

И. Е. ЕФИМОВ, И. Я. КОЗЫРЬ

ОСНОВЫ МИКРОЭЛЕКТРОНИКИ

УЧЕБНИК

Издание третье, стереотипное



САНКТ-ПЕТЕРБУРГ • МОСКВА • КРАСНОДАР
2008

ББК 32.844.1

Е 91

Ефимов И. Е., Козырь И. Я.

Е 91 Основы микроэлектроники: Учебник. 3-е изд., стер. — СПб.: Издательство «Лань», 2008. — 384 с.: ил. — (Учебники для вузов. Специальная литература).

ISBN 978-5-8114-0866-5

В учебнике изложены основные направления развития микроэлектроники: рассмотрены физические основы, конструкция, технология, структурные элементы и аспекты проектирования интегральных микросхем (ИМС) и больших интегральных схем (БИС). Рассмотрены отдельные технологические процессы, схемотехнические решения, машинные методы проектирования и изготовления изделий микроэлектроники.

Учебник предназначен для студентов технических вузов и университетов, изучающих микроэлектронику.

ББК 32.844.1

Генеральный директор *А. Л. Кноп*. Директор издательства *О. В. Смирнова*

ЛР № 065466 от 21.10.97

Гигиенический сертификат 78.01.07.953.П.004173.04.07

от 26.04.2007 г., выдан ЦГСЭН в СПб

Издательство «ЛАНЬ». lan@lpbl.spb.ru; www.lanbook.com

192029, Санкт-Петербург, Общественный пер., 5.

Тел./факс: (812)567-29-35, 567-05-97, 567-92-72

Книги издательства «Лань»

можно приобрести в оптовых книготорговых организациях:

САНКТ-ПЕТЕРБУРГ. ООО «Лань-Трейд». 192029, Санкт-Петербург,

ул. Крупской, 13, тел./факс: (812)567-54-93, тел.: (812)567-85-78,

(812)567-14-45, 567-85-82, 567-85-91;

trade@lanpbl.spb.ru; www.lanpbl.spb.ru/price.htm

МОСКВА. ООО «Лань-пресс».

109263, Москва, 7-я ул. Текстильщиков, 6/19,

тел.: (495)178-65-85; (495)740-43-16;

lanpress@ultimanet.ru; lanpress@yandex.ru

КРАСНОДАР. ООО «Лань-Юг». 350072, Краснодар, ул. Жлобы, 1/1,

тел.: (861)274-10-35; lanrdr98@mail.ru

Сдано в набор 11.01.08. Подписано в печать 26.05.08.

Бумага офсетная. Гарнитура Школьная. Формат 84×108 ¹/₃₂.

Печать офсетная. Усл. п. л. 20,16. Тираж 2000 экз.

Заказ №

Отпечатано в полном соответствии

с качеством предоставленных диапозитивов

в ОАО «Издательско-полиграфическое предприятие «Правда Севера».

163002, г. Архангельск, пр. Новгородский, д. 32.

Тел./факс (8182) 64-14-54; www.ippps.ru

Обложка

А. Ю. ЛАПШИН

© Издательство «Лань», 2008

© И. Е. Ефимов,

И. Я. Козырь, наследники, 2008

© Издательство «Лань»,

художественное оформление, 2008

ПРЕДИСЛОВИЕ

Проектирование и создание изделий современной микроэлектроники — необходимое условие для создания в нашей стране передовой интеллектуальной техники и обеспечения технологической независимости и информационной безопасности отечественных электронных систем.

Изделия микроэлектроники — интегральные микросхемы различной степеней интеграции, микросборки, микропроцессоры, мини- и микро-ЭВМ — позволили осуществить проектирование и промышленное производство функционально сложной радио- и вычислительной аппаратуры, отличающейся от аппаратуры предыдущих поколений лучшими параметрами, более высокими надежностью и сроком службы, меньшими потребляемой энергией и стоимостью. Аппаратура на базе изделий микроэлектроники находит широкое применение во всех сферах деятельности человека. Микроэлектроника способствует созданию систем автоматического проектирования, промышленных роботов, автоматизированных и автоматических производственных линий, средств связи и др.

Микроэлектроника является одним из наиболее быстро и эффективно развивающихся направлений науки и техники. Поэтому изучение ее основ необходимо при подготовке инженеров всех радиотехнических специальностей и специальностей электросвязи.

Главной задачей курса основ микроэлектроники для специальностей электросвязи является изучение физических принципов построения интегральных микросхем, способов их изготовления, основных конструктивных и электрических характеристик и методов оценки их качества и надежности. На основе этих знаний студенты могут успешно изучать радиотехническую аппаратуру и аппаратуру электросвязи, в которой широко применяются интегральные микросхемы.

Становление микроэлектроники как самостоятельной науки стало возможным благодаря использованию богатого опыта и базы промышленности, выпускающей дискретные полупроводниковые приборы. На современном этапе микроэлектроника продолжает продвигаться быстрыми темпами как в направлении совершенствования полупроводниковой интегральной технологии, так

и в направлении использования новых физических явлений. Впервые в учебной литературе основы микроэлектроники были изложены в книге И. П. Степаненко [2], в которой рассмотрены в органическом единстве физические, технологические и схемотехнические аспекты микроэлектроники.

Во втором издании данной книги по сравнению с первым существенной переработке подверглись все главы, особенно посвященные схемотехнике ИМС и БИС. Введены разделы по испытаниям ИМС и БИС в аппаратуре.

Авторы считают своим долгом выразить благодарность рецензентам — зав. кафедрой «Конструирование радиоэлектронной аппаратуры и микроэлектроника» Ленинградского электротехнического института связи проф. Л.Ф. Григоровскому, доцентам этой кафедры Ю. Н. Балодису, О. В. Кустову, В. З. Лундину, А. Т. Мельниченко, Е. Д. Романову, Ю. Г. Тупикову за ценные замечания и предложения, учтенные при окончательной отработке рукописи. Авторы благодарят также инженера Р. А. Роздову за участие в переработке главы по гибридным микросхемам и канд. техн. наук В. И. Ефимова, написавшего параграф «Интегральные микросхемы СВЧ-диапазона».

Авторы с благодарностью приняли большинство замечаний по рукописи сотрудников кафедры микроэлектроники Московского ордена Трудового Красного Знамени электротехнического института связи.

Авторы

ВВЕДЕНИЕ

Современный этап развития радиотехники, электронной техники и техники связи характеризуется их взаимным проникновением и широким использованием практически во всех областях науки и техники (космонавтике, ядерной физике, медицине, астрономии, метрологии), а также значительным усложнением требований и задач, решаемых радиоэлектронной аппаратурой. Достаточно указать, что число электрорадиокомпонентов, входящих в состав аппаратуры, возрастает за десятилетие в 5 — 20 раз, а разрабатываемые сложные комплексы и системы содержат миллионы и десятки миллионов элементов. В этих условиях исключительно важное значение приобретают проблемы повышения надежности аппаратуры и ее элементов, микроминиатюризации электрорадиокомпонентов и комплексной миниатюризации аппаратуры.

В историческом плане элементная база радиоэлектронной аппаратуры прошла несколько поколений своего развития. К первому поколению базовых элементов относятся различные электровакуумные приборы, ко второму — полупроводниковые приборы, широко используемые во всех классах радиоэлектронной аппаратуры, к третьему — интегральные микросхемы (в том числе большие интегральные схемы), характеризующиеся микроминиатюризацией как элементов, так и аппаратуры в целом, и, наконец, к четвертому — функциональные приборы и узлы. Для четвертого поколения, которое только начинает широко развиваться, характерна интеграция различных физических явлений, сопровождающихся также микроминиатюризацией элементов и узлов аппаратуры. Два последних поколения, т. е. интегральная и функциональная микроэлектроника, являются фундаментальной базой развития всех систем радиоэлектронной аппаратуры. Микроэлектроника — одно из магистральных направлений в радиоэлектронике, и уровень ее развития в значительной степени определяет уровень научно-технического прогресса страны.

Микроэлектроника обеспечивает создание сложных вычислительных и управляющих машин и систем, различных кибернетических машин, разветвленных систем связи со

сложными способами кодирования и обработки информации, автоматических систем управления, т. е. решение основных вопросов научно-технического прогресса. Интегральные микросхемы служат элементной базой практически всех типов радиоэлектронной аппаратуры. На рис. В. 1 схематически указаны основные области применения интегральных микросхем в различных классах радиоэлектронной аппаратуры. Сокращения на рисунке: ЦАП — цифро-аналоговые преобразователи; АЦП — аналого-цифровые преобразователи; ВИП — вторичные источники питания.

Совершенствование радиоэлектронной аппаратуры связано с широким использованием элементов микроэлектроники, заменой механических и электромеханических узлов и блоков электронными с комплексной миниатюризацией.

Наибольшее распространение интегральные микросхемы находят в вычислительной технике. Новые ЭВМ разрабатываются только на интегральных микросхемах (машины третьего поколения). Успехи микроэлектроники в создании линейных интегральных микросхем (усилители, преобразователи частоты, детекторы и др.) стимулировали их внедрение в аппаратуру связи.

Рассмотрим кратко тенденции развития техники связи. Если в прошлом связь в значительной мере определялась только по каналам взаимодействия человека с человеком, то теперь появились новые, непрерывно развивающиеся каналы взаимодействия человека с ЭВМ и ЭВМ с ЭВМ. Основными тенденциями развития сетей связи стали: непрерывное расширение видов и объемов информации, увеличение требований к достоверности доставляемой информации, уменьшение затрат времени абонентом при пользовании средствами связи, расширение видов и числа услуг, предоставляемых абоненту.

Дальнейшее развитие систем связи в нашей стране будет идти по пути построения единой автоматизированной сети связи (ЕАСС). В ЕАСС создается первичная сеть междугородных каналов и магистралей, объединяющих кабельные, радиорелейные, а также все магистраль радиосвязи и вторичные сети со своими системами коммутации для различных видов информации.

Многообразные формы обслуживания абонентов — телефон, видеотелефон, телеграф, фототелеграф, передача данных, кабельное радиовещание и телевидение — вызывают необходимость «универсализации» (интеграции) сетей связи на единой технической базе.

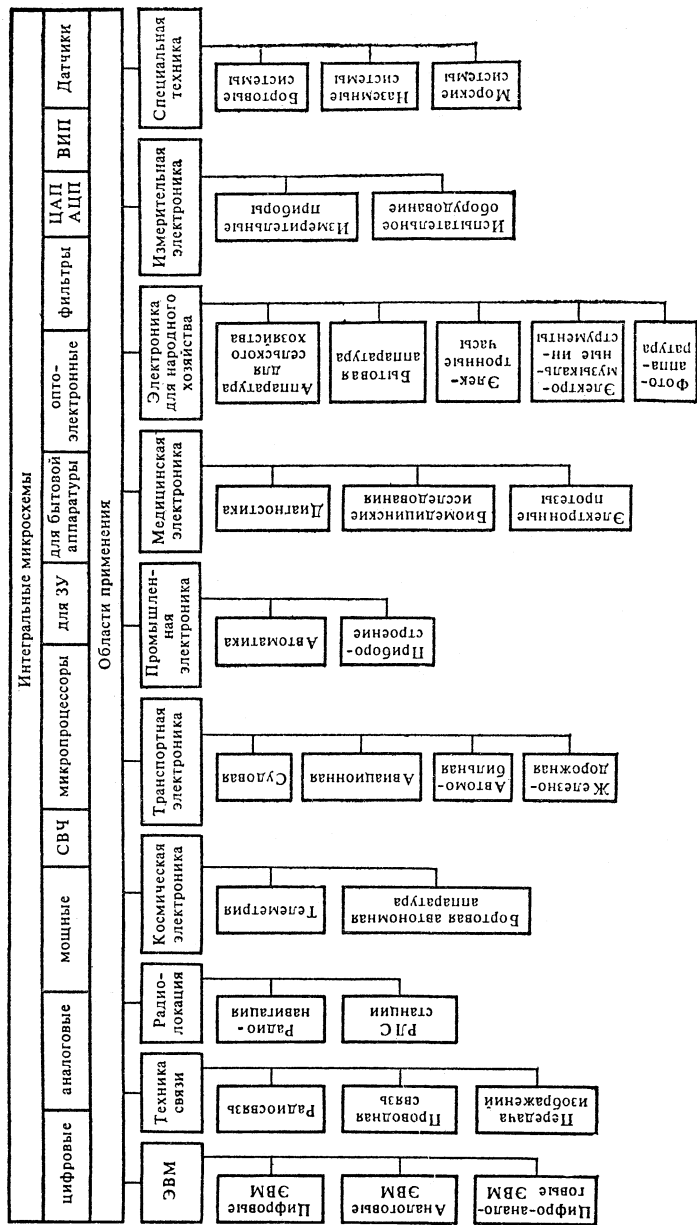


Рис. В.1. Основные области применения интегральных микросхем в радиоэлектронной аппаратуре

В настоящее время такой технической базой служат аналоговые сигналы и принцип частотного разделения каналов. Однако вследствие неуклонного роста парка ЭВМ, увеличения объемов передачи данных и новых требований к ее надежности интегральные сети связи в дальнейшем будут развиваться главным образом на основе дискретных сигналов и принципа временного разделения каналов. Элементарная база аппаратуры таких сетей — интегральные микросхемы.

Главной тенденцией современного развития техники связи во всех ее звеньях является переход к цифровым методам передачи. Успешное решение этой проблемы стало возможным благодаря созданию и промышленному освоению микропроцессоров, полупроводниковых запоминающих устройств и БИС для аппаратуры связи.

Наиболее перспективными БИС для техники связи являются: импульсные номеронабиратели; накопители номеров, запоминающие наиболее часто набираемые номера, которые автоматически воспроизводятся простым нажатием кнопки; тонгенераторы для получения многочастотных сигналов тонального набора, заменяющие устройства импульсного набора; приемники сигналов тонального набора (тондетекторы), осуществляющие прием тональных сигналов как на АТС, так и в абонентском оборудовании; генераторы ИКМ-сигналов, восстанавливающие импульсный сигнал по форме, фазе и амплитуде; кодеры-декодеры (кодеки), преобразующие в системах с импульсно-кодовой (ИКМ) и дельта-модуляцией аналоговые речевые сигналы в цифровую форму, и наоборот. Разработаны и выпускаются другие виды интегральных микросхем, необходимые для телефонной связи, передачи данных, и др.

Наиболее массовой БИС для телефонной связи является кодек. Благодаря достижениям в области БИС оказалось экономичным кодировать отдельно сигнал каждого канала и только после этого объединять цифровые сигналы. В недалеком будущем кодеки будут устанавливаться в каждом телефонном аппарате. Они размещаются на одном или двух кристаллах, причем фильтры нижних и верхних частот могут быть расположены на этих же кристаллах.

Широкое внедрение цифровых методов передачи по линиям связи требует значительного расширения спектра частот, пропускаемых по этим линиям с небольшим затуханием. Эту проблему можно полностью решить при использовании волоконно-оптических кабелей, которые обеспечивают

передачу практически в любой полосе частот. Успехи в разработке и производстве таких кабелей позволяют говорить об их широком применении в недалеком будущем.

Ведутся работы по практическому внедрению различных типов волноводных линий связи с использованием миллиметровых и субмиллиметровых волн, что дает возможность создать линию емкостью в сотни тысяч телефонных и телевизионных каналов. Использование диэлектрических волноводов, линий передачи поверхностной волны и интегральных микросхем СВЧ-диапазона будет характерной особенностью таких линий.

Система кабельного телевидения открывает широкие перспективы для абонентов. Появляется принципиально новая возможность обратной связи абонента с источником информации, например получение программы по запросу, участие абонента в учебной программе, видеотелефонная связь между абонентами и т. д.

Микроэлектронику уже нельзя считать молодой областью науки и техники — она возникла более 20 лет назад, однако высокие темпы развития придают ей нестареющий характер. Каковы же основные причины динамичного развития микроэлектроники? В целом можно утверждать, что микроэлектроника явилась следствием общего прогресса в различных областях науки и техники, в частности выдающихся достижений в области физики твердого тела и полупроводниковой электроники.

Рост сложности радиоэлектронной аппаратуры, определяемый экспоненциальной временной зависимостью (более чем на полтора порядка за каждое десятилетие последних тридцати лет), привел к неизбежности поиска путей решения проблем миниатюризации и микроминиатюризации, обеспечивающих одновременное снижение энергопотребления и повышение надежности аппаратуры. Так возникла необходимость постепенного перехода от электровакуумных приборов (ЭВП) к полупроводниковым приборам (ППП) и интегральным микросхемам (ИМС).

Потребности обеспечения систем связи, радиолокации, промышленной автоматики, космических исследований, транспортных средств и т. д. интегральными микросхемами высокого качества привели к разработке и выпуску большой номенклатуры ИМС с непрерывно возрастающей степенью интеграции. При этом производная роста сложности ИМС (числа активных элементов) существенно выше аналогичного показателя для аппаратуры.

Проблема повышения качества ИМС и их надежности при одновременном снижении стоимости решается на основе внедрения прогрессивной технологии и эффективных схемотехнических решений. Можно считать, что высокие темпы развития микроэлектроники обусловлены как возрастающими потребностями в ИМС, так и плодотворной в данной области взаимосвязью науки, технологии и экономики.

Постепенное накопление физико-технологических, схемотехнических достижений в области микроэлектроники привело к созданию больших интегральных схем (БИС), имеющих новое качество: изделия микроэлектроники, приобретая свойства сложных систем, стали обладать широкими возможностями для программного их управления, а также совмещения с техническими объектами различного назначения.

Таким образом, с появлением БИС микроэлектроника стала использоваться не только в информационно-вычислительных системах, но практически во всех технических устройствах, от которых требуется высокая точность, запоминание многих логических состояний, малое потребление энергии и высокая надежность. Крупномасштабное производство БИС открывает путь снижения их стоимости до уровня, доступного для массового потребления, что в свою очередь приводит к значительному повышению производительности физического и умственного труда.

Наиболее перспективными устройствами, создаваемыми на основе БИС, можно считать микропроцессоры (МП) и микро-ЭВМ. Появление микропроцессоров связывают с революционным скачком в электронной технике. Благодаря широким возможностям МП насчитывается огромное множество областей их применения. Основу МП составляют арифметико-логические устройства, регистры для выполнения операций вычисления и изменения адресов в программе и оперативные запоминающие устройства.

В ряде случаев МП выполняют функции обычного процессора в небольшой ЭВМ, собираемого из комбинации дискретных транзисторов или ИМС малой степени интеграции. Отличие МП от обычного процессора ЭВМ состоит не только в малых габаритах, малом количестве выводов и внутренних соединений, но и программных средствах, обладающих гибкостью перестройки. Все это существенно уменьшает количество связей внутри БИС, не требует переделки аппаратуры при изменении логики управления,

БИС относят к радиоэлектронной аппаратуре четвертого поколения (первое — на ЭВП, второе — на ППП и третье — на ИМС). По прогнозу, в ЭВМ четвертого поколения 50—70% всего состава изделий электронной техники будут составлять большие и сверхбольшие интегральные схемы, причем большую их часть (70—95%) — схемы памяти.

Эффективность применения в ЭВМ БИС по сравнению с ЭВМ, выпуск которых начался на дискретных полупроводниковых приборах, характеризуется уменьшением объема в 100—250 раз, массы в 50—100 раз, потребляемой мощности в 10—50 раз, повышением надежности (наработки на отказ) в 5—10 раз и значительным снижением стоимости — в 14—15 раз при сохранении или улучшении таких показателей, как быстродействие, емкость памяти и др.

Широкое использование микропроцессоров и микро-ЭВМ во всех областях народного хозяйства оказывает существенное влияние на повышение уровня автоматизации оборудования, что приводит к уменьшению численности операторов и повышению производительности труда.

ОСНОВНЫЕ ПОЛОЖЕНИЯ МИКРОЭЛЕКТРОНИКИ И НАПРАВЛЕНИЯ ЕЕ РАЗВИТИЯ

§ 1.1. Этапы миниатюризации и микроминиатюризации элементов электронной аппаратуры

Миниатюризация дискретных элементов электронной аппаратуры, часто называемых радиодеталями, являлась и является важнейшей задачей на протяжении всего периода развития радиотехники и электроники. Радииодетали — резисторы, конденсаторы, лампы, трансформаторы, переключатели, разъемы — непрерывно уменьшаются по габаритам и массе за счет применения более рациональных конструкций и новых материалов. Особенно большие успехи в миниатюризации были в 60—70-е годы в связи с заменой электронных ламп полупроводниковыми приборами и использованием печатного монтажа. Применение транзисторов и диодов, работающих в большинстве случаев при значительно меньших напряжениях, чем радиолампы, и имеющих более высокий к. п. д., позволило существенно сократить габариты радиодеталей. Так, за указанный период объем резисторов был уменьшен в 50—75 раз, а удельный объем пленочных конденсаторов — в 60—70 раз, удельная емкость керамических конденсаторов увеличена в 250—300 раз, удельный заряд на единицу объема электролитических конденсаторов — в 5—10 раз, масса и габариты радиокомпонентов уменьшены в 2—15 раз.

Миниатюризация радиодеталей, повышение их надежности, использование полупроводниковых приборов и печатного монтажа позволили разработать элементарные функциональные узлы электронной аппаратуры — модули, которые являются первичными элементами большого числа электронных схем. С помощью модулей можно создать типовые унифицированные функциональные узлы, блоки, шкафы, что дает возможность сократить сроки разработки аппаратуры, повысить ее качество и надежность, уменьшить время изготовления и стоимость.

Проблему дальнейшего уменьшения габаритов и массы радиоэлектронной аппаратуры, повышения ее надежности решает микроминиатюризация — направление электроники, обеспечивающее реализацию электронных схем, блоков и аппаратуры в целом из микроминиатюрных радиодеталей и узлов. Это качественно новый этап развития радиоэлектроники, предусматривающий комплексное решение поставленной задачи с помощью новых конструктивных форм, технологии изготовления и методов конструирования аппаратуры. Первым этапом микроминиатюризации являются микромодули, собираемые из отдельных микроэлементов (резисторы, конденсаторы, транзисторы, диоды, трансформаторы и др.) с последующей их герметизацией. В микромодулях плотность заполнения элементами составляет 10—20 деталей/см³ вместо 3—5 деталей/см³ в модулях. Кроме того, применение микромодулей повышает надежность электронной аппаратуры.

Рассмотрим более подробно основные направления миниатюризации и микроминиатюризации элементов электронной аппаратуры.

Модули. При разработке функциональных модулей (или просто модулей) стремятся к тому, чтобы каждый модуль представлял собой функционально законченную часть схемы и имел законченную конструкцию, удовлетворяющую заданным электрическим, механическим и климатическим требованиям. Серия модулей должна иметь единое конструктивное исполнение с ограниченным числом типоразмеров, хорошо сопрягающихся между собой. Это дает возможность применять так называемый узловой метод конструирования электронной аппаратуры, обеспечивающий повышение ее надежности, снижение трудоемкости изготовления и стоимости. Модули являются конструктивно-технологической базой этого метода.

Конструкция модуля должна обеспечивать высокую плотность заполнения его объема радиодетальями, защиту входящих в него элементов от различных механических и климатических воздействий, малую трудоемкость изготовления, а также возможность широкой механизации и автоматизации технологических процессов.

При использовании печатного монтажа наиболее рациональной и простой является плоская прямоугольная форма модуля. Такая форма при одностороннем открытом расположении навесных элементов позволяет осуществлять их механизированную сборку на автоматической линии и

пайку погружением платы в припой. Промышленностью выпускаются различные унифицированные функциональные модули на полупроводниковых приборах в виде плоских конструкций.

Элементы в плоских модулях расположены на плоскости печатной платы, как при обычном печатном монтаже. Примером могут служить модули «Элемент-2». Их печатные платы унифицированы по размерам и соответствуют следующим рядам: $34 \times (12; 26; 40; 54; 68; 82; 110; 124; 138)$ мм и $70 \times (82; 110; 124;)$ мм. Модули монтируют на одной

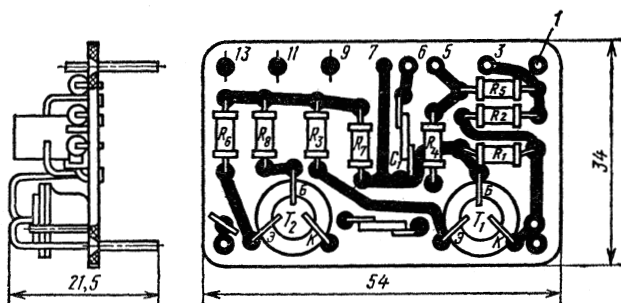


Рис. 1.1. Конструкция плоского модуля типа «Элемент-2»

из плат этого унифицированного ряда, высота их определяется высотой наибольшего элемента. Выводы модуля выполняют в виде штырьков на стороне платы, противоположной элементам. Конструкция модуля «Элемент-2» (усилитель низкой частоты) показана на рис. 1.1. Эти плоские модули обеспечивают плотность заполнения объема 0,5—0,8 деталей/см³.

В аппаратуре связи наибольшее распространение получили плоские модули типа ФЭ (функциональные элементы), которые монтируют на печатных платах толщиной 1 мм унифицированных размеров. Один размер платы равен 24 мм и всегда постоянен, другой определяется как $(14 + n \cdot 5)$ мм и изменяется с шагом 5 мм. Выбор размера 24 мм обусловлен габаритами миниатюрных резисторов и конденсаторов, а минимального размера 14 мм — диаметром дискретного корпусного транзистора. Изменение размера платы с шагом 5 мм позволяет разместить в модуле практически любую функциональную схему.

Модуль монтируют на печатной плате выбранного размера (рис. 1.2, а). Собранный модуль помещают в легкий алюминиевый экран и заливают пенопластом. Пенопласт имеет хорошую адгезию с металлом, благодаря чему получается монолитный блок, который выдерживает большие механические нагрузки. Для герметизации модули дополнительно заливают двух- и трехмиллиметровым слоем эпоксидного компаунда. Габариты собранного модуля (рис. 1.2, б) следующие: высота 25 мм, ширина 15 мм, длина $(15 + \pm 5)$ мм. Модули ФЭ имеют высокую механическую прочность, надежную защиту от воздействия влаги, электростатический экран и цоколевку выводов.

Микромодули. Микромодулями принято называть миниатюрные функциональные модули, собранные из радиодеталей специальной формы—микроэлементов. Наиболее широкое распространение получили этажерочные микромодули.

Этажерочный микромодуль представляет собой конструкцию, в которой размещен в виде «этажерки» набор микроэлементов и микролат с перемычками, соединенными между собой проводниками согласно электрической схеме (рис. 1.3, а). Как правило, микромодуль является функционально законченным устройством (триггером или плечом триггера, мультивибратором, усилителем и т. д.). В некоторых случаях он может содержать набор отдельных микроэлементов. При разработке микромодуля к нему предъявляются следующие требования:

микромодуль должен иметь стандартную конструкцию независимо от типов входящих в него микроэлементов и электрической схемы соединений;

микроэлементы, входящие в состав микромодуля, должны быть универсальными;

конструкция микромодуля должна обеспечивать его работу в условиях эксплуатации аппаратуры и возможность механизации и автоматизации производства.

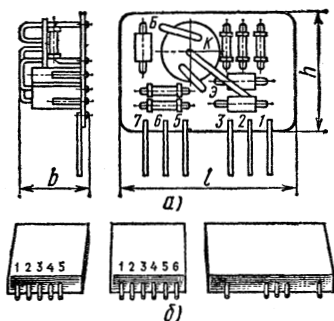
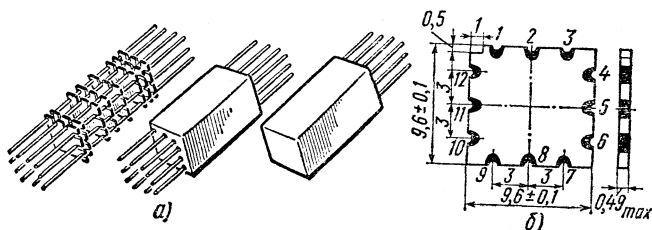


Рис. 1.2. Плоский модуль типа ФЭ:

а — монтажная плата; б — внешний вид

Основным элементом микро модуля является микроплата, которая предназначена для размещения на ней печатных или навесных элементов, а также печатных проводников для соединений внутри микро модуля. Микроплаты должны быть механически прочными при толщине 0,49—1,4 мм во избежание появления трещин при сборке микроэлементов в модуль, а также при проверке параметров микроэлементов. Микроплаты отечественных микро модулей изготавливают из ультрафарфора, миналунда и фотоситалла в форме квадрата



со стороной 9,6 мм. На каждой стороне имеется по три металлизированных серебром паза, в которые при сборке микро модуля вплавляют соединительные проводники (рис. 1.3, б). В одном из углов микроплаты предусмотрен ключ (прямоугольный вырез размерами $1,0 \times 0,5$ мм), служащий для ориентации микроплат в процессе изготовления микроэлементов, а также для ориентации микроэлементов относительно друг друга при их сборке в микро модуль. При нормальном* расположении микроплат паза нумеруют по часовой стрелке, начиная от ключа.

На микроплатах размещают специально разработанные микроэлементы: резисторы, конденсаторы, индуктивные катушки, трансформаторы, кварцевые резонаторы, диоды, транзисторы (рис. 1.4). Существует большая номенклатура таких микроэлементов на различные номинальные значения основных параметров.

16

Кроме микроэлементов, размещаемых в микромодулях, выпускают элементы в микромодульном исполнении, которые не могут быть размещены на микроплатах. Их изготавливают с размерами, равными или кратными размерам микромодуля, с учетом необходимого зазора между микромодулями (11, 23 и 35 мм). В микромодульном исполнении вы-

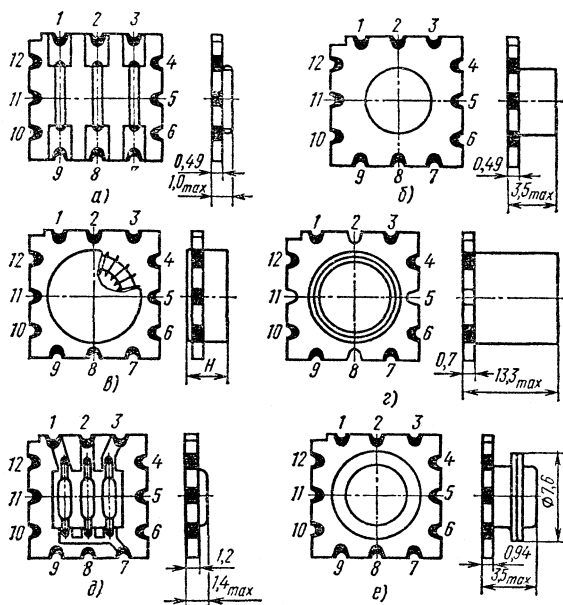


Рис. 1.4. Микроэлементы:

а — микромодульный резистор (типа СКНМ); б — микромодульный конденсатор (типа КОПМ); в — микромодульная индуктивная катушка (типа ИФМ); высота катушки $H=3$ мм для $L=1 \div 50$ мкГн и $H=4,5$ мм для $L=400 \div 630$ мкГн; г — микромодульный трансформатор (типа ММТС); д — микромодульный диод (типа ЗДММЗ); е — микромодульный транзистор

пускают некоторые типы резисторов, конденсаторов, трансформаторов, индуктивных катушек, транзисторов, линий задержки, переключателей, разъемов, гнезд и др.

Собранный микромодуль заливают эпоксидным компаундом для придания ему механической прочности и защиты микроэлементов от воздействия влаги.

Дальнейшее совершенствование этажерочных микромодулей позволило при изготовлении микроэлементов размещать на одной плате несколько резисторов, или несколь-

ко конденсаторов, или несколько диодов, или их комбинацию. На плате могут быть размещены также интегральные микросхемы. Микромодули, на плате которых размещено несколько элементов, называются полиэлементными. Эти микромодули имеют более высокую плотность заполнения объема (15—20 деталей/см³) и более высокую надежность.

Для экранирования и защиты от внешних воздействий «этажерку» помещают в металлическую капсулу, как пра-

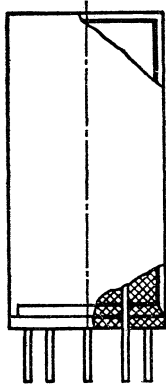


Рис. 1.5. Общий вид экранированного этажерочного микромодуля

вило, из анодированного алюминия и с торца заливают полимеризующимся эпоксидным компаундом (рис. 1.5).

Промышленностью выпускается большая номенклатура этажерочных микромодулей, которые удовлетворяют самым высоким требованиям, предъявляемым к радиоэлектронной аппаратуре различного назначения.

Начиная со второй половины 70-х годов благодаря успешному развитию разработок и производства интегральных микросхем использование микромодулей и модулей в качестве элементной базы аппаратуры резко сократилось.

Быстрое усложнение радиоэлектронной аппаратуры и выполняемых ею функций привело к существенному увеличению числа элементов и особенно количества межсоединений. Выполнение такой аппаратуры на обычных дискретных радиокомпонентах, в том числе на модулях и микромодулях, уже не обеспечивало необходимой надежности даже при различных способах резервирования. Кроме того, аппаратура получалась громоздкой, дорогостоящей, и важные требования по габаритам и массе не выполнялись. Все эти трудности позволяет успешно преодолевать микроэлектроника.

Дальнейшим развитием микроминиатюризации является микроэлектроника, объединяющая интегральные микросхемы, функциональные приборы и узлы, микропроцессорные наборы и т. д.

§ 1.2. Общая характеристика микроэлектроники

Микроэлектроника — область электроники, охватывающая проблемы исследования, конструирования, изготовления и применения микроэлектронных изделий,

причем под микроэлектронным изделием понимают электронное устройство с высокой степенью интеграции. Микроэлектроника позволяет существенно повысить надежность электронной аппаратуры, значительно уменьшить ее габариты, массу, потребляемую энергию и стоимость. В микроэлектронике отказываются от применения дискретных радиокомпонентов. Используя достижения физики твердого тела, металлургии сверхчистых материалов и электронного машиностроения на основе качественно новой технологии, в микрообъемах твердого тела формируют сложные электронные узлы — интегральные микросхемы.

*Интегральной микросхемой** называют микроэлектронное изделие, выполняющее определенную функцию преобразования и обработки сигнала (или накопления информации) и имеющее высокую плотность упаковки электрически соединенных элементов (или элементов и компонентов) и (или) кристаллов, которое с точки зрения требований к испытаниям, приемке, поставке и эксплуатации рассматривается как единое целое. Плотность упаковки элементов (степень интеграции) в микросхеме может достигать сотен тысяч элементов в одном кристалле.

Наряду с термином «интегральная микросхема» (ИМС) используют термин «микросхема». Интегральная микросхема содержит *элементы и компоненты*.

Элементом интегральной микросхемы называется часть ИМС, реализующая функцию какого-либо электрорадиоэлемента (например, транзистора, диода, резистора, конденсатора). Эту часть выполняют нераздельно от кристалла ИМС (или ее подложки). Элемент не может быть отделен от ИМС как самостоятельное изделие, поэтому его нельзя испытать, упаковать и эксплуатировать.

Компонентом интегральной микросхемы также называется часть ИМС, реализующая функции какого-либо электрорадиоэлемента. Однако эта часть перед монтажом является самостоятельным изделием в специальной упаковке (комплектующее изделие). Компонент в принципе может быть отделен от изготовленной ИМС.

Аппаратуру, в которой используются в основном изделия микроэлектроники, называют микроэлектронной. Повышение надежности микроэлектронной аппаратуры объясняет-

* ГОСТ 17021— 88 Микросхемы интегральные. Термины и определения.

ся использованием при изготовлении интегральных микросхем специальной технологии, применением особо чистых материалов, когда весь процесс изготовления протекает в условиях, исключающих возможность загрязнения. Кроме того, внутренние соединения интегральных микросхем герметичны и защищены прочным покрытием, а их малые габариты позволяют создавать прочные и компактные узлы и блоки аппаратуры, способные выдерживать большие механические нагрузки. Высокая надежность интегральных микросхем обусловлена также меньшим числом соединений.

Применение интегральных микросхем позволяет уменьшить габариты и массу аппаратуры в несколько раз, а микропроцессоров — в десятки и сотни раз. Это объясняется тем, что размеры элементов интегральных микросхем составляют единицы и десятые доли микрометра. Малые габариты интегральных микросхем и малое потребление ими электрической энергии позволяют осуществлять комплексную микроминиатюризацию всех компонентов электронной аппаратуры. Разработаны и применяются миниатюрные трансформаторы, переключатели, разъемы, провода и кабели, индуктивные катушки и другие радиодетали.

На современном этапе развития микроэлектроники используют два основных метода создания интегральных микросхем:

1) метод локального воздействия на микроучастки полупроводникового кристалла (твердого тела) и придания им свойств, соответствующих функциям микроэлемента и их соединений (*полупроводниковые интегральные микросхемы*, часто неправильно называемые твердыми);

2) метод образования микросхем в твердом теле посредством послойного нанесения тонких пленок различных материалов на общее основание (подложку) с одновременным формированием из них микроэлементов и их соединений (*пленочные интегральные микросхемы*).

Эти два различных технологических метода являются не конкурирующими, а дополняющими друг друга. Их комбинирование привело к разработке схем нового типа — *гибридных интегральных микросхем*, в которых используются микроминиатюрные дискретные активные элементы (транзисторы, диоды и их сборки). Применение дискретных активных элементов объясняется отсутствием в настоящее время эксплуатационно устойчивых пленочных транзисторов и диодов. Разработка таких активных элементов позволит создать тонкопленочные интегральные микросхемы.

Как отмечалось, кроме интегральных микросхем микроэлектроника охватывает область функциональной электроники. При создании функциональных приборов, микросхем, узлов и блоков электронной аппаратуры используют явления в твердых телах, связанные с механическими, тепловыми, излучательными и магнитными эффектами, а также явления в жидких телах, связанные с электрохимическими процессами. При этом соответствующему материалу придают свойства, необходимые для выполнения данной функции, а промежуточный этап представления желаемой функции в виде эквивалентной электронной схемы опускают. Функциональные приборы, блоки, микросхемы и элементы можно изготавливать не только на основе полупроводников, но и сверхпроводников, сегнетоэлектриков, материалов с фотопроводящими свойствами и др.

Быстрое развитие интегральной электроники в значительной степени объясняется успехами полупроводниковой и пленочной технологии, достигнутыми в конце 50-х и в начале 60-х годов. На смену мезатранзистору (сплавному) пришел кремниевый планарный транзистор, а обычные дискретные компоненты были заменены диффузионными или тонкопленочными элементами, которые одновременно (групповой метод) изготавливаются на одной монокристаллической кремниевой пластине. Последнее не только оказало огромное влияние на промышленное производство радиодеталей и электронных компонентов, но и обусловило появление новых методов в схемотехнике. Обычные проводниковые соединения между различными компонентами схемы были заменены системой межсоединений, которую путем напыления наносят непосредственно на подложку. При изготовлении интегральных микросхем наряду с материалами, процессами и технологическими приемами, хорошо изученными и применяемыми в электронной и других отраслях промышленности, используют и материалы с совершенно новыми свойствами.

Полупроводниковая интегральная микросхема обычно представляет собой кристалл кремния, в поверхностном слое которого с помощью методов полупроводниковой технологии сформированы области, эквивалентные элементам электрической схемы, и соединения между ними. Так как кремний является полупроводником, для изоляции элементов друг от друга принимают специальные меры.

Применяемые при изготовлении полупроводниковых интегральных микросхем технологические процессы имеют

групповой характер, т. е. одновременно изготавливается большое число микросхем. Например, в кремниевой монокристаллической пластине диаметром 76 мм (используемой в основном для изготовления микросхем) размещается до 5000 электронных схем, каждая из которых содержит от 10 до 20 000 электронных приборов и более. Многие тех-

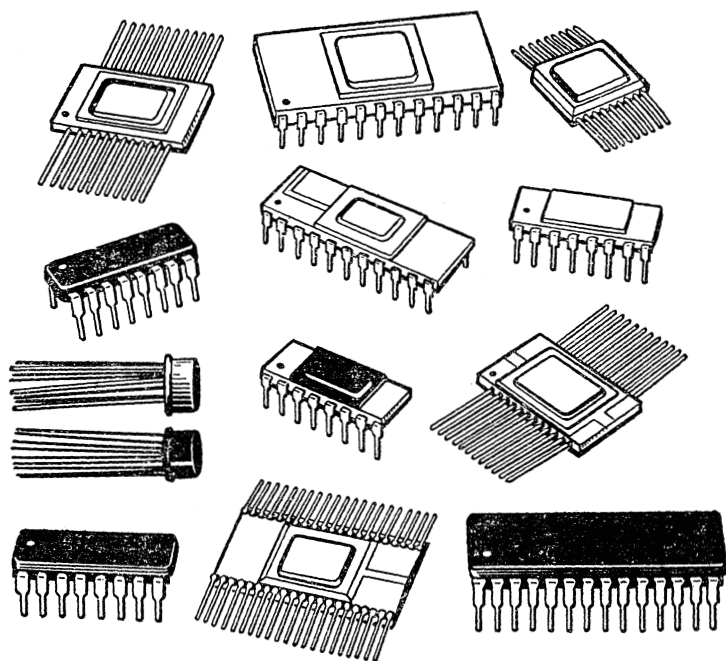


Рис. 1.6. Внешний вид интегральных микросхем

нологические операции допускают одновременную обработку 10—200 пластин и изготовление свыше 1 млн. электронных приборов. Даже при сравнительно небольшом проценте выхода годных приборов очевидна высокая экономичность изготовления интегральных микросхем. Поэтому интегральные микросхемы, изготавливаемые методами групповой технологии, при массовом производстве оказываются значительно более дешевыми, чем эквивалентные им схемы, собранные из дискретных компонентов.

В пленочных интегральных микросхемах все элементы и соединения между ними формируются в виде пленок из различных материалов, которые в определенной последовательности и конфигурации наносят на пассивную изоляционную подложку. Различают два вида пленочных интегральных микросхем: *тонкопленочные* и *толстопленочные*.

Тонкие пленки микросхем обычно изготавливают методами осаждения в вакууме, а толстые — методами сеткографии (нанесение специальных паст через трафареты). Толстопленочные микросхемы имеют преимущество перед тонкопленочными благодаря меньшей сложности и стоимости оборудования для их изготовления, а также меньшим затратам при массовом производстве.

Внешний общий вид различных типов интегральных микросхем показан на рис. 1.6.

§ 1.3. История развития микроэлектроники

Первые разработки интегральных микросхем относятся к 1958 — 1960 гг. Отечественные интегральные микросхемы появились в 1960 — 1961 гг. В 1961 — 1963 гг. ряд американских фирм начали выпускать простейшие пролупроводниковые микросхемы. В то же время были разработаны пленочные интегральные микросхемы. Однако некоторые неудачи с разработками стабильных по электрическим характеристикам пленочных активных элементов привели к преимущественной разработке гибридных интегральных микросхем.

Следует отметить, что основные принципы микроэлектроники — групповой метод и планарная технология — были известны до появления интегральных микросхем. Эти методы были освоены в дискретной транзисторной технике в конце 50-х годов. Следовательно, для появления интегральных микросхем уже существовали необходимые материальные предпосылки.

При изготовлении транзисторов осуществлялась их технологическая интеграция, обусловленная групповым методом изготовления. Групповой метод состоит в том, что на пластине из полупроводникового материала (кремния или германия) диаметром 25 — 40 мм и более одновременно создают большое число транзисторов, расположенных на поверхности пластин (рис. 1.7, а). Затем пластину разрезают (скрайбируют) по вертикали и горизонтали на сотни

отдельных кристаллов*, содержащих по одному транзистору (рис. 1.7, в), и в таком виде они используются разработчиками аппаратуры.

Если на исходной пластине изготовляют групповым методом вместо отдельных транзисторов комплекс элементов функционального узла (транзисторы, диоды, резисторы и т. д.), то после разрезания получают отдельные кристаллы интегральных схем**. На рис. 1.8, а показан схематически групповой метод изготовления интегральных микросхем. В этом случае интегральная микросхема содержит два тран-

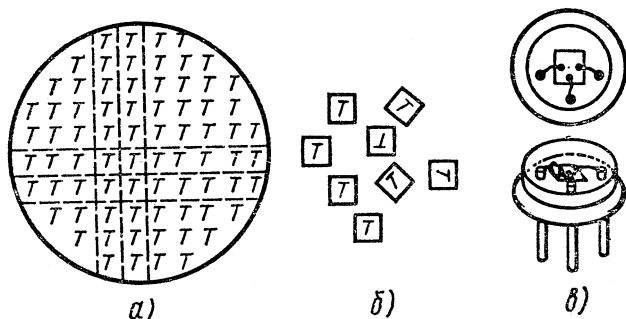


Рис. 1.7. Групповой метод изготовления транзисторов:
а — кремниевая или германиевая пластина с транзисторами; б — отдельные кристаллы с транзисторами; в — готовый транзистор (кристалл в корпусе с выводами)

зистора (Т), один диод (Д) и один резистор (R). Элементы микросхемы соединяются друг с другом по заданной схеме короткими тонкими металлическими полосками, напыляемыми на поверхность пластины (рис. 1.8, б). После разрезания на отдельные кристаллы их помещают в специальный корпус (рис. 1.8, в). Разработчик аппаратуры получает готовый функциональный узел в виде конструктивно единого электронного прибора. Рассмотренным способом получают

* Термин «кристалл» официально принят для готового полупроводникового прибора и микросхемы без внешних выводов и корпуса. Этот термин неудачен, так как совпадает с более общим *физическим* понятием кристалла. В зарубежной литературе используется специальный термин — чип.

** Термин «схема», используемый в микроэлектронике для готового изделия, также является неудачным, так как схемой принято называть чертёж, воспроизводящий обычно с помощью условных обозначений основную идею устройства, прибора. Поэтому более целесообразен термин «микросхема».

полупроводниковые интегральные микросхемы. Полупроводниковой интегральной микросхемой называют ИМС, все элементы и межэлементные соединения которой выполнены в объеме и на поверхности полупроводника. Иногда полупроводниковую интегральную микросхему неправильно называют твердой (или твердотельной). Этот термин не допускается в технической документации.

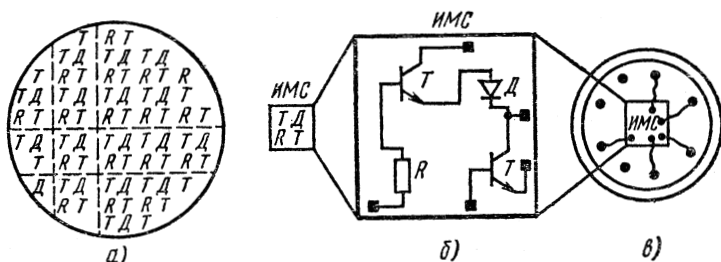


Рис. 1.8. Групповой метод изготовления интегральных микросхем: *а* — полупроводниковая пластина, содержащая в заданной последовательности элементы ИМС (два транзистора, диод, резистор); *б* — соединение элементов внутри микросхемы; *в* — ИМС в корпусе

В зависимости от технологии изготовления интегральные микросхемы могут быть также пленочными или гибридными.

Пленочной интегральной микросхемой называется ИМС, все элементы и межэлементные соединения которой выполнены только в виде пленок. Вариантами технического исполнения пленочных интегральных микросхем являются тонко- и толстопленочные ИМС.

Различие между тонко- и толстопленочными ИМС может быть количественным и качественным. К *тонкопленочным* условно относят интегральные микросхемы с толщиной пленок до 1 мкм, а к *толстопленочным* — ИМС с толщиной пленок более 1 мкм. Качественные различия определяются технологией изготовления пленок. Элементы тонкопленочных ИМС наносят на подложку, как правило, с помощью термовакuumного осаждения и катодного распыления, а элементы толстопленочных ИМС получают преимущественно методом сеткографии с последующим вжиганием.

Гибридной интегральной микросхемой называется ИМС, в составе которой имеются пленочные эле-

менты и компоненты В составе гибридных микросхем кроме простых могут быть и сложные компоненты (например, кристаллы полупроводниковых ИМС). Разновидностью гибридной ИМС является многокристальная ИМС, представляющая собой совокупность нескольких бескорпусных ИМС на одной подложке.

В первой половине 60-х годов широкое распространение получили гибридные интегральные микросхемы. В дальнейшем, по мере совершенствования технологии, быстрыми темпами росло производство полупроводниковых микросхем, изготовление которых оказалось более экономичным. Основной тенденцией развития интегральных микросхем является увеличение числа элементов на одном кристалле, т. е. повышение их функциональной сложности. Функциональную сложность микросхем принято характеризовать степенью интеграции, т. е. количеством элементов (обычно транзисторов) на кристалле или в корпусе.

Степень интеграции микросхемы является показателем сложности ИМС, характеризуемой числом содержащихся в ней элементов и компонентов. Степень интеграции определяется формулой $k \approx \lg N$, где k — коэффициент, определяющий степень интеграции, округляемой до ближайшего большего целого числа, а N — число элементов и компонентов, входящих в ИМС. В соответствии с этой формулой интегральной микросхемой 1-й степени интеграции называется ИМС, содержащая до 10 элементов и компонентов включительно. Интегральная микросхема 2-й степени интеграции содержит от 11 до 100 элементов и компонентов включительно. Соответственно интегральную микросхему, имеющую в своем составе от 101 до 1000 элементов и компонентов включительно, называют ИМС 3-й степени интеграции. Аналогично интегральные микросхемы, имеющие число элементов и компонентов от 1001 до 10 000 или от 10 001 до 100 000 — это ИМС 4-й и 5-й степеней интеграции.

Для количественной характеристики степени интеграции часто используют и такие термины: если $k \leq 1$ ($N \leq 10$), то интегральную схему называют простой, если $1 \leq k \leq 2$ — средней (СИМС), если $2 \leq k \leq 3$ и $3 \leq k \leq 4$ — большой (БИС), а если $k \geq 4$ ($N \geq 10\,000$) — сверхбольшой (СБИС).

Кроме степени интеграции используют еще такой показатель, как *плотность упаковки* элементов — количество элементов (чаще всего транзисторов) на единицу площади кристалла. Этот показатель, характеризующий главным

образом уровень технологии, в настоящее время составляет 500 — 1000 элементов/мм² и более.

Можно отметить три этапа развития микроэлектроники. П е р в ы й этап, относящийся к первой половине 60-х годов, характеризуется разработкой микросхем со степенью интеграции 10 — 100 элементов/кристалл и минимальным размером элементов порядка 100 мкм. В т о р о й этап, относящийся ко второй половине 60-х годов и первой половине 70-х годов, характеризуется созданием микросхем со степенью интеграции 100 — 10 000 элементов/кристалл и минимальным размером элементов от 100 до 3 мкм. В этот период особенно быстрыми темпами разрабатывались и осваивались в серийном производстве большие интегральные схемы (БИС). Т р е т и й этап, начавшийся во второй половине 70-х годов, характеризуется разработкой микросхем со степенью интеграции 10^4 — 10^6 элементов/кристалл и минимальным размером элементов 1—0,1 мкм. В этот период быстрыми темпами разрабатываются сверхбольшие интегральные схемы (СБИС) и микропроцессоры.

§ 1.4 Изделия микроэлектроники и классификация интегральных микросхем

Как стмечалось, основной задачей современной микроэлектроники является создание высоконадежной малогабаритной радиоэлектронной аппаратуры (РЭА) на базе интегральных микросхем, изготовленных с использованием физических явлений в твердом теле и пленках, схемотехнических средств и групповых технологических методов. Разработка такой РЭА предусматривает комплексную миниатюризацию всех ее элементов, т. е. применение в аппаратуре кроме интегральных микросхем, малогабаритных деталей, соединительных элементов, источников питания и других радиокомпонентов.

В связи с этим все микроэлектронные изделия подразделяют на три группы (рис. 1.9):

- интегральные микросхемы;
- функциональные приборы и микросхемы;
- конструктивно-вспомогательные изделия.

Интегральные микросхемы, являющиеся элементной базой микроэлектроники, предназначены для реализации подавляющего большинства аппаратурных функций. Их элементы, аналогичные обычным радиодеталям и приборам, выполнены и объединены внутри или на поверхности общей

подложки, электрически соединены между собой и заключены в общий корпус. Все или часть элементов создаются в едином технологическом процессе с использованием групповых методов изготовления элементов и межэлементных соединений.

В настоящее время разработано большое число различных по функциональному назначению интегральных микро-

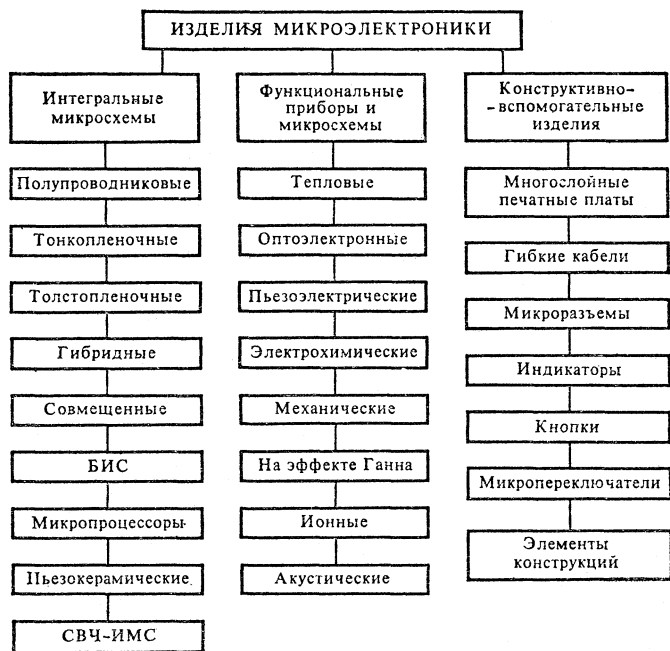


Рис. 1.9. Основные изделия микроэлектроники

схем (мультивибраторы, триггеры, логические схемы, усилители, дешифраторы, смесители, ограничители, микропроцессоры и др.), на которых могут быть построены устройства и системы автоматики, связи, вычислительной и радиолокационной техники и т. д.

Широкое распространение получили *микропроцессоры*. Микропроцессор представляет собой процессор обычной ЭВМ, выполненный на одном или нескольких кристаллах полупроводниковой микросхемы. Микропроцессоры служат главными функциональными частями нового класса ЭВМ,

так называемых микро-ЭВМ. Они обычно имеют высокую степень интеграции и представляют собой большие или сверхбольшие интегральные схемы.

Для повышения уровня миниатюризации аппаратуры используют микросборки и микроблоки.

Микросборка — это микроэлектронное изделие, выполняющее определенную функцию и состоящее из элементов, компонентов и интегральных микросхем (корпусных и бескорпусных), а также других электрорадиоэлементов, находящихся в различных сочетаниях. Микросборка может иметь или не иметь собственный корпус.

Микроблок — это микроэлектронное изделие, которое кроме микросборок содержит интегральные микросхемы и компоненты.

Функциональные приборы и микросхемы не имеют физических аналогов конденсаторов, резисторов, диодов и транзисторов. В этих приборах (оптоэлектронных, ионных, тепловых, акустических и др.) используют различные свойства веществ: оптические явления в полупроводниковых твердых телах, электролиз в жидких электролитах, механические колебания, распространение тепла, эффект Холла, электрические явления в диэлектриках, магнитные свойства твердых тел, доменные свойства полупроводников — эффект Ганна и др. Это позволило создать ряд микроэлектронных функциональных приборов — оптроны, электрохимические интеграторы, генераторы Ганна, акустико-электрические полупроводниковые линии задержки.

Конструктивно-вспомогательные изделия предназначены для монтажа и сборки микросхем в блоки или устройства. К ним относятся многослойные печатные платы, гибкие кабели, микроразъемы, микропереключатели, кнопки, индикаторы, элементы конструкций и т. д. По своим конструктивным характеристикам и надежности эти изделия должны быть близки к интегральным микросхемам и функциональным приборам. Поэтому для их реализации используют, если это возможно, технологические и конструктивные приемы микроэлектроники.

Из всех изделий микроэлектроники наибольшее распространение получили интегральные микросхемы. Именно они характеризуют современный уровень развития микроэлектроники. Техника изготовления интегральных микросхем основана на обобщении групповых технологических методов, как ранее применяемых в полупроводниковом производстве и при получении пленочных покрытий, так и новых.

Это и определило два главных направления в создании интегральных микросхем: полупроводниковое и пленочное. Однако совершенствование полупроводниковой и пленочной технологии, а также возможность их комбинирования позволили выделить ряд новых самостоятельных направлений, по которым можно классифицировать интегральные микросхемы.

Для классификации интегральных микросхем можно использовать различные критерии: степень интеграции, физический принцип работы активных элементов, выполняемую функцию, быстродействие, потребляемую мощность, применяемость в аппаратуре и др. Наиболее распространена классификация по конструктивно-технологическим признакам, поскольку при этом в названии микросхемы содержится общая информация о ее конструкции и технологии изготовления.

Одним из основных критериев оценки технологического уровня производства и отработанности конструкции интегральной микросхемы является степень интеграции (см. § 1.3).

Важным конструктивным признаком интегральной микросхемы является тип подложки. По этому признаку все интегральные микросхемы подразделяют на ИМС с активной и пассивной подложками. К первому классу относятся микросхемы, все или часть элементов которых выполнены внутри самой подложки, представляющей собой пластинку из полупроводникового материала, ко второму — микросхемы, элементы которых размещены на поверхности подложки, выполненной из диэлектрического материала. Тип подложки определяется технологией изготовления интегральной микросхемы. Для полупроводниковых интегральных микросхем используют активные и пассивные подложки, для пленочных и гибридных, как правило, — пассивные, для БИС — активные и пассивные, для СВЧ- и пьезокерамических схем — пассивные.

На рис. 1.10 показана классификация интегральных микросхем по основным конструктивно-технологическим признакам и физическому принципу работы основных элементов.

Для интегральных микросхем любого типа основными и наиболее сложными элементами являются транзисторы, которые по физическому принципу подразделяются на биполярные и униполярные (МДП-структуры). В гибридных интегральных микросхемах используют бескорпусные дискретные биполярные транзисторы, изготавливаемые на основе

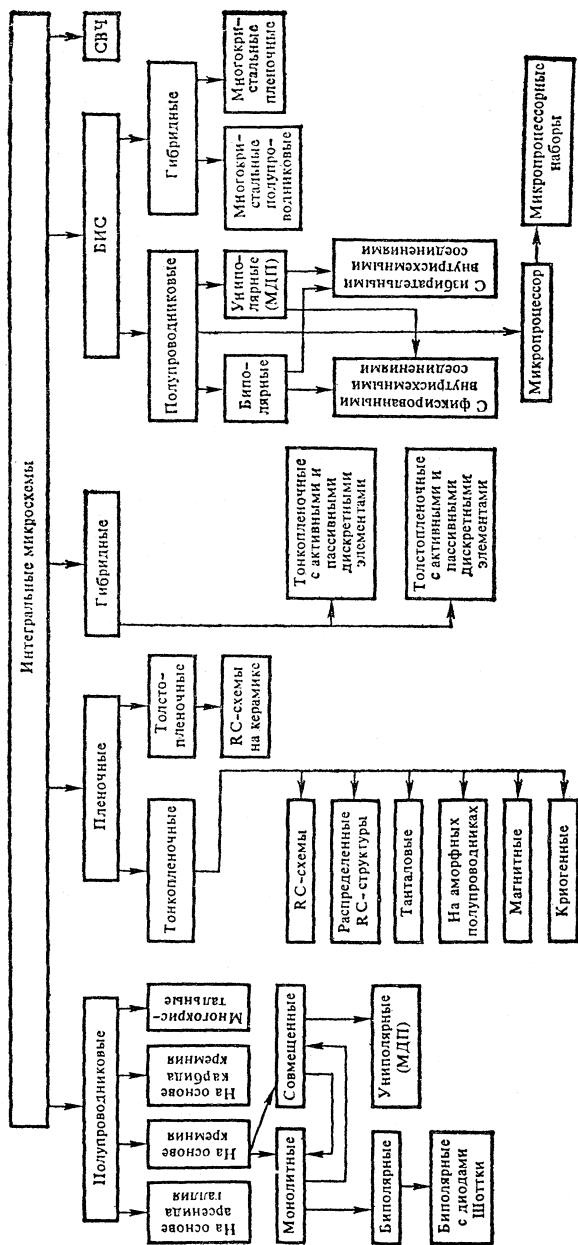


Рис. 1.10. Конструктивно-технологическая классификация интегральных микросхем

кремния по планарно-эпитаксиальной технологии, диоды, бескорпусные микросхемы («чипы»). В полупроводниковых интегральных микросхемах применяют биполярные и МДП-транзисторы, изготавливаемые главным образом по планарной технологии.

Все интегральные микросхемы подвергают герметизации с целью защиты их от внешних воздействий. По конструктивно-технологическим признакам герметизации интегральные микросхемы подразделяют на корпусные и бескорпусные. Для первых характерна вакуумная герметизация в специальных корпусах или опрессовка в пластмассу, для вторых — покрытие эпоксидным или другими лаками.

По функциональному назначению различают цифровые, аналоговые (линейные) и аналого-цифровые интегральные микросхемы, а по применяемости в аппаратуре — изделия широкого и специального (по заказу потребителя) применения.

§ 1.5. Система обозначений интегральных микросхем

Интегральные микросхемы стали элементарной базой для всех видов электронной аппаратуры. Для построения различной аппаратуры (цифровой, аналоговой и комбинированной — аналого-цифровой) необходимы не отдельные микросхемы, а их функционально полные системы (серии). Поэтому элементарную базу электронной аппаратуры составляют *серии* интегральных микросхем — совокупность ИМС, выполняющих различные функции, имеющих единую конструктивно-технологическую базу и предназначенных для совместного применения в аппаратуре.

Под *типономиналом* интегральной микросхемы понимают ИМС, имеющую конкретное функциональное назначение и свое условное обозначение. Под *типом* интегральной микросхемы понимают совокупность типономиналов ИМС, имеющих конкретное функциональное назначение и свое условное обозначение.

Состав серии определяется функциональной полнотой отдельных микросхем, удобством построения сложных устройств и систем и типом стандартного корпуса. В зависимости от функционального назначения и областей применения серии могут содержать от трех-четырех до нескольких десятков различных типов микросхем. С течением времени состав перспективных серий расширяется.

Все выпускаемые интегральные микросхемы в соответствии с принятой системой условных обозначений по конструктивно-технологическому исполнению подразделяют на три группы: полупроводниковые, гибридные и прочие. К последней группе относят пленочные ИМС, которые в настоящее время выпускаются в ограниченном количестве, а также вакуумные и керамические ИМС. Этим группам в системе условных обозначений присвоены следующие цифры: 1, 5, 7 — ИМС полупроводниковые (7 — бескорпусные полупроводниковые ИМС); 2, 4, 6, 8 — ИМС гибридные; 3 — ИМС прочие.

По характеру выполняемых функций в радиоэлектронной аппаратуре ИМС подразделяют на подгруппы (например, генераторы, усилители, модуляторы, триггеры) и виды (например, преобразователи частоты, фазы, напряжения). Классификация интегральных микросхем по функциональному назначению приведена в табл. 1.1.

По принятой системе обозначение ИМС состоит из четырех элементов.

Первый элемент — цифра, соответствующая конструктивно-технологической группе.

Второй элемент — две-три цифры, означающие порядковый номер разработки данной серии ИМС. Таким образом, первые два элемента составляют три-четыре цифры, характеризующие полный номер серии ИМС.

Третий элемент — две буквы, соответствующие подгруппе и виду ИМС (по табл. 1.1).

Четвертый элемент — порядковый номер разработки ИМС в данной серии, в которой может быть несколько одинаковых по функциональному признаку ИМС. Он может состоять как из одной, так и из нескольких цифр.

На рис. 1.11 приведено обозначение полупроводниковой ИМС операционного усилителя с порядковым номером разработки серии 40, порядковым номером разработки данной микросхемы в серии по функциональному признаку 11.

Иногда в конце условного обозначения добавляют букву, определяющую технологический разброс электрических параметров данного типоминнала. Конкретные значения электрических параметров и отличие каждого типоминнала друг от друга приводятся в технической документации (например, ИМС 133ЛА1А отличается от ИМС 133ЛА1Б).

Таблица 1.1

Функциональная классификация интегральных микросхем

Подгруппа		Вид		Буквенное обозначение типоминнала
Наименование	Буквенное обозначение	Наименование	Буквенное обозначение	
Генераторы	Г	Гармонических сигналов	С	ГС
		Прямоугольных сигналов (в том числе автоколебательные мультивибраторы, блокинггенераторы и др.)	Г	ГГ
		Линейно изменяющихся сигналов	Л	ГЛ
		Сигналов специальной формы	Ф	ГФ
		Шума	М	ГМ
		Прочие	П	ГП
Детекторы	Д	Амплитудные	А	ДА
		Импульсные	И	ДИ
		Частотные	С	ДС
		Фазовые	Ф	ДФ
		Прочие	П	ДП
Коммутаторы и ключи	К	Тока	Т	КТ
		Напряжения	Н	КН
		Прочие	П	КП
Логические элементы	Л	Элемент И — НЕ	А	ЛА
		Элемент ИЛИ — НЕ	Е	ЛЕ
		Элемент И	И	ЛИ
		Элемент ИЛИ	Л	ЛЛ
		Элемент НЕ	Н	ЛН
		Элемент И — ИЛИ	С	ЛС
		Элемент И — НЕ/ИЛИ — НЕ	Б	ЛБ
		Элемент И — ИЛИ — НЕ	Р	ЛР
		Элемент И — ИЛИ — НЕ/И — ИЛИ	К	ЛК
		Элемент ИЛИ — НЕ/ИЛИ	М	ЛМ
Многофункциональные схемы	Х	Расширители	Д	ЛД
		Прочие	П	ЛП
		Аналоговые	А	ХА
		Цифровые	Л	ХЛ
		Комбинированные	К	ХК
		Прочие	П	ХП

Продолжение табл. 1.1

Подгруппа		Вид		Буквенное обозначение типоминнала
Наименование	Буквенное обозначение	Наименование	Буквенное обозначение	
Модуляторы	М	Амплитудные Частотные Фазовые Импульсные Прочие	А С Ф И П	МА МС МФ МИ МП
Наборы элементов	Н	Диодов Транзисторов Резисторов Конденсаторов Комбинированные Прочие	Д Т Р Е К П	НД НТ НР НЕ НК НП
Преобразователи	П	Частоты Фазы Длительности Напряжения Мощности Уровня (согласователи) Код — аналог Аналог — код Код — код Прочие	С Ф Д Н М У А В Р П	ПС ПФ ПД ПН ПМ ПУ ПА ПВ ПР ПП
Схемы вторичных источников питания	Е	Выпрямители Преобразователи Стабилизаторы напряжения Стабилизаторы тока Прочие	В М Н Т П	ЕВ ЕМ ЕН ЕТ ЕП
Схемы задержки	Б	Пассивные Активные Прочие	М Р П	БМ БР БП
Схемы селекции и сравнения	С	Амплитудные (уровня сигналов) Временные Частотные Фазовые Прочие	А В С Ф П	СА СВ СС СФ СП

Продолжение табл. 1.1

Подгруппа		Вид		
Наименование	Буквенное обозначение	Наименование	Буквенное обозначение	Буквенное обозначение типоминала
Триггеры	Т	Типа <i>JK</i> Типа <i>RS</i> Типа <i>D</i> Типа <i>T</i> Динамические Шмидта Комбинированные (типов <i>DT</i> , <i>RST</i> и др.) Прочие	В Р М Т Д Л К П	ТВ ТР ТМ ТТ ТД ТЛ ТК ТП
Усилители	У	Высокой частоты* Промежуточной частоты* Низкой частоты* Импульсных сигналов* Повторители Считывания и воспроизведе- ния Индикации Постоянного тока* Операционные и дифферен- циальные* Прочие	В Р Н И Е Л М Т Д П	УВ УР УН УИ УЕ УЛ УМ УТ УД УП
Фильтры	Ф	Верхних частот Нижних частот Полосовые Режекторные Прочие	В Н Е Р П	ФВ ФН ФЕ ФР ФП
Формиро- ватели	А	Импульсов прямоугольной формы (ждушие мультивибра- торы, блокинг-генераторы и др.) Импульсов специальной фор- мы Адресных токов (формиро- ватели напряжения или токов) Разрядных токов (формиро- ватели напряжения или токов) Прочие	Г Ф А Р П	АГ АФ АА АР АП

Продолжение табл. 1.1

Подгруппа		Вид		Буквенное обозначение типоминала
Наименование	Буквенное обозначение	Наименование	Буквенное обозначение	
Элементы запоминающих устройств	Р	Матрицы-накопители:	М	РМ
		ОЗУ	В	РВ
		ПЗУ	У	РУ
		ОЗУ со схемами управления	Е	РЕ
		ПЗУ (масочные) со схемами управления	Т	РТ
		ПЗУ со схемами управления и однократным программированием	Р	РР
		ПЗУ со схемами управления и многократным программированием	А	РА
Элементы арифметических и дискретных устройств	И	АЗУ со схемами управления	П	РП
		Прочие		
		Регистры	Р	ИР
		Сумматоры	М	ИМ
		Полусумматоры	Л	ИЛ
		Счетчики	Е	ИЕ
		Шифраторы	В	ИВ
		Дешифраторы	Д	ИД
		Комбинированные	К	ИК
		Прочие	П	ИП

* Усилители напряжения или мощности (в том числе маломощные).

В некоторых сериях (это также оговаривается в технической документации) буква в конце условного обозначения ИМС определяет тип корпуса, в котором выпускается данный типоминал. Например: буква «П» означает пластмассовый корпус, буква «М» — керамический. Для микросхем широкого применения в начале условного обозначения указывают букву «К» (например, К140УД11). Если после буквы «К» перед номером серии указывается буква «М», то это означает, что вся серия выпускается в керамическом корпусе (например, КМ155ЛА1).

Для серии ИМС в бескорпусном исполнении, без присоединения выводов к кристаллу, добавляется буква «Б» перед обозначением серии (например, КБ524РП1А-4).

Для бескорпусных ИМС в состав сокращенного обозначения через дефис вводится цифра, характеризующая со-

ответствующую модификацию конструктивного исполнения (например 703ЛБ1-2): с гибкими выводами — 1; с ленточными (паучковыми) выводами, в том числе на полиимидной пленке — 2; с жесткими выводами — 3; на общей пластине (неразделенные) — 4; разделенные без потери ориентации (например, наклеенные на пленку) — 5; с контактными площадками без выводов (кристалл) — 6.

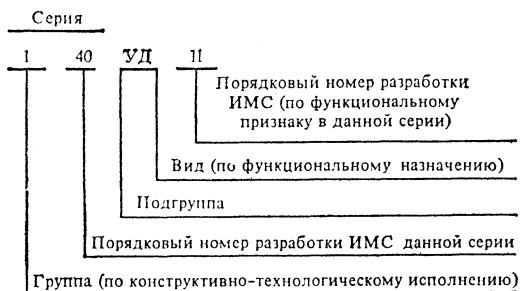


Рис. 1.11. Пример обозначения полупроводниковой ИМС согласно ГОСТ 18682—73

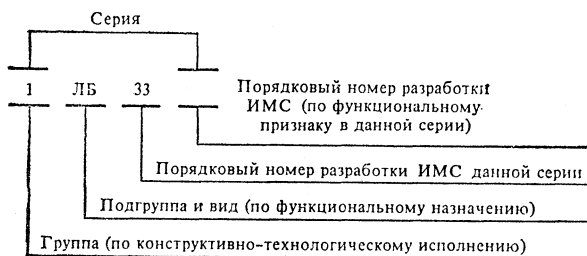


Рис. 1.12. Пример обозначения полупроводниковой ИМС до введения ГОСТ 18682—73

Следует заметить, что до введения ГОСТ 18682 — 73 присвоение условных обозначений проводилось в соответствии с нормативно-технической документацией, действовавшей в то время. После 1973 г большинство ИМС получили новые условные обозначения. Однако для определенного числа ИМС, на которые не было выпущено новой технической документации, старые условные обозначения сохранились.

Старые и новые условные обозначения различаются буквенными обозначениями подгрупп и видов. На рис. 1.11 и 1.12 приведены примеры нового обозначения ИМС (тип 140УД 11) и старого обозначения ИМС (тип 1ЛБ331).

Контрольные вопросы

1. Перечислите поколения развития элементной базы радиоэлектронной аппаратуры и приведите их характеристику.
2. Чем вызвано развитие микроэлектроники?
3. Каковы основные этапы миниатюризации и микроминиатюризации элементов электронной аппаратуры?
4. Дайте краткую характеристику функциональных модулей.
5. Опишите конструкцию этажерочных микромодулей и приведите их основные характеристики.
6. Опишите конструкцию микроплаты и перечислите требования, которые к ней предъявляются.
7. Дайте определения интегральной микросхемы, ее элемента и компонента.
8. Каковы основные различия между полупроводниковыми, пленочными и гибридными ИМС?
9. Как определяется степень интеграции микросхем и каковы ее значения?
10. Назовите основные этапы развития микроэлектроники и дайте их краткую характеристику.
11. Приведите классификацию изделий микроэлектроники.
12. Каковы критерии классификации ИМС?
13. Что такое серии и типы ИМС?
14. Опишите систему обозначений ИМС.

Глава 2

ФИЗИЧЕСКИЕ ПРИНЦИПЫ РАБОТЫ И СОЗДАНИЯ ИНТЕГРАЛЬНЫХ МИКРОСХЕМ

§ 2.1. Явления, процессы и методы, используемые в интегральной микроэлектронике

Интегральные микросхемы и входящие в них элементы реализуются различными технологическими методами в виде объемных и пленочных структур из полупроводниковых, диэлектрических и проводящих материалов. Каждая из структур выполняет функции элемента микросхемы или группы элементов. Различают полупроводниковые и пленочные структуры. Полупроводниковые структуры служат базой для построения полупроводниковых ИМС, а пленочные — для пленочных и гибридных ИМС. Пленочные струк-

туры нашли применение и в полупроводниковых микросхемах (особенно в МДП-микросхемах).

Все физические явления, процессы и методы, используемые в интегральной микроэлектронике, по роду функционального назначения можно разделить на две группы (рис. 2.1).



Рис. 2.1. Физические явления, процессы и методы, используемые в интегральной микроэлектронике

Первую группу составляют физические явления и процессы, которые возникают и протекают в полупроводниковых и пленочных структурах и положены в основу работы различных приборов, интегральных микросхем и их элементов.

К ним относятся: явления переноса носителей заряда в полупроводниках (кинетические); контактные явления в структурах полупроводник — металл, полупроводник — полупроводник; электронные процессы на поверхности полупроводников; оптические и фотоэлектрические явления в полупроводниках; размерные эффекты и различные механизмы токопрохождения в пленочных структурах; физические явления в ферромагнитных пленках. К этой же

группе относятся эффекты, используемые при создании отдельных элементов интегральных микросхем: туннельный эффект, эффект сильного поля, эффект Ганна, эффект Холла, эффект Джозефсона.

Ко второй группе относятся физико-химические методы, лежащие в основе получения микроэлектронных полупроводниковых и пленочных структур.

Это процессы эпитаксии, диффузии, ионного легирования, структурного разупорядочения в тонких пленках, испарения частиц с последующей конденсацией и др. Данные методы применяют для создания технологических процессов изготовления полупроводниковых и пленочных структур. Поэтому технологические возможности микроэлектроники, а следовательно, и разновидность структур и конструкций ИМС определяются реализацией того или иного метода в технологическом процессе. На основе этих методов разрабатывают групповые технологические циклы создания структур и микросхем в целом.

Если явления и процессы первой группы определяют физические возможности реализации заданной функции в ИМС и позволяют объяснить и математически описать принцип работы микросхем и их элементов, то методы второй группы определяют возможность технологической реализации микросхемы. Некоторые из этих методов находят применение как в описании принципов работы устройств микроэлектроники, так и в процессах получения микроэлектронных структур. Это относится прежде всего к диффузии и ее законам, которые описывают движение носителей заряда в полупроводнике и объясняют распределение примесей при легировании полупроводников.

Далее рассмотрены основные физические явления, процессы и методы, наиболее широко используемые в интегральной микроэлектронике.

§ 2.2. Общая характеристика явлений и процессов, определяющих функционирование ИМС

Полупроводниковые материалы. Основу современной микроэлектроники составляют полупроводниковые приборы. Для их реализации используют, как правило, монокристаллические полупроводники — твердые тела с регулярной кристаллической структурой. Наиболее распространенным в интегральной микроэлектронике полупроводниковым материалом является монокристаллический кремний, ко-

торый имеет кубическую решетку типа алмаза, состоящую из тетраэдров.

Связь атомов в кристаллической решетке кремния и ряда других полупроводников обусловлена специфическими обменными силами, возникающими в результате попарного объединения валентных электронов у смежных атомов. Такая связь называется ковалентной. Свойства полупроводников обусловлены регулярностью структуры кристалла и зависят от направления кристаллографических осей и плоскостей в кристаллической решетке.

В интегральной микроэлектронике применяют примесные полупроводники, в которых примеси вводятся специально для придания кристаллу необходимых свойств. Примесные атомы могут располагаться либо в узлах решетки вместо основных атомов (примесь замещения), либо в междоузлиях решетки (примесь внедрения).

Электропроводность полупроводников обусловлена наличием свободных носителей заряда, которые могут перемещаться под действием электрического поля или градиента концентрации. В примесных полупроводниках электропроводность зависит от общего количества свободных собственных носителей и примесных носителей.

Для кремния характерными являются примеси замещения. При этом введение в кремний примесных атомов пятивалентного элемента приводит к образованию свободных электронов, а атомов трехвалентных элементов — свободных дырок. В первом случае полупроводники называют электронными или *n*-типа, во втором — дырочными или *p*-типа. Введенные примесные атомы превращаются в неподвижные положительно или отрицательно заряженные ионы. Ионизация примесных атомов требует некоторой энергии — энергии ионизации или активации примеси. Поэтому при температуре абсолютного нуля ионизация не имеет места, а при комнатной температуре примесные атомы III и V групп в кремнии практически полностью ионизированы.

Следовательно, в примесных полупроводниках всегда имеются носители заряда двух типов: электроны и дырки, но концентрации их резко различны. Носители преобладающего типа принято называть основными (в полупроводнике *n*-типа — электроны), а носители другого типа — неосновными (в полупроводнике *p*-типа — дырки). Концентрация основных носителей заряда определяется главным образом количеством ионизированных примесных атомов.

Иногда в полупроводники вводят примеси, которые являются электрически нейтральными, но влияют на работу полупроводниковых приборов.

Приповерхностный слой полупроводников характеризуется нарушением периодичности решетки и наличием адсорбированных атомов, что обуславливает различие свойств и параметров полупроводника в объеме и приповерхностном слое.

Для изготовления полупроводниковых приборов и ИМС используют выпускаемые промышленностью пластины кремния четырех видов: однослойные p - и n -типов электропроводности, двухслойные p -типа с эпитаксиальным слоем n -типа, двухслойные p -типа с эпитаксиальным слоем n -типа и скрытым слоем n^+ -типа, гетероэпитаксиальные структуры типа кремний на сапфире.

Однослойные пластины кремния n - и p -типов получают резкой слитков монокристаллического кремния диаметром 60—100 мм на пластины толщиной 0,25—0,4 мм. Промышленностью выпускаются слитки монокристаллического кремния, которые в зависимости от типа электропроводности и удельного сопротивления подразделяют на пять групп.

Подготовка пластин, получаемых из слитков монокристаллического кремния, включает в себя следующие операции: ориентация слитков по кристаллографическим осям, резка слитков на пластины, шлифовка, полировка, травление и очистка поверхностей.

Наибольшее применение получили двухслойные кремниевые пластины различных марок. Двухслойные пластины маркируют дробью с числовым коэффициентом, например $80 \frac{10 \text{ КЭФ-0,1}}{200 \text{ КДБ-0,01}}$. Числовой коэффициент перед дробью означает диаметр пластины (80 мм), первая цифра в числителе соответствует толщине эпитаксиального слоя (10 мкм), а в знаменателе — толщине пластины p -типа (200 мкм). Вторые цифры в числителе и знаменателе соответствуют удельным сопротивлениям эпитаксиального слоя (0,1 Ом·см) и исходной пластины (0,01 Ом·см). Буквы означают: К — кремний; Д, Э — дырочный и электронный типы электропроводности; Б, Ф — легирующие элементы (бор, фосфор).

Двухслойные пластины со скрытыми слоями маркируют следующим образом, например $100 \frac{10 \text{ КЭФ } 0,2/2 \text{ КЭМ } 5}{300 \text{ КДБ } 10}$, где 2 КЭМ 5 — характеристика скрытого слоя кремния (К) электронной электропроводности (Э), легированного мышьяком (М), толщиной 2 мкм и удельным поверхностным сопротивлением 5 Ом/квадрат.

Кроме указанных видов промышленностью выпускаются заказные пластины из поликристаллического кремния, в котором сформированы «карманы» монокристаллического кремния n -типа, изолированные слоями двуокиси кремния.

Помимо кремниевых пластин в микроэлектронике в последнее время применяют материалы из полупроводниковых соединений типа $A^{III}B^V$: арсенид галлия, фосфид галлия и др.

Кинетические явления в полупроводниках. Кинетические явления в общем случае характеризуют движение носителей заряда в полупроводниках, которое обусловлено двумя процессами: диффузией под действием градиента концентрации и дрейфом под действием градиента электрического потенциала. Поскольку в микроэлектронике используются примесные полупроводники с двумя типами носителей заряда — дырками и электронами, полный ток, протекающий в полупроводниковых структурах, складывается из четырех составляющих:

$$J = (J_p)_{\text{диф}} + (J_p)_{\text{др}} + (J_n)_{\text{диф}} + (J_n)_{\text{др}}, \quad (2.1)$$

где индексы «диф» и «др» относятся соответственно к диффузионной и дрейфовой составляющим плотностей токов, а p и n — к дырочной и электронной составляющим.

Плотности дрейфовых составляющих тока пропорциональны градиенту электрического потенциала φ , т. е. напряженности электрического поля $E = -\partial\varphi/\partial x$, а плотности диффузионных составляющих — градиентам концентраций носителей заряда. Для одномерной модели, когда носители заряда перемещаются только вдоль оси x , дрейфовые и диффузионные составляющие записываются следующим образом:

$$(J_p)_{\text{др}} = -q p \mu_p \frac{d\varphi}{dx} = q p \mu_p E, \quad (2.2)$$

$$(J_n)_{\text{др}} = -q n \mu_n \frac{d\varphi}{dx} = q n \mu_n E, \quad (2.3)$$

$$(J_p)_{\text{диф}} = -q D_p \frac{dp}{dx}, \quad (2.4)$$

$$(J_n)_{\text{диф}} = q D_n \frac{dn}{dx}. \quad (2.5)$$

Здесь q — заряд; p , n — концентрации свободных носителей заряда (дырок и электронов); μ_p , μ_n — подвижности дырок и электронов; D_p , D_n — коэффициенты диффузии дырок и электронов.

Необходимо отметить, что подвижность дырок и электронов зависит от температуры и концентрации примесей,

как показано на рис. 2.2. Коэффициенты диффузии дырок и электронов связаны с подвижностями этих носителей известным соотношением

$$D_{p,n} = \varphi_T \mu_{p,n}, \quad (2.6)$$

где $\varphi_T = kT/q$ — температурный потенциал; k — постоянная Больцмана; T — температура (при $T = 300$ К $\varphi_T \approx 0,026$ В).

В свою очередь, в невырожденных полупроводниках коэффициент диффузии носителей зависит только от температуры, а в вырожденных полупроводниках, например, при высоких уровнях легирования, и от концентрации примесей.

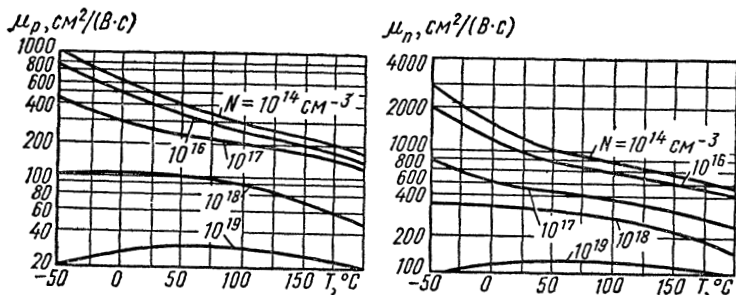


Рис. 2.2. Зависимости подвижности носителей заряда в кремнии от концентрации примесей и температуры

С учетом (2.2) — (2.5) плотность полного тока в полупроводнике определяется выражением

$$J = -qD_p \frac{dp}{dx} + q\mu_p pE + qD_n \frac{dn}{dx} + q\mu_n nE, \quad (2.7)$$

которое называют *уравнением плотности токов*. Из него следует, что для определения плотности тока должны быть известны концентрации носителей заряда и напряженность электрического поля.

Концентрации p и n являются функциями двух переменных — координаты x и времени t : $p(x, t)$ и $n(x, t)$. Эти функции являются решениями так называемых *уравнений непрерывности потока*, которыми в любой момент времени описывается движение носителей заряда. Уравнения непрерывности представляют собой систему уравнений, описывающих изменение концентрации носителей заряда в малом объеме полупроводникового материала.

При отсутствии влияния факторов, вызывающих неравновесную генерацию носителей заряда, уравнения непрерывности для дырок и электронов записываются в виде:

$$\frac{\partial p}{\partial t} = -\frac{p-p_0}{\tau_p} + D_p \frac{\partial^2 p}{\partial x^2} - \mu_p E \frac{\partial p}{\partial x} - p\mu_p \frac{\partial E}{\partial x}, \quad (2.8)$$

$$\frac{\partial n}{\partial t} = -\frac{n-n_0}{\tau_n} + D_n \frac{\partial^2 n}{\partial x^2} + \mu_n E \frac{\partial n}{\partial x} + n\mu_n \frac{\partial E}{\partial x}, \quad (2.9)$$

где p_0 и n_0 — равновесные значения концентраций дырок и электронов; $p - p_0 = \Delta p$; $n - n_0 = \Delta n$ — избыточные концентрации; τ_p , τ_n — среднее время жизни носителей заряда.

В случае, когда поле в полупроводнике отсутствует ($E = 0$) или когда его влиянием заведомо можно пренебречь, уравнения непрерывности значительно упрощаются. Если в полупроводнике имеется существенный объемный заряд (т. е. если напряженность E изменяется вдоль x), при решении уравнений непрерывности пользуются уравнением Пуассона. Уравнения (2.8), (2.9) широко используются в микроэлектронике для количественной оценки процессов, обусловленных поведением и движением носителей заряда в полупроводниковых структурах, например, для определения усилительных и частотных параметров транзисторов ИМС.

Контактные явления в микроэлектронных структурах. Контактные явления играют исключительно важную роль в микроэлектронике. Все электрические контакты можно подразделить на омические (линейные), нелинейные и инжектирующие. В зависимости от конкретной задачи, выполняемой контактом, к нему предъявляются различные требования. Так, омические контакты должны обладать малым сопротивлением, не искажать формы передаваемого сигнала, не создавать шумов, иметь линейную вольт-амперную характеристику. Нелинейные контакты, осуществляющие нелинейное преобразование сигнала (выпрямление, детектирование, генерирование, умножение частоты и др.), должны иметь нелинейную вольт-амперную характеристику и отвечать специальным требованиям в каждом конкретном случае (по обратному сопротивлению, пробивному напряжению, толщине, емкости). Инжектирующие контакты, используемые в биполярных транзисторах, должны инжек-

тировать неосновные носители заряда только в одном направлении. Для этого контакт должен быть резко асимметричным.

В микроэлектронике наибольшее распространение получили следующие структуры контактов: металл — металл, металл — полупроводник, металл — диэлектрик, полупроводник — полупроводник и полупроводник — диэлектрик. Контакты двух металлов наиболее распространены, поскольку интегральные микросхемы содержат внутрисхемные соединения и внешние выводы. Такие контакты должны обладать низким сопротивлением.

Контакты металл — полупроводник могут быть как омическими, так и нелинейными. Омические контакты металла с полупроводником широко применяют в активных и пассивных элементах полупроводниковых ИМС и в активных элементах гибридных ИМС. Обеспечение омического контакта, для которого характерно низкое сопротивление, зависит от соотношения работ выхода электронов из металла A_m и полупроводника A_p . Так, в зависимости от соотношения работ выхода электронов приконтактная область полупроводника может обогащаться или обедняться электронами, что в конечном итоге вызывает перераспределение основных носителей заряда и образование слоя объемного заряда в приконтактной области полупроводника. Наличие обогащенного слоя приводит к тому, что сопротивление системы в целом определяется нейтральным слоем полупроводника и, следовательно, не зависит ни от величины (в области слабых полей), ни от полярности приложенного напряжения. Такие невыпрямляющие контакты являются омическими. Для получения омического контакта необходимо так подобрать металл, чтобы приконтактная область была обогащена основными носителями заряда.

Наличие обедненных носителями слоев в приконтактной области полупроводника приводит к тому, что такой слой обладает повышенным удельным сопротивлением и поэтому определяет сопротивление всей системы. Приложение внешнего напряжения различной полярности изменяет сопротивление приконтактного слоя. Такие контакты обладают выпрямляющими свойствами и могут быть основой для реализации диодов.

Необходимо отметить, что чем больше разность работ выхода и меньше концентрация носителей заряда в полупроводнике, тем больше ширина слоя. Выпрямляющие контакты металл — полупроводник широко используют в мик-

роэлектронных структурах, в частности для построения полупроводниковых элементов с барьером Шоттки.

p-n-переходы широко распространены в полупроводниковой микроэлектронике как для создания активных и пассивных элементов ИМС, так и для изоляции между ними. В изделиях микроэлектроники наиболее часто встречаются плавные, несимметричные переходы, у которых концентрация основных носителей заряда в одной области значительно превышает их концентрацию в другой области: $p_{p0} \gg n_{n0}$ или $n_{n0} \gg p_{p0}$. Распределение примесей в области плавного *p-n*-перехода, изготовляемого методом диффузии,

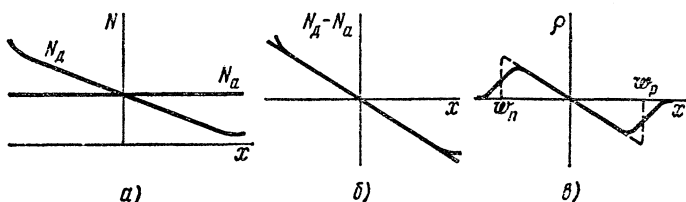


Рис. 2.3. Распределение в области плавного *p-n*-перехода:
 а — донорной и акцепторной примесей; б — их разности; в — плотности объемного заряда

можно без заметной погрешности принять линейным, как показано на рис. 2.3, а, б. Для перехода справедливо равенство

$$N(x) = N_d - N_a = ax, \quad (2.10)$$

где a — градиент концентрации примеси в *p-n*-переходе.

В таком переходе вследствие разности работ выхода электронов в *n*- и *p*-областях возникает диффузионный поток электронов из полупроводника *n*-типа в полупроводник *p*-типа и аналогичный поток дырок, направленный в противоположную сторону. Уход электронов и дырок из приконтактных областей создает объемного заряда, обусловленного неподвижными ионизированными атомами донорной и акцепторной примесей (рис. 2.3, в). Процесс перемещения носителей заряда прекращается лишь тогда, когда контактная разность потенциалов оказывается полностью скомпенсированной разностью потенциалов, созданной объемным зарядом. При этом ток, создаваемый электрическим полем, возникающим в слое объемного заряда, полностью компенсируется диффузионным током, обусловленным градиентом концентрации носителей заряда.

При подведении к полупроводниковой структуре, содержащей p - n -переход, внешнего напряжения U в зависимости от направления приложенного поля будут изменяться высота потенциального барьера, распределение концентрации носителей заряда, как показано на рис. 2.4, и, следовательно, ширина области объемного заряда.

При этом концентрации неосновных носителей p_n и n_p на границах слоя объемного заряда при прямом смещении

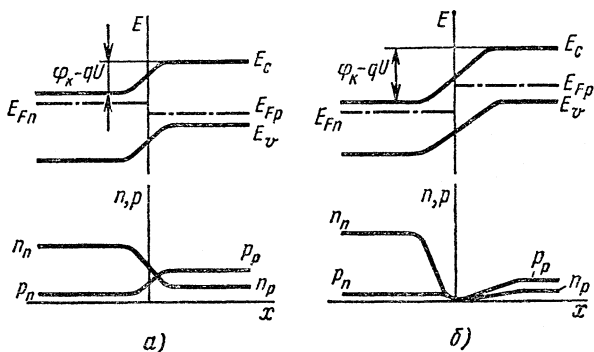


Рис. 2.4. Энергетическая диаграмма и распределение носителей заряда в p - n -переходе при внешнем напряжении, приложенном в прямом (а) и обратном (б) направлениях

возрастают по сравнению с равновесными значениями p_{n0} и n_{p0} по закону:

$$p_n = p_{n0} \exp(qU/kT), \quad (2.11)$$

$$n_p = n_{p0} \exp(qU/kT). \quad (2.12)$$

Это приводит к образованию избыточных неосновных носителей заряда, процесс нагнетания которых называется *инжекцией*.

При обратном смещении концентрация неосновных носителей заряда уменьшается по сравнению с равновесными значениями по аналогичному закону. Процесс «отсоса» неосновных носителей заряда называют *экстракцией*.

В резко асимметричных переходах концентрация инжектируемых неосновных носителей заряда гораздо больше в высокоомном слое, чем в низкоомном, т. е. инжекция носит односторонний характер. Неосновные носители заряда

инжектируются в основном из низкоомного слоя — эмиттера в высокоомный слой — базу.

Вольт-амперная характеристика p - n -перехода, когда рекомбинация в слое объемного заряда незначительна, описывается выражением

$$J = J_s [\exp (qU/kT) - 1], \quad (2.13)$$

где $J_s = q \left(\frac{D_p p_{n0}}{L_p} + \frac{D_n n_{p0}}{L_n} \right)$ — плотность тока насыщения; L_n и L_p — диффузионные длины электронов и дырок.

Из выражения (2.13) следует, что в прямом направлении ток возрастает по экспоненциальному закону с повышением напряжения, а в обратном стремится к току насыщения J_s , не зависящему от внешнего напряжения. В случае резко асимметричного перехода, например, если n -область легирована значительно сильнее p -области, т. е. $p_{n0} \ll n_{p0}$, плотность обратного тока

$$J_s = J_{sn} = q \frac{L_n n_{p0}}{\tau_n}. \quad (2.14)$$

В полупроводниковых структурах микроэлектроники часто ширина базы W_6 значительно меньше диффузионной длины L . В таких переходах инжектированные носители заряда не успевают рекомбинировать в базе, а достигают контакта с другой областью полупроводника или с металлом. В этом случае вольт-амперная характеристика описывается выражением

$$J = J_n = q \frac{D_n n_{p0}}{W_6} [\exp (qU/kT) - 1]. \quad (2.15)$$

p - n -переход обладает емкостными свойствами. Барьерная емкость обратно смещенного p - n -перехода широко применяется в микроэлектронике для создания конденсаторов в полупроводниковых ИМС.

Наличие диффузионной емкости (емкость p - n -перехода при прямом смещении) нежелательно, поскольку она ухудшает импульсные и частотные свойства p - n -перехода.

Из контактов полупроводник — диэлектрик в интегральной микроэлектронике особый интерес представляют *контакты кремний — окисел кремния*. Они имеют место в полупроводниковых ИМС при защите поверхности микросхем слоем двуоксида кремния, создании полевых транзисторов с изолированным затвором и конденсаторов со струк-

турой металл — диэлектрик — полупроводник. Особенность таких контактов состоит в том, что слои двуокиси кремния (окисел) содержат ионизированные атомы доноров, обусловленные технологией их получения. Ионы доноров, как правило, сосредоточены в окисле вблизи границы раздела кремний — окисел и характеризуются плотностью поверхностного положительного заряда. При этом в случае кремния *n*-типа его приповерхностный слой обогащается основными носителями заряда (электронами), в случае кремния *p*-типа — обедняется основными носителями (дырками). Иногда в зависимости от плотности заряда в окисле и концентрации примесей в кремнии возможно изменение типа электропроводности в приповерхностном слое кремния, т. е. образование инверсных каналов. Наличие в кремнии обогащенных, обедненных и инверсных слоев, обусловленных контактом с окислом, оказывает определенное, нередко существенное влияние на работу полупроводниковых ИМС и их элементов.

Поверхностные явления в полупроводниковых структурах. Как отмечалось, свойства полупроводников на поверхности и в объеме различаются, что необходимо учитывать при построении интегральных микросхем. Это объясняется тем, что у поверхности реальных полупроводниковых структур возникают так называемые поверхностные энергетические состояния. Они обусловлены наличием недостроенных (нескомпенсированных) валентных связей у поверхностных атомов и искажением потенциала решетки у поверхности, вызванным адсорбированными атомами и всевозможными поверхностными дефектами. С этим связано возникновение поверхностного заряда, т. е. поверхность полупроводникового кристалла приобретает положительный или отрицательный заряд. Так, наличие на поверхности кремниевой пластины атомов воды или кислорода приводит к образованию отрицательного заряда, а ионов щелочных металлов — положительного.

В соответствии с условием электрической нейтральности образование поверхностного заряда полупроводника при заполнении поверхностных состояний должно сопровождаться возникновением у поверхности слоя объемного заряда, нейтрализующего этот заряд. Нейтрализация происходит путем притяжения к поверхности из объема полупроводника носителей заряда со знаком, противоположным знаку заряда у поверхности, и отталкивания носителей одного знака. Поэтому приповерхностный слой полупро-

водника оказывается обедненным или обогащенным основными носителями заряда.

Появление объемного заряда в приповерхностном слое полупроводника приводит к возникновению электрического поля в этом слое.

Свойства приповерхностного слоя полупроводника, имеющего поверхностные состояния, во многом аналогичны свойствам приповерхностного слоя структуры контактов металл — полупроводник и полупроводник — диэлектрик.

В процессе формирования или работы полупроводниковых структур в зависимости от знака возникающего на

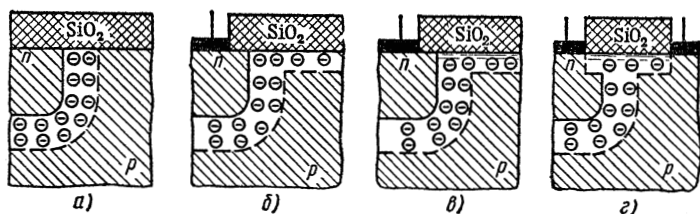


Рис. 2.5. Структура планарных p - n -переходов вблизи поверхности при отсутствии (а) и наличии (б — г) на поверхности положительного заряда

поверхности заряда, концентрации носителей и типа полупроводника возможны также три случая изменения концентрации носителей заряда в приповерхностной области: обеднение, инверсия и обогащение.

Таким образом, у поверхности полупроводников существуют области, электрические свойства которых определяются не объемными концентрациями примеси, а величиной поверхностного заряда. Наличие таких областей оказывает существенное влияние на многие свойства (электропроводность, работу выхода, фото-э. д. с.) и параметры полупроводниковых структур и ИМС (обратный ток p - n -перехода, коэффициент усиления транзистора, напряжение пробоя p - n -перехода).

В качестве примера рассмотрим влияние положительно-го поверхностного заряда на работу планарных p - n -переходов, у которых боковые участки выходят на поверхность. Структура p - n -перехода при отсутствии заряда на поверхности показана на рис. 2.5, а. При наличии на поверхности

положительного заряда образовавшийся в кремнии p -типа обедненный слой сливается с исходным вертикальным слоем (рис. 2.5, б). При этом суммарная площадь и объем обедненного слоя возрастает, что приводит к увеличению обратного тока в p - n -переходе.

Если в кремнии p -типа наряду с обедненным слоем образуется инверсный канал n -типа (рис. 2.5, в), то он соединяется с n -слоем p - n -перехода и как бы продолжает его вдоль поверхности. В данном случае обедненный слой отделен от поверхности проводящим каналом, что отрицательно сказывается на работе p - n -перехода. В частности, такой канал способен образовать проводящую область между омическими контактами к n - и p -областям и тем самым закортить p - n -переход (рис. 2.5, г). Кроме того, наличие канала снижает напряжение пробоя, а также влияет на стабильность тока через p - n -переход. Отметим, что чем выше плотность поверхностного положительного заряда и меньше концентрация примесей (акцепторов) в p -области, тем существеннее проявление канала.

Из-за возможности возникновения поверхностных явлений успешная и надежная работа полупроводниковых элементов и ИМС в целом зависит от стабилизации поверхности полупроводниковых структур и качества защиты ее от окружающей среды. Это выдвигает определенные требования к технологическому процессу и достигается соответствующей обработкой, сборкой в специальной среде и последующей защитой или герметизацией.

Поверхностные явления, как положительные, используются в микроэлектронных структурах в случае приложения к ним внешнего электрического поля. Они изменяют электропроводность полупроводника под действием поперечного электрического поля и известны как эффект поля. При этом структура представляет собой слой полупроводникового материала, на поверхность которого наносится тонкий слой диэлектрика с последующим нанесением металлического электрода. Такие структуры положены в основу создания МДП-транзисторов с изолированным затвором.

Механизмы переноса носителей заряда в пленочных структурах. Электрический ток в пленках может протекать за счет переноса различных носителей заряда: электронов, дырок, ионов. Свойства пленочных элементов определяются прежде всего механизмом токопрохождения в них. Механизм токопрохождения объясняет и принцип работы пленочного элемента. На практике часто реализуется сразу несколько

механизмов токопрохождения с преобладанием одного из них.

В соответствии с принятой классификацией в пленочных структурах различают следующие токи:

в диэлектрических и полупроводниковых пленках за счет надбарьерной (шоттковской) эмиссии;

за счет туннельного прохождения электронов сквозь тонкие диэлектрические и полупроводниковые пленки;

в диэлектрических пленках за счет термоэлектронной эмиссии;

в диэлектрических пленках, ограниченные пространственным зарядом;

в диэлектрических пленках с малой подвижностью электронов;

в диэлектрических и полупроводниковых пленках за счет проводимости по примесям («прыжковая» проводимость);

за счет прохождения возбужденных электронов сквозь тонкие металлические пленки.

Рассмотрим особенности некоторых из этих токов. *Токи надбарьерной (шоттковской) эмиссии* от одного металлического электрода к другому через полупроводниковый или диэлектрический слой возникают и являются преобладающими при сравнительно низких потенциальных барьерах и высоких температурах.

Токи, ограниченные пространственным зарядом (ТОПЗ), проявляются в структуре металл — диэлектрик (или высокоомный полупроводник — металл) в случае, когда контакт имеет малую высоту потенциального барьера. При этом возникает инжекция электронов из металла в полупроводник. Поскольку в диэлектрических (полупроводниковых) пленках наблюдается высокая плотность дефектов, подвижные носители заряда могут захватываться этими дефектами, которые играют роль ловушек. Носители, захваченные ловушками, не переносят зарядов, а создают неподвижный пространственный заряд, ограничивающий ток через диэлектрик (полупроводник).

При рассмотрении ТОПЗ различают случаи, когда инжекция осуществляется на границе с одним электродом (односторонняя инжекция) и когда инжектируют оба металлических электрода (двойная инжекция). Односторонняя инжекция возникает, если высота потенциального барьера на одном контакте значительно отличается от высоты потенциального барьера на другом.

Двойная инжекция наблюдается в симметричных или близких к ним структурах. При соответствующем подборе материалов металлических электродов приложение прямого смещения к структуре вызовет одновременную инжекцию в диэлектрик электронов из одного контакта и дырок — из другого. При этом структура обладает вольт-амперной характеристикой *N*- или *S*-типа. На основе структур с ТОПЗ могут быть построены различные пленочные элементы, в том числе активные, выполняющие разные функции.

Туннельный механизм прохождения электронов сквозь тонкие диэлектрические слои может проявляться и быть преобладающим при малой концентрации носителей заряда в пленке диэлектрика, низких температурах и малых толщинах пленки.

При импульсном приложении к диэлектрикам и полупроводникам, разделенным металлической пленкой, сильных полей образуются возбужденные («горячие») электроны, энергия которых значительно превышает среднюю энергию равновесных носителей заряда. Ввод электронов в металлическую пленку может осуществляться различными механизмами — туннелированием, инжекцией. Обладая значительной энергией, электроны преодолевают тонкую металлическую пленку без рассеяния.

Рассмотренные механизмы переноса носителей заряда используют при построении различных пленочных структур, в том числе и сложных типа металл — диэлектрик — металл — полупроводник.

§ 2.3. Базовые физико-химические методы создания микроэлектронных структур

При создании микроэлектронных структур и ИМС на их основе наибольшее применение получили такие физико-химические методы, как очистка и окисление поверхности, фотолитография, диффузия примесей, ионная имплантация, эпитаксия, травление, испарение и конденсация атомов и частиц различных материалов, металлизация и др.

Очистка. Независимо от вида пластин, используемых в качестве исходного материала для изготовления микросхем, их поверхности подвергают тщательной очистке. Качеству очистки поверхности пластин придают большое значение, поскольку надежность и электрические характеристики ИМС во многом определяются состоянием их поверхности. Кроме того, в ИМС высокой степени интеграции, где

общий размер элементов может быть меньше размеров пылинки, влияние загрязнений стало особо опасным.

Применяют три основных метода очистки — удаления загрязнений с поверхности пластин: растворение, химическую реакцию, превращающую загрязнения в растворимые продукты, которые затем могут быть смыты, механическую очистку и удаление частиц загрязнителя потоком жидкости или газа. На практике наиболее эффективной считается очистка, которая сочетает некоторые или все эти методы. Поэтому существует множество модификаций и комбинаций основных методов очистки. Выбор метода очистки определяется видом загрязнений, их влиянием на последующую технологическую операцию и свойства элементов микросхем, методом гарантированного контроля.

Наибольшее применение в технологии микросхем получила очистка, включающая промывку в деионизованной или дистиллированной воде, ультразвуковую промывку в растворителях, кипячение в растворителях, травление кислотами, обработку ионной бомбардировкой и в тлеющем разряде.

Необходимо отметить, что очистку поверхности пластин производят перед каждой операцией формирования микронных структур

Термическое окисление. Окисление предназначено для создания на поверхности полупроводниковых или пленочных структур защитных слоев из окислов исходных материалов. В полупроводниковой технологии широко применяют окисление поверхности пластин кремния с целью создания слоев из двуокиси (оксида) кремния, которые выполняют различные функции в конструкции микросхем и в технологии их изготовления. Различают термическое окисление, анодное окисление и пиролитическое нанесение окисла.

При наиболее распространенном термическом окислении кинетику роста слоев окисла кремния можно представить в виде трех основных процессов:

- 1) адсорбции молекул окислителя на поверхности исходной пластины;
- 2) прохождения атомов окислителя через слой образовавшегося окисла;
- 3) реакции взаимодействия окислителя с атомами кремния на границе раздела кремний — окисел с образованием нового слоя окисла.

При производстве кремниевых ИМС по планарной технологии используют *термическое* (высокотемпературное)

окисление кремния в различных окислительных средах: в сухом и влажном кислороде и в парах воды.

Окисление в потоке сухого кислорода производят при температурах 1000 — 1300°C и, как правило, при атмосферном давлении. Зависимость толщины пленки от температуры — линейно-параболическая. Окисление кремния во влажном кислороде осуществляют при температуре 1200°C. Для данного процесса окисления кислород, поступающий в печь для окисления, предварительно пропускают через водяную баню и насыщают парами воды. Скорость роста и, следовательно, толщина получаемого окисла зависят от длительности процесса, давления кислорода и концентрации паров воды.

При окислении кремния в парах воды над пластинами, нагретыми до температуры 1000 — 1200°C, пропускают водяной пар при атмосферном давлении. Скорость окисления в парах воды значительно (примерно на порядок) превышает скорость окисления в сухом кислороде.

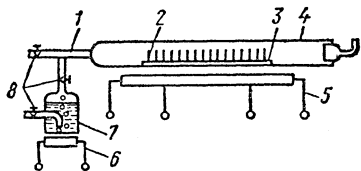


Рис. 2.6. Схема установки термического окисления кремния

При изготовлении полупроводниковых ИМС процессы термического окисления производят в однозонных высокотемпературных печах, точность поддержания температуры в которых не хуже $\pm 1^\circ\text{C}$. Схема однозонной печи окисления — диффузии приведена на рис. 2.6. Пластины кремния 2 после полировки и очистки устанавливают рядами в пазах кварцевой или кремниевой кассеты 3, которую затем помещают в рабочую зону печи. Во избежание попадания на кремниевые полированные пластины каких-либо загрязнений и примесей кассету с пластинами располагают в кварцевой трубе 4, проходящей внутри нагревателя 5, через которую продувается газ-окислитель. Для этих целей используют кварц специальной очистки (дважды переплавленный в вакууме). Один конец кварцевой трубы 1 через систему вентиляций 8 соединен с сосудом-увлажителем 7, наполненным деионизованной водой, через который можно пропускать («пробулькивать») газ (кислород, азот, аргон), или с магистралью сухого кислорода. Температура увлажнителя регулируется специальной баней со стабилизацией температуры с помощью нагревателя 6. Для регулировки расхода газа на входе устанавливают ротаметры и редукторы. В случае, когда для окисления используют пары воды, принимают специальные меры, препятствующие конденсации пара в кварцевых трубах, подводящих пар в печь окисления.

В промышленном производстве полупроводниковых ИМС чаще всего используют комбинированное окисление кремниевых пластин. Вначале выращивают тонкий слой SiO_2 в

сухом кислороде, затем наращивают более толстый слой во влажном кислороде и завершают процесс окисления снова обработкой в сухом кислороде. Такое комбинированное окисление обеспечивает, с одной стороны, получение необходимых свойств границы раздела Si — SiO₂ и слоя SiO₂ и, с другой, при минимальных температурах и в возможно более короткое время выращивание слоя SiO₂ необходимой толщины. Сокращение же процесса окисления и снижение его температуры необходимы для того, чтобы свести к минимуму разгонку примесей при окислении и, следовательно, сохранить геометрию и свойства электронно-дырочных переходов активных и пассивных элементов полупроводниковых ИМС.

В последнее время используют окисление кремния в парах воды при повышенном давлении. В данном случае рост слоев двуокиси кремния подчиняется линейному закону во времени и скорость роста окисла пропорциональна давлению пара.

Иногда для окисления кремния применяют *электролитическое* и *газовое анодирование*, а для нанесения двуокиси кремния на подложки из других материалов — *пиролитическое разложение кремнийорганических соединений* и *вакуумные методы*.

Физические свойства слоев двуокиси кремния зависят от методов и режимов окисления, степени очистки поверхности пластин и толщины окисла.

Маскирующие свойства зависят от многих факторов технологического процесса и параметров слоев двуокиси кремния: толщины слоя окисла, температуры и времени диффузии, давления паров примесей и концентрации примесей в исходном материале. Определяющим фактором маскирования является *отношение коэффициента диффузии примеси в окисел кремния к коэффициенту диффузии в защищаемый материал*. Если это отношение значительно меньше единицы, то будет достигнуто полное маскирование, если больше единицы, маскирования не будет.

Для примесей, применяемых в современной технологии микросхем (P, B, As, Sb), это отношение значительно меньше единицы и при соответствующей минимальной толщине слоя двуокиси кремния осуществляется полное маскирование полупроводника. Если в качестве примесей используется галлий или алюминий, маскирования не будет, так как коэффициенты диффузии этих элементов в двуокиси кремния значительно выше, чем в кремнии.

При всех обычных параметрах технологических процессов производства и применяемых глубинах *p-n*-переходов полностью маскируют кремний и германий пленки двуокиси кремния толщиной: для мышьяка, сурьмы, бора $\sim 0,5$ мкм, для фосфора $\sim 1,0$ мкм. Необходимо отметить, что слои двуокиси кремния, полученные термическим окислением в разных средах, отличаются маскирующими свойствами. Так, слои, выращенные в сухом кислороде, имеют более высокую плотность и лучше задерживают диффузаны, а слои, выращенные в парах воды, характеризуются меньшей плотностью и несколько хуже задерживают диффузаны, хотя скорость роста их в парах воды значительно выше, чем в сухом кислороде.

В технологии полупроводниковых ИМС слои двуокиси кремния применяют также и как источники диффузанта при создании *p-n*-переходов.

Фотолитография. Для получения заданного расположения и конфигурации элементов в микросхеме служит метод фотолитографии. Суть метода состоит в следующем. Для получения элементов полупроводниковой ИМС проводят локальную диффузию примеси. В качестве защитной маски используют слой двуокиси кремния и нитрида кремния. Для получения заданного расположения отверстий, через которые будет проводиться диффузия, и их конфигурации на окисленную поверхность полупроводниковой пластины наносят фоточувствительный слой — фоторезист, на котором методом фотопечати — засветкой через фотошаблон с последующим проявлением — получают требуемый рисунок. В результате химической обработки при проявлении с отдельных участков (окон) фоторезист удаляется, а оставшийся на поверхности используется как защитная маска. После этого проводят травление слоя SiO_2 , не защищенного фоторезистом, плавиковой кислотой (она не действует на фоторезист) и получают окна, через которые проводят диффузию примеси.

Для получения точной копии топологического рисунка микросхемы на подложке сначала делают фотооригинал микросхемы, с помощью которого затем создают фотошаблон.

Фотооригинал (оригинал) — специальный чертеж конфигурации каждого слоя структуры микросхемы, выполненный с высокой степенью точности в увеличенном масштабе: (M100 : 1; M200 : 1; M500: 1 или даже M1000 : 1).

Фотооригинал микросхемы изготавливают с помощью координатографа на стекле, покрытом пленкой нитроэмали. Координатограф вычерчивает на стекле рисунок микросхемы, удаляя в необходимых местах нитроэмаль. Существующие координатографы позволяют получать точность отсчета и определения координат соответственно 12,5 и 25 мкм.

Фотошаблон — негативное или позитивное изображение оригинала, выполненное на прозрачном материале путем фотографирования оригинала с высокой степенью точности. Различают промежуточные, эталонные и рабочие фотошаблоны. Изображение рисунка микросхемы на рабочем фотошаблоне получают в масштабе $M1 : 1$ неоднократным фотографированием с уменьшением. Чаще всего рабочий фотошаблон содержит несколько изображений микросхемы (от 50 до 2000 и даже до 20 000).

Процесс получения фотошаблона с размноженным изображением называют *мультиплицированием*.

Для изготовления рабочих фотошаблонов применяют фотопластинки с разрешающей способностью до 1200 линий/мм и высокоразрешающие оптические системы. В настоящее время получают элементы микросхем размером 0,7 — 0,4 мкм (предел разрешающей способности оптических систем 0,11 мкм).

Рабочие фотошаблоны бывают двух типов: эмульсионные, позволяющие производить не более 20 операций контактной печати; металлизированные с пленкой хрома, позволяющие производить до 3000 операций контактной печати.

Процесс получения фотошаблонов требует особого внимания и высокой точности при выполнении операций.

Фоторезисты — светочувствительные и после проявления устойчивые к воздействию агрессивных факторов (кислот, щелочей) составы. Свет, действуя на эти материалы, либо разрушает молекулы, либо вызывает дополнительную полимеризацию. В зависимости от этого по способу образования рельефа фоторезисты подразделяют на негативные и позитивные.

Позитивный фоторезист при освещении разрушается и при проявлении удаляется с освещенных участков. Светлое поле дает не защищенный фоторезистом участок.

Негативный фоторезист при освещении увеличивает степень полимеризации и при проявлении удаляется с неосвещенных участков. Светлое пятно дает защищенный фоторезистом участок.

Кроме того, различают кислото- и щелочестойкие фоторезисты.

Критериями оценки фоторезистов являются чувствительность, кислотостойкость и разрешающая способность.

Технология процесса фотолитографии включает ряд операций, выполняемых в такой последовательности:

1) очистка поверхности пластин;

2) нанесение фоторезиста, чаще всего центрифугированием;

3) сушка фоторезиста, задубливание;

4) совмещение фотошаблона с подложкой;

5) экспонирование (может осуществляться контактным и проекционным способами);

6) проявление фоторезиста;

7) травление двуокиси кремния на не защищенных фоторезистом участках;

8) удаление фоторезиста.

Последовательность основных технологических операций процесса контактной фотолитографии по маскирующему слою двуокиси кремния в планарной технологии показана на рис. 2.7, а—в.

Качество процесса фотолитографии определяется точностью воспроизведения геометрических размеров элементов на полупроводниковой пластине, на что влияют практически все операции процесса.

Совершенствование процесса фотолитографии происходит путем замены контактной фотопечати проекционной, использования фотонабора, заменяющего трудоемкий и многоступенчатый процесс изготовления промежуточного фотошаблона одним процессом последовательной фотопечати элементов рисунка на фотопластинку. Наиболее перспективным является применение рентгеновской и электронной литографии.

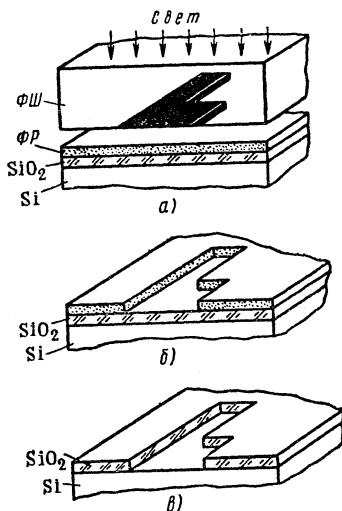


Рис. 2.7. Схема процесса фотолитографии:

а — экспонирование через фотошаблон (ФШ); б — проявление фоторезиста (ФР); в — травление SiO₂ и удаление фоторезиста

Локальная диффузия примесей. Диффузия как метод введения примесей в полупроводники для получения *p-n*-переходов имеет первостепенное значение. Так как от свойств *p-n*-переходов зависят основные характеристики микросхем, а свойства *p-n*-переходов зависят от распределения примесей в полупроводниковых структурах, получаемых методом диффузии, то к процессам диффузии предъявляются жесткие требования по прецизионности геометрических размеров диффузионных областей и точности распределения концентрации примеси. Это в свою очередь накладывает определенные требования на технологические режимы процесса диффузии: количество и распределение введенной примеси, точность температуры и времени.

Диффузия представляет собой обусловленное тепловым движением перемещение частиц в направлении убывания их концентрации.

При диффузии в кристаллах различают перемещение примесных атомов и атомов данного твердого тела (самодиффузия). Движущей силой диффузии является градиент концентрации атомов: чем он больше, тем интенсивнее перемещение атомов.

Теория диффузии в реальных кристаллах предполагает три механизма:

- взаимный обмен мест, как в идеальном кристалле;
- диффузию по междоузлиям;
- диффузию по вакантным узлам.

Скорость диффузии примесных атомов в металлах и полупроводниках обратно пропорциональна их растворимости. Если атомы растворителя и растворенного вещества идентичны, то примесь проникает в кристаллическую решетку в основном по вакансиям, замещая узлы растворителя. В результате образуется твердый раствор замещения. В случае, когда атомы разнородны и диффундирующий атом не может замещать узел или не может удержаться там вследствие слабой химической связи, диффузия идет в основном по междоузлиям. Это более быстрый механизм, но в междоузельном пространстве может разместиться гораздо меньшее число атомов, чем в вакансиях.

Математическое описание диффузионных процессов применительно к идеальным газам и растворам было впервые дано в 1855 г. А. Фиком в виде двух законов, основанных на уравнениях теплопроводности Фурье. Первый закон Фика определяет скорость проникновения атомов одного

вещества в другое при постоянном во времени потоке этих атомов и неизменном градиенте концентрации. Для одномерной модели плотность потока атомов примеси определяется уравнением.

$$J(x) = -D \frac{\partial N}{\partial x}, \quad (2.16)$$

где $D = D_0 \exp(-\Delta E/kT)$ — коэффициент диффузии примеси; $\partial N/\partial x$ — градиент концентрации; D_0 — постоянная, численно равная коэффициенту диффузии при бесконечно большой температуре; ΔE — энергия активации диффузии.

Второй закон Фика определяет скорость накопления растворенной примеси в любой плоскости, перпендикулярной направлению диффузии. Для одномерной модели

$$\frac{\partial N}{\partial t} = D \frac{\partial^2 N}{\partial x^2}, \quad (2.17)$$

где $\partial N/\partial t$ — изменение концентрации диффундирующего вещества в зависимости от времени.

Теория диффузии предполагает, что один вид примеси диффундирует независимо от любого другого и что скорость диффузии, т. е. коэффициент диффузии, не зависит от концентрации. Эти допущения, однако, позволяют получить удовлетворительное совпадение теоретических и экспериментальных данных для невырожденных полупроводников. В вырожденных полупроводниках имеет место зависимость коэффициента диффузии от концентрации примеси.

При производстве полупроводниковых ИМС представляют интерес два вида диффузии: диффузия из бесконечного (постоянного) источника и диффузия из конечного (ограниченного) источника примеси.

Диффузия из бесконечного (постоянного) источника примеси происходит в полупроводниковую пластину, диаметр которой много больше ее толщины, на глубину, много меньшую толщины самой пластины. Под бесконечным, или постоянным, источником понимают такое состояние системы, когда количество примеси, уходящей из поверхностного слоя полупроводника в его объем, равно количеству примеси, поступающей в поверхностный слой. Этому требованию удовлетворяет источник примеси с бесконечно большим содержанием атомов, которые в источнике и у поверхности полупроводниковой пластины имеют скорости, значительно

бóльшие, чем в материале пластины. Начальные и граничные условия для этого случая записываются в виде

$$N(x, t) = \begin{cases} 0 & \text{при } t = 0, x > 0, \\ N_s & \text{при } t \geq 0, x = 0, \\ 0 & \text{при } t \geq 0, x \rightarrow \infty, \end{cases} \quad (2.18)$$

где $N(x, t)$ — концентрация диффундирующей примеси на любой глубине в любое время; x — расстояние от поверхности; t — время диффузии; $x = 0$ — координата поверхности, через которую проводится диффузия; N_s — поверхностная концентрация примеси, поддерживаемая постоянной в течение всего процесса.

При этих условиях решение уравнения второго закона Фика имеет вид

$$N(x, t) = N_s \left[1 - \frac{2}{\sqrt{\pi}} \int_0^{x/2\sqrt{Dt}} \exp(-\lambda^2) d\lambda \right], \quad (2.19)$$

где λ — переменная интегрирования.

Второй член в квадратных скобках представляет собой выражение функции ошибок и уравнение (2.19) можно записать таким образом:

$$N(x, t) = N_s \left(1 - \operatorname{erf} \frac{x}{2\sqrt{Dt}} \right), \quad (2.20)$$

или

$$N(x, t) = N_s \operatorname{erfc} \frac{x}{2\sqrt{Dt}}. \quad (2.21)$$

Здесь erfc — символ, обозначающий дополнение функции ошибок до единицы (error function complement).

Формула (2.21) описывает распределение концентрации примеси в зависимости от координаты (т. е. глубины от поверхности пластины) и времени (рис. 2.8, а). Из этой формулы видно, что распределение примеси определяется поверхностной концентрацией примеси N_s , коэффициентом диффузии D и временем диффузии t . Если процесс диффузии прервать, а затем возобновить, то общее распределение примеси

$$N(x, t) = N_s \operatorname{erfc} \frac{x}{2\sqrt{D_1 t_1 + D_2 t_2}}. \quad (2.22)$$

В этом выражении индексы 1 и 2 относятся соответственно к первой и второй стадиям процесса.

Диффузия из конечного (ограниченного) источника примеси осуществляется следующим образом: в тонком приповерхностном слое полупроводниковой пластины d создают избыточную концентрацию примеси N_s («загонку»), после чего поверхность пластины покрывают материалом со значительно меньшим, чем у полупроводника, коэффициентом диффузии (например, SiO_2) и подвергают нагреву, во время которого происходит диффузия примеси в глубь пластины

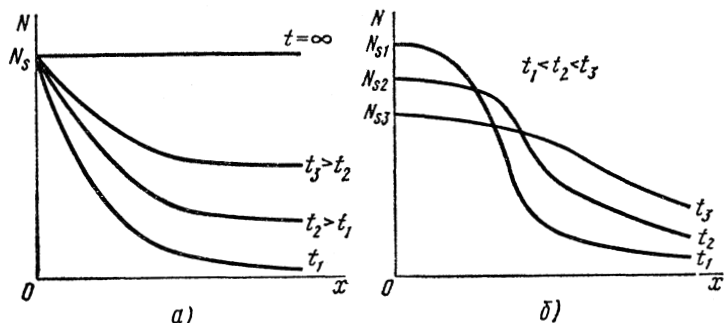


Рис. 2.8. Графики распределения концентрации примеси в полупроводнике при диффузии ($t_1 < t_2 < t_3$):

а — по закону дополняющей функции ошибок; б — по закону Гаусса

(«разгонка»), а на ее границе (при $x = 0$) поток примеси практически равен нулю в течение любого времени.

Начальные граничные условия для этого случая записываются в виде

$$N(x, 0) = \begin{cases} N_s & 0 \leq x \leq d, \\ 0 & x > d. \end{cases} \quad (2.23)$$

При этих условиях решение уравнения второго закона Фика имеет вид

$$N(x, t) = \frac{Q}{\sqrt{\pi Dt}} \exp \left[-\left(\frac{x}{2\sqrt{Dt}} \right)^2 \right], \quad (2.24)$$

где Q — общее количество примеси в полупроводниковой пластине в любой момент времени.

Уравнение (2.24) представляет собой функцию распределения Гаусса и показывает распределение примеси в

зависимости от глубины диффузионного слоя и времени (рис. 2.8, б).

Из сравнения уравнений (2.21) и (2.24), описывающих распределение примеси для двух основных граничных условий, видно, что в первом случае концентрация примеси на границе пластины остается постоянной, а внутри пластины все время повышается и при $t \rightarrow \infty$ $N(x, t) \rightarrow N_s$. Во втором случае концентрация примеси на поверхности постоянно уменьшается и при $t \rightarrow \infty$ общее количество примеси в пластине Q стремится к равномерному распределению на всей глубине пластины.

Диффузия из бесконечного источника проводится при изоляции полупроводниковых структур и формировании эмиттерных областей, диффузия из ограниченного источника — при создании многослойной структуры и формировании базовых областей транзистора, а также при изоляции структур.

В технологии изготовления полупроводниковых ИМС диффузию примесей осуществляют следующими методами: в открытой трубе в потоке газа-носителя, в ампулах, в вакууме и бокс-методом. Диффузию для изготовления кремниевых ИМС часто проводят в две стадии. Вначале на поверхности пластины создают относительно тонкий диффузионный слой с высокой концентрацией примеси, а затем пластину нагревают в атмосфере, не содержащей примеси; в результате происходит перераспределение примеси в пластине из приповерхностного слоя. Этот способ диффузии имеет ряд преимуществ перед одностадийным:

- 1) лучший контроль параметров получаемого диффузионного профиля и воспроизводимость микросхем, так как на второй стадии можно, управляя процессом, вносить поправки для устранения погрешностей, имевших место на первой стадии;

- 2) более легкая маскировка, так как предварительную стадию («загонку») можно проводить при более низкой температуре и иметь для маскировки более тонкий слой пленки;

- 3) получаемое распределение примеси по функции Гаусса чаще более желательно, чем распределение по дополняющей функции ошибок при диффузии в одну стадию.

Метод диффузии в открытой трубе в технологии кремниевых ИМС применяют наиболее широко. Диффузию осуществляют в кварцевой трубе с открытым выходным концом (рис. 2.9).

Входной конец кварцевой трубы 4 соединен с системой подачи газа-носителя 1, которая дает возможность подавать в трубу газ-носитель с необходимой скоростью и составом. Труба помещается в двух нагревательных печах (низкотемпературной 2 и высокотемпературной 3), создающих зоны с соответствующими температурами (бывают установки с одной зоной нагрева). В низкотемпературной зоне, первой по ходу газа-носителя, помещают источник примеси 6, а в высокотемпературной зоне ближе к выходу из трубы в специальной кварцевой лодочке — пластины кремния 5. Газ-носитель, поступаая из системы подачи газа через вентили 7, вытесняет воздух из трубы. Проходя сначала в зоне источника примеси, газ-носитель захватывает испарившиеся атомы примеси и переносит их в зону, где находятся пластины. Атомы оседают на поверхности пластин

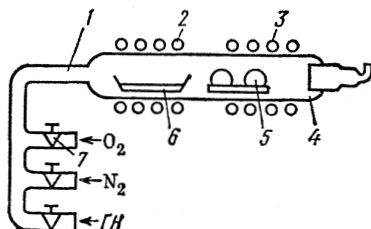


Рис. 2.9. Схема двухзонной диффузионной установки

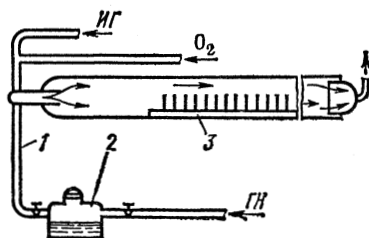


Рис. 2.10. Схема однозонной диффузионной установки:

1 — магистраль для подачи газов; 2 — питатель для жидкого диффузанта; 3 — кварцевая труба; ИГ — инертный газ; ГН — газ-носитель

кремния и диффундируют внутрь пластин. Источники примеси могут быть твердыми, жидкими и газообразными; в зависимости от этого различают разные способы введения примеси в систему. При твердом источнике примеси применяют метод введения диффузанта в систему, описанный ранее, т. е. частицы твердого источника помещают в лодочке в зоне нагрева в реакционной трубе. При жидком источнике примеси используют специальные питатели и однозонные установки (рис. 2.10). При газообразном источнике примеси газ-диффузانت из специальных баллонов подается в систему и смешивается с газом-носителем в необходимой пропорции, как и при окислении. В качестве диффузантов используют соединения бора, фосфора, мышьяка и сурьмы.

Существует также *диффузия из нанесенного источника примеси*, при которой на одну из сторон полупроводниковой пластины наносят слой источника примеси (например, термическим напылением в вакууме), после этого пластину нагревают в печи методом открытой трубы в неокисляющей атмосфере, и примесь диффундирует в пластину. Этот метод применяют при проведении диффузии золота в кремний.

Диффузией Au в Si создают рекомбинационные центры, снижающие время жизни неосновных носителей заряда в полупроводнике. Это делают при создании ИМС, работающих в ключевом режиме с высоким быстродействием. При диффузии золота в кремний наблюдается междоузельный механизм диффузии с очень высокими скоростями.

Диффузию примесей осуществляют в диффузионных установках, которые в технологии производства микросхем служат также для проведения окисления поверхности пластин и других видов термической обработки (отжиг, пиролиз и т. д.). В отечественной практике используют диффузионные однозонные установки типов СДО-13, СДО-125/4 (агрегатированы четыре камеры) и СДО-125/3-12 (агрегатированы три камеры) и двухзонные установки типов СДД-13, СДД-125П/1.

Ионное легирование. В технологии микроэлектроники широко распространена также *ионная имплантация*. Метод ионной имплантации основан на использовании управляемых электрическими и магнитными полями направленных потоков заряженных атомных частиц (ионов) с высокими энергиями, бомбардирующих твердое тело, для изменения в его поверхностных слоях структурных, электрофизических, физико-химических и других свойств. Наибольшее применение ионная имплантация нашла для введения примесей в полупроводник. Такой процесс называют *ионным легированием*.

Сущность ионного легирования заключается в следующем. Ионы примесей, получаемые из специальных источников, ускоряются и фокусируются в электрическом или магнитном поле, попадают на поверхность полупроводниковой пластины, бомбардируя ее. Обладая большой энергией, ионы влетают в кристаллическую решетку полупроводника, сталкиваются и взаимодействуют со встреченными атомами. При каждом столкновении ионы передают часть своей кинетической энергии ядрам атомов и электронам. Столкновения, в результате которых происходит потеря энергии, подразделяют на упругие и неупругие. Взаимодействие иона с атомом как целым является упругим, а с его электронной оболочкой — неупругим. Если энергия, переданная ионом атому при упругом столкновении, превышает энергию связи атомов в твердом теле, то атом покидает узел. В результате образуется вакансия и междоузельный атом. Поскольку энергия первично смещенного атома велика, на пути своего движения он образует целый каскад смещений. Поэтому

процесс имплантации ионов сопровождается накоплением радиационных дефектов, что приводит к разупорядочению кристаллической решетки. Внедренные ионы могут попасть в вакантный узел, став донорами или акцепторами, хотя вероятность замещения узлов мала. Большинство внедренных ионов находится в междоузлиях, где они являются электрически нейтральными. Для перевода их в узлы и восстановления кристаллической структуры полупроводников производят отжиг. В результате происходит распад и аннигиляция радиационных дефектов, а внедренные примесные атомы занимают вакантные узлы, становятся электрически активными, что обеспечивает образование слоев *n*- или *p*-типа электропроводности.

Процесс ионного легирования состоит из внедрения в пластину ионов и ее отжига, осуществляемого одновременно с внедрением либо после него.

Характерной особенностью ионного легирования является то, что содержание внедренных атомов примеси определяется не физическими свойствами подложки — полупроводниковой пластины (как при диффузии), а условиями внедрения ионов и температурой отжига, которая значительно ниже температуры диффузии.

Ионное легирование осуществляют в специальной вакуумной установке, схема которой показана на рис. 2.11.

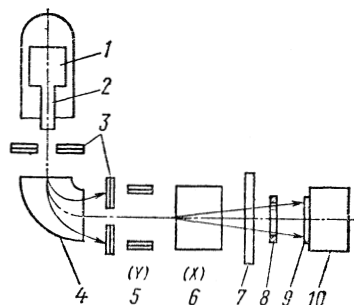


Рис. 2.11. Схема установки для ионного легирования

Источник ионов 1 состоит из камеры, предназначенной для ионизации паров легирующих элементов, и экстрагирующего ионы зонда. Ионизация производится в высокочастотном или дуговом разряде. Исходными материалами для получения ионов фосфора и бора, которые в основном используют при легировании кремния, являются красный порошкообразный или кристаллический фосфор и галогениды бора. Твердые вещества загружают в тигель источника, а пары галогенидов поступают в источник через накататель. Экстрагированные с помощью отрицательно заряженного зонда положительные ионы концентрируются и фокусируются системами 2 и 3 в пучок с плотностью до 100 А/м^2 . Под действием напряжения ускорительной системы (20 — 200 кВ) ионные пучки приобретают необходимую энергию, достаточно мощную для ионного внедрения. С помощью магнитного масс-сепаратора 4 происходит выделение ионов

нужной массы, что достигается разделением движения частиц по различным траекториям в соответствии с их массами под действием магнитного поля; сепарирование по массам обеспечивает высокую чистоту легирования. С помощью отклоняющих пластин 5 и 6 и системы сканирования 7 обеспечивается управление потоком ионов по поверхности пластин 9, установленных в многопозиционном приемнике ионов 10. Во избежание столкновений ионов при движении в установке поддерживается вакуум ($10^{-4} - 10^{-5}$ Па). Измерителем 8 контролируют ионный ток.

Легирование осуществляют посредством широкого (соизмеримо с диаметром пластины либо превышающего его) или острого фокусированного пучка ионов. В первом случае для локальной обработки необходимо маскирование, во втором оно необязательно (обработка может достигаться сканированием). В качестве материалов для маскирования применяют двуокись и нитрид кремния, вольфрам, молибден и др. Предпочтительнее металлические маски.

В отечественной промышленности применяют широкофокусные установки «Везувий», обеспечивающие точность легирования по глубине 0,02 мкм, и ионно-лучевые ускорители ИЛУ-2, обеспечивающие формирование пучков диаметром до 50 мкм при энергиях 150—250 кэВ для фосфора и 50—150 кэВ для бора. Причем внедрение ионов осуществляется как при комнатной температуре, так и в условиях нагрева подложки. Эффективность применения ионного легирования зависит от ряда факторов, основными из которых являются распределение пробегов внедренных атомов, степень и характер разупорядочения решетки, локализация атомов в кристаллической решетке и электрические свойства слоев после внедрения и отжига.

Основные параметры, от которых зависит пробег ионов, — это их энергия и порядковый номер, порядковый номер материала пластины, а также ориентация пластины и амплитуда тепловых колебаний атомов ее решетки, обусловленная температурными условиями. Свойства ионно-легированных слоев (распределение концентрации носителей заряда, сопротивление слоя, глубина p - n -перехода) определяются распределением внедренных атомов, их положением в решетке и наличием дефектов, что зависит от основных параметров процесса, дозы и энергии облучения, ориентации и температуры пластины и температуры отжига.

Распределение внедренных ионов в первом приближении определяется законом Гаусса:

$$N(x) = \frac{Q}{\sqrt{2\pi\Delta R_n^2}} \exp \left[-\frac{(x - R_n^2)^2}{2\Delta R_n^2} \right], \quad (2.25)$$

где x — глубина внедренных ионов; Q — доза облучения; R_n и ΔR_n — средний нормальный пробег ионов и его отклонение.

Характерно, что максимум распределения находится не на поверхности пластины, как при диффузии, а на расстоянии от поверхности, равном среднему нормальному пробегу ионов. Максимальные значения концентрации примесей в ионно-легированных слоях достигают значений $2 \cdot 10^{20} \text{ см}^{-3}$ (для бора) и 10^{20} см^{-3} (для фосфора).

Ионное легирование полупроводников в планарной технологии применяется либо для введения фиксированного количества заданной примеси в локальную область, либо для создания контролируемого профиля концентрации примеси в заданной области. Важным при этом является внедрение примесей в пластину через предварительно нанесенный слой SiO_2 ; маской в этом случае смогут служить слои из нитрида кремния, алюминия, молибдена и др.

Основными преимуществами ионного легирования являются следующие:

- 1) возможность точного задания конфигурации распределения концентрации примеси как по глубине, так и по площади облучения. При этом градиент концентрации примеси в области p - n -перехода существенно больше, чем у диффузионного профиля, а геометрические размеры локальной области строго определяются конфигурацией маски;

- 2) протекание процесса при низких температурах (около $600 - 800^\circ\text{C}$ при отжиге дефектов), что позволяет сохранить заданный профиль распределения концентрации примесей в структурах и их электрофизические параметры;

- 3) возможность легирования кремния и других полупроводников любыми легирующими примесями в различных количествах, вплоть до предельной растворимости;

- 4) изотопная чистота ионов легирующей примеси, сепарированных в магнитном поле;

- 5) отсутствие влияния окружающей среды, так как процесс осуществляется в вакууме;

- 6) высокая воспроизводимость результатов благодаря точному контролю интенсивности пучка и дозы внедряемых ионов;

- 7) возможность осуществления на одной установке целого комплекса операций, включая легирование, металлизацию и защиту поверхности.

Основными недостатками ионного легирования являются сложность технологических установок и возможность образования дефектного слоя на поверхности пластин.

В настоящее время ионное легирование используют для создания биполярных транзисторов СВЧ-диапазона, МДП-транзисторов с самосовмещающимся затвором, диодов, высокоомных резисторов и других элементов полупроводниковых ИМС.

Эпитаксия. Эпитаксией называют явление ориентированного роста слоев, кристаллическая решетка которых повторяет структуру пластины.

Эпитаксиальное наращивание полупроводниковых слоев широко используют совместно с диффузией примесей для получения транзисторных структур полупроводниковых ИМС. Применение методов эпитаксиального наращивания слоев в технологии полупроводниковых ИМС дает ряд преимуществ:

- возможность получения монокристаллических слоев полупроводников с заданной ориентацией кристаллографических осей;

- возможность осуществления равномерного распределения примесей в слое (что практически невозможно при диффузии примесей);

- сокращение процессов диффузии до двух при получении четырехслойных транзисторных структур в интегральных микросхемах;

- получение транзисторных структур с лучшими, чем при тройной диффузии, характеристиками и упрощение операций по изоляции элементов p - n -переходами;

- сокращение длительности операций получения транзисторных структур (скорость роста эпитаксиальных слоев относительно высокая).

В настоящее время разработан ряд методов получения эпитаксиальных слоев полупроводников. Все методы принято подразделять на две группы: прямые и непрямые (косвенные). При прямых методах частицы полупроводника переносятся от источника к пластине без промежуточных химических реакций путем испарения из жидкой фазы, сублимации, реактивного распыления. При непрямых методах атомы полупроводников получают на поверхности пластины путем разложения паров полупроводниковых соединений. К ним относятся методы, основанные на восстановлении в водороде хлоридов, бромидов, иодидов полупроводников кремния и германия.

Хлоридный метод получения эпитаксиальных слоев распространен наиболее широко. Схема установки для получения слоев этим методом представлена на рис. 2.12.

Установка состоит из реакционной камеры 1 (цилиндрическая кварцевая труба), помещенной в поле индукционной катушки ВЧ-нагрева 2. Внутри трубы полупроводниковые пластины 4 размещают на тепловоспринимающем элементе 3 из графита. Для подачи газов в реакционную камеру служит специальная газовая система, снабженная вентилями 5 и ротаметрами 6.

Эпитаксиальный процесс начинают с загрузки партии пластин кремния 4, размещенных на графитовой подставке 3, в реакционную камеру и нагревания их до рабочей температуры. Этому предшествуют шлифовка и тщательная очистка поверхности пластин. Затем реакционную камеру продувают водородом и заполняют смесью HCl и H_2 для газового травления поверхности полупроводниковых пластин. Тем самым достигаются снятие нарушенного слоя кремния и окончательная очистка поверхности. После очистки подачу HCl прекращают и в реакционную камеру установки, где поддерживается температура $1150\text{--}1300^\circ\text{C}$, подается смесь газов тетрахлорида кремния SiCl_4 и водорода, выполняющего роль восстановителя и газа-носителя.

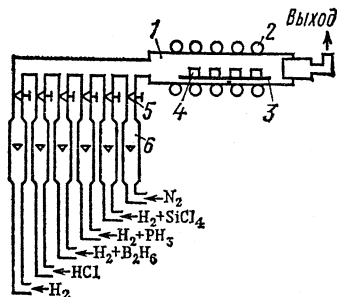


Рис. 2.12. Схема установки для эпитаксиального наращивания кремния

В процессе роста эпитаксиальных слоев легко легировать их примесями. Примеси подаются в реакционную камеру вместе с газами, несущими полупроводниковое соединение. Регулируя подачу диффузанта, можно получать необходимую концентрацию примеси в полупроводниковом эпитаксиальном слое. Легирование можно осуществлять двумя способами:

1) из раствора добавлением к жидкому SiCl_4 летучих примесей (PCl_5 или SbCl_5), которые испаряются вместе с ним и поступают в реакционную камеру;

2) введением примеси в реакционную камеру отдельным газовым потоком (газовое легирование). Например, в качестве донорных примесей вводят фосфин PH_3 , арсин AsH_3 , а в качестве акцепторной примеси — диборан B_2H_6 . Эти газы разбавляют водородом и вводят в реакционную камеру.

Эпитаксиальный рост полупроводниковых слоев и их качество зависят от ряда факторов. При хлоридном методе

с повышением температуры возрастает скорость наращивания совершенного эпитаксиального слоя, так как при этом увеличиваются скорости миграции атомов полупроводника по пластине и они быстрее занимают соответствующие места в кристаллической решетке.

Скорость роста слоев зависит от ориентации и степени разориентации пластин по кристаллографическим осям, скорости потока газа-носителя водорода, а также отношения H_2 и $SiCl_4$ и аэродинамических факторов. Для уменьшения аэродинамических факторов используют эпитаксиальные установки с вертикальным реактором.

В последнее время успешно развивается технология гетероэпитаксиального наращивания слоев кремния на диэлектрические подложки, в частности сапфир. Такая технология обеспечивает получение структурных элементов ИМС с превосходной изоляцией. Гетероэпитаксия кремния на сапфире, в основу которой положены газофазные реакции, осуществляется в основном хлоридным методом и пиролизом моносилана.

Силановый метод, в основу которого положен пиролиз SiH_4 , обеспечивает качественный рост эпитаксиальных слоев кремния на сапфире с оптимальными электрофизическими свойствами при температуре 1050 — 1150°C. Следует отметить, что эпитаксиальные слои, выращенные силановым методом, более совершенны по структуре и свойствам.

В отечественной промышленности для эпитаксиального наращивания применяют установки с вертикальным реактором УНЭС-1, УНЭС-2, УНЭС-2П-В.

Напыление пленок. Помимо эпитаксиальных монокристаллических пленок, осаждаемых на кристаллические подложки, широкое распространение в микроэлектронике находят тонкие поликристаллические и аморфные пленки. На основе таких пленок в настоящее время изготавливают не только пассивные, но и активные элементы, работающие с использованием основных носителей заряда. Для указанных целей применяют проводниковые (металлические), резистивные, диэлектрические и полупроводниковые поликристаллические и аморфные пленки. Эти пленки обычно получают методом *вакуумного напыления*.

Процесс нанесения пленок в вакууме складывается из двух этапов: превращения вещества в газообразное состояние и конденсации. По способу превращения вещества в газообразное состояние методы вакуумного нанесения подразделяют на термовакuumное испарение, катодное и ионно-

плазменное распыление. Термовакuumное испарение осуществляется нагревом испаряемого вещества. При этом вещество плавится, а затем образуется пар. Некоторые вещества при нагреве переходят в пар, минуя жидкую фазу (сублимация). Катодное распыление основано на явлении разрушения катода, который является напыляемым веществом, при бомбардировке его ионизированными атомами газа. Разновидностью катодного распыления является ионно-плазменное распыление. Процесс испарения (распыления) характеризуется средней длиной свободного пробега молекул, давлением паров и скоростью испарения.

Вторым этапом получения тонких пленок является конденсация — процесс перехода из газообразной фазы в твердую. При столкновении с подложкой осаждаемые атомы или молекулы могут либо отразиться в результате упругого столкновения, либо, передав часть энергии атомам подложки, адсорбироваться на ее поверхности. Проникновением атомов в глубь материалов подложки даже при максимальных значениях энергии испаренных атомов можно пренебречь. Конденсация пара сопровождается отражением или испарением конденсируемых частиц с подложки.

Процесс конденсации существенно зависит от температуры подложки и плотности потока достигающих ее частиц.

Наряду с вакуумными в технологии микроэлектроники используют химические и электрохимические методы нанесения пленок.

Травление. В технологии микроэлектроники широко применяют различные методы травления поверхности структур из разных материалов. Особый интерес представляют методы травления поверхности полупроводниковых структур.

Травление полупроводников заключается в растворении их поверхности при взаимодействии с соответствующими химическими реагентами: щелочами, кислотами, их смесями и солями. Существуют две теории саморастворения полупроводниковых материалов в травителях: химическая и электрохимическая. Согласно химической теории растворение полупроводников происходит в две стадии: сначала полупроводник окисляется, затем окисел переходит в раствор. При травлении этот процесс многократно повторяется. Травитель при этом состоит из сильного окислителя и растворителя с различными добавками. В соответствии с электрохимической теорией взаимодействие между полупроводником и травителем обусловлено тем, что на поверх-

ности полупроводников существуют анодные и катодные микроучастки, между которыми возникают локальные токи. На анодных участках полупроводник переходит в раствор, а на катодных происходит восстановление окислителя. При равномерном травлении поверхности полупроводниковой пластины микроаноды и микрокатоды непрерывно меняются местами. Для интенсификации химического травления применяют активное перемешивание травителя непосредственно у поверхности обрабатываемой пластины.

Травление полупроводников используют для получения качественной поверхности пластины и локальных (различной конфигурации) полупроводниковых структур. После травления пластины подвергают промывке, как правило, в деионизированной воде для удаления следов травителя.

Металлизация. В планарных структурах микросхем внутрисхемные соединения выполняются с помощью тонких металлических пленок, наносимых на изолирующий слой двуокиси кремния. Процесс создания внутрисхемных соединений называется металлизацией.

Тонкая металлическая пленка, которая используется в качестве проводников внутрисхемной коммутации, должна обладать необходимыми свойствами: обеспечивать невыпрямляющий контакт с полупроводником, иметь хорошую адгезию с кремнием и двуокисью кремния, а также достаточно низкое удельное сопротивление, давать возможность присоединения выводов микросхемы. Для коммутации могут служить золото, никель, свинец, серебро, хром, алюминий, системы $\text{Cr} - \text{Au}$, $\text{Ti} - \text{Au}$, $\text{Mo} - \text{Au}$ и т. д.

В кремниевых ИМС для коммутации в настоящее время широко применяют алюминий, так как он обладает следующими положительными свойствами:

- позволяет изготавливать структуры с металлизацией одним металлом, что упрощает технологию;

- имеет высокую проводимость, близкую к проводимости объемного материала;

- обладает хорошей адгезией к кремнию и двуокиси кремния;

- хорошо испаряется в вакууме;

- хорошо обрабатывается при проведении операций фотолитографии для получения нужной конфигурации проводников; пленки алюминия легко поддаются травлению, которое не действует на Si и SiO_2 ;

вступает в реакцию с SiO_2 , которая частично остается на контактных площадках;

образует низкоомные контакты с кремнием n^+ - и p -типов;

в системе $\text{Al} - \text{Si}$ не образуется хрупких химических соединений;

кремний, находящийся в алюминии в виде твердого раствора, почти не уменьшает его проводимость;

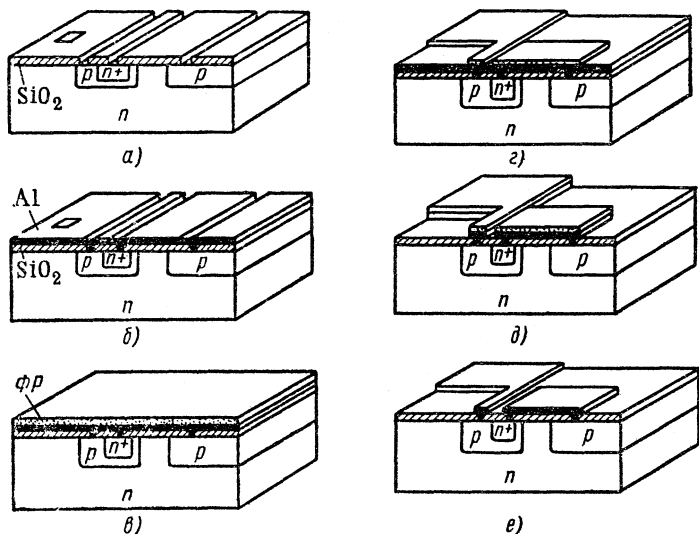


Рис. 2.13. Последовательность формирования металлизированной разводки:

a — фотолитография в слое SiO_2 ; *б* — напыление пленки Al ; *в* — нанесение фоторезиста; *г* — проявление фоторезиста; *д* — травление Al ; *е* — удаление фоторезиста

к пленке алюминия хорошо присоединяется золотая и алюминиевая проволока;

выдерживает циклические изменения температуры (достаточно пластичен);

стойкий к окислению в атмосфере;

является достаточно хорошим материалом для схем, стойких к радиации;

имеет небольшую стоимость.

Коммутацию с помощью пленок алюминия осуществляют по следующей технологии (рис. 2.13). После завершения всех операций по созданию структур в объеме полупровод-

никовой пластины ее покрывают слоем SiO_2 . Методом фотолитографии в слое SiO_2 в местах, где должны быть контакты к кремнию, вскрывают окна соответствующих размеров (рис. 2.13, а). Затем методом термического испарения в вакууме наносят на пластину сплошную пленку алюминия толщиной около 1 мкм (рис. 2.13, б). В специальных случаях толщина пленки колеблется от 0,5 до 2 мкм. При многослойной металлизации первый слой металла наносят более тонким, чем последующий слой диэлектрика и второй слой металла. Пленка алюминия имеет удельное сопротивление около $3 \cdot 10^{-6}$ Ом · см, т. е. на 10 — 20% больше сопротивления объемного Al ($2,7 \cdot 10^{-6}$ Ом · см). Сопротивление в омах на квадрат составляет 10^{-2} — 10^{-3} .

Необходимый рисунок проводников и контактных площадок создается фотолитографией (рис. 2.13, в — е). Ширина линий проводников и промежутков между ними равна 6 — 10 мкм. В настоящее время вполне доступно создание проводящих полосок шириной $\sim 2,5$ мкм и доказана возможность изготовления полосок алюминия шириной чуть более 1 мкм.

После нанесения рисунка пластину подвергают термообработке для получения низкоомных контактов к кремнию. В обычном случае пластину нагревают до температуры 550° (ниже температуры эвтектической точки) и выдерживают несколько минут. Эта операция приводит к растворению кремния в алюминии. При снижении температуры из жидкой фазы выделяется кремний, образуя рекристаллизационный слой на поверхности раздела с концентрацией алюминия $5 \cdot 10^{18}$ атом/см³, а так как алюминий является для кремния акцепторной примесью, то полученный рекристаллизационный слой будет иметь электропроводность *p*-типа. Таким образом, при образовании контакта к области кремния с электропроводностью *p*-типа примесь Al только увеличит концентрацию этой примеси; при образовании контакта к области кремния с электропроводностью *n*-типа, если ее концентрация будет меньше $5 \cdot 10^{18}$ атом/см³, диффундирующий в кремний Al изменит электропроводность кремния на *p*-тип и в данном месте образуется *p-n*-переход, т. е. выпрямляющий контакт. Эмиттерные области транзисторов *n-p-n*-типа в ИМС имеют концентрацию примесей обычно около 10^{21} атом/см³, что значительно больше $5 \cdot 10^{18}$ атом/см³, поэтому контакт к этой области будет невыпрямляющим. В месте контакта к коллекторной области, где концентрация примеси *n*-типа может быть ниже $5 \cdot 10^{18}$ атом/см³, необходимо создать локальный участок электропроводности *n*-типа. Операция сплавления должна выполняться при строгом соблюдении технологического режима, в противном случае могут появляться разрывы токоведущих дорожек из Al.

На основе изложенных методов разрабатывают технологические процессы изготовления ИМС.

Контрольные вопросы

1. Как классифицируют явления, процессы и методы по роду функционального использования в микроэлектронике?
2. Перечислите основные физические явления, процессы и методы, используемые в интегральной микроэлектронике.
3. Какие полупроводниковые материалы применяют в микроэлектронике?
4. Чем обусловлена электропроводность полупроводников?
5. Что такое основные и неосновные носители заряда в полупроводнике?
6. Какими процессами обусловлен перенос носителей заряда в полупроводниках?
7. Запишите выражение для составляющих электронного и дырочного токов в полупроводниках.
8. Что такое подвижность и коэффициент диффузии носителей заряда? От каких факторов они зависят?
9. Запишите уравнение непрерывности потока носителей заряда в полупроводнике и объясните его физический смысл.
10. От каких факторов зависит, будет ли контакт металл — полупроводник выпрямляющим или невыпрямляющим?
11. Как подразделяются *p-n*-переходы?
12. Запишите выражения для в.а.х. *p-n*-перехода.
13. Объясните образование обогащенных, обедненных и инверсных слоев в приповерхностном слое кремния.
14. Как влияет поверхностный заряд на свойства *p-n*-перехода?
15. Перечислите основные механизмы переноса носителей заряда в пленочных структурах.
16. Какие физико-химические методы используют для создания микроэлектронных структур?
17. В чем сущность метода эпитаксии и каково его назначение?
18. В чем сущность метода диффузии примесей и каково его назначение?
19. Что такое ионная имплантация? Где она применяется?
20. В чем сущность метода травления и каково его назначение?
21. Какими методами получают пленки в микроэлектронной технологии?
22. В чем сущность метода очистки поверхности полупроводниковых пластин?
23. Какие методы очистки применяют в технологии полупроводниковых пластин?
24. Каковы назначение и применение слоев двуокиси кремния в конструкции и технологии ИМС?
25. Как проводят фотолитографию в микроэлектронной технологии?
26. Что такое фотошаблон? Как классифицируют фотошаблоны?
27. Что такое фоторезист? Как подразделяют фоторезисты?
28. Какими методами осуществляют легирование полупроводников?
29. Как осуществляется локальная диффузия легирующих примесей?
30. Какие примеси используют для легирования полупроводников?

31. Как распределяется примесь в полупроводнике при диффузии?
32. Какие факторы и как влияют на параметры диффузионных слоев?
33. Как осуществляется ионное легирование полупроводников?
34. Какими факторами характеризуется ионное легирование?
35. Какие методы эпитаксиального наращивания полупроводниковых слоев используют в технологии ИМС?
36. Как проводят эпитаксию в промышленных условиях?
37. Какими факторами характеризуется процесс эпитаксиального наращивания?
38. Как создают внутрисхемные соединения в полупроводниковых ИМС?
39. Как осуществляется процесс металлизации?

Глава 3

ПОЛУПРОВОДНИКОВЫЕ ИНТЕГРАЛЬНЫЕ МИКРОСХЕМЫ

§ 3.1. Типовые конструкции и структура полупроводниковых ИМС

В конструктивном отношении полупроводниковая ИМС представляет собой полупроводниковый кристалл прямоугольной или квадратной формы, в объеме и на поверхности которого сосредоточены изолированные друг от друга элементы, соединенные согласно электрической схеме.

Обычно каждому элементу схемы соответствует локальная область полупроводникового материала, свойства и характеристики которой обеспечивают выполнение функций дискретных элементов (транзисторов, резисторов, конденсаторов и др.). Каждая локальная область, выполняющая функции конкретного элемента, требует изоляции от других элементов. Соединения между элементами согласно электрической схеме обычно выполняются с помощью напыленных на поверхность полупроводникового кристалла металлических проводников или высоко легированных полупроводниковых перемычек. Такой кристалл заключается в герметизированный корпус и имеет систему выводов для практического применения микросхемы. Таким образом, полупроводниковая ИМС представляет собой законченную конструкцию. Тип конструкции полупроводниковых ИМС определяется: полупроводниковым материалом; технологическими методами создания локальных областей и формирования в них элементов; методами изоляции elemen-

тов в кристалле; типом и структурой используемых транзисторов.

Большинство полупроводниковых ИМС изготавливают на основе монокристаллического кремния, хотя в отдельных случаях используют германий. Это объясняется тем, что кремний по сравнению с германием обладает рядом физических и технологических преимуществ, важных для создания элементов ИМС. Физические преимущества кремния по сравнению с германием проявляются в следующем:

кремний имеет большую ширину запрещенной зоны и меньшие обратные токи переходов, что уменьшает паразитные связи между элементами ИМС, позволяет создавать микросхемы, работоспособные при повышенных температурах (до $+120^{\circ}\text{C}$), и микромощные схемы, работающие при малых уровнях рабочих токов (менее 1 мкА);

кремниевые транзисторы имеют более высокое пороговое напряжение, а следовательно, логические схемы на этих транзисторах характеризуются большой статической помехоустойчивостью;

кремний характеризуется меньшей диэлектрической проницаемостью, что обуславливает меньшие значения барьерных емкостей переходов при той же их площади и позволяет увеличить быстродействие ИМС.

Наиболее важное технологическое преимущество кремния по сравнению с другими полупроводниковыми материалами связано со свойствами слоев двуокиси кремния, которые обладают хорошей адгезией к кремнию и сравнительно легко могут быть получены на поверхности кремниевой пластины путем ее окисления при высокой температуре ($1200 - 1300^{\circ}\text{C}$).

Слои двуокиси кремния играют значительную роль в технологии ИМС на основе кремния и используются:

в качестве маски при проведении процессов локальной диффузии примесей;

для защиты поверхности кристалла от влияния окружающей среды;

в качестве основания для металлической коммутации;

для диэлектрической изоляции элементов;

для изоляции затвора от канала в МДП-транзисторах с изолированным затвором;

в качестве диэлектрика пленочных конденсаторов.

Большими потенциальными возможностями с точки зрения физических особенностей работы микросхем обла-

дают арсенид галлия и другие полупроводниковые соединения. В промышленных условиях кремний наиболее широко используется для изготовления полупроводниковых ИМС. Поэтому основным типом полупроводниковых ИМС являются кремниевые.

Основными технологическими процессами изготовления полупроводниковых ИМС называют те, с помощью которых создаются локальные области в полупроводниковом материале и формируются переходы структуры и элементы схемы. К ним относятся локальная диффузия легирующих примесей в кремний, ионное легирование и эпитаксиальное наращивание монокристаллических слоев кремния на кремниевую пластину, имеющую противоположный тип электропроводности. В связи с этим все полупроводниковые ИМС по технологическим признакам подразделяют на две группы: ИМС, изготавливаемые с применением только процессов диффузии, и ИМС, при изготовлении которых сочетаются процессы эпитаксиального наращивания, диффузии и ионного внедрения примесей. Технологию изготовления микросхем первой группы называют *планарно-диффузионной*, а второй группы — *планарно-эпитаксиальной*.

Разновидностями этих технологий являются так называемые *совмещенная* и *изопланарная технологии*. При совмещенной технологии активные элементы ИМС изготавливают методами планарно-диффузионной или планарно-эпитаксиальной технологии в объеме полупроводникового материала, а пассивные — методами тонкопленочной технологии на поверхности кристалла.

Метод изоляции элементов также существенно влияет на конструкцию микросхемы. В полупроводниковых ИМС для изоляции элементов наиболее широко применяют следующие методы: изоляцию обратнo смещенными *p-n*-переходами; полную диэлектрическую изоляцию; комбинированную изоляцию (сочетание изоляции *p-n*-переходами и диэлектриком).

Основу конструкции полупроводниковых ИМС составляет транзисторная структура, которая является базовой для реализации всех входящих в схему активных и пассивных элементов.

В качестве базового элемента в полупроводниковых ИМС используют биполярные транзисторы, преимущественно с *n-p-n⁺*-типом электропроводности, изготавливаемые по планарно-диффузионной или планарно-эпитаксиальной технологии, и униполярные транзисторы с МДП-структурой

одного или двух типов электропроводности канала, изготавливаемые по планарной технологии.

Особенностью структуры полупроводниковых ИМС является то, что все элементы изготавливаются в едином технологическом процессе. Поэтому эпитаксиальные и диффузионные слои, образующие области различных элементов, имеют одинаковые параметры. Так, например, для создания резисторов используют обычно те слои, которые образуют эмиттер или базу биполярного транзистора, а для создания диодов и конденсаторов — те же переходы, что и в структуре транзистора. Поскольку транзисторная структура является наиболее сложной и определяющей в конструкции микросхемы, все предназначенные для реализации других элементов слои и переходы называются в соответствии с областями транзистора, независимо от того, в каком элементе они используются. Технологические методы и тип конструкции полупроводниковых ИМС обычно классифицируют по способам получения локальных областей и переходов транзисторной структуры и методам изоляции.

В зависимости от технологических методов и конструкции полупроводниковые ИМС подразделяют на:

- планарно-диффузионные с изоляцией элементов p - n -переходами;

- планарно-диффузионные с резистивной изоляцией элементов;

- планарно-эпитаксиальные с изоляцией элементов p - n -переходами;

- планарно-эпитаксиальные с диэлектрической изоляцией элементов;

- совмещенные;

- изопланарные с комбинированной изоляцией;

- металл — диэлектрик — полупроводниковые на транзисторах с одним типом электропроводности (МДП-ИМС);

- металл — диэлектрик — полупроводниковые на транзисторах с взаимодополняющими типами электропроводности (КМДП-ИМС).

В *планарно-диффузионных ИМС* элементы представляют собой области с различным типом электропроводности, созданные локальной диффузией легирующих примесей внутри монокристаллической пластины кремния. Эти элементы изолированы друг от друга либо обратным смещенным p - n -переходом, либо с помощью высокоомной пластины. Структура полупроводниковой ИМС с изолирующими p - n -переходами показана на рис. 3.1, а. Изолированные об-

ласти получают путем диффузии примеси в пластину с целью создания p - n -перехода. Эти области (обычно n -типа) являются либо коллекторами транзисторов, либо изолированными областями для других элементов. Структура такой ИМС создается методом тройной диффузии, т. е. путем последовательных трех процессов локальной диффузии, проводимых с одной стороны в однородно легированную высокоомную пластину кремния p -типа. *Планарно-диффузионные ИМС с резистивной изоляцией* отличаются тем, что в них элементы изолируются друг от друга с помощью

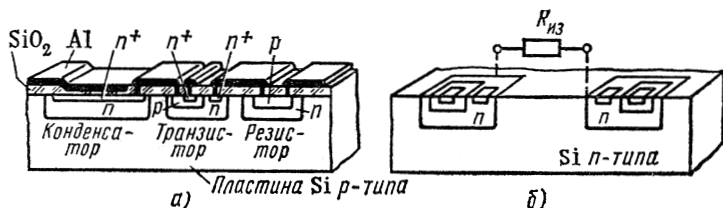


Рис. 3.1. Структура полупроводниковых ИМС планарно-диффузионного типа:

а — с изолирующими p - n -переходами; б — с резистивной изоляцией

высокоомного сопротивления материала самой пластины, включенного последовательно с элементами (рис. 3.1, б). Такая изоляция возможна при работе микросхемы на высоких частотах. Структура данного типа ИМС создается также методом тройной диффузии, однако используется пластина n -типа.

Планарно-эпитаксиальные ИМС аналогичны планарно-диффузионным. Однако их структуру создают методами эпитаксиального наращивания тонкого монокристаллического слоя кремния n -типа на относительно высокоомную пластину кремния p -типа и последовательной двойной локальной диффузии легирующих примесей в эпитаксиальный слой. Формирование локальных областей в полупроводниковом кристалле под элементы схемы определяется методом изоляции. Так, изоляция элементов p - n -переходами в планарно-эпитаксиальных ИМС достигается путем проведения односторонней селективной (разделительной) диффузии акцепторной примеси на всю толщину эпитаксиального слоя. При этом образуются локальные области эпитаксиального слоя с электропроводностью n -типа, окруженные со всех сторон изолирующими областями p -типа. Для формирова-

ния транзисторной структуры в этих областях используют только два последовательных процесса диффузии. Структура планарно-эпитаксиальной ИМС с изолирующими p - n -переходами показана на рис. 3.2, а.

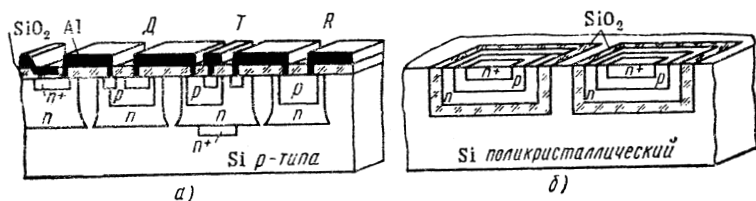


Рис. 3.2. Структура полупроводниковых ИМС планарно-эпитаксиального типа:

а — с изолирующими p - n -переходами; б — с диэлектрической изоляцией

Планарно-эпитаксиальные ИМС с диэлектрической изоляцией отличаются тем, что в них элементы изолируются друг от друга с помощью диэлектрического материала, как показано на рис. 3.2, б. В данном случае в качестве диэлектрического материала наиболее часто применяют слой двуокиси кремния, нитрида кремния, карбида кремния, иногда стекло, керамику и другие диэлектрики. Подложкой при этом служит поликристаллический кремний, сапфир или керамика.

Использование воздуха в качестве диэлектрика позволяет создавать микросхемы новой конструкции — ИМС с балочными выводами (рис. 3.3), в которых транзисторные структуры создают по планарно-эпитаксиальной технологии, а путем последовательного электроосаждения силицида платины, титана, платины и золота создают выводы и межэлементные соединения повышенной прочности. Металлические слои подвергают травлению в целях создания изолированных балочных выводов, которые обеспечивают электрическую и механическую связи между элементами схемы. Изолирование элементов в схеме осуществляют травлением

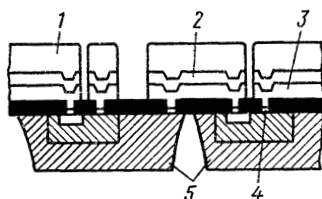


Рис. 3.3. Структура полупроводниковой ИМС с балочными выводами:

1 — золото; 2 — платина; 3 — титан; 4 — силицид платины; 5 — транзисторы

пластины на всю ее толщину. При этом конструкция микросхемы представляет собой изолированные островки с элементами, электрически и механически объединенными балочными выводами. Метод воздушной изоляции применяют также при создании ИМС на основе кремния на сапфире.

Из всех схем на биполярных транзисторах наибольшее распространение получили планарно-эпитаксиальные ИМС с изолирующими *p-n*-переходами и с диэлектрической изоляцией. Это объясняется тем, что планарно-эпитаксиальная структура транзистора имеет ряд преимуществ по сравнению с планарной как по электрическим параметрам, так и по технологии изготовления. Использование эпитаксиального слоя упрощает технологический процесс формирования транзисторной структуры (вместо трех при планарно-диффузионной технологии проводятся две диффузии), позволяет существенно улучшить параметры транзистора и микросхемы в целом (уменьшается средняя задержка и повышается помехоустойчивость). Что касается сравнения планарно-эпитаксиальных структур по методу изоляции, то ИМС с изолирующими переходами более технологичны, так как технология их проще. Однако изолирующие *p-n*-переходы таких ИМС должны находиться в состоянии обратного смещения, что достигается путем присоединения к пластине *p*-типа самого низкого отрицательного потенциала. Применение изолирующих *p-n*-переходов приводит к возникновению четырехслойных структур, появлению положительных обратных связей, что отрицательно влияет на работу схем и ограничивает их частотный диапазон. Кроме того, пробивное напряжение обратно пропорционально концентрации примесей изоляционных областей, которая в свою очередь должна быть минимальна во избежание слишком больших токов утечки.

Эти трудности в значительной степени снижаются в случае диэлектрической изоляции. Так, в микросхемах подобной конструкции, где в качестве диэлектрика используются слои двуокиси кремния, паразитные емкости и токи утечки уменьшаются на 1—2 порядка, а пробивные напряжения и быстродействие можно повысить в два раза. Применение в этих конструкциях других диэлектрических материалов позволяет значительно улучшить электрические и эксплуатационные параметры ИМС. Однако технология изготовления микросхем с диэлектрической изоляцией намного сложнее и дороже технологии микросхем с изолирующими *p-n*-переходами.

Совмещенные ИМС представляют собой конструкцию, в которой все активные элементы и по возможности часть пассивных создают по планарно-эпитаксиальной технологии с изоляцией p - n -переходами или диэлектриком, а все или часть пассивных элементов — по пленочной технологии путем нанесения резистивных, проводящих и диэлектрических пленок на поверхность микросхемы, покрытую слоем двуокиси кремния (рис. 3.4). В такой конструкции используются преимущества полупроводниковой и пленочной технологий.

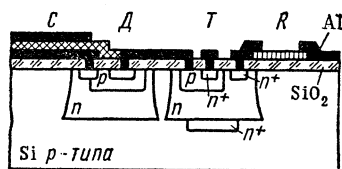


Рис. 3.4. Структура совмещенной ИМС

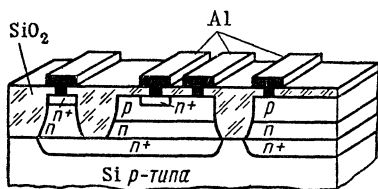


Рис. 3.5. Структура изопланарной ИМС с комбинированной изоляцией

Первостепенной задачей при конструировании полупроводниковых ИМС является увеличение плотности размещения элементов на кристалле при одновременном уменьшении их геометрических размеров и улучшении электрических характеристик. При этом важным является уменьшение площади изолирующих областей, занимающей в планарно-эпитаксиальных ИМС с изоляцией p - n -переходами и диэлектриком до 40% всей площади кристалла. Эффективным для решения данной задачи является применение комбинированной изоляции. Структура полупроводниковой ИМС с комбинированной изоляцией, изготовленной по изопланарной технологии, показана на рис. 3.5. При этом боковые поверхности транзисторных структур изолируют диэлектриком (толстым слоем двуокиси кремния), а нижние поверхности — p - n -переходами. Формирование элементов осуществляют по обычной планарно-эпитаксиальной технологии с использованием тонких эпитаксиальных слоев n -типа. Комбинированная изоляция позволяет существенно уменьшить площадь транзистора, увеличить быстродействие и значительно снизить паразитные емкости.

Конструкция ИМС на МДП-транзисторах представляет собой кремниевую пластину с электропроводностью

n- или *p*-типа, в которой по планарной технологии создают МДП-структуры, объединенные между собой согласно электрической схеме с помощью металлических проводников, напыленных на поверхность защитного слоя из двуокиси кремния. Наиболее распространены МДП-структуры с изолированным затвором, в которых диэлектриком служит двуокись кремния. Особенностью конструкции МДП-ИМС

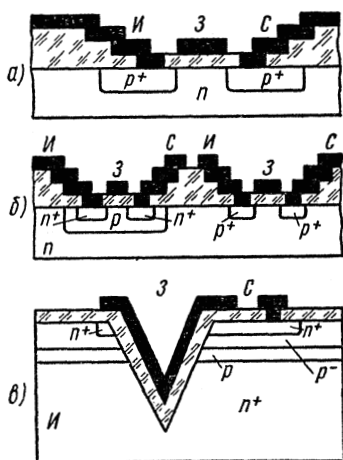


Рис. 3.6. Структура МДП-ИМС:

a — на однотипных транзисторах с каналом *p*-типа; *б* — на транзисторах с каналами взаимодополняющих типов электропроводности; *в* — на V-МОП-транзисторах

является использование только МОП-структур (МОП-транзисторы служат в качестве активных и пассивных элементов), отсутствие изоляции между отдельными структурами, применение для внутрисхемных соединений как металлизированных пленочных проводников, так и высоколегированных диффузионных областей. Получили распространение ИМС на МДП-транзисторах с индуцированными каналами *n*- и *p*-типов, а также ИМС на МДП-транзисторах с каналами взаимодополняющих типов электропроводности (КМДП-ИМС), конструкции которых показаны на рис. 3.6, *a*, *б*. Повышение плотности упаковки МДП-ИМС

и их быстродействия достигается при использовании в качестве основного элемента МОП-транзисторов с малой длиной канала, размещенного в V-образных углублениях, получаемых анизотропным травлением кремния (V-МОП-транзисторов). ИМС на основе V-МОП-транзисторов (рис. 3.6, *в*) являются наиболее перспективными среди МДП-ИМС высокой степени интеграции.

Следует отметить, что конструкция МДП-ИМС обеспечивает большие плотность элементов и функциональную плотность, чем конструкция ИМС на биполярных транзисторах. Это объясняется следующим: площадь, занимаемая МОП-транзистором на кристалле, на два порядка меньше площади под биполярный транзистор; при использовании МДП-структур не требуется изоляция между элемента-

ми; для биполярного транзистора требуются три контакта металл — кремний, в то время как для МДП-транзистора — только два. Дальнейшее конструктивное оформление полупроводниковых ИМС определяется способом герметизации и типом применяемого корпуса.

§ 3.2. Биполярные транзисторы

Для всех конструктивно-технологических групп ИМС основными и наиболее сложными элементами являются транзисторы. Полупроводниковые ИМС разрабатывают на основе биполярных и МДП-транзисторов и их модификаций, которые создаются в процессе изготовления микросхемы. В последнее время в ИМС применяют быстродействующие транзисторы с барьером Шоттки, многоэмиттерные, многоколлекторные и микромощные транзисторы. Большинство биполярных транзисторов изготавливают по планарной технологии со структурой $n-p-n^+$ -типа, хотя в некоторых случаях используют и транзисторы $p-n-p$ -типа. Транзисторы $n-p-n^+$ -типа (коллектор — база — эмиттер) имеют улучшенные электрические характеристики по сравнению с транзисторами $p-n-p$ -типа, что обусловлено рядом физических и технологических факторов.

Так, для обеспечения в транзисторе максимального значения коэффициента передачи тока α необходимо, чтобы интегральный коэффициент эффективности эмиттера $\gamma \rightarrow 1$. Это возможно при условии, если эмиттер будет легирован намного сильнее базы, причем концентрация примеси в эмиттере должна быть по возможности максимальной. Поскольку базовые и эмиттерные области транзисторов формируются диффузией, а предельная растворимость фосфора в кремнии выше растворимости бора, именно диффузию фосфора применяют для создания высоколегированной эмиттерной области n^+ -типа. Кроме того, в транзисторах $n-p-n^+$ -типа неосновными носителями заряда в базе являются электроны. Подвижность электронов при одинаковой температуре и концентрации примеси в кремнии приблизительно в два раза превышает подвижность дырок. Следовательно, необходимо, чтобы база транзистора была p -типа. При этом время пролета носителей заряда через базу у кремниевых транзисторов $n-p-n^+$ -типа меньше, чем у транзисторов $p-n-p$ -типа. В полупроводниковых ИМС структура биполярного транзистора определяет структуру остальных элементов, так как все элементы, как пассивные, так и активные, формируются на основе транзисторной структуры. Причем параметры транзисторов являются определяющими для параметров других элементов.

Область применения транзисторов и выполняемые ими функции в ИМС определяются совокупностью электриче-

ских статических и динамических параметров и характеристик, которыми характеризуются транзисторы в зависимости от схемы включения и режима работы. Конкретные значения электрических параметров зависят от структурных параметров транзисторов, т. е. параметров физической структуры: геометрических размеров структуры (глубина залегания коллекторного и эмиттерного переходов, конфигурация и размеры областей эмиттера, коллектора и т. д.), и электрофизических характеристик материала структурных областей (профиль примесного распределения, подвижность, время жизни носителей заряда и др.). Определяющее влияние на основные характеристики транзисторов — усиленные и частотные — оказывают характер примесного распределения в структурных областях и способ изоляции транзисторных структур.

Формирование структуры транзистора и его изоляция определяются технологическим процессом изготовления, а электрофизические параметры структуры, в том числе профиль примесного распределения, — способом проведения технологических операций и их режимами.

Транзисторы классифицируют по способу изоляции и технологии изготовления (характеру примесного распределения), как это принято в классификации структур полупроводниковых ИМС. По способу изоляции различают структуры, изолированные *p-n*-переходом, диэлектрическим слоем и их комбинацией. По технологии изготовления независимо от способа изоляции транзисторы подразделяются на планарно-диффузионные, планарно-эпитаксиальные и изопланарные.

Планарно-эпитаксиальные транзисторы. Наиболее экономичной при массовом производстве ИМС является планарно-эпитаксиальная технология с изоляцией элементов *p-n*-переходом. Поэтому планарно-эпитаксиальные транзисторы являются наиболее распространенными для построения различных микросхем. Кроме того, транзисторы, изготовленные по планарно-эпитаксиальной технологии, обладают улучшенными параметрами и характеристиками по сравнению с планарно-диффузионными. Следует отметить, что планарно-эпитаксиальная технология помимо основных видов с изоляцией элементов *p-n*-переходом и диэлектриком имеет несколько модификаций; среди них наиболее перспективными считаются изопланарный процесс и технологический процесс, в котором изоляция элементов осуществляется при диффузии коллектора.

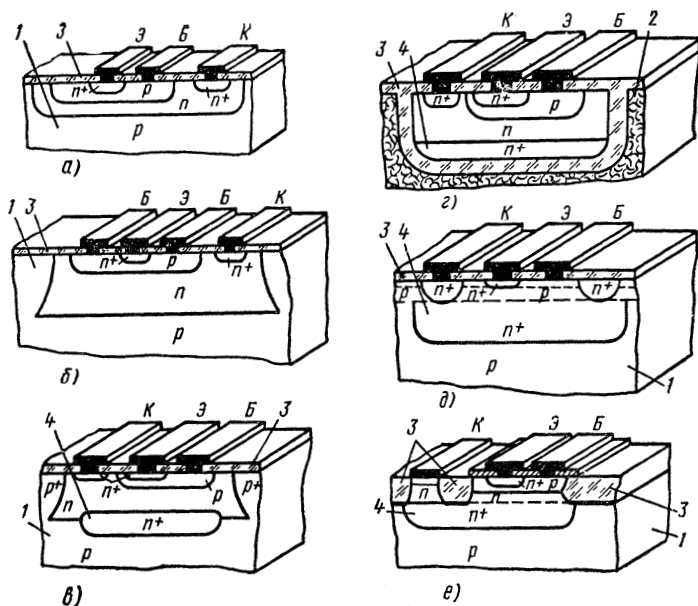


Рис. 3.7. Структуры планарно-диффузионных и планарно-эпитаксиальных транзисторов:

1 — пластина кремния; 2 — поликристаллический кремний; 3 — окисел кремния; 4 — скрытый n^+ -слой

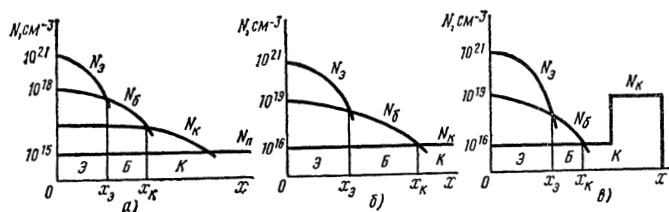


Рис. 3.8. Распределение атомов легирующих примесей в структурных областях планарно-диффузионного (а) и планарно-эпитаксиального транзисторов (б, е); концентрация:

N_K — донорной примеси в коллекторе; N_6 — акцепторной примеси в базе; N_3 — донорной примеси в эмиттере; x_3 , x_K — глубина залегания эмиттерного и коллекторного переходов

На рис. 3.7 приведены структуры транзисторов, наиболее широко используемых в ИМС и изготовленных с помощью планарно-диффузионной и различных модификаций планарно-эпитаксиальной технологии, а на рис. 3.8 — рас-

пределение атомов легирующих примесей для основных структур транзисторов — планарно-диффузионной и планарно-эпитаксиальной.

Планарно-диффузионные транзисторы с изоляцией p - n -переходом (рис. 3.7, а) изготавливают путем последовательного проведения локальной диффузии легирующих примесей для формирования коллекторной, базовой и эмиттерной областей (тройная диффузия) в пластину p -типа. Изолирующий p - n -переход создается в процессе формирования коллекторной диффузионной области. Особенностью планарно-диффузионных транзисторов является неравномерное распределение концентрации примеси в коллекторной области (рис. 3.8, а), а следовательно, неравномерное сопротивление тела коллектора, достигающее больших значений. Это проявляется в низком пробивном напряжении перехода коллектор — подложка и сильном влиянии подложки на электрические параметры данных транзисторов, что ограничивает их применение.

Планарно-эпитаксиальные транзисторы (рис. 3.7, б) изготавливают методом двойной диффузии. При этом базовая и эмиттерная области формируются локальной диффузией примесей в эпитаксиальный n -слой, предварительно выращенный на пластине кремния p -типа и являющийся коллектором, а изоляция p - n -переходом осуществляется локальной разделительной диффузией на всю глубину эпитаксиального слоя, по всему периметру транзистора перед формированием базовой и эмиттерной областей. Такие транзисторы имеют равномерное распределение примеси в коллекторе (рис. 3.8, б).

Для уменьшения сопротивления тела коллектора и степени влияния подложки в планарно-эпитаксиальных транзисторах создают скрытый n^+ -слой в коллекторе (рис. 3.7, в). Его получают дополнительной локальной диффузией донорной примеси, которая предшествует эпитаксиальному наращиванию. Наличие скрытого слоя связано с неравномерным распределением примесей в коллекторе (рис. 3.8, в), что приводит к образованию внутреннего статического электрического поля. Это поле тормозит движение неосновных носителей заряда (дырок), инжектированных из базы в коллектор в режиме насыщения. При наличии скрытого слоя избыточные неосновные носители заряда в режиме насыщения накапливаются в относительно высокоомной области коллектора, прилегающей к переходу коллектор — база. При этом подложка слабо влияет на распре-

деление неосновных носителей в коллекторе, а следовательно, на параметры транзистора.

Планарно-эпитаксиальные транзисторы с диэлектрической изоляцией (рис. 3.7, *г*) изготавливают путем локальной диффузии для формирования базовой и эмиттерной областей в специальные «карманы» — локализованные однороднолегированные n -области, предварительно изолированные друг от друга и поликристаллической подложки слоем диэлектрика, чаще всего — окислом кремния. Распределение примесей в таких транзисторах аналогично распределению у планарно-эпитаксиальных транзисторов с изоляцией p - n -переходом. Однако для данной структуры характерны малые потери в изоляции, минимальные значения удельного сопротивления коллекторной области, повышенные частотные свойства.

В транзисторах, изготовленных по технологии изолирующей диффузии коллектора, изолирующий p - n -переход создается глубокой диффузией примеси n -типа сквозь тонкий эпитаксиальный p -слой до смыкания со скрытым n^+ -слоем. Образовавшаяся замкнутая n -область является коллектором, а расположенная внутри нее p -область — базой транзистора, эмиттер создается локальной диффузией примеси n -типа в базовую область (рис. 3.7, *д*). Особенностью таких транзисторов является низкое удельное сопротивление коллекторной области, повышенный коэффициент усиления в инверсном режиме и пониженное напряжение пробоя коллекторного перехода.

В транзисторах, изготовленных по изопланарной технологии, изоляция достигается глубоким окислением эпитаксиального слоя кремния n -типа до смыкания окисла со скрытым слоем n^+ -типа. Часть эпитаксиального слоя, предварительно защищенная нитридом Si_3N_4 , не подвергается окислению и служит коллекторной областью, в которой последовательной локальной диффузией формируются p -базовая и эмиттерная n^+ -области (рис. 3.7, *е*). В результате создаются планарно-эпитаксиальные транзисторы с комбинированной изоляцией: окислом и p - n -переходом.

Независимо от способа изготовления и изоляции для планарно-эпитаксиальных транзисторов специфичным является неравномерное распределение примесей в базовых и эмиттерных областях, характер которого определяет основные параметры и свойства транзисторов. После формирования структуры транзистора распределение диффундирующей примеси в каждой структурной области имеет вид,

показанный на рис. 3.8. При этом распределение примеси в базовой области подчиняется функции Гаусса, а в эмиттерной оно близко к функции $\exp$. Однако на основные параметры транзистора определяющее влияние оказывает характер результирующего примесного распределения, определяемого как

$$N_{\text{рез}}(x) = |N_d(x) - N_a(x)|, \quad (3.1)$$

где $N_d(x) = N_a(x) + N_k$ — концентрация донорной примеси; $N_a(x) = N_b(x)$ — концентрация акцепторной примеси.

В точках эмиттерного x_a и коллекторного x_k металлургических переходов результирующая концентрация примесей равна нулю:

$$N_{\text{рез}}(x) = |N_d(x) - N_a(x)| \Big|_{x=x_a, x_k} = 0. \quad (3.2)$$

Такое неравномерное распределение результирующей примеси приводит к возникновению в транзисторной структуре внутренних статических электрических полей, напряженность которых определяют решением уравнения плотности токов для каждой структурной области.

В эмиттерной области, где основными носителями заряда являются электроны, обусловленные ионизированными атомами донорной примеси, возникает внутреннее статическое поле, напряженность которого

$$E_a(x) = -\frac{kT}{q} \frac{1}{N_{\text{рез}}(x)} \frac{dN_{\text{рез}}(x)}{dx}, \quad (3.3)$$

где $0 \leq x \leq x_a$.

Вектор напряженности этого поля направлен к эмиттерному переходу, и поле является тормозящим для неосновных носителей заряда (дырок), инжектируемых эмиттерным переходом из базы в эмиттер.

В базовой области, где основными носителями заряда являются дырки, напряженность внутреннего статического поля

$$E_b(x) = \frac{kT}{q} \frac{1}{N_{\text{рез}}(x)} \frac{dN_{\text{рез}}(x)}{dx}, \quad (3.4)$$

где $x_a \leq x \leq x_k$.

Однако функция $E_b(x)$ является знакопеременной, поскольку производная $\frac{dN_{\text{рез}}(x)}{dx}$ на участке $x_a - x_k$ меняет свой знак, поэтому вектор напряженности электрического

поля характеризуется двумя взаимно противоположными направлениями. На участке $x_3 \leq x \leq x_T$ он направлен от эмиттерного перехода. Величина $\delta = x_T - x_3$ представляет собой участок базовой области, на котором внутреннее статическое поле тормозит неосновные носители заряда, инжектируемые в базу. На участке же $x_K - x_T$ поле является ускоряющим. Наличие в планарно-эпитаксиальной структуре транзистора внутренних статических полей не только определяет характер (механизм) переноса носителей заряда, но и количественно влияет на основные его параметры.

Следует отметить, что планарно-эпитаксиальный транзистор с изолирующим p - n -переходом в общем виде представляет собой четырехслойную n^+ - p - n - p -структуру, которую можно представить как соединение транзисторов: основного n^+ - p - n и паразитного p - n - p . Однако в реальных структурах коэффициент передачи тока через слой коллектора в подложку весьма мал ($\alpha_n \approx 0,01$), поэтому планарно-эпитаксиальный транзистор можно рассматривать как n^+ - p - n -транзистор, к коллектору которого подключена усредненная паразитная емкость изолирующего p - n -перехода C_n . Этой же модели соответствуют и транзисторы, изолированные слоем диэлектрика. Основными параметрами, характеризующими работу транзистора в статическом и переходном режимах, являются коэффициент усиления тока транзистора в прямом B и инверсном B_1 режимах, а также параметры входной и выходных характеристик. Величина B определяется в основном коэффициентом инжекции эмиттерного перехода, который при больших токах инжекции, когда можно пренебречь током рекомбинации в эмиттерном переходе, равен

$$\gamma = \frac{I_n}{I_3} = \frac{I_n}{I_n + I_p} = \frac{1}{1 + (I_p/I_n)}, \quad (3.5)$$

где I_n — ток инжекции электронов в базу; I_p — ток инжекции дырок из базы в эмиттер; I_3 — полный ток эмиттера.

Токи I_n и I_p , а следовательно, и коэффициент γ определяются решением уравнений непрерывности для базовой и эмиттерной структурных областей транзистора с учетом значений $E_3(x)$ и $E_6(x)$. Планарно-эпитаксиальные транзисторы обладают малым (не более 0,3) инверсным коэффициентом усиления B_1 . Это объясняется тем, что концентрация примесей в коллекторе вблизи коллекторного перехода значительно меньше, чем концентрация примесей в базе по другую сторону этого перехода. Следовательно, коэф-

коэффициент инжекции коллекторного перехода будет низким, что обуславливает и низкое значение B_1 .

Важнейшими статическими характеристиками транзисторов в режиме насыщения являются входная (базовая) и выходные характеристики. Напряжение насыщения $U_{\text{кн}}$ транзистора снижается с ростом B_1 и уменьшением $r_{\text{к}}$. Особенностью планарных транзисторов является расположение контактов к основным областям в одной плоскости на поверхности транзистора, что обуславливает значительное распределение сопротивления тела коллектора $r_{\text{к}}$. Наиболее эффективным способом уменьшения $r_{\text{к}}$ является создание в коллекторе скрытого n^+ -слоя и введение доноров под коллекторный контакт в процессе формирования эмиттера. Некоторое уменьшение напряжения $U_{\text{кн}}$ может быть достигнуто при использовании двух выводов коллектора, один из которых подсоединяется к нагрузке, а другой является выходным.

Таким образом, величина остаточного напряжения на транзисторе в режиме насыщения $U_{\text{кн}}$ зависит от трех параметров: B , B_1 и $r_{\text{к}}$, которые в свою очередь определяются параметрами структуры и режимом работы транзистора.

Частотные свойства транзистора определяются в основном временем пролета неосновных носителей заряда через базу $\tau_{\text{пр}}$ и емкостями эмиттерного $C_{\text{э}}$ и коллекторного $C_{\text{к}}$ переходов. Время пролета носителей заряда через базу определяют как время накопления заряда инжектированных электронов Q у коллекторного перехода:

$$\tau_{\text{пр}} = \frac{Q}{I_{\text{п}}} = \frac{q}{I_{\text{п}}} \int_0^{W_{\text{б}}} n(x) dx, \quad (3.6)$$

где $n(x)$ — распределение инжектированных электронов в базе; $W_{\text{б}}$ — ширина базы.

Емкости коллекторного и эмиттерного переходов определяются площадью переходов и шириной области объемного заряда, которая зависит от градиента концентрации примеси и приложенного к переходу напряжения:

$$C_{\text{к}} = S_{\text{к}} \left[\frac{q (\epsilon \epsilon_0)^2}{12 (\varphi_{\text{кк}} - U_{\text{к}})} \left| \frac{dN_{\text{рез}}(x)}{dx} \right|_{x=x_{\text{к}}} \right]^{1/3}, \quad (3.7)$$

$$C_{\text{э}} = S_{\text{э}} \left[\frac{q (\epsilon \epsilon_0)^2}{12 (\varphi_{\text{кэ}} - U_{\text{к}})} \left| \frac{dN_{\text{рез}}(x)}{dx} \right|_{x=x_{\text{э}}} \right]^{1/3}. \quad (3.8)$$

Здесь S_K , S_a — площади коллекторного и эмиттерного переходов; Φ_{KK} , $\Phi_{KЭ}$ — контактные разности потенциалов коллекторного и эмиттерного переходов.

Как видно из выражений (3.7), (3.8), емкости C_K и C_a пропорционально зависят от градиента концентрации результирующей примеси, величина которого определяет и другие свойства транзисторов. Для получения минимальных значений C_K и C_a транзисторы изготавливают с малой площадью, для которых граничная частота усиления $f_{гр} = 500 \div 1000$ МГц.

Характер распределения $N_{рез}(x)$ оказывает существенное влияние и на предельные значения некоторых параметров транзистора. Так, *напряжение пробоя коллекторного перехода* $U_{K.пр}$ зависит от ряда факторов (кривизны перехода, величины заряда на поверхности), но определяющим является градиент концентрации примеси. В первом приближении

$$U_{K.пр} = 1,71 \cdot 10^9 \left| \frac{dN_{рез}(x)}{dx} \right|_{x=x_K}^{-0,364}, \quad (3.9)$$

откуда следует, что снижение $\frac{dN_{рез}(x)}{dx}$ приводит к повышению напряжения пробоя.

Отметим, что напряжение пробоя эмиттерного перехода определяется аналогичной зависимостью. Но так как

$$\left. \frac{dN_{рез}(x)}{dx} \right|_{x=x_a} > \left. \frac{dN_{рез}(x)}{dx} \right|_{x=x_K}, \text{ то } U_{a.пр} < U_{K.пр}.$$

Напряжение смыкания базы $U_{KБ.с}$, характеризующее напряжение, при котором область объемного заряда эмиттерного перехода смыкается с областью объемного заряда коллекторного перехода, для планарно-эпитаксиальных транзисторов ($W_6/\delta \gg 1$) также определяется градиентом концентрации результирующей примеси в базовой области на участке ускоряющего поля:

$$U_{KБ.с} = \frac{2q}{3\epsilon\epsilon_0} \frac{dN_{рез}(x)}{dx} W_6, \quad (3.10)$$

где ϵ — диэлектрическая проницаемость кремния.

Важным параметром, характеризующим быстродействие транзистора, является *время рассасывания избыточного заряда в коллекторе* t_p при переходе транзистора из режима насыщения в режим отсечки.

Для уменьшения t_p проводят дополнительную диффузию золота в готовую структуру транзистора.

Отметим, что на параметры планарно-эпитаксиальных транзисторов существенное влияние оказывает подложка, которая в транзисторах, изолированных p - n -переходом, действует как паразитный транзистор. Наименьшее влияние подложки наблюдается у транзисторов, изолированных слоем окисла.

Таким образом, параметры планарно-эпитаксиальных транзисторов определяются в основном распределением концентрации результирующей примеси в структурных областях, причем характер влияния $N_{рез}(x)$ на отдельные параметры противоречивый. Поэтому при разработке транзисторов с требуемыми параметрами и характеристиками необходима оптимизация $N_{рез}(x)$ и глубины залегания переходов, т. е. оптимизация $\frac{dN_{рез}(x)}{dx}$.

Для наиболее распространенных в ИМС транзисторов, изготовленных по планарно-эпитаксиальной технологии с изоляцией p - n -переходом и слоем окисла и легированных золотом, при $T = +25^\circ\text{C}$ основные параметры следующие: $U_{э0} = 0,7 \pm 0,1\text{ В}$; $U_{эз} = 0,55 \pm 0,1\text{ В}$; $r_б = 50 \div 200\text{ Ом}$; $r_к = 5 \div 20\text{ Ом}$; $B = 20 \div 50$; $B_1 = 0,1 \div 0,3$; $\tau_{пр} \approx 0,5\text{ нс}$; $t_p = 20 \div 50\text{ нс}$; $C_э, C_к = 1 \div 10\text{ пФ}$; $U_{к.пр} = 30 \div 50\text{ В}$; $U_{э.пр} = 5 \div 7\text{ В}$. Для транзисторов, изготовленных по технологии изолирующей диффузии коллектора, $B_1 = 3 \div 5$; $U_{к.пр} = 6 \div 8\text{ В}$, а по изопланарной технологии $U_{к.пр} = 10\text{ В}$. Значения остальных параметров соответствуют приведенным ранее.

Транзисторы с барьером Шоттки. Важным параметром переключающих транзисторов, работающих в цифровых и ключевых схемах, является время рассасывания t_p , которое характеризует длительность фронта выключения импульса коллекторного тока при переходе транзистора из режима насыщения в режим отсечки. Когда планарно-эпитаксиальный транзистор находится в режиме насыщения, в базовой и высокоомной коллекторной областях накапливается заряд неосновных носителей. При подаче запирающего импульса базового тока неосновные носители рассасываются в течение некоторого времени за счет вытекания в базовый и коллекторный контакты и рекомбинации. Это время, необходимое для рассасывания неосновных носителей заряда, составляет 10—100 нс и является серьезным ограничением при разработке быстродействующих ИМС.

Для уменьшения времени рассасывания транзисторы легируют золотом, создавая тем самым дополнительные центры рекомбинации. Однако этот метод нетехнологичен (требуются дополнительные напыление и отжиг), связан с дополнительным расходом золота и не всегда дает воспроизводимые результаты. Кроме того, легирование золотом уменьшает время жизни неосновных носителей заряда в базе, что заметно снижает коэффициент усиления B (в некоторых случаях в 2—3 раза), а также уменьшает время жизни носителей заряда в коллекторном переходе и тем самым почти на порядок увеличивает обратный ток I_{K0} . Другим методом снижения времени рассасывания t_p является шунтирование коллекторного перехода диодом с p - n -переходом, предотвращающим смещение коллектора в прямом направлении. Однако при этом в самом диоде накапливается избыточный заряд, а структура ИМС усложняется.

Наиболее перспективным методом снижения t_p является использование диодов с барьером Шоттки, шунтирующих коллекторный переход. Диод Шоттки в интегральном исполнении представляет собой контакт металла с высокоомным полупроводником n -типа, в качестве которого используется коллекторная область транзистора. При соответствующей очистке поверхности полупроводника на границе полупроводник — металл возникает обедненный слой и образуется барьер Шоттки. Такой контакт обладает выпрямляющими свойствами и работает как диод. По сравнению с диодом на p - n -переходе диод Шоттки характеризуется низкими значениями падения напряжения в открытом состоянии (около 0,35—0,45 В) и временем выключения, которое обычно не превышает 0,1 нс.

При включении диода Шоттки параллельно коллекторному переходу транзистора ограничивается степень насыщения транзистора. При интегральном исполнении транзистор и диод составляют единую структуру, которую называют *транзистором с барьером Шоттки*.

На рис. 3.9 показаны структура (а) и схема (б) транзистора с барьером Шоттки, изготовленного по планарно-эпитаксиальной технологии с изоляцией p - n -переходом. Структура представляет собой обычный планарно-эпитаксиальный транзистор n - p - n^+ -типа, в котором металлический контакт базы расширен в коллекторную область. Диод Шоттки образуется в месте контакта металла с высокоомным полупроводником коллекторной n -области. Таким образом,

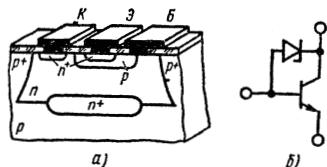


Рис. 3.9. Структура (а) и схема (б) транзистора с барьером Шоттки

технологически изготовление транзистора с барьером Шоттки не требует дополнительных операций. Площадь, занимаемая этим транзистором, практически незначительно превышает площадь обычного транзистора. Аналогично можно создавать транзисторы с барьером Шоттки для различных типов ИМС, используя технологию с изоляцией слоем окисла или изопланарную технологию.

По принципу действия транзистор с барьером Шоттки отличается от обычного планарно-эпитаксиального транзистора тем, что при переходе к режиму насыщения в нем отсутствует инжекция неосновных носителей из коллектора в базу, а также нет накопления заряда в области коллектора.

Транзисторы с барьером Шоттки характеризуются большим коэффициентом усиления (так как они не легируются золотом), малым инверсным коэффициентом усиления и высоким быстродействием ($t_p \approx 0$). Однако для них характерны повышенное падение напряжения в режиме насыщения ($U_{кш} \leq 0,4В$) и увеличенная емкость коллекторного перехода ($C_{кш} = C_k + C_{дш}$). Это несколько ухудшает параметры ИМС, однако выигрыш по быстродействию при использовании транзисторов с барьером Шоттки является определяющим. Следует отметить, что основным требованием, предъявляемым к транзисторам с барьером Шоттки, является получение контакта металл — полупроводник, обладающего большим током через контакт при прямом смещении, чем ток через коллекторный переход. Кроме того, характеристики барьера Шоттки $Al - Si - n$ очень чувствительны к технологическому процессу металлизации алюминием и на практике имеют определенный разброс по $I_{дш}$ и, следовательно, по t_p . Поэтому для получения высококачественного барьера Шоттки в технологический планарно-эпитаксиальный процесс вводят дополнительные операции: специальную очистку поверхности кремния после вскрытия окон в окисле, напыление и сплавление платины или молибдена под контакт металл — полупроводник. Такое усложнение технологии позволяет получать быстродействующие транзисторы с барьером Шоттки с воспроизводимыми параметрами, которые успешно применяются в быстродействующих цифровых ИМС.

Многоэмиттерные транзисторы. Специфическим элементом некоторых ИМС, в частности логических типа ТТЛ, является *многоэмиттерный транзистор* (МЭТ), представляющий собой полупроводниковый прибор, содержащий

коллектор и M эмиттеров, объединенных одним базовым слоем. Структура многоэмиттерного транзистора, изготовленного по планарно-эпитаксиальной технологии с изоляцией p - n -переходом, приведена на рис. 3.10. Такие транзисторы получают в едином технологическом процессе изготовления обычных планарно-эпитаксиальных транзисторов. Поэтому транзисторы обоих типов имеют одинаковое распределение примесей в коллекторе, базе и эмиттере, одинаковые удельные емкости переходов и свойства коллекторов. Различие заключается в площадях коллекторных и эмиттерных переходов и числе эмиттеров, а также в конфигурации и взаимном расположении контактов.

Структура многоэмиттерного транзистора представляет собой совокупность M транзисторных n - p - n^+ -структур, имеющих общий коллектор. Под каждым из эмиттерных переходов расположены активные базовые области этих транзисторных

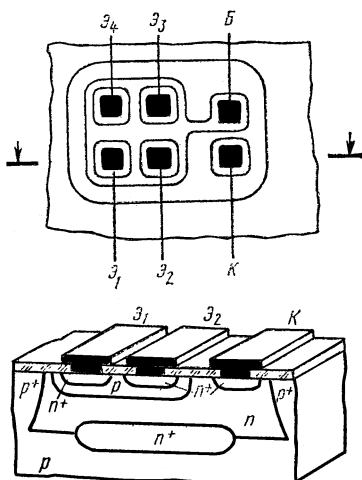


Рис. 3.10. Структура многоэмиттерного транзистора

структур, а вне этих переходов базовая область пассивна. Связь между соседними эмиттерами осуществляется через соединяющий их участок пассивной области базы только за счет основных носителей заряда. Поэтому коэффициенты передачи тока между соседними эмиттерами малы и не зависят от расстояния между эмиттерами. Минимальные расстояния между эмиттерами определяются не обеспечением малых коэффициентов связи, а технологическими возможностями. Это позволяет создавать компактные структуры многоэмиттерных транзисторов.

Для уменьшения входных токов необходимо, чтобы многоэмиттерный транзистор имел низкий инверсный коэффициент усиления B_1 . Это достигается увеличением расстояния между контактом базы и эмиттерными областями (рис. 3.10), благодаря чему сопротивление r_b повышается до нескольких сотен см, а инверсный коэффициент усиления

снижается до $B_1 = 0,001 \div 0,005$. Очень часто с этой целью многоэмиттерный транзистор делают с барьером Шоттки.

Многоколлекторные транзисторы. Структура *многоколлекторного транзистора* (МКТ) *n-p-n*-типа не отличается от структуры МЭТ. Различие состоит лишь в ее использовании. При включении МКТ в электрическую схему эмиттером является эпитаксиальный *n*-слой, а коллекторами — высоколегированные n^+ -области. Наибольший практический интерес представляют МКТ с инжекционным питанием, которые составляют основу одного из самых распространенных классов цифровых БИС — И²Л (инжекционная

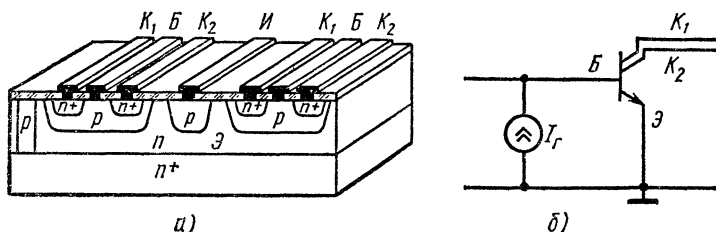


Рис. 3.11. Структура (а) и схема (б) многоколлекторного транзистора с инжекционным переходом

интегральная логика). Двухколлекторная структура МКТ с инжекционным питанием и его эквивалентная схема показаны на рис. 3.11, а, б. Такие транзисторы состоят из многоколлекторного переключающего транзистора *n-p-n*-типа, имеющего вертикальную структуру, и инжекторного продольного транзистора *p-n-p*-типа. Различают структуры МКТ с боковым или вертикальным (как показано на рис. 3.11, а) и продольным или горизонтальным инжекторами.

Особенностью МКТ с инжекционным питанием является то, что *p*-область инжектора является общей для многих вертикальных транзисторов, а количество коллекторов определяется в основном технологическими возможностями и составляет 2, 3, 4, 5 и более.

При работе область инжектора подключают к плюсу источника питания через токозадающий резистор. Подложку n^+ -типа и высокоомную *n*-область, которая является общей эмиттерной областью всех вертикальных МКТ, подключают к шине «земля». Высокоомный *n*-слой является одновременно и базовой областью продольных транзисторов *p-n-p*-типа. Диффузионный *p*-слой является базой переключающего МКТ и одновременно коллектором продольно-

го транзистора; к нему с трех боковых сторон (кроме стороны, обращенной к инжектору) примыкают разделительные n^+ -области. Вывод от базовой p -области является входом ключа, а выводы от коллекторных n^+ -областей — его выходами (см. эквивалентную схему рис. 3.11, б).

В основе принципа действия МКТ лежат те же физические процессы, что и в обычных биполярных транзисторах: инжекция носителей заряда через прямо смещенные переходы, дрейфовое и диффузионное их перемещение в базовых областях и коллектирование их переходами. Так, в МКТ инжекторный переход всегда смещен в прямом направлении. Это приводит к накоплению дырок в базе переключающего транзистора p - n - p -типа, что эквивалентно смещению эмиттерного перехода этого транзистора в прямом направлении.

Структуры МКТ отличаются формой и размерами основных областей (инжектора, эмиттера, базы, коллекторов), их взаимным расположением, технологией формирования, наличием вспомогательных областей, используемых для изоляции, и др. Основными статическими параметрами МКТ с инжекционным питанием являются нормальные и инверсные коэффициенты усиления тока инжекторного транзистора p - n - p -типа и переключающего МКТ n - p - n -типа, а также тепловые обратные токи инжекторного, эмиттерного и коллекторного переходов.

Важнейшими статическими характеристиками таких транзисторов являются передаточные характеристики по напряжению $U_{кэ} = f(U_{бэ})|_{I_{н}=\text{const}}$ и по току $I_{к} = f(I_{б})|_{I_{н}=\text{const}}$, определяемые в цепочке последовательно соединенных транзисторов. Средняя задержка, которая характеризует длительность переходных процессов переключения, зависит от тока инжекторов и составляет 5—15 нс.

В последнее время структуру МКТ с инжекционным питанием дополняют диодами с барьером Шоттки, что позволяет повысить их быстродействие.

§ 3.3. МДП-транзисторы

Наряду с биполярными транзисторами в полупроводниковых ИМС успешно применяют МДП-транзисторы, которые по принципу действия относятся к полевым приборам. Их работа основана на модуляции сопротивления (проводимо-

сти) слоя полупроводникового материала поперечным электрическим полем. При этом ток между истоком и стоком переносится основными носителями заряда под действием продольного электрического поля, а управление величиной этого тока осуществляется поперечным электрическим полем, создаваемым напряжением, приложенным к управляющему электроду — затвору. В отличие от биполярных полевых транзисторов не имеют усиления по току. Они являются активными элементами, обеспечивающими усиление по мощности и напряжению, их характеристики зависят от структуры и приложенных напряжений, а принцип действия основан на эффекте поля.

Известны две разновидности полевых приборов: *транзисторы с управляющим р-п-переходом и транзисторы с изолированным затвором, или МДП-транзисторы*. В технике ИМС применяют в основном МДП-транзисторы, изготавливаемые по планарной технологии. Области истока и стока планарных МДП-транзисторов формируют локальной диффузией легирующих примесей в кремниевую пластину с противоположным типом электропроводности, изоляцию затвора от полупроводника осуществляют созданием диэлектрического слоя, расположенного на поверхности пластины между областями истока и стока. Затвор и электроды (выводы) к структурным областям (истоку, стоку и затвору) выполняют металлизацией. В случае, когда в качестве материала диэлектрика под затвором используют окисел кремния SiO_2 , такие приборы называют МОП-транзисторами.

МДП-транзисторы — это четырехполюсные полупроводниковые приборы. Кроме истока, стока и затвора они имеют четвертый дополнительный электрод, присоединенный к подложке — полупроводниковой пластине, на основе которой изготавливаются транзисторы. В МДП-транзисторах проводимость граничного слоя между диэлектриком и полупроводником (канала) изменяется за счет наведения заряда подвижных носителей под действием напряжения, приложенного к затвору. Аналогичное действие оказывает напряжение, приложенное к подложке.

МДП-транзисторы подразделяют на два основных вида: с индуцированным каналом (рис. 3.12, а), в которых канал наводится (индуцируется) под действием управляющего напряжения на затворе;

со встроенным каналом (рис. 3.12, б), в которых канал между истоком и стоком создается технологическим путем, обычно локальной диффузией.

Транзисторы с индуцированным каналом в простейшей форме представляют собой конденсатор, в котором верхней обкладкой является металлический затвор, нижней — полупроводник (кремний p -типа), а диэлектриком — слой SiO_2 (рис. 3.12, a). Если к затвору приложить положительное напряжение, то положительный заряд на затворе индуцирует отрицательный заряд в полупроводнике. С увеличением

напряжения на затворе возрастает индуцированный заряд в полупроводнике, что обусловлено перераспределением носителей заряда в приповерхностной области полупроводника. При определенном напряжении на затворе приповерхностный слой изменяет тип электропроводности, в результате чего индуцируется канал с электропроводностью n -типа, соединяющий области истока и стока. Так как сопротивление канала зависит от напряжения на затворе, ток между истоком и стоком можно модулировать напряжением на затворе. На рис. 3.13, $a, б$ приведены выходные и передаточная характеристики МДП-транзистора с индуцированным каналом, иллюстрирующие зависимости $I_c = f(U_c, U_3)$ при $U_n = 0$ и $I_c = f(U_3)$ при $U_c = \text{const}$, $U_n = 0$. Незначительный ток, протекающий между истоком и стоком при $U_3 = 0$, обусловлен обратными токами p - n -переходов (исток — подложка, сток — подложка).

Встроенный канал n -типа (см. рис. 3.12) обладает умеренным сопротивлением. В отсутствие напряжения на затворе, с приложением разности потенциалов между истоком и стоком в канале протекает определенный ток. С ростом приложенного к затвору отрицательного напряжения концентрация носителей заряда в канале уменьшается и в нем появляется обедненный слой. При определенном отрицательном напряжении на затворе ток в канале прекращается. Если приложенное к затвору положительное напряжение будет повышаться, ток в канале увеличится (рис. 3.13, $в, г$).

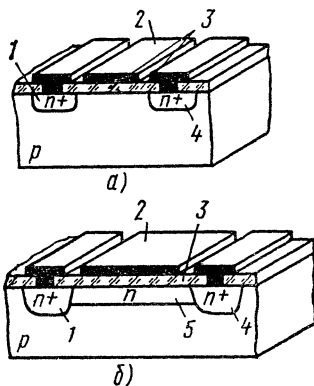


Рис. 3.12. Структуры основных видов МДП-транзисторов:

1 — исток; 2 — затвор; 3 — диэлектрик под затвором; 4 — сток; 5 — встроенный канал n -типа

Поэтому МДП-транзисторы с индуцированными каналами работают только в режиме обогащения граничного слоя диэлектрик — полупроводник основными носителями заряда, а МДП-транзисторы со встроенными каналами могут работать в режимах обогащения и обеднения канала основными носителями. Приведенные на рис. 3.13, б, г передаточные характеристики МДП-транзисторов обоих типов иллюстрируют особенности режимов их работы.

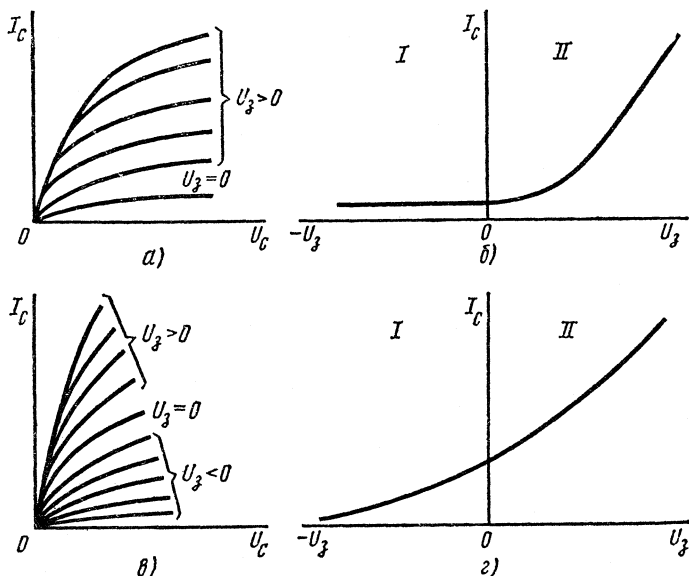


Рис. 3.13. Выходные (а, в) и передаточные (б, г) характеристики МДП-транзисторов:

I — режим обеднения; *II* — режим обогащения; $U_{\text{г}}$ — напряжение на стоке; $U_{\text{з}}$ — напряжение на затворе; I_c — ток между истоком и стоком

По механизму электропроводности каналов МДП-транзисторы подразделяют на транзисторы с каналами *n*- и *p*-типов. Канал транзистора изолирован от основного объема подложки высокоомным слоем объемного заряда. Поэтому если на подложке изготавливается несколько транзисторов, то их взаимным влиянием можно пренебречь и дополнительной изоляции не требуется.

В ИМС применяют в основном МДП-транзисторы с индуцированными каналами *n*- и *p*-типов, что позволяет просто осуществить согласование и реализовать универсальные

логические функции и необходимые линейные преобразования.

В отличие от биполярных транзисторов в МДП-транзисторах ток в канале создается основными носителями заряда: n -канальные транзисторы работают на основе электронной, а p -канальные — на основе дырочной электропроводности, хотя принцип их действия не зависит от типа канала. Входное сопротивление МДП-транзисторов со стороны управляющего электрода значительно превышает входное сопротивление биполярных транзисторов и составляет $10^{10} - 10^{14}$ Ом. Так как входные токи МДП-транзистора малы, изменением тока в выходной цепи управляет входное напряжение. Поэтому *усилительные свойства* МДП-транзисторов аналогично электровакуумным приборам *характеризуются крутизной*, а не коэффициентом передачи тока, как в биполярных транзисторах. Крутизну в МДП-транзисторах для большинства практических применений считают частотно-независимым параметром. Поэтому быстроедействие ИМС на этих транзисторах ограничено в основном паразитными параметрами схемы.

В МДП-транзисторах различают:
крутизну по затвору

$$S = \frac{\partial I_c}{\partial U_z} \text{ при } U_c = \text{const}, U_n = \text{const}; \quad (3.11)$$

крутизну по подложке

$$S_n = \frac{\partial I_c}{\partial U_n} \text{ при } U_c = \text{const}, U_z = \text{const}. \quad (3.12)$$

В выражениях (3.11), (3.12) U_z , U_c , U_n — напряжения, приложенные к затвору, стоку и подложке соответственно (потенциал истока является общим при включении МДП-транзистора); I_c — ток в канале между истоком и стоком.

Важным параметром МДП-транзистора является коэффициент усиления по напряжению:

$$K_U = \frac{dU_c}{dU_z} \text{ при } I_c = \text{const}; K_U = -SR_{\text{вых}}, \quad (3.13)$$

где $R_{\text{вых}}$ — дифференциальное выходное сопротивление МДП-транзисторов в пологой области вольт-амперных характеристик.

Типичные вольт-амперные характеристики МДП-транзистора с индуцированным каналом n -типа приведены на рис. 3.14.

МДП-транзисторы характеризуются совокупностью статических и динамических параметров. Практически в МДП-транзисторах используют следующие статические параметры: *пороговое напряжение* U_0 — минимальное напряжение на затворе, при котором отпирается канал ($U_c = \text{const}$, $U_n = 0$); *удельную крутизну* k — изменение крутизны транзистора при изменении управляющего напряжения на затворе на 1 В; *коэффициент влияния подложки* η , характеризующий влияние напряжения

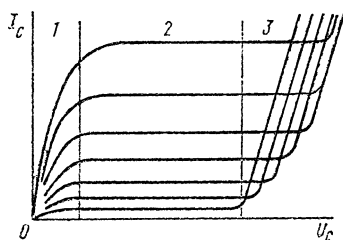


Рис. 3.14. Вольт-амперные характеристики МДП-транзистора с индуцированным каналом n -типа:

1 — триодная область; 2 — область насыщения; 3 — область пробоя

на подложке на ток стока и на изменение напряжения отпираания $U_{отп}$; *выходное дифференциальное сопротивление* транзистора в пологой области $R_{вых}$; *допустимые напряжения* между стоком и истоком $U_{доп.с-и}$, между стоком и подложкой $U_{доп.с-п}$, между затвором и истоком $U_{доп.з-и}$. Основными параметрами, характеризующими МДП-транзисторы в динамическом режиме, являются:

полная емкость между затвором и каналом C_0 ; *входная емкость* между затвором и истоком $C_{вх}$; *выходная емкость* между стоком и подложкой $C_{вых}$; *проходная емкость* между затвором и стоком $C_{пр}$; *постоянная времени переключения* τ_0 .

Электрические параметры и характеристики МДП-транзисторов определяются основными электрофизическими параметрами МДП-структуры, к которым относятся плотность эффективного поверхностного заряда $Q_{пов}$, концентрация атомов примеси в подложке N_d или N_a (удельное сопротивление подложки ρ_n), подвижность носителей заряда у поверхности полупроводниковой пластины на границе полупроводник — диэлектрик μ и геометрические размеры структуры (глубина залегания диффузионных областей стока и истока $W_{диф}$, длина L и ширина z канала, толщина диэлектрика d_d).

В свою очередь, электрофизические параметры структуры зависят от технологических режимов ее формирования. Для МДП-транзисторов с индуцированными каналами p -типа, изготовленными по планарной технологии, зависимости между основными электрическими параметрами транзисторов и электрофизическими параметрами структуры определяются следующими соотношениями:

пороговое напряжение

$$U_0 = \varphi_{\text{МДП}} + \frac{Q_{\text{пов}}}{\epsilon_{\text{д}} \epsilon_0} d_{\text{д}} + \frac{kT}{q} \ln \frac{N_{\text{д}}}{n_i} + \\ + \frac{d_{\text{д}}}{\epsilon_{\text{д}} \epsilon_0} \sqrt{4\epsilon_0 \epsilon_{\text{д}} N_{\text{д}} kT \ln \frac{N_{\text{д}}}{n_i}}, \quad (3.14)$$

удельная крутизна

$$k = \frac{\epsilon_{\text{д}} \epsilon_0}{d_{\text{д}}} \frac{z}{L} \mu_{\text{п ср}}, \quad (3.15)$$

коэффициент влияния подложки

$$\eta = \frac{1}{2} \frac{d_{\text{д}}}{\epsilon_{\text{д}} \epsilon_0} \sqrt{\frac{\epsilon_0 \epsilon_{\text{п}} q^2 N_{\text{д}}}{kT \ln (N_{\text{д}}/n_i)}}, \quad (3.16)$$

выходное сопротивление

$$R_{\text{вых}} = \frac{d_{\text{д}}}{\epsilon_0 \epsilon_{\text{д}}} \frac{L^2}{z} \frac{1}{U_0^{3/2}} \sqrt{\frac{q N_{\text{д}}}{2\epsilon_0 \epsilon_{\text{п}}}}. \quad (3.17)$$

В выражениях (3.14) — (3.16) $\varphi_{\text{МДП}}$ — потенциал, соответствующий разности работ выхода из диэлектрика и полупроводника; $\epsilon_{\text{д}}$, $\epsilon_{\text{п}}$ — диэлектрическая проницаемость материала диэлектрика и подложки соответственно; $N_{\text{д}}$ — концентрация донорной примеси в подложке; n_i — собственная концентрация подвижных носителей заряда в полупроводнике.

Плотность эффективного поверхностного заряда $Q_{\text{пов}}$ оказывает основное влияние на пороговое напряжение U_0 и косвенное влияние на выходное сопротивление $R_{\text{вых}}$. Рост $Q_{\text{пов}}$ приводит к увеличению U_0 и уменьшению $R_{\text{вых}}$ (при $Q_{\text{пов}} = 5 \cdot 10^{11} \text{ см}^{-2}$ $U_0 = 2\text{В}$ при $d_{\text{д}} = 1000 \text{ \AA}$). Поэтому уменьшение заряда $Q_{\text{пов}}$, обусловленного свойствами диэлектрика, является актуальной задачей технологии. Кроме того, поверхностный заряд оказывает решающее влияние на стабильность параметров МДП-транзисторов. Как следует из (3.14), на пороговое напряжение влияет концентрация примеси в подложке — с увеличением $N_{\text{д}}$ возрастает U_0 . Концентрация примеси в подложке, т. е. ее удельное сопротивление $\rho_{\text{п}}$, влияет также на напряжение пробоя сток — подложка $U_{\text{пр. с-п}}$ и стабильность материала подложки.

Существенное влияние на параметры МДП-транзистора оказывает толщина диэлектрика под затвором [см. выражения (3.14) — (3.17)]. С увеличением толщины диэлектрика возрастают значения U_0 , η и $R_{\text{вых}}$ и снижается удельная крутизна k . Кроме того, от толщины диэлектрика зависит напряжение пробоя затвор — подложка $U_{\text{пр. з-п}}$. Оптимальное значение толщины диэлектрика $d_{\text{д}} \approx 1000 \text{ \AA}$, при этом достигаются высокие значения $U_{\text{пр. з-п}}$, k и достаточно низкое значение U_0 .

Из приведенного анализа следует, что выбор материалов для диэлектрика и подложки играет важную роль при разработке МДП-транзисторов с требуемыми параметрами.

Что касается геометрических размеров структурных областей транзисторов, то их необходимо выбирать минимальными. Так, для получения максимальной удельной крутизны k целесообразно уменьшать длину канала. Это приводит также к уменьшению встроенных емкостей транзистора. Минимальная длина канала ограничена технологическими факторами: точностью изготовления и совмещения фотошаблонов при формировании областей истока и стока, контролируемостью диффузионного процесса при создании истока и стока. Типичная длина канала для современных МДП-транзисторов лежит в пределах 3—7 мкм.

Параметры диффузионных областей истока и стока определяются главным образом технологичностью процессов их формирования и требованиями, предъявляемыми к структуре. Области истока и стока должны быть достаточно легированными для получения качественных p - n -переходов и низкого поверхностного сопротивления. Обычно области истока и стока формируются глубиной 1—2 мкм с $\rho_s = 20 \div 70$ Ом/квадрат.

Быстродействие МДП-транзисторов ограничено временем пролета носителей заряда вдоль канала и временем перезаряда собственной емкости через сопротивление канала. Так, при длине канала p -типа порядка 10 мкм максимальная частота усиления МДП-транзистора достигает 120 МГц, т. е. приближается к граничным частотам биполярных транзисторов. Однако быстродействие ИМС на МДП-транзисторах значительно ниже. Это объясняется существенным влиянием на быстродействие как транзисторов, так и ИМС на их основе встроенных паразитных емкостей МДП-транзистора (затвор — сток и затвор — исток).

Для повышения технологичности процесса создания ИМС на МДП-транзисторах, выхода годных схем, оптимизации и стабильности параметров, а также для снижения встроенных емкостей, влияния паразитных эффектов и занимаемой транзисторами площади в последнее время разработан ряд модификаций МДП-транзисторов: с *кремниевыми или молибденовыми затворами, изготавливаемые по толстоокисной самосовмещенной технологии; диффузионно-ионные, V-MOP* и др. В табл. 3.1 приведен сравнительный анализ некоторых параметров МДП-транзисторов, изготовленных по различным технологиям.

Разработаны также структуры МОП-транзисторов, в которых для истока и стока использованы контакты с барьером Шоттки. Такие МОП-транзисторы более просты в изготовле-

Таблица 3.1

Параметры МДП-транзисторов различных структур

Параметры	Тип структуры			
	обычный МОП	с кремниевым затвором	диффузионно-ионный МОП	с молибденовым затвором
Пороговое напряжение активного транзистора U_0 , В	3,0—5,0	1,5—2,5	1,7	1,5—2,5
Пороговое напряжение паразитного транзистора U'_0 , В	30—50	25—40	30	25—40
Поверхностное сопротивление диффузионных областей p -типа ρ_s , Ом/квadrat	50—100	30	70	10
Поверхностное сопротивление затворного проводника ρ_s з, Ом/квadrat	0,05	40	0,05	0,15
Поверхностное сопротивление второго слоя соединения ρ_s с, Ом/квadrat	Не существует	0,05	Не существует	0,05

нии, обладают улучшенными структурными и электрическими параметрами; основная область их применения — быстродействующие микроэлектронные запоминающие устройства.

С точки зрения схемотехники в ИМС очень важным является одновременное использование МДП-транзисторов с различным типом электропроводности каналов. Для этого разработаны комплементарные МДП-транзисторы, которые представляют собой структуры с дополняющими (по типу электропроводности каналов) МДП-транзисторами, изготовленными на одной подложке в едином технологическом процессе.

Важным преимуществом МДП-транзисторов является возможность их применения не только в качестве активного, но и в качестве пассивного элемента. При соответствующем включении МДП-транзисторов их можно использовать как элемент нагрузки — резисторы. Это позволяет создавать большинство ИМС (ключевых, логических) только на базе МДП-структур.

§ 3.4. Диоды

В цифровых и аналоговых ИМС диоды находят широкое применение для выполнения как основных логических операций (И, ИЛИ), так и вспомогательных функций: расширителей по входу, смещения и фиксации уровней напряжения, ускорения процессов включения и выключения и др. Поэтому к основным электрическим параметрам диодов в ИМС предъявляются разнообразные требования.

Диоды в полупроводниковых ИМС изготавливают на основе тех же диффузионных (эпитаксиальных) слоев и переходов, что и биполярные транзисторы. Поэтому на практике в качестве диодов принято использовать транзисторные структуры n - p - n^+ -типа, так как при создании ИМС транзисторы все равно необходимо формировать, а получение диодов таким путем значительно проще, чем изготовление специализированных диодных структур. Это означает, что диоды и транзисторы формируются одновременно. Поскольку диоды изготавливают на одной пластине кремния вместе с другими элементами в едином технологическом процессе, возможности оптимизации их параметров ограничены. Для получения диодов на основе транзисторных

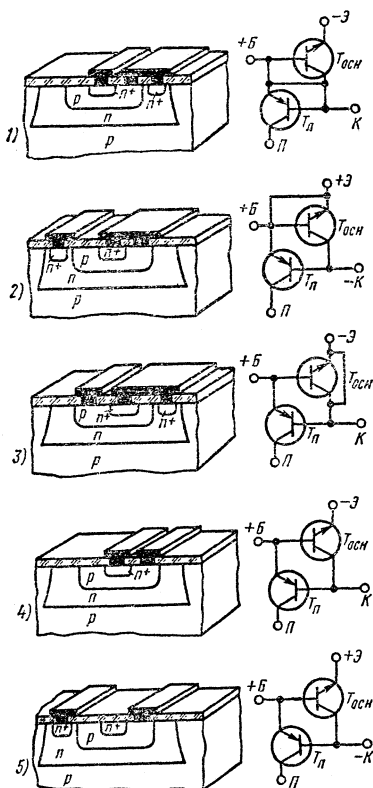


Рис. 3.15. Структуры и схемы диодного включения планарно-эпитаксиальных транзисторов, изолированных p - n -переходом (T_{ocn} — основной; T_n — паразитный)

структур используют различные схемы диодного включения транзисторов. На рис. 3.15 показаны структуры и модели пяти различных вариантов (схем) диодного включения планарно-эпитаксиальных транзисторов, изолированных обратным смещенным p - n -переходом:

1) используется переход эмиттер — база, а переход коллектор — база замкнут ($U_{кб} = 0$);

2) используется переход коллектор — база, а эмиттер замкнут на базу ($U_{эб} = 0$);

3) используются оба перехода, но эмиттер накоротко соединен с коллектором ($U_{кэ} = 0$);

4) используется переход эмиттер — база, а коллектор разомкнут ($I_k = 0$);

5) используется переход коллектор — база, а эмиттер разомкнут ($I_э = 0$).

Диодное включение транзистора достигается при выполнении внутрисхемных соединений путем металлизации, проводимой после формирования всех элементов микросхемы. Диодные схемы включения транзисторов одинаковы независимо от способа изоляции транзисторных структур. Отличие состоит в наличии паразитного транзистора у структур, изолированных p - n -переходом.

Диоды полупроводниковых ИМС характеризуются совокупностью статических и импульсных параметров. Статические параметры определяют по вольт-амперной характеристике диода (p - n -перехода). К ним относятся: *напряжение пробоя $U_{пр}$, обратный ток $I_{обр}$, прямой ток и напряжение I_d и U_d .*

Независимо от способа изоляции транзисторов напряжение пробоя $U_{пр}$ диодов на основе транзисторных структур определяется свойствами либо коллекторного, либо эмиттерного перехода. На величину $U_{пр}$ диодов на основе транзисторных структур, изолированных p - n -переходом, изолирующий переход коллектор — подложка не оказывает влияния, поскольку его напряжение пробоя имеет наибольшее значение. Поэтому напряжение пробоя $U_{пр}$ схем включения 1, 3, и 4 ($1 - U_{кб} = 0$; 3 — $U_{кэ} = 0$; 4 — $I_k = 0$) одинаково, так как определяется эмиттерным переходом, и составляет 5—7 В. Для остальных двух схем включения (2 — $U_{эб} = 0$; 5 — $I_э = 0$) напряжение пробоя диода $U_{пр}$ определяется коллекторным переходом и в зависимости от концентрации примесей в коллекторе $N_{дк}$ находится в пределах 20—50 В для типовых планарно-эпитаксиальных структур.

Обратный ток диода $I_{обр}$ в ИМС определяют при максимальном обратном напряжении, соответствующем рабочему режиму схемы. Обратный ток диода при любом включении транзистора обусловлен генерацией носителей заряда в обедненных областях переходов. Он монотонно возрастает при увеличении обратного напряжения вследствие расширения p - n -переходов.

Наименьшие значения $I_{обр}$ имеют диоды на основе транзисторных структур, изолированных диэлектриком и включенных по схеме 1 ($U_{кб} = 0$) и 4 ($I_k = 0$), так как в этих случаях используется только эмиттерный переход, который имеет малые площади и ширину. Наибольший обратный ток характерен для диодов на основе транзисторных структур с диэлектрической изоляцией, включенных

по схеме 3 ($U_{кэ} = 0$), так как при этом оба перехода (коллекторный и эмиттерный) включены параллельно.

Диоды на транзисторных структурах, изолированных p - n -переходом, представляют собой четырехслойную структуру n^+-p - n - p -типа. Для обеспечения изоляции транзисторной структуры, которая используется в качестве диода, на изолирующий переход коллектор—подложка подают обратное смещение, для чего подложку p -типа подключают к самому низкому потенциалу в схеме. В этом случае в цепи диодов может протекать значительный ток, обусловленный изолирующим переходом. Влияние этого тока на обратный ток $I_{обр}$ диода зависит от схемы включения.

Для всех диодных схем включения транзисторов с изоляцией переходом, когда используется коллекторный вывод, кроме схемы 4 ($I_{кэ} = 0$), обратный ток $I_{обр}$ определяется не только обратным током эмиттерного и коллекторного переходов, но и обратным током изолирующих переходов. Наименьшим обратным током обладают диоды на транзисторных структурах, изолированных переходом, включенных по схеме 4 ($I_{кэ} = 0$).

Прямые ток $I_{д}$ и напряжение $U_{д}$ диода взаимозависимы и определяются либо экспериментально, либо из вольт-амперной характеристики.

Важнейшими импульсными (динамическими) параметрами диодов ИМС являются *проходная емкость* $C_{д}$, *шунтирующая переход диода, паразитная емкость* $C_{д.п}$ диода на подложку; *постоянная времени восстановления обратного сопротивления* $\tau_{д}$. Для диодов, полученных на основе транзисторных структур, импульсные параметры зависят от схемы включения. Емкости $C_{д}$ и $C_{д.п}$ определяются емкостями p - n -переходов (эмиттерного, коллекторного и изолирующего) при последовательном или параллельном их соединении в зависимости от схемы включения транзисторной структуры. Следует отметить, что роль емкостей $C_{д}$ и $C_{д.п}$ диода в различных схемах неодинакова, так как при переключении схемы эти емкости могут заряжаться различными токами и напряжения на них могут изменяться в разных пределах.

Постоянная времени восстановления обратного сопротивления диода $\tau_{д}$ определяется процессами накопления и релаксации заряда $Q_{д}$, обусловленного избыточными носителями, в различных областях диода при протекании тока $I_{д}$. Постоянная $\tau_{д}$ для диода на одном p - n -переходе определяется временем жизни неосновных носителей заряда в высокоомной области τ_n или τ_p . Для диодов на основе транзисторных структур $\tau_{д}$ зависит как от схемы включения, так и от способа изоляции структуры.

Для всех параметров диодов характерным является зависимость от температуры. Наибольшее влияние температура оказывает на обратный ток $I_{обр}$, так как основной его

составляющей для кремниевых структур является ток термогенерации. Этот ток возрастает с повышением температуры, удваиваясь при изменении температуры приблизительно на 15°C . Второй составляющей обратного тока диода является тепловой ток, который возрастает с повышением температуры быстрее тока термогенерации. При температуре 100°C эти токи примерно равны, а при дальнейшем повышении температуры преобладает тепловой ток.

В табл. 3.2 приведены обобщенные данные по основным параметрам диодов в зависимости от схемы включения транзисторной структуры.

Таблица 3.2

Параметры диодов на основе транзисторных структур, включенных по различным схемам

№ схемы	Признак схемы	Способ включения	$U_{\text{пр}}$	$C_{\text{д}}$	$C_{\text{дп}}$	$r_{\text{д}}$	$\tau_{\text{д}}$
1	$U_{\text{кб}} = 0$	Э—КБ	$U_{\text{э.пр}}$	$C_{\text{э}}$	$C_{\text{кп}}$	$r_{\text{к}}$	$\tau_{\text{пр}}$
2	$U_{\text{эб}} = 0$	К—ЭБ	$U_{\text{к.пр}}$	$C_{\text{к}}$	$C_{\text{кп}}$	$r_{\text{к}}$	$t_{\text{р}}$
3	$U_{\text{кэ}} = 0$	Б—ЭК	$U_{\text{э.пр}}$	$C_{\text{к}} + C_{\text{э}}$	$C_{\text{кп}}$	$r_{\text{б}}$	$\tau_{\text{пр}}$
4	$I_{\text{к}} = 0$	Э—Б	$U_{\text{э.пр}}$	$C_{\text{э}}$	$\frac{C_{\text{кп}}C_{\text{к}}}{C_{\text{кп}} + C_{\text{к}}}$	$r_{\text{б}}$	$t_{\text{р}}$
5	$I_{\text{э}} = 0$	Б—К	$U_{\text{к.пр}}$	$C_{\text{к}}$	$C_{\text{кп}}$	$r_{\text{б}} + r_{\text{к}}$	$t_{\text{р}}$

Анализ данных, приведенных в табл. 3.2, показывает, что с помощью различных схем включения одной и той же транзисторной структуры можно получить диоды с разными параметрами. Так, для получения быстродействующих диодов структуры включают по схеме 1, а диодов с большими пробивными напряжениями — по схемам 2 и 5. Диоды, полученные включением транзисторных структур по схемам 3 и 4, используют как накопительные.

Отметим, что в ИМС широкое распространение нашли и диоды с барьером Шоттки. Для них характерным является низкое значение $U_{\text{д}}$ ($U_{\text{д}} = 0,35 \div 0,4 \text{ В}$) при $I_{\text{д}} = 1 \text{ мА}$, что почти вдвое меньше падения напряжения на эмиттерном переходе $U_{\text{эо}}$. Время $\tau_{\text{д}}$ для диодов с барьером Шоттки не превышает 0,1 нс, тогда как для диодов на p - n -переходе, легированных золотом, оно составляет более 0,5 нс.

В цифровых ИМС, как отмечалось, диоды с барьером Шоттки используют для ограничения насыщения транзисторов. Особенно перспективно применение диодов с барьером Шоттки в ИМС СВЧ-диапазона.

§ 3.5. Полупроводниковые резисторы

После транзисторов и диодов по значимости и количеству в ИМС следует считать резисторы. Существует ряд ИМС, например цифровых, в которых все логические операции реализуются с помощью транзисторов, диодов и резисторов или транзисторов и резисторов.

Резисторы в составе ИМС характеризуются совокупностью параметров, основными из которых являются: *номинальное сопротивление R , допуск на номинал $\pm \delta R$, температурный коэффициент сопротивления TKR , мощность рассеяния P* . Эти параметры в каждом конкретном случае зависят от исходного материала, способа формирования резистора и его формы (структуры).

Полупроводниковые резисторы — это резисторы, изготовленные на основе полупроводникового материала методами полупроводниковой технологии. Различают объемные и диффузионные полупроводниковые резисторы. *Объемные резисторы* получают путем создания омических (невыпрямляющих) контактов металла с полупроводником. При идеальных контактах удельное сопротивление ρ_v такого резистора определяется объемными свойствами полупроводника.

Поскольку на практике используют легированные полупроводники, их удельное сопротивление в случае полной ионизации примеси

$$\rho_{nv} = [q\mu_n N_d^+]^{-1} \text{ при } N_d \gg N_a, \quad (3.18)$$

$$\rho_{pv} = [q\mu_p N_a^-]^{-1} \text{ при } N_a \gg N_d. \quad (3.19)$$

Несмотря на простоту конструктивного и технологического исполнения, объемные резисторы не нашли широкого применения из-за большой занимаемой площади и температурной нестабильности.

Диффузионные резисторы формируют на основе диффузионных слоев, толщина которых намного меньше их ширины и длины. Диффузионные резисторы изолированы от остального объема полупроводника *p-n*-переходом. Они могут быть изготовлены одновременно с другими элементами

ми при формировании структуры полупроводниковых ИМС. Поэтому для реализации диффузионных резисторов в полупроводниковых ИМС используют те же диффузионные слои, которые образуют основные структурные области транзистора: базовую, эмиттерную или коллекторную.

Сопротивление диффузионного резистора R определяется удельным сопротивлением полупроводникового слоя, его глубиной и занимаемой площадью:

$$R = \frac{\tilde{\rho}_V}{W_{\text{диф}}} \frac{l}{b}, \quad (3.20)$$

где $\tilde{\rho}_V$ — среднее удельное сопротивление диффузионного слоя; $W_{\text{диф}}$ — глубина диффузии; l и b — длина и ширина участка поверхности, в который проводилась диффузия.

При создании полупроводниковых ИМС параметры всех диффузионных слоев оптимизируют для получения наилучших характеристик транзистора. Поэтому при расчете сопротивления диффузионных резисторов по формуле (3.20) возникает задача определения конфигурации (длины и ширины) резистивного слоя по его известным характеристикам: поверхностной концентрации и распределению примесей, глубине залегания перехода и др. На практике значение $W_{\text{диф}}$ обусловлено также требованиями к параметрам транзистора и для каждого конкретного слоя, который можно использовать в качестве резистивного, $W_{\text{диф}} = \text{const}$. Поэтому расчет и конструирование диффузионных резисторов облегчаются введением понятия об удельном поверхностном сопротивлении слоя (сопротивлении на квадрат). Это сопротивление определяется выражением

$$\rho_s = \tilde{\rho}_V / W_{\text{диф}} \quad (3.21)$$

и для каждого слоя транзистора является постоянным.

С учетом выражения (3.21) сопротивление диффузионного резистора

$$R = \rho_s l / b. \quad (3.22)$$

Так как ρ_s определяется требованиями к областям транзистора, то проектирование диффузионных резисторов заданного номинала сводится к определению l и b .

В общем случае удельное поверхностное сопротивление диффузионного слоя с учетом концентрационной зависимости подвижности носителей заряда и неравномерного рас-

пределения примеси по толщине слоя, обусловленного диффузией,

$$\rho_s = \tilde{\rho}_V / W_{\text{диф}} = [q \tilde{\mu}(N) \tilde{N}(x) W_{\text{диф}}]^{-1}, \quad (3.23)$$

где $\tilde{\mu}(N)$ — усредненное по концентрации значение подвижности носителей заряда; $\tilde{N}(x)$ — усредненное по координате (толщине диффузионного слоя) значение концентрации примеси.

Выражение (3.23) можно представить в виде

$$\rho_s = \left[q \frac{\int_{N_1}^{N_2} \mu(N) dN}{|N_1 - N_2|} \int_0^{W_{\text{диф}}} N(x) dx \right]^{-1} \quad (3.24)$$

При известных характере распределения примеси $N(x)$, технологических режимах диффузии, характере зависимости $\mu(N)$ и глубине залегания p - n -перехода оно является исходным для определения удельного поверхностного сопротивления в зависимости от характера распределения примеси в диффузионном слое.

Диффузионные резисторы практически могут быть реализованы на основе любой из структурных областей транзистора. Для их использования в ИМС на поверхности структурных областей создают омические контакты металлизацией алюминием. Структуры диффузионных резисторов на основе структурных областей типового планарно-эпитаксиального транзистора показаны на рис. 3.16, а их параметры приведены в табл. 3.3.

Таблица 3.3

Параметры диффузионных резисторов

Тип диффузионного слоя	ρ_s , Ом/кв.ат	$\pm \delta R$	TKR, 1/°C	$C_{\text{распред}}$, пФ/мм ²	$W_{\text{диф}}$, мкм
База	100—300	5—20	$\pm (1,5-3) \cdot 10^{-3}$	150—350	2,5—3,5
База, ограниченная эмиттером	3000	100	$\pm (1,5-3) \cdot 10^{-3}$	1000—1500	0,5—1,0
Коллектор	200	15—25	$\pm (2-4) \cdot 10^{-3}$	80—100	7—10
Эмиттер	2—3	20	$\pm (1-5) \cdot 10^{-4}$	1000—1500	1,5—2,5

Как видно из табл. 3.3, наибольшим удельным сопротивлением ρ_s обладают резисторы, выполненные на основе базового слоя, ограниченного эмиттерным переходом (рис. 3.16, б), однако воспроизводимость сопротивлений низкая. По этой причине используют в основном эмиттерные или базовые слои. Эмиттерные слои применяют для получения резисторов с малым сопротивлением (рис. 3.16, в). Наиболее распространены резисторы, сформированные на основе базовых слоев (рис. 3.16, а). При этом достигается сочетание высокого сопротивления слоя, необходимого для уменьшения площади, занимаемой резисторами, и приемлемого (сравнительно малого) температурного коэффициента сопротивления.

Для получения диффузионных резисторов требуемого сопротивления, определяемого по формуле (3.22), диффузионные слои формируют в виде прямоугольника (для небольших номиналов) или змейки (с целью уменьшения занимаемой резистором площади). В этом случае отношение l/b стремятся сделать по возможности большим (10—50) для уменьшения на расчетную величину R изгибов резистора (при выполнении его в виде змейки) и расширения слоя на концах (под контактные площадки). Минимальная ширина резистора определяется процессами фотолитографии и диффузии и достигает предельного значения порядка 5 мкм и менее. Для диффузионных резисторов характерно наличие паразитных элементов — распределенного конденсатора и распределенного транзистора.

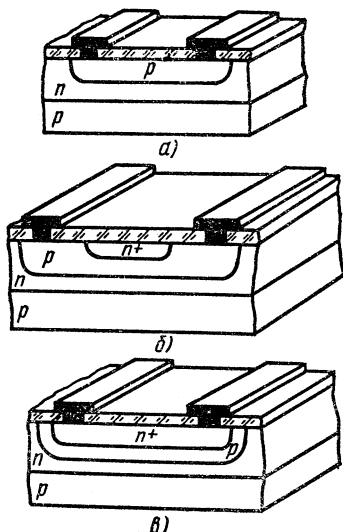


Рис. 3.16. Структуры диффузионных резисторов, сформированных на основе базового слоя (а), базового слоя, ограниченного эмиттером (б), и эмиттерного слоя (в)

Эквивалентная схема диффузионного резистора на основе базового слоя приведена на рис. 3.17. Она содержит следующие основные и паразитные элементы: R_1 — сопротивление проводящего канала резистора (p -области); R_2 — омическое сопротивление кон-

тактов; R_3 — сопротивление токам утечки n -области; R_4 — сопротивление токам утечки подложки; C_1 — емкость коллекторного p - n -перехода; C_2 — емкость изолирующего p - n -перехода; p - n -распределенная паразитная транзисторная структура с низким коэффициентом β . Паразитная транзисторная структура начнет сравнительно хорошо проводить, если изолирующий переход будет смещен в прямом направлении, а коллекторный переход — в обратном. Чтобы этого не произошло, в правильно сконструированной ИМС на n - и n^+ -области подается самый высокий положительный потенциал. Обратное пробивное напряжение переходов порядка 50 В, а ток утечки обычно не превышает 10 мкА. Влияние распределенной емкости резистора становится заметным на частотах выше 10 МГц.

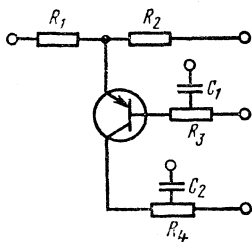


Рис. 3.17. Эквивалентная схема диффузионного резистора, сформированного на основе базового слоя транзистора

На точность воспроизведения сопротивления диффузионного резистора $\pm \Delta R$ влияют в основном три технологические операции: 1) изготовление фоторезистивной маски; 2) травление слоя SiO_2 при изготовлении из него защитной маски; 3) диффузия примесей через окна маски на заданную глубину. Первые две операции определяют точность рисунка, т. е. допуск на длину ($\pm \Delta l$) и ширину ($\pm \Delta b$) проводящего канала (слоя). Третья операция определяет глубину

залегания p - n -перехода и характер распределения концентрации примеси в p -области, т. е. допуски на толщину канала $\pm \Delta W_{\text{диф}}$ и его удельное сопротивление $\pm \rho_v$. Указанные параметры связаны известным соотношением:

$$R \pm \Delta R = (\tilde{\rho}_v \pm \Delta \rho_v) (l \pm \Delta l) / (b \pm \Delta b) (W_{\text{диф}} \pm \Delta W_{\text{диф}}), \quad (3.25)$$

где $\tilde{\rho}_v$ — среднее удельное сопротивление канала резистора.

Наибольшие потери точности воспроизведения сопротивления резистора происходят на третьей операции, т. е. во время диффузии примесей.

Кроме разброса по номиналу диффузионные резисторы обладают существенной температурной зависимостью. Температурный коэффициент сопротивления определяется выражением

$$\text{TKR} = \Delta R(T) / R(T_n) (T - T_n), \quad (3.26)$$

где $\Delta R(T)$ — абсолютное изменение номинала резистора в исследуемом диапазоне температур; $R(T_n)$ — значение

номинала резистора при температуре T_n ; $T - T_n$ — диапазон изменения температуры.

Высокий ТКР диффузионных резисторов обусловлен температурной зависимостью подвижности носителей заряда μ_n или μ_p и концентрации примеси N_d или N_a . На рис. 3.18 показана зависимость сопротивления диффузионных резисторов от температуры при различных значениях удельного поверхностного сопротивления. Отсюда видно, что ТКР для диффузионных резисторов положителен при положительной температуре и тем более высокий, чем выше ρ_s . Для диффузионных резисторов на основе базового слоя транзистора $\text{TKR} = (1 \div 2) \times 10^{-3} 1/^\circ\text{C}$ в диапазоне изменения температур $T = 20 \div 125^\circ\text{C}$ и $\text{TKR} = \pm 5 \cdot 10^{-4} 1/^\circ\text{C}$ в диапазоне $T = -60 \div +20^\circ\text{C}$.

Рассеиваемая диффузионным резистором мощность определяется максимальным падением напряжения на резисторе, которое не может превышать напряжение смещения на изолирующем p - n -переходе. Основным фактором, ограничивающим мощность рассеяния, является нагрев резистора в процессе работы. Для диффузионных резисторов предельной считается мощность 50 мВт/мм^2 .

Диффузионные резисторы для полупроводниковых ИМС изготавливают с номиналами $50 \text{ Ом} - 300 \text{ кОм}$ и разбросом $\pm (10-20)\%$; максимальная мощность рассеяния зависит от типа корпуса и, как правило, не превышает $0,1 \text{ Вт}$. Кроме диффузионных в полупроводниковых ИМС применяют резисторы на основе МДП-структуры. При этом в качестве резистора используют МДП-транзистор, работающий в режимах, соответствующих наклонной области вольт-амперной характеристики. Использование МДП-структур в качестве резисторов позволяет реализовать целый ряд цифровых ИМС только на одних МДП-транзисторах.

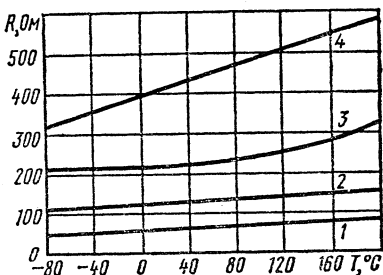


Рис. 3.18. Зависимость сопротивления диффузионных резисторов от температуры при различных значениях поверхностного удельного сопротивления в Ом/кв. ($1 - \rho_s = 50$; $2 - \rho_s = 100$; $3 - \rho_s = 200$; $4 - \rho_s = 400$)

Для реализации больших значений сопротивления служат высокоомные полупроводниковые резисторы на основе ионно-легированных слоев. Такие резисторы хорошо воспроизводимы, имеют большой динамический диапазон сопротивлений и линейные характеристики. Ионным легированием легко получить полупроводниковые резисторы с $\rho_s = 10^4 \div 10^5$ Ом/квadrat.

§ 3.6. Полупроводниковые конденсаторы

В полупроводниковых ИМС обычно используются два типа конденсаторов: *конденсаторы на основе p - n -переходов (диффузионные)* и *окисные конденсаторы* со структурой металл — окисел кремния (диэлектрик) — полупроводник (*МДП-конденсаторы*). Конденсаторы любого типа характеризуются совокупностью следующих основных параметров: *номинальной емкостью C , удельной емкостью C_0 на единицу площади, технологическим разбросом емкостей (допуском) $\pm \delta C$, рабочим напряжением U_p , добротностью Q и температурным коэффициентом емкости ТКС.* В общем случае емкость конденсатора определяется выражением для емкости плоского конденсатора:

$$C = \frac{\epsilon \epsilon_0}{4\pi d} S = C_0 S, \quad (3.27)$$

где ϵ , d — диэлектрическая проницаемость и толщина диэлектрика; S — площадь, занимаемая конденсатором.

Структуры конденсаторов должны обеспечивать максимальное значение C_0 , что позволяет создавать большие номинальные емкости на малой площади. Следует отметить, что ряд ИМС, в частности цифровых, разрабатывается с минимальным числом конденсаторов. Это связано с тем, что площадь, занимаемая конденсатором, значительно превышает площадь, занимаемую другими элементами (транзисторами, диодами). Наиболее часто конденсаторы применяются в аналоговых (линейных) ИМС.

Диффузионные конденсаторы основаны на использовании барьерной (зарядной) емкости обратно смещенного p - n -перехода. При этом в качестве диэлектрика толщиной d выступает область объемного заряда p - n -перехода, характеризующаяся шириной ω_{06} . Это означает, что удельная

емкость диффузионного конденсатора определяется шириной области объемного заряда

$$C_0 = \frac{\varepsilon \varepsilon_0}{4\pi w_{об}}, \quad (3.28)$$

где $\varepsilon = 12$ — диэлектрическая проницаемость кремния.

Поскольку ширина области объемного заряда p - n -перехода зависит от распределения носителей заряда в прилегающих к p - n -переходу областях, емкость C_0 обратного смещенного p - n -перехода определяется характером распределения примесей, обусловленного способом формирования p - n -перехода, и значением напряжения, смещающего p - n -переход в обратном направлении.

В полупроводниковых ИМС на биполярных транзисторах диффузионные конденсаторы реализуются на основе переходов транзистора. Их создание не требует дополнительных технологических операций, поскольку используются те же переходы, что и в транзисторной структуре. На рис. 3.19, a — $в$ показаны типовые структуры диффузионных конденсаторов на основе p - n -переходов планарно-эпитаксиального транзистора. Необходимым условием практического применения таких конденсаторов является соблюдение полярности подключения смещающего напряжения.

Как известно (см. § 3.2), емкость p - n -перехода пропорционально зависит от градиента концентрации примеси: чем выше $dN_{рез}(x)/dx$, тем больше значение C при неизменной площади. В полупроводниковых ИМС структурные параметры, в том числе характер распределения $N_{рез}(x)$ и глубины залегания p - n -переходов, оптимизируют, исходя

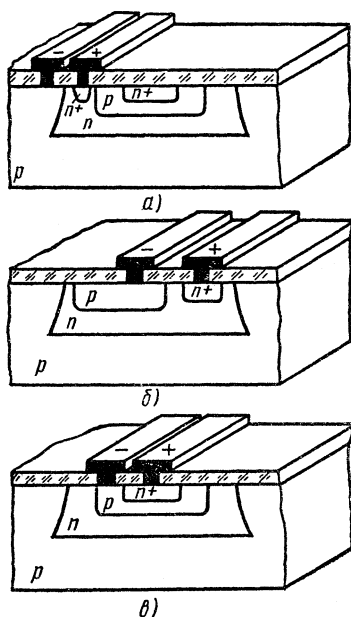


Рис. 3.19. Структуры диффузионных конденсаторов на основе p - n -переходов:

a — изолирующего; $б$ — коллекторного; $в$ — эмиттерного

из требований, предъявляемых к электрическим параметрам транзистора. Поэтому удельная емкость диффузионных конденсаторов на основе p - n -переходов транзисторной структуры будет изменяться только при изменении приложенного напряжения. Так, при использовании эмиттерного перехода (рис. 3.19, *в*) удельная емкость

$$C_{э0} = [2 q \varepsilon \varepsilon_0 N_{рез}(x) / (U_{дэ} + U)]^{1/2}, \quad (3.29)$$

где $N_{рез}(x)$ — концентрация акцепторной примеси в базе на границе области объемного заряда эмиттерного перехода (на слабо легированной стороне p - n -перехода), т. е. при $x = x_э + \delta'$; U — напряжение, приложенное к p - n -переходу; $U_{дэ} \approx 0,85$ В — диффузионный потенциал эмиттерного перехода.

Выражение (3.29) можно использовать для оценки емкости коллекторного и изолирующего переходов при больших отрицательных напряжениях на них, если распределение примеси будет соответствовать резкому переходу.

Для коллекторного перехода при малых обратных напряжениях

$$C_{к0} = \frac{\varepsilon \varepsilon_0}{2} [2qa / 3\varepsilon \varepsilon_0 (U_{дк} + U)]^{1/3}, \quad (3.30)$$

где $a = \left. \frac{dN_{рез}(x)}{dx} \right|_{x=x_к}$ — градиент концентрации примеси в p - n -переходе; $U_{дк} \approx 0,6$ В — диффузионный потенциал коллекторного перехода.

При заданной структуре номинальная емкость достигается необходимым значением площади p - n -перехода:

$$C = C_0 S_{p \cdot n}. \quad (3.31)$$

В практических расчетах требуется учитывать не только площадь плоской части p - n -перехода, но и площадь боковых стенок.

Как видно из выражений (3.29) и (3.30), емкость диффузионного конденсатора зависит от приложенного напряжения. Следовательно, диффузионные конденсаторы могут выполнять роль как постоянной, так и переменной емкости. В первом случае $U = \text{const}$, во втором необходимо выполнить условие $U_{д} \leq 2 U_m \leq U$, где U_m — амплитуда рабочего сигнала. Кроме того, рабочее напряжение U_p определяет, какой из переходов (коллекторный, эмиттерный или изолирующий) должен быть применен для получения кон-

денсатора, а тип перехода в свою очередь определяет площадь, необходимую для получения заданной емкости. Так, например, при использовании эмиттерного перехода достигается большое значение C_0 , но поскольку пробивное напряжение этого перехода низкое (5—7 В), рабочее напряжение ограничено.

Применение конденсаторов на основе p - n -переходов ограничивают два паразитных параметра: эквивалентное последовательное сопротивление и параллельная паразитная емкость. Паразитные элементы конденсатора на основе коллекторного перехода показаны на рис. 3.20. Здесь C_1 — полезная емкость; C_2 — паразитная емкость; D_1 и D_2 — диоды, образующие полезную и паразитную емкости; R_K — последовательное сопротивление. Для получения максимального коэффициента передачи сигнала от точки А к точке В необходимо стремиться к возможно более высокому отношению C_1/C_2 . В данной структуре может быть получен максимальный коэффициент передачи 7:1, что достигается подачей максимального напряжения на подложку.

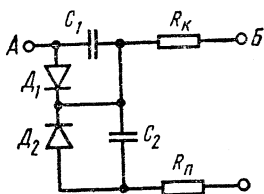


Рис. 3.20. Эквивалентная схема диффузионного конденсатора, сформированного на основе коллекторного перехода

Добротность конденсатора определяется известным соотношением

$$Q = x_c/R = (2\pi fCR)^{-1}, \quad (3.32)$$

где f — рабочая частота; C — емкость; R — сопротивление.

Для диффузионных конденсаторов значение R определяется в основном сопротивлением структурной области транзистора, имеющей большее сопротивление. Поэтому конденсаторы, рассчитанные на высокое рабочее напряжение, будут иметь меньшую добротность по сравнению с конденсаторами, рассчитанными на малое рабочее напряжение.

Температурная нестабильность диффузионных конденсаторов определяется в основном температурными зависимостями диэлектрической проницаемости ϵ полупроводника и диффузионного потенциала U_d .

Для конденсаторов на основе эмиттерного перехода

$$TKC = \frac{1}{2} \{ \alpha_e - \alpha_U [U_{dэ}/(U_{dэ} + U)] \}, \quad (3.33)$$

а для конденсаторов на основе коллекторного перехода

$$TKC = \frac{2}{3} \{ \alpha_e - \alpha_U [U_{дк}/(U_{дк} + U)] \} \quad (3.34)$$

где $\alpha_\varepsilon = \Delta\varepsilon/\varepsilon(T)(T - T_n)$, $\alpha_U = \Delta U_d/U_d(T)(T - T_n)$ — температурные коэффициенты ε и U_d .

Так как $\alpha_\varepsilon < \alpha_U$, то ТКС определяется в основном температурной нестабильностью диффузионного потенциала p - n -перехода (U_d уменьшается с ростом температуры). Это означает, что емкость конденсатора на основе коллекторного перехода значительно слабее зависит от температуры по сравнению с емкостью конденсатора на основе эмиттерного перехода.

Основные параметры диффузионных конденсаторов на основе p - n -переходов типовых планарно-эпитаксиальных транзисторов приведены в табл. 3.4.

Таблица 3.4

Параметры диффузионных конденсаторов

Переход	U_d , В	C_0 , пФ/мм ²	Примечания
Коллектор — подложка	0	256	$\rho_n = 5 \text{ Ом} \cdot \text{см}$
	—5	80	$N_{ap} = 2,6 \cdot 10^{15} \text{ см}^{-3}$
	—10	56	
Коллектор — база	0	320	
	—5	144	$\rho_k = 0,5 \text{ Ом} \cdot \text{см}$
	—10	96	$N_{dk} = 1,2 \cdot 10^{16} \text{ см}^{-3}$
Эмиттер — база	0	1400	$\rho_{sb} = 200 \text{ Ом/квadrat}$
	—2	1000	
	—5	640	

Диффузионные конденсаторы на основе p - n -переходов имеют следующие особенности:

их параметры ограничены, так как определяются требованиями к параметрам транзистора;

наличие паразитного диода (транзистора) требует всегда отрицательного смещения на подложке;

емкость модулируется внешним смещением;

конденсаторы биполярны;

их добротность низкая из-за последовательно включенного резистора.

В полупроводниковых ИМС используются конденсаторы на основе p - n -переходов с номиналом $C = 300$ пФ, напряжением пробоя $U_{пр} = 7 \div 50$ В, добротностью $Q = 1 \div 10$, допуском $\delta C = \pm (15 \div 20)\%$ и ТКС $= 2 \cdot 10^{-4} \text{ 1/}^\circ\text{C}$. Образование конденсатора возможно также за счет параллельного соединения эмиттерного и коллекторного переходов транзисторной структуры.

В МДП-конденсаторах в качестве нижней обкладки используется n^+ -слой, в качестве диэлектрика — слой SiO_2 толщиной 0,08—0,1 мкм, в качестве верхней обкладки — пленка алюминия.

Такие конденсаторы характеризуются следующими параметрами: $C_0 = 650 \text{ пФ/мм}^2$, $U_{\text{нр}} = 50 \text{ В}$, $Q = 10 \div 100$ и $\delta C = \pm 10\%$. Они униполярны, их номинал не зависит от приложенного напряжения.

§ 3.7. Технология изготовления биполярных ИМС

Особенности технологии производства. Процесс изготовления ИМС состоит из определенного количества технологических операций и переходов, в результате которых из исходных материалов на пластине заданных размеров получают готовые электронные функциональные устройства — микросхемы.

Специфичной особенностью изготовления ИМС является *интегрально-групповой метод производства*. Суть его заключается в интеграции большого количества различных и однотипных элементов на едином технологическом носителе — пластине и в интеграции технологических процессов (операций) при групповых методах их проведения. Это означает, что за один технологический цикл одновременно создается не одна, а множество (до нескольких тысяч) ИМС. При этом технологической обработке подвергается целая группа (партия) пластин. Тем самым достигается основная цель интегрально-групповых методов производства — повышение процента выхода годных изделий и их качества, а также снижение стоимости ИМС.

В настоящее время не все операции технологического процесса осуществляются интегрально-групповым методом. Групповые методы объединяют все процессы и операции, применяемые к пластине как целому.

Следующая особенность — организация и реализация, как правило, всего технологического цикла изготовления ИМС на одном заводе-изготовителе. При этом технологический цикл организуется таким образом, что длительность технологических переходов сводится к минимуму и осуществляются они при помещении изделий в специальные технологические тары, что в определенной степени сказывается на качестве микросхем. Важной особенностью технологии производства ИМС является также использование аналогичных технологических процессов для изготовления микро-

схем, отличающихся по виду (функциональному назначению) и конструкции. В этом случае применяют не только отдельные технологические операции, но и весь технологический цикл с определенной последовательностью операций. Поэтому в технологии микроэлектроники существует понятие « типовые технологические процессы ». Типовой процесс — это совокупность технологических процессов или операций, выполняемых в определенной последовательности на конкретно заданном технологическом оборудовании для получения групповым методом ИМС определенной структуры и конструкции. Использование типовых процессов позволяет создавать множество различных микросхем на одной конструктивно-технологической основе, характерным для которых является одинаковый уровень качества. В этом проявляется также значительный экономический эффект интегрально-групповых методов изготовления.

Для каждого конструктивно-технологического типа ИМС разрабатывается свой типовой технологический процесс. В основу каждого типового процесса положена такая последовательность технологических операций, которая соответствует основным стадиям (этапам) формирования микросхем. Так, в технологии изготовления полупроводниковых ИМС можно выделить следующие основные стадии процесса:

- изготовление фотооригиналов и прецизионных фотошаблонов;

- подготовку партии пластин кремния и обработку их поверхности;

- формирование в пластинах кремния структур;

- создание внутрисхемных соединений;

- сборку и герметизацию.

На всех этапах изготовления, за исключением сборки и герметизации, проявляется групповой метод проведения технологических операций.

Неотъемлемой частью технологического процесса является входной, пооперационный и выходной (приемочный) контроль, а также испытания готовых микросхем.

Организационно типовой технологический процесс реализуется на технологической линии — наборе комплектов технологического, измерительного и испытательного оборудования, обеспечивающего непрерывный процесс последовательного изготовления ИМС. Составной частью технологической линии являются производственные участки. Они формируются в соответствии с основными стадия-

ми изготовления ИМС и комплектуются оборудованием, на котором реализуются технологические операции (процессы), сгруппированные по физико-химическим признакам.

При организации производства полупроводниковых ИМС создаются следующие производственные участки: фотошаблонов, фотолитографии, химический, термический (окисление, диффузия, эпитаксия), вакуумно-напылительный, сборки и монтажа, герметизации, измерительный (контроля), испытаний.

Технологический процесс изготовления корпусов не входит в состав типового процесса, а следовательно, участок корпусов не является организационной структурой для типового процесса. Это объясняется тем, что корпуса одного и того же типа могут применяться для защиты микросхем различной конструкции, изготовленных по разным типовым технологическим процессам. Поэтому технология изготовления корпусов является общей для всех разновидностей ИМС.

Специфичным для технологии изготовления ИМС является дальнейшая интеграция технологических процессов — объединение и реализация нескольких технологических операций в пределах одного производственного участка на одной технологической установке.

Основным структурным элементом полупроводниковых ИМС на биполярных транзисторах является транзисторная структура n - p - n -типа с равномерным распределением примеси в коллекторной области. На основе такой структуры создаются все активные и пассивные элементы микросхемы. Поэтому типовой технологический процесс изготовления полупроводниковых ИМС на биполярных транзисторах сводится к формированию в пластине кремния транзисторных структур n - p - n^+ -типа (с одинаковым распределением концентрации примесей и различными размерами в плане) в количестве, необходимом для реализации всех активных и пассивных элементов, к обеспечению изоляции между элементами и созданию внутрисхемных соединений.

Последовательность операций при изготовлении полупроводниковых ИМС определяется методами изоляции элементов в микросхеме и методами создания транзисторных структур. Как известно, основными методами изоляции элементов являются изоляция с помощью обратно смещенных p - n -переходов, осуществляемая разделительной диффузией в эпитаксиальный слой, изоляция диэлектриком, в основном слое окисла кремния, и комбинированная изоляция, а для формирования транзисторных структур ис-

пользуют базовые физико-химические процессы (см. гл. 2). В связи с этим различают следующие типовые процессы изготовления полупроводниковых ИМС:

планарно-эпитаксиальную технологию изготовления полупроводниковых ИМС со скрытым n^+ -слоем в коллекторных областях транзисторов и изоляцией элементов p - n -переходами (планарно-эпитаксиальная технология);

планарно-эпитаксиальную технологию изготовления полупроводниковых ИМС с изоляцией диэлектрическим слоем SiO_2 (EPIC-технология);

совмещенную технологию;

изопланарный технологический процесс изготовления полупроводниковых ИМС (изопланарная технология);

технологию изготовления полупроводниковых ИМС с применением ионной имплантации (ионно-диффузионная технология).

Планарно-эпитаксиальная технология. Последовательность формирования простой ИМС (рис. 3.21, а), содержащей транзистор, диод, резистор, конденсатор и внутрисхемные соединения, по этой технологии приведена на рис. 3.21 (на рисунке показана часть пластины, в пределах которой формируется только одна схема).

Вначале составляется партия пластин (10—20 шт.), характеризующихся одинаковыми геометрическими размерами и заданным удельным сопротивлением. В отечественной промышленности используются пластины кремния диаметром 60—100 мм и толщиной 0,2—0,4 мм с удельным сопротивлением 1—10 Ом · см. Пластины подвергают очистке путем химической обработки поверхности с последующим ее травлением и промывкой в деионизованной или дистиллированной воде. После этого поверхность пластин окисляют для создания маскирующего окисла. Окисление производят в однозонной диффузионной печи в атмосфере сухого или влажного кислорода либо паров воды при температуре около 1150° С.

Затем производят первую фотолитографию, целью которой является вскрытие окон в маскирующем слое окиси кремния для последующего формирования скрытого n^+ -слоя в коллекторных областях транзисторов. Через окна в окисле проводят диффузию сурьмы или мышьяка в две стадии на глубину 1—2 мкм; в результате формируется хорошо проводящая n^+ -область под коллектором будущего транзистора (рис. 3.21, б).

После этого удаляют окисел кремния со всей поверхно-

сти пластин, производят очистку пластин и эпитаксиальное наращивание слоя кремния n -типа (рис. 3.21, в) хлоридным методом в эпитаксиальных вертикальных реакторах при температуре около 1200°C . При этом получают слои кремния толщиной 8—12 мкм с удельным сопротивлением 0,1—1,0 Ом · см. Повторным термическим окислением создают

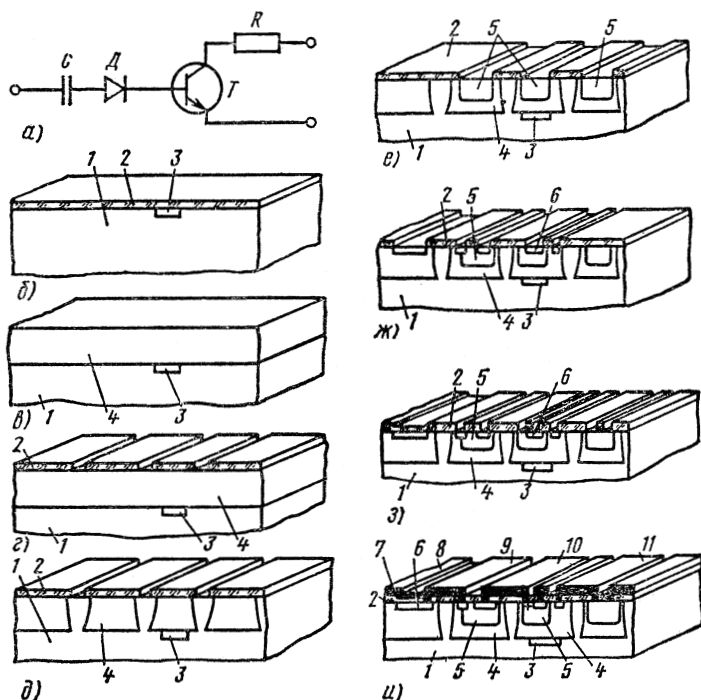


Рис. 3.21. Последовательность формирования полупроводниковой ИМС по планарно-эпитаксиальной технологии:

1 — пластина p -типа; 2 — окисел кремния; 3 — скрытый n^+ -слой; 4 — эпитаксиальный n^+ -слой; 5 — базовая p -область; 6 — эмиттерная n^+ -область; 7 — металлизация; 8 — МДП-конденсатор; 9 — диод ($U_{кб}=0$); 10 — биполярный транзистор; 11 — диффузионный резистор p -типа

слой окисла толщиной 0,5—1 мкм и второй фотолитографией формируют окна в маскирующем слое под разделительную диффузию (рис. 3.21, г).

Затем с помощью разделительной диффузии производят формирование изолирующих p -областей, для чего используют двухстадийную диффузию бора. Первую стадию диффузии проводят при более низкой температуре ($\sim 1100^{\circ}\text{C}$)

в течение незначительного промежутка времени (единицы-десятки минут), вторую — при более высокой температуре ($\sim 1200^\circ\text{C}$) в атмосфере сухого кислорода в течение времени, необходимого для проникновения бора на всю глубину эпитаксиального слоя. Тем самым создаются коллекторные n -области, изолированные p -областями (рис. 3.21, *д*). Причем распределение примесей в изолированных n -областях равномерное, а в изолирующих p -областях подчиняется закону Гаусса.

Для создания базовых областей транзисторов, резисторов и диодов в изолированные n -области проводят диффузию акцепторных примесей. Для этого в окисном слое третьей фотолитографией создают окна с размерами, необходимыми для реализации элементов с требуемыми номиналами. Базовую диффузию примеси бора проводят в две стадии. Первую стадию (загонку) осуществляют в инертной среде при температуре $900\text{—}1000^\circ\text{C}$ (в зависимости от применяемого источника диффузанта), после чего удаляют с поверхности пластин боросиликатное стекло травлением в азотной или фтористо-водородной кислоте.

Вторую стадию (загонку) производят при более высокой температуре ($\sim 1150^\circ\text{C}$) в окислительной среде, в результате чего происходит перераспределение бора на определенную глубину. При этом создаются базовые области глубиной $2,5\text{—}3,5$ мкм с удельным поверхностным сопротивлением $150\text{—}300$ Ом/квadrat, а на поверхности пластин — слой окисла кремния (рис. 3.21, *е*).

Затем формируют эмиттерные n^+ -области, которые служат эмиттером транзисторов, катодами диодов, обкладкой конденсаторов, омическими контактами к коллекторным областям, а иногда и внутрисхемными соединениями. Для этого пластины подвергают четвертой фотолитографии, с помощью которой формируются окна в окисном слое под эмиттерные и контактные области к кремнию n -типа. Формирование эмиттерных n^+ -областей осуществляют диффузией фосфора в одну или две стадии на глубину $0,8\text{—}2$ мкм. При этом создаются высоколегированные n^+ -области с удельным поверхностным сопротивлением $5\text{—}20$ Ом/квadrat (рис. 3.21, *ж*). Независимо от стадийности процесса диффузии (одна или две) распределение примеси в этих областях подчиняется функции erfc .

Заканчивается процесс формирования структур ИМС созданием внутрисхемных соединений путем металлизации алюминием (рис. 3.21, *з, и*) и пассивацией — нанесением за-

щитного покрытия, в котором фотолитографией вскрывают окна под периферийные контактные площадки. Пластины с готовыми микросхемами подвергают контролю на функционирование с помощью зондовых установок. Забракованные микросхемы метят краской, после чего пластины разделяют на кристаллы, годные из них поступают на сборку.

Основными недостатками данного типового процесса изготовления ИМС является возможность перераспределения примесей в ранее сформированных областях при последующих высокотемпературных операциях, что необходимо учитывать при расчетах и проектировании, а также наличие паразитных емкостей и токов утечки изолирующих *p-n*-переходов, что особенно сказывается в быстродействующих и микроомных цифровых и высокочастотных аналоговых ИМС.

ЕРИС-технология. Последовательность формирования простой ИМС (см. рис. 3.21, а) по данной технологии показана на рис. 3.22. Вначале формируют партию кремниевых пластин *n*-типа с удельным сопротивлением 0,1 — 10 Ом·см, после чего их подвергают химической обработке травлением.

Затем в исходные пластины диффузией сурьмы или мышьяка на глубину 1—2 мкм формируют скрытый *n*⁺-слой по всей площади пластины. После этого на поверхности пластины создается маскирующий слой окисла путем термического окисления пластин со стороны *n*⁺-слоя. Методом фотолитографии (первая фотолитография) в этом

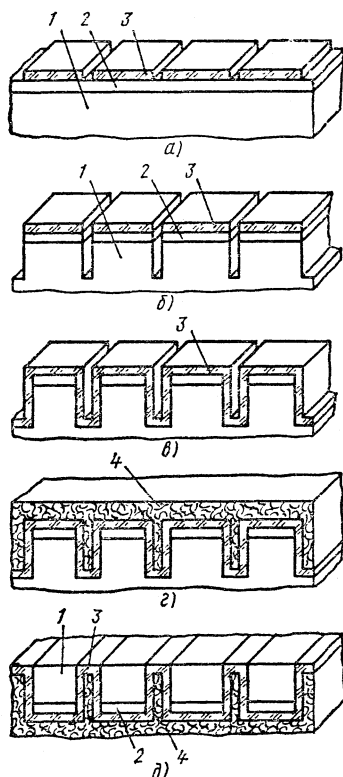


Рис. 3.22. Последовательность формирования полупроводниковой ИМС по ЕРИС-технологии:

1 — пластина кремния *n*-типа; 2 — скрытый *n*⁺-слой; 3 — окисел кремния; 4 — поликристаллический кремний

слое создают окна под изоляционные области (рис. 3.22, а). Травлением кремния в не защищенных окислом участках создают канавки глубиной 8—12 мкм (рис. 3.22, б).

На рельефную поверхность пластины наносят слой окисла толщиной около 1 мкм, для чего используют пиролиз силана или термическое окисление (рис. 3.22, в). На поверхность пластин со стороны окисленных канавок наращивают поликристаллический кремний толщиной 0,2—0,25 мм (рис. 3.22, г). Данный слой является основанием (подложкой) будущей ИМС.

После этого пластины со стороны кремния *n*-типа сошлифовывают до окисного слоя (рис. 3.22, д). Таким образом получают области кремния *n*-типа со скрытыми слоями *n*⁺-типа, изолированные друг от друга слоем SiO₂. В этих областях методами окисления, фотолитографии и диффузии формируют элементы микросхемы. Дальнейший процесс изготовления ИМС проводят аналогично планарно-эпитаксиальной технологии, начиная с формирования базовых областей.

ЕРИС-технология позволяет получить хорошую изоляцию между элементами как по постоянному, так и по переменному току, поскольку емкость, образованная окисным слоем, может быть очень малой (30 пФ/мм² при слое окисла кремния толщиной 1 мкм). Кроме того, ЕРИС-технология дает возможность изготавливать на одном кристалле высокочастотные и низкочастотные диоды с помощью селективной диффузии золота, а также облегчает изготовление на одном кристалле транзисторов *n-p-n* и *p-n-p*-типов. По данной технологии целесообразно изготавливать микромощные и быстродействующие цифровые и высокочастотные аналоговые ИМС.

Основным недостатком такой технологии является более высокая ее стоимость по сравнению с планарно-эпитаксиальной.

Совмещенная технология. Для расширения номиналов и повышения точности воспроизведения резисторов и конденсаторов в полупроводниковых ИМС, а также для улучшения их рабочих характеристик разработана специальная технология, основанная на сочетании (совмещении) полупроводниковой и пленочной технологий. Такую комбинированную технологию изготовления полупроводниковых ИМС называют совмещенной. Последовательность формирования полупроводниковой ИМС по совмещенной технологии показана на рис. 3.23. Первую группу составляют процес-

сы планарно-эпитаксиальной технологии, с помощью которых в объеме полупроводниковой пластины изготавливают активные элементы ИМС (рис. 3.23, а) и по возможности некоторые некритичные по номинальному значению и точности резисторы и конденсаторы. Вторую группу составляют процессы пленочной технологии, используемые для получения пассивных элементов — пленочных резисторов (рис. 3.23, б) и конденсаторов (рис. 3.23, в, г) непосредственно на поверхности слоя SiO_2 , выращенного на верхней поверхности монокристаллической структуры, ранее сформированной процессами первой группы.

Анализ технологического процесса изготовления совмещенных ИМС показывает, что он содержит по сравнению с обычным планарно-эпитаксиальным или ЕРИС-процессом дополнительные этапы, необходимые для формирования тонкопленочных элементов. Эти этапы, кроме увеличения продолжительности технологического цикла, удорожают производство и снижают производительность. Однако получаемые по данной технологии совмещенные ИМС обладают преимуществами как полупроводниковых, так и гибридных ИМС.

Изопланарная технология. Особенностью изопланарного процесса изготовления полупроводниковых ИМС является использование слоев SiO_2 для боковой изоляции структур. Процесс основан на селективном термическом окислении кремния на всю глубину эпитаксиального слоя вместо раздельной диффузии, проводимой в обычном планарно-эпитаксиальном процессе. Реализация такого процесса основана на использовании при маскировании на первых стадиях формирования структуры ИМС специфических свойств

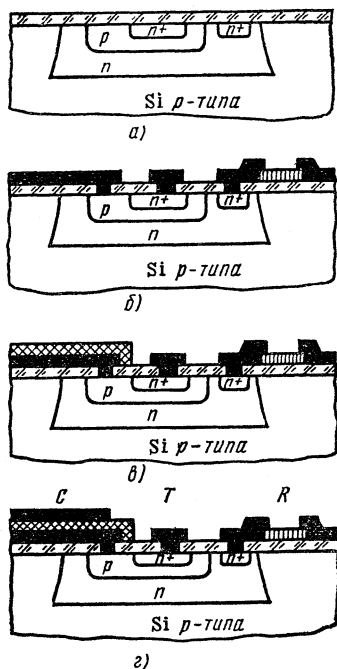


Рис. 3.23. Последовательность формирования полупроводниковой ИМС по совмещенной технологии

нитрида кремния Si_3N_4 . Нитрид кремния препятствует превращению кремния в SiO_2 в местах, где Si_3N_4 служит в качестве защитного слоя. Кроме того, нитрид кремния легко удаляется травителем на основе фосфорной кислоты, который не воздействует на окисел. Изопланарная технология

позволяет создавать тонкие базовые области и небольшие коллекторные области с окисными боковыми стенками и тем самым обеспечивает получение транзисторных структур малых размеров и высокого быстродействия.

Последовательность формирования полупроводниковой ИМС по изопланарной технологии показана на рис. 3.24. Изготовление ИМС начинается с формирования скрытого n^+ -слоя в кремниевой пластине p -типа. Затем на всей поверхности пластины выращивают тонкий (примерно 2—3 мкм) эпитаксиальный n - или p -слой (рис. 3.24, а). При изготовлении транзисторных структур с эпитаксиальной базой применяют эпитаксиальное наращивание p -слоя, а с диффузионной базой n -слоя.

После этого на поверхность пластины наносят

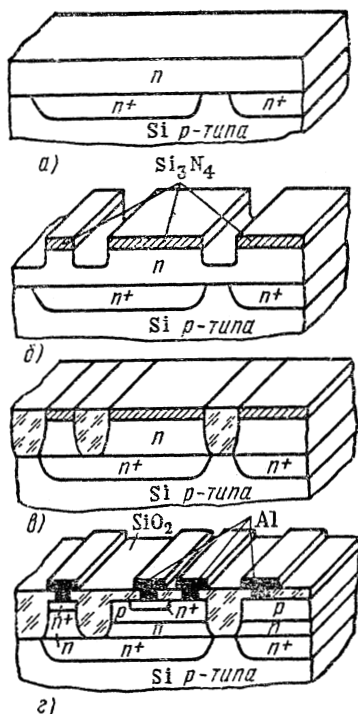


Рис. 3.24. Последовательность формирования полупроводниковой ИМС по изопланарной технологии

слой нитрида кремния, из которого формируется защитная маска для создания транзисторов и резисторов. Не защищенные нитридом области подвергают травлению на относительно большую глубину (почти до скрытого n^+ -слоя), что позволяет уменьшить высоту ступенек толстого изолирующего окисла на поверхности пластины (рис. 3.24, б). Далее проводят длительное низкотемпературное окисление, в результате которого области глубокого травления кремния запол-

няются изолирующим окислом, а участки, покрытые нитридом кремния, остаются неокисленными (рис. 3.24, в). При этом формируются изолированные окислом области кремния, в которых последующими операциями создают транзисторы, диоды и резисторы, как в планарно-эпитаксиальной технологии (рис. 3.24, г).

Использование изопланарного процесса для изготовления полупроводниковых ИМС расширяет функциональные возможности ИМС вследствие получения различных по структуре и параметрам транзисторов и резисторов. В ИМС, изготовленных по изопланарной технологии, достигается самая высокая плотность размещения элементов, так как размеры транзисторов уменьшаются вдвое по сравнению с планарно-эпитаксиальными, а также уменьшается площадь под изолирующими областями. Кроме того, при формировании структуры ИМС по изопланарной технологии ограничивается диффузия в боковом направлении и обеспечивается самосовмещение фотошаблона с пластиной при фотолитографии. Это позволяет утверждать, что изопланарный процесс является наиболее перспективным и целесообразным для изготовления быстродействующих полупроводниковых ИМС и запоминающих устройств. Данная технология применима для изготовления полупроводниковых ИМС как на биполярных, так и МДП-транзисторах, а также для совместного изготовления схем на одной пластине.

Наряду с изложенными разработан ряд технологических процессов изготовления полупроводниковых ИМС, среди которых можно выделить процессы, основанные на коллекторной изолирующей диффузии, базовой изолирующей диффузии и методе трех фотошаблонов.

В табл. 3.5 дано сравнение различных процессов изготовления полупроводниковых ИМС на биполярных транзисторах по технологичности.

Анализ данных табл. 3.5 по числу основных процессов показывает, что изопланарный процесс проще планарно-эпитаксиального, хотя он связан с глубоким окислением. Однако изопланарный процесс является наиболее перспективным для получения ИМС, имеющих высокий процент выхода годных, различную функциональную сложность и высокую плотность размещения элементов.

Технология, основанная на ионном легировании, в настоящее время наиболее применима для изготовления полупроводниковых ИМС на биполярных транзисторах для СВЧ-диапазона и ИМС, содержащих только транзисторы и

Таблица 3.5

**Сравнительная характеристика процессов изготовления
полупроводниковых ИМС**

Критерий сравнения	Типовой процесс		
	планарно-эпитаксиальный	ЕРИС	изопланарный
Число фотошаблонов	6	5	5
Число эпитаксиальных процессов	1	1	1
Число диффузий	4	3	3
Число окислений	4	4	4

резисторы. При этом для изготовления структурных областей ИМС используют либо только ионное легирование, либо ионное легирование в сочетании с диффузией. Ионное легирование в таких процессах служит для формирования базовых и эмиттерных областей или только базовых областей. В последнем случае эмиттерные области формируют диффузией, однако эмиттерную диффузию проводят раньше формирования базы. Базовые области, применяемые и в качестве резисторов, формируют ионным легированием, причем внедрение ионов в кремний проводят сквозь предварительно созданный термический окисел SiO_2 . Иногда ионное легирование используют для загонки заданного количества примеси, а разгонку осуществляют диффузией. Остальные операции проводят аналогично обычной планарной технологии.

Наибольшее применение методы ионного легирования нашли в технологии изготовления МДП-ИМС.

§ 3.8. Технология изготовления МДП-ИМС

Для технологии изготовления МДП-ИМС характерен ряд особенностей, обусловленных конструкцией и структурой самих ИМС на МДП-транзисторах. Основные из этих особенностей проявляются в следующем:

процесс изготовления сводится к формированию МДП-транзисторов и соединений между ними, поскольку МДП-транзисторы используются не только в качестве транзисторов, но также резисторов и конденсаторов, т. е. практиче-

ски все схемные функции реализуются на одних МДП-структурах;

в технологических процессах отсутствуют операции, необходимые для изоляции структур, так как в МДП-ИМС ее не требуется;

внутрисхемные соединения выполняются с помощью не только алюминиевых металлических пленок, но и высоколегированных диффузионных слоев кремния и материала затвора (молибдена, поликристаллического кремния), тем самым значительно проще решается задача многослойной разводки;

сравнительно легко можно создавать на одном кристалле МДП-транзисторы с различным типом электропроводности канала, что позволяет изготавливать МДП-ИМС с большими функциональными возможностями на комплементарных структурах, так называемые КМДП-ИМС;

отдельные технологические операции, особенно совмещение фотошаблонов при фотолитографии, диффузия, окисление и др., требуют прецизионного их проведения, поскольку размеры МДП-транзисторов значительно меньше размеров биполярных транзисторов.

ИМС на МДП-транзисторах изготавливают по планарной технологии, широко распространенной в микроэлектронике.

Технология изготовления полупроводниковых ИМС на МДП-транзисторах значительно проще технологии изготовления биполярных микросхем. Так, число основных операций при изготовлении МДП-ИМС примерно на 30% меньше по сравнению с изготовлением биполярных микросхем (табл. 3.6). При этом резко сокращается число высокотемпературных процессов, которые во многом влияют на процент выхода годных микросхем.

Таблица 3.6

**Сравнительная характеристика ИМС
по числу основных процессов**

Процессы	Число основных процессов	
	для МДП-ИМС	для бипо- лярных ИМС
Высокотемпературные	2	10 (8)
Диффузия	1	4 (3)
Фотолитография	4	6 (5)

Наиболее ответственный этап изготовления МДП-ИМС — создание диэлектрического слоя под затвором, к которому предъявляются особые требования: высокая электрическая прочность ($E \approx 10^6$ В/см), минимальная величина и стабильность зарядов в слое и др. В настоящее время изоляцию затвора в кремниевых ИМС на МДП-транзисторах осуществляют с помощью двуокиси кремния SiO_2 или двуокиси и нитрида кремния. В зависимости от структуры различают следующие технологические процессы изготовления МДП-ИМС:

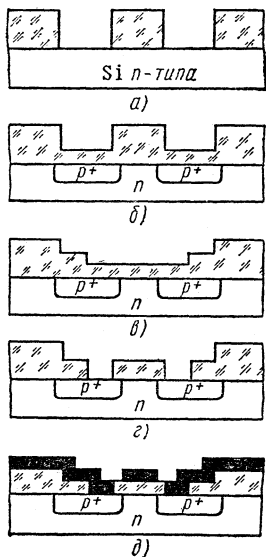


Рис. 3.25. Последовательность формирования МДП-ИМС на транзисторах с каналом p -типа

на транзисторах одного типа электропроводности;

на транзисторах с взаимодополняющими типами электропроводности (комплементарных МДП-ИМС).

Рассмотрим последовательность изготовления наиболее часто встречающихся ИМС на МДП-транзисторах с индуцированным каналом p -типа электропроводности и на комплементарных МДП-транзисторах (с взаимодополняющими типами электропроводности).

Поскольку МДП-ИМС реализуются только на МДП-транзисторах, соединенных между собой согласно принципиальной электрической схеме, ограничимся рассмотрением технологии изготовления самих транзисторов и внутрисхемных соединений.

Последовательность формирования МДП-ИМС на транзисторах с каналом p -типа показана на рис. 3.25. В качестве исходного материала применяют кремниевые пластины n -типа с удельным сопротивлением 2,5—10 Ом · см. После подготовки поверхности таких пластин (соответствующей очистки) термическим окислением создают маскирующий слой SiO_2 , в котором методом фотолитографии формируют окна под области истока и стока (рис. 3.25, а). Затем проводят двухстадийную диффузию бора, тем самым создают высоколегированные области стока и истока глубиной 1—

2 мкм (рис. 3.25, б). Далее проводят фотолитографию окон под тонкий окисел (под затвором) и тщательную очистку поверхности кремния. Термическим окислением в сухом кислороде создают окисел под будущим затвором толщиной около 0,1 мкм (рис. 3.25, в). Затем проводят фотолитографию — вскрытие окон под контакты и металлизацию алюминием, аналогично металлизации при создании ИМС на биполярных транзисторах (рис. 3.25, г, д).

По такой же технологии могут быть изготовлены МДП-ИМС на транзисторах с n -типом электропроводности, с той лишь разницей, что в качестве исходной пластины используют кремний p -типа, а формирование областей истока и стока осуществляют диффузией фосфора.

Для изготовления КМДП-ИМС необходимо в одном кристалле создавать две области монокристаллического кремния p - и n -типов электропроводности, к которым предъявляются следующие требования:

- хорошая электрическая изоляция между областями p - и n -типов;

- оптимальное удельное сопротивление каждой области;

- применимость к каждой области стандартной планарной технологии;

- надежность межсоединений.

Существуют три возможных технологических метода создания ИМС на МДП-транзисторах с каналами p - и n -типов электропроводности: создание «карманов» p -типа в кремнии n -типа и, наоборот, с помощью селективной диффузии; создание «карманов» p -типа в кремнии n -типа и, наоборот, с помощью эпитаксии; соединение между собой МДП-транзисторов, изготовленных на пластинах разного типа электропроводности. Наиболее простым из них является первый метод, так как второй требует применения сложной «рельефной эпитаксии», а третий — специальных методов сборки.

На рис. 3.26 приведена последовательность формирования КМДП-ИМС. Вначале исходную пластину кремния n -типа подвергают первичному окислению, затем выполняют фотолитографию «кармана» и двухстадийную диффузию «кармана» на необходимую глубину (рис. 3.26, а). После этого фотолитографией и диффузией поочередно формируют области истока и стока в кремнии n - и p -типов (рис. 3.26, б, в). Затем проводят фотолитографию под тонкий окисел (рис. 3.26, г) по всей пластине, выращивание тонкого слоя

окисла (рис. 3.26, δ), фотолитографию контактных окон в слое SiO_2 и металлизацию (рис. 3.26, ϵ).

Однако в процессе изготовления МДП-ИМС возникает ряд трудностей и проблем, которые сказываются на качестве ИМС и стабильности их параметров и проявляются в следующем.

1. Наличие в окисле под затвором положительных и отрицательных зарядов, обусловленных кислородными вакансиями, ионами щелочных металлов или водорода, приводит к нестабильности параметров МДП-транзисторов с приложением к структуре электрического поля вследствие дрейфа зарядов.

2. При определенных значениях потенциалов на шинах металлизированной разводки возможно образование паразитных МДП-транзисторов, что приводит к образованию каналов проводимости под окислом, расположенным под шиной разводки, а значит, к возникновению токов утечки между диффузионными областями. Кроме того, для МДП-ИМС опасным является короткое замыкание металла затвора или разводки на подложку, особенно на высоколегированные области истока и стока, вследствие проколов окисла.

3. Существенной проблемой изготовления МДП-ИМС является совмещение затвора с областями истока и стока. Так, отсутствие перекрытия канала металлом затвора приводит к неработоспособности МДП-транзистора, а слишком большое перекрытие (расположение металла затвора над диффузионными областями) — к образованию больших емкостей затвор — исток и затвор — сток, что снижает быстродействие ИМС.

Для преодоления этих трудностей и проблем разработаны специальные технологические приемы. Так, при стабилизации параметров ИМС на МДП-транзисторах применяют специальные методы обработки (очистки) поверхности кремния перед созданием окисла под затвор, наносят фосфоро-

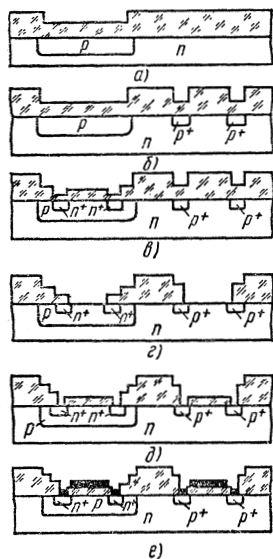


Рис. 3.26. Последовательность формирования КМДП-ИМС

силикатное стекло на поверхность окисла под затвор, а также производят низкотемпературный отжиг микросхем в восстановительной среде. Важным при этом является и режим создания окисла, требующий подачи окислителя (кислорода) в строго контролируемом дозированном количестве и предварительно очищенном состоянии при температуре, близкой к температуре процесса окисления. Для предотвращения образования паразитных МДП-транзисторов под шинами разводки металлизацию выполняют по окислу с относительно большой толщиной (порядка 1,5 мкм), который получают при первичном окислении. Для более точного совмещения затвора с областью канала используют технологию изготовления МДП-транзисторов с *самосовмещающимися* (фиксированными) *затворами* на основе, например, поликристаллического кремния или молибдена. Процесс изготовления МДП-ИМС с толстым окислом называют *МТОП-технологией* (металл — толстый окисел — полупроводник). Ее сущность заключается в том, что вначале на поверхности пластины выращивают толстый слой SiO_2 , в котором с помощью фотолитографии вытравливают окна под общую область истока, стока и канала. После этого пластину снова подвергают термическому окислению, в результате чего создают маскирующий окисел, в котором формируют окна под исток и сток. Затем проводят обычные операции для формирования структуры ИМС.

Технология изготовления МДП-ИМС на транзисторах с *фиксированными затворами* основана на том, что после создания толстого окисла и вскрытия окон в нем под активные области выращивают тонкий окисел под затвор, формируют затвор необходимых конфигураций и размеров, а затем формируют области истока и стока. При этом материал затвора служит маской, и тем самым осуществляется процесс самосовмещения затвора.

Существуют два направления создания МДП-ИМС с фиксированным затвором: диффузия с использованием затвора из кремния или молибдена и ионное легирование с использованием металлического затвора.

Таким образом, технология изготовления современных МДП-ИМС основана на получении толстого окисла и фиксированных затворов. Для изготовления МДП-ИМС наиболее распространенными являются следующие типовые технологические процессы: самосовмещенный толстоокисный, изопланарный, самосовмещенный с применением ионного легирования.

Наибольший практический интерес представляет *изопланарная технология*. Особенностью этой технологии является изоляция МДП-структур слоем окисла SiO_2 и использование толстоокисной самосовмещенной технологии для получения МДП-транзисторов с кремниевыми затворами в изолированных областях. При такой технологии все активные области МДП-ИМС — области истоков, стоков, каналов и диффузионные соединения формируют на мезаобластях, окруженных слоем окисла кремния и выступающих над утопленной неактивной поверхностью пластины

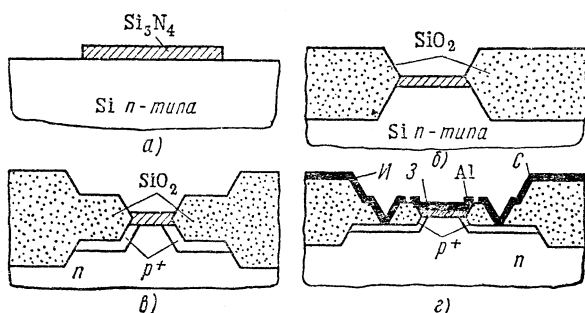


Рис. 3.27. Последовательность формирования МДП-ИМС по изопланарной технологии

(рис. 3.27, а, б). При этом активные мезаобласти покрывают двойным диэлектрическим слоем, состоящим из слоя нитрида кремния, осажденного на слой окисла. Такой двойной слой защищает мезаобласти от последующей неглубокой диффузии при формировании локальных p^+ -областей и от локализованного выращивания толстого окисла (рис. 3.27, в). Благодаря этому слою достигается самосовмещение диффузионных областей истока и стока с затвором. Металлизированные соединения в таких МДП-ИМС формируются на толстом окисле (рис. 3.27, г).

Изопланарная технология позволяет изготавливать МДП-ИМС с высокой плотностью размещения элементов и улучшенными электрическими характеристиками. Такие МДП-ИМС легко изготавливаются совместно с ИМС на биполярных транзисторах.

Ионное легирование в технологии МДП-ИМС применяют в двух целях: 1) для самосовмещения затвора с диффузионными областями; 2) для получения МДП-транзисторов, ра-

ботающих в режиме обеднения с низким пороговым напряжением. В первом случае для изготовления МДП-ИМС используют так называемую комбинированную диффузионно-ионную технологию. Согласно этой технологии основные этапы формирования структуры осуществляют по обычной технологии; при этом области истока и стока создают диффузионным способом до выращивания окисла. Ионное легирование применяют на последней стадии изготовления ИМС, когда создается «встроенный» канал в промежутке между областью стока и металлом затвора, сдвинутого в сторону истока; при этом достигается самосовмещение затвора. Во втором случае ионное легирование также используют на последней стадии изготовления ИМС, когда МДП-структуры уже сформированы, например, по толстоокисной технологии. При этом часть структуры подвергают ионному легированию, с помощью которого между p^+ -областями истока и стока формируются встроенные каналы p -типа. Это позволяет получать транзисторы, работающие в режиме обеднения, которые служат в качестве нагрузочных элементов. Тем самым достигается улучшение схемных параметров ИМС.

§ 3.9. Сборка и герметизация полупроводниковых ИМС

Этап сборки является частью общего технологического процесса изготовления ИМС и включает в себя следующие завершающие операции:

- разделение пластины на кристаллы, содержащие микросхемы;

- монтаж кристаллов в корпус;

- монтаж внешних (по отношению к кристаллу) выводов; герметизацию;

- маркировку.

Сборку полупроводниковых ИМС производят после групповой обработки пластин, в результате которой тем или иным технологическим процессом создаются структуры микросхем с металлизацией. Перед сборкой контролируют функционирование микросхем — проверяют работоспособность по тестовым программам и выявляют негодные участки пластин.

Разделение пластины на кристаллы выполняют несколькими методами, основными из которых являются:

- скрайбирование и раскалывание — нанесение на поверхность пластины сетки линий алмазным резцом с по-

следующим раскалыванием по этим линиям под воздействием изгибающих усилий;

резрезание травлением — покрытие пластины слоем парафина и фоторезиста и вытравливание непокрытых граничных участков;

разрезание ультразвуком — воздействие ультразвуковых колебаний на абразивную суспензию, которая через специальные отверстия в головке преобразователя, соответствующие форме и размерам кристалла, поступает на пластину.

Наибольшее распространение в производстве полупроводниковых ИМС получил метод *скрайбирования*. При этом пластину помещают на вакуумный патрон, ориентируют в горизонтальной плоскости и алмазным резцом под соответствующим давлением наносят риски (тонкие царапины) на ее поверхность в двух взаимно перпендикулярных направлениях. После этого пластину снимают с патрона и раскалывают на кристаллы по линиям скрайбирования (либо вручную путем пропускания пластины через резиновые валики, либо машинным способом, основанным на контакте сферической поверхности с пластиной, помещенной на резиновой подушке).

После разделения выбраковывают негодные ИМС, а остальные кристаллы очищают от кремниевой пыли и других посторонних частиц. Очищенные кристаллы, содержащие одну или несколько микросхем, поступают на участок сборки, где их устанавливают в корпус, присоединяют выводы, герметизируют и маркируют. Корпус ИМС должен иметь достаточную механическую прочность, небольшие размеры, хорошую герметичность и обеспечивать высокие электрические характеристики схемы. Для полупроводниковых ИМС применяют в основном следующие типы корпусов (рис. 3.28):

корпусы (тип II) прямоугольной формы с выводами, расположенными с двух сторон и изогнутыми перпендикулярно монтажной плоскости корпуса (рис. 3.28, а);

корпусы (тип III) в форме круглого цилиндра с выводами, расположенными по кругу с одной из плоских сторон цилиндра перпендикулярно монтажной плоскости корпуса (рис. 3.28, б);

корпусы (тип IV) прямоугольной формы с выводами, расположенными параллельно монтажной плоскости корпуса (рис. 3.28, в). Конструктивные данные и размеры корпусов установлены ГОСТ 17467—79.

Монтаж кристаллов на основание корпуса осуществляют пайкой твердым припоем или легкоплавким стеклом в зависимости от типа корпуса и необходимости электрического контакта кристалла с корпусом. При монтаже в металлический корпус используют твердый припой, представляющий собой эвтектический сплав золото — германий или золото — кремний с температурами плавления 356 и 370° С соответственно. Изоляции кристалла от основания корпуса не требуется, так как пластина полупроводниковой ИМС всегда имеет самый низкий потенциал.

Кристаллы монтируют (рис. 3.29, а) на однопозиционной машине пайки или в конвейерной печи в атмосфере инертного газа. В стеклянных или пластмассовых корпусах, в которых отсутствует металлическая пластина, кристалл прикрепляют легкоплавким стеклом в атмосфере инертного газа при температуре до 525° С (рис. 3.29, б).

После монтажа кристалла в корпус выполняют соединения контактных площадок с выводами корпуса. Такие соединения осуществляют с помощью проволочных выводов различными методами: *пайкой*, *термокомпрессией* или *ультразвуковой сваркой*. Наибольшее распространение получил метод термокомпрессии, при которой полупроводниковый кристалл нагревают до температуры около 300° С, а золотую проволоку диаметром 20—50 мкм присоединяют к контактной площадке под давлением в течение нескольких

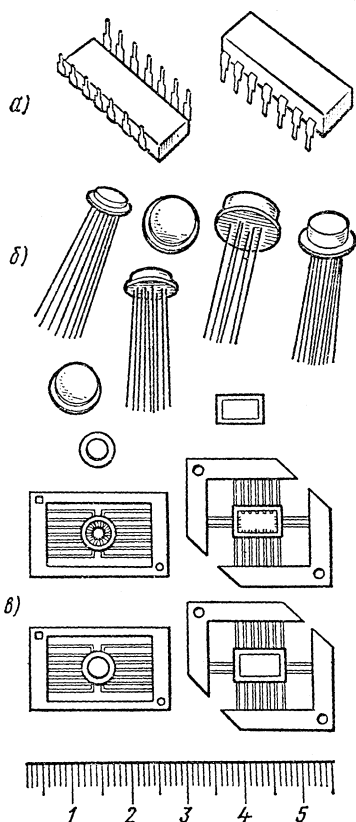


Рис. 3.28. Корпусы для полупроводниковых ИМС

секунд. Кроме золотых проволок используют также алюминиевые.

На рис. 3.30 схематически показано поперечное сечение полупроводниковой ИМС после выполнения соединений между контактными площадками и выводами корпуса. Для герметизации кристаллов ИМС в корпусах применяют следующие методы:

контактную сварку крышки корпуса с его основанием (для корпусов типа III);
пайку крышки к основанию корпуса (для корпусов типа IV);

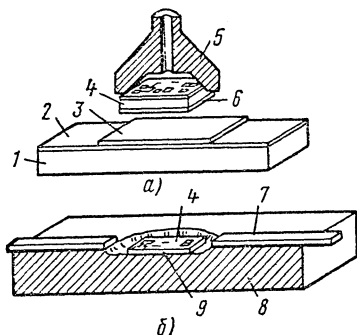


Рис. 3.29. Монтаж кристаллов на основание металлического (а) и пластмассового (б) корпуса:

1 — основание металлического корпуса; 2, 6 — слой золота; 3 — эвтектический сплав Au — Si; 4 — кристалл; 5 — вакуумный патрон; 7 — вывод корпуса; 8 — основание пластмассового корпуса; 9 — стекло

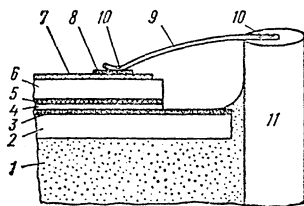


Рис. 3.30. Поперечное сечение полупроводниковой ИМС:

1 — основание корпуса; 2 — ковар; 3 — сплав Au — Si; 4 — слой золота; 5 — сплав Au — Si; 6 — кристалл; 7 — окисел кремния; 8 — алюминий; 9 — золотая проволока; 10 — термокомпрессионное соединение; 11 — вывод корпуса

формовку заливкой или трансферную пресовку (для корпусов типа II).

Если полупроводниковые ИМС используют в качестве компонентов гибридных ИМС и БИС, применяют бескорпусную защиту. После герметизации ИМС маркируют: на крышке корпуса указывают тип микросхемы, дату изготовления и шифр завода-изготовителя.

В течение всего процесса сборки после каждой операции проверяют работоспособность микросхем, а после завершения сборки их подвергают испытаниям.

§ 3.10. Этапы разработки и проектирования полупроводниковых ИМС

Проектирование полупроводниковых ИМС существенно отличается от проектирования схем на дискретных элементах и носит комплексный характер. Это обусловлено преж-

де всего интеграцией двух ранее не связанных процессов: 1) разработки и изготовления дискретных элементов; 2) разработки и изготовления микросхем. На схемотехнику ИМС оказывают сильное влияние технические, надежность, технологические и конструктивные характеристики составных элементов. Определяющей при проектировании является технология изготовления полупроводниковых ИМС, а для реализации элементов микросхем — транзисторная структура, параметры которой также определяются технологией. Поэтому с появлением нового или с изменением существующего технологического процесса в схемотехнике, а следовательно, и в проектировании появляется своя специфика. Так, при проектировании полупроводниковых ИМС необходимо учитывать паразитные активные и пассивные связи между элементами (подложкой), взаимосвязь параметров элементов и допусков на параметры за счет технологических разбросов, ограничений на пассивные элементы и др.

Проектирование полупроводниковых ИМС включает целый комплекс сложных задач, решение которых требует применения машинных методов. Как правило, одновременно проектируют серию микросхем. Цикл проектирования подразделяют на следующие основные этапы:

- определение функционального состава серии микросхем и технических требований к каждой микросхеме;

- синтез и анализ принципиальных электрических схем, разрабатываемых в интегральном исполнении;

- разработка и оптимизация системы параметров и методов их контроля;

- выбор физической структуры и расчет параметров активных и пассивных элементов;

- разработка топологии.

В большинстве случаев проектирование ведут на основе исходных данных освоенного технологического процесса с установившейся физической структурой и известными параметрами активных элементов. Если на базе известного технологического процесса невозможно получить требуемые параметры микросхем, то создают новый технологический процесс с требуемой физической структурой. При этом процесс проектирования усложняется за счет многократного повторения всех этапов (кроме первого) в различных вариантах. Рассмотрим особенности основных этапов проектирования.

Функциональный состав серии полупроводниковых ИМС и технические требования к ним определяют, как правило, при разработке радиоэлектронного устройства или задают в виде функциональных узлов, предназначенных для построения широкого класса аппаратуры. При этом важной является разработка принципиальных электрических схем, которая должна учитывать технологические возможности их изготовления и применения в различной аппаратуре. Одновременно уточняют требования к каждой принципиальной схеме, исходя из выполняемой функции и предполагаемой технологии изготовления.

Второй этап проектирования полупроводниковых ИМС значительно сложнее аналогичного этапа проектирования схем на дискретных элементах, так как здесь необходимо учитывать паразитные связи сложными эквивалентными схемами.

Задачей *синтеза* принципиальных электрических схем является определение их оптимальных вариантов по определенному набору параметров, которые полностью удовлетворяют требованиям технического задания.

После выбора принципиальных электрических схем их тщательно анализируют с целью выявления соответствия внешних характеристик техническим требованиям, уточнения схемы и параметров элементов. На этом этапе проектирования рассчитывают принципиальную электрическую схему, определяют параметры элементов, исследуют распределение выходных параметров и устанавливают браковочные нормы технических условий.

Задачей *анализа* принципиальных электрических схем является моделирование переходных процессов, протекающих в схеме, для расчета ее характеристик. Анализ сводится к определению выходных параметров микросхемы при различных значениях параметров элементов и внешних условиях. Главным на этом этапе является выбор математической модели анализируемой микросхемы. Математическая модель составляется на основе принципиальной электрической схемы с учетом эквивалентных схем составных и паразитных элементов и представляет собой систему нелинейных дифференциальных уравнений. Моделирование переходных процессов осуществляют машинными методами. В настоящее время разработаны алгоритмы для анализа логических и линейных микросхем, что значительно упрощает решение данной задачи на ЭВМ.

После этого проводят *статистический анализ микросхем*, заключающийся в определении гистограмм выходных параметров и оценке числовых характеристик их распределений при заданных допусках на параметры элементов. Таким образом, выявляется определенное соответствие между допусками на параметры микросхемы и элементов. Статистический анализ микросхем обычно выполняют методом Монте-Карло. При таком анализе устанавливают также браковочные нормы на параметры микросхемы.

Далее на основе анализа (иногда в процессе анализа) полупроводниковых ИМС определяют, а в процессе накопления статистических данных по характеристикам микросхем уточняют систему измеряемых параметров. При этом полупроводниковую ИМС рассматривают как многополюсник, а ее параметры находят по основным характеристикам многополюсника: входным, выходным, передаточным. Измеряемые параметры для каждой ИМС оптимизируют по минимальному числу, достаточно полному для характеристики микросхемы в соответствии с техническими требованиями. Все эти параметры измеряют непосредственно в виде значений токов, напряжений и временных интервалов. Для измерений и контроля параметров составляют специальные тесты и разрабатывают контрольно-измерительную аппаратуру, которая по возможности должна быть универсальной для измерения параметров различных типов и серий микросхем.

Выбор физической структуры и расчет параметров элементов можно выполнять двумя способами. Если технология изготовления ИМС известна, то выбирают физическую структуру, рассчитывают для нее физические параметры и на основе этих данных производят расчет параметров активных и пассивных элементов. Если же существующая технология не удовлетворяет требованиям проектируемой микросхемы, то сначала на основе электрических параметров активных элементов рассчитывают физические структуры, а затем определяют технологические режимы. Необходимо отметить, что разработка физической структуры свойственна только проектированию полупроводниковых ИМС.

Рассмотрим наиболее распространенный первый способ на примере проектирования полупроводниковых ИМС на биполярных транзисторах.

Исходя из электрических и конструктивных особенностей транзисторов, выбирают планарно-эпитаксиальную

структуру. По известным технологическим параметрам и режимам изготовления данной структуры производят расчет и построение профиля примесных распределений в планарно-эпитаксиальном транзисторе. Для этого используют известные законы распределения примесных атомов при формировании базовой и эмиттерной областей транзистора. Отметим, что при формировании эмиттерной области, содержащей высокую концентрацию примеси, наблюдается концентрационная зависимость коэффициента диффузии. Это необходимо учитывать при построении примесного распределения в эмиттерной области.

Практически для данного распределения применяют методы аппроксимации кривой распределения тремя кривыми, для каждой из которых вводят усредненный для данного участка коэффициент диффузии. По результатам расчета строят кривую результирующего распределения примесных концентраций в планарно-эпитаксиальной структуре. Затем определяют внутренние статические поля в структуре транзистора и производят расчет усилительных (путем решения уравнения непрерывности) и частотных (путем решения уравнения плотностей токов) свойств транзистора. Одновременно определяют и другие физические параметры структуры. После этого рассчитывают геометрию транзисторов, диодов, диффузионных резисторов и конденсаторов.

Для ИМС на МДП-транзисторах выбор физической структуры сводится к выбору удельного сопротивления пластины, толщины окисла под затвором и параметров диффузионных областей с учетом требуемых электрических параметров: напряжений пробоя, порогового напряжения, крутизны и др. На данном этапе проектирования пользуются также машинными методами расчета.

Разработка топологии является основным этапом проектирования полупроводниковых ИМС, на котором решается задача компоновки элементов микросхемы и соединений между ними с учетом технологических возможностей. Топологический чертеж микросхемы служит основой для разработки конструкторско-технологической документации на ее изготовление, в частности на изготовление фотошаблонов и сборки.

Исходными при разработке топологии являются следующие данные и требования:

электрические (принципиальная электрическая схема, частотный диапазон и др.);

технологические (параметры структуры, минимально

допустимые расстояния между элементами и точность получения заданной геометрии);

конструктивные (тип корпуса, расположение выводов, крепление кристалла и др.).

При проектировании топологии вначале разрабатывают эскизный вариант. Для этого принципиальную электрическую схему перечерчивают таким образом, чтобы выводы располагались в необходимой последовательности, а все элементы соединялись с минимальным числом пересечений. Далее определяют число изо-

лированных областей. Получив приемлемый эскиз, разрабатывают предварительный вариант топологии. Топологию вычерчивают в масштабах 100 : 1; 200 : 1; 500 : 1 или 1000 : 1 с учетом всех данных, требований и ограничений. При этом необходимо учитывать точность воспроизведения фотолитографии, уход геометрических размеров при диффузии и применять групповой метод компоновки элементов. Основным принципом предварительного варианта топологии — размещение максимального числа элементов на кристалле минимальных размеров.

После этого оценивают качество разработанной топологии, уточняют ее и получают окончательный вариант. Оценку качества производят по схемотехническим, технологическим и конструктивным критериям. К ним относится оценка емкостных связей, температурного режима, обеспечение реализации элементов с заданными номиналами и т. д. В последнее время при проектировании полупроводниковых ИМС применяют ЭВМ совместно с координатографами (устройствами для вычерчивания топологических чертежей) для машинного проектирования топологической структуры. При этом все варианты топологии анализируются и оптимизируются ЭВМ.

При проектировании топологии полупроводниковых МДП-ИМС необходимо учитывать следующее. Все логические схемы могут быть выполнены полностью на одних МДП-структурах. Между МДП-транзисторами не требует-

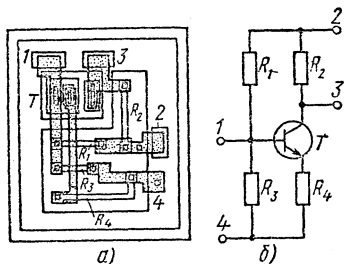


Рис. 3.31. Фрагмент топологии полупроводниковой ИМС на биполярных транзисторах (а) и ее электрическая схема (б)

ся изоляции. В качестве внутрисхемных соединений часто используют диффузионные высоколегированные слои.

В качестве примера на рис. 3.31, а показан фрагмент топологии, а на рис. 3.31, б — электрическая схема четырехвыводной полупроводниковой ИМС на биполярных транзисторных структурах.

Таким образом, все основные этапы проектирования полупроводниковых ИМС взаимосвязаны, что приводит иногда к многократному повторению цикла проектирования с целью наиболее полного использования технологических возможностей.

Контрольные вопросы

1. Как классифицируют полупроводниковые ИМС по конструктивно-технологическому исполнению?
2. Нарисуйте структуры основных типов полупроводниковых ИМС и приведите их характеристику.
3. Какие методы изоляции применяют в полупроводниковых ИМС?
4. Какая структура транзистора и почему используется для построения биполярных ИМС?
5. Какие разновидности транзисторных структур используют для построения полупроводниковых ИМС? Как распределены примеси в структурных областях?
6. Какими основными параметрами характеризуются планарно-эпитаксиальные транзисторы?
7. Какую роль выполняют скрытые слои в транзисторных структурах?
8. Дайте характеристику структуры и основных параметров транзисторов с барьером Шоттки.
9. Дайте характеристику структуры и основных параметров многоэмиттерных транзисторов.
10. Дайте характеристику структуры и основных параметров многоколлекторных транзисторов.
11. Как реализуются диоды в полупроводниковых ИМС?
12. Дайте характеристику основных параметров диодов.
13. Как реализуются резисторы в полупроводниковых ИМС?
14. Дайте характеристику основных параметров диффузионных резисторов
15. Как реализуются конденсаторы в полупроводниковых ИМС?
16. Дайте характеристику основных параметров полупроводниковых конденсаторов.
17. Как формируется структура ИМС по планарно-эпитаксиальной технологии?
18. Как формируется структура ИМС по ЕРИС-технологии?
19. Как формируется структура ИМС по изопланарной технологии?
20. Какие технологические процессы используют для изготовления биполярных и МДП-ИМС?
21. Как формируются структуры МДП-и КМДП-ИМС?

22. В чем особенность технологии изготовления ИМС?
23. Сравните различные технологические процессы изготовления ИМС.
24. Как осуществляют сборку ИМС?
25. Какие корпуса применяют для полупроводниковых ИМС?
26. Как осуществляют монтаж кристаллов в корпус?
27. Дайте характеристику основных этапов разработки полупроводниковых ИМС.
28. Как осуществляют проектирование полупроводниковых ИМС?
29. Каковы основные этапы проектирования топологии полупроводниковых ИМС?
30. Каковы особенности проектирования МДП-ИМС?

Глава 4

ГИБРИДНЫЕ ИНТЕГРАЛЬНЫЕ МИКРОСХЕМЫ

§ 4.1. Конструкция гибридных ИМС

Как указывалось в гл. 1, в пленочных интегральных микросхемах пассивные элементы (резисторы, конденсаторы, индуктивные катушки) и активные элементы (диоды, транзисторы) выполняются в виде тонких пленок. Однако активные пленочные элементы не получили широкого распространения ввиду технологических трудностей создания стабильных во времени по электрическим характеристикам пленочных диодов и транзисторов. Большое применение нашли микросхемы, в которых наряду с пленочными пассивными элементами используются дискретные, в основном бескорпусные диоды, транзисторы и интегральные микросхемы. Они получили название гибридных интегральных микросхем.

По технологическому принципу изготовления гибридные ИМС подразделяют на *толстопленочные* и *тонкопленочные*. При изготовлении толстопленочных микросхем на изолирующую подложку наносят через сетку-трафарет проводящие, резистивные и диэлектрические композиции с последующим вжиганием (резисторы, конденсаторы, проводники). Толщина наносимых пленок, образующих элементы микросхемы, составляет от единиц до десятков микрометров. При изготовлении тонкопленочных микросхем пассивные элементы получают путем последовательного нанесения проводящих, резистивных и диэлектрических слоев толщиной порядка десятых и сотых долей микрометра. Необходимая конфигурация элементов в этом случае дости-

гается либо с помощью трафаретов в процессе нанесения пленки, либо путем избирательного химического травления сплошной пленки.

Навесные активные элементы (транзисторы, диоды, микросхемы и др.) крепят на плате с пленочными пассивными элементами или на основании корпуса микросхемы. Для защиты от внешних воздействий и создания выводов микросхему помещают в корпус. При выборе корпуса, размеры которого стандартизированы, учитывают компоновку эле-

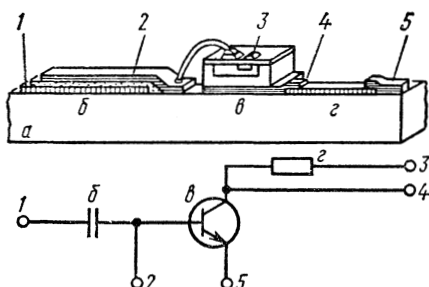


Рис. 4.1. Поперечное сечение и электрическая схема гибридной ИМС:

a — керамическая подложка; *б* — конденсатор; *в* — транзистор; *г* — резистор

вертикальными разреженными линиями — слой хрома, вертикальными сгущенными линиями — слой из хромистого никеля, а горизонтальными линиями — слои внутрисхемных соединений из золота или серебра; цифрами отмечены участки микросхемы, обозначенные на электрической схеме.

Основными конструктивными элементами гибридной ИМС являются:

подложка, на которой размещаются пассивные и активные элементы;

пленочные резисторы, конденсаторы, проводники, контактные площадки;

навесные бескорпусные полупроводниковые приборы (или кристалл полупроводниковой ИМС) с гибкими проводочными выводами или с жестко фиксированной системой выводов (типа шариков и балок);

навесные миниатюрные пассивные элементы (конденсаторы с емкостями больших номиналов, трансформаторы,

возможность теплоотвода, эксплуатационные характеристики активных и пленочных элементов. Наибольшее распространение получили металlostеклянные, металлокерамические и пластмассовые корпуса.

На рис. 4.1 изображено устройство гибридной ИМС на примере простейшей электрической цепи. Здесь точками показан слой диэлектрика из окиси кремния,

дрессели), которые применяют в исключительных случаях;

корпус для герметизации микросхемы и закрепления ее выводов.

Оптимальная конструкция гибридной ИМС определяется различными факторами: плотностью упаковки элементов, мощностью рассеяния, номиналами элементов и допусками на них, процентом выхода годных изделий, стоимостью и др.

Наивысшая плотность упаковки достигается при многослойном расположении пленочных элементов с использованием в качестве прокладок между ними пленок диэлектрика. Однако при этом практически невозможен доступ к внутренним элементам, что исключает возможность подгонки номиналов и увеличивает число технологических операций, а также снижает процент выхода годных изделий. Минимальные линейные размеры элементов составляют 100—200 мкм, максимальная площадь конденсаторов порядка 2 см².

Навесные активные элементы имеют гибкие выводы из золотой проволоки диаметром 25—50 мкм и подсоединяются к пленочной микросхеме пайкой или сваркой. Для закрепления элементов на подложке применяют влагостойкие клеи и компаунды.

Следует отметить, что использование активных элементов с гибкими выводами затрудняет автоматизацию и механизацию этих операций. Поэтому в настоящее время помимо проведения работ по механизации и автоматизации сборки микросхем с гибкими выводами применяют полупроводниковые приборы с жесткими выводами. Наибольшее распространение получили приборы с шариковыми и балочными выводами.

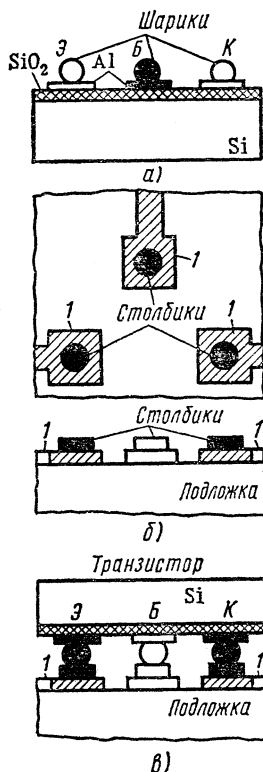


Рис. 4.2. Схема монтажа бескорпусных транзисторов с шариковыми выводами:

а — транзистор с шариковыми выводами; б — контактные столбики на подложке пленочной микросхемы; в — соединение шариков с контактными столбиками; (1 — контактные площадки на подложке и выводы от них)

В бескорпусном транзисторе с шариковыми выводами (рис. 4.2, а) шарики диаметром 50—100 мкм соединены с контактными площадками транзистора, а через них с тем или иным слоем кремния: эмиттерным (Э), базовым (Б) или коллекторным (К). Шарики изготовляют из золота, меди или сплава Sn — Sb. Из того же материала на диэлектрической подложке гибридной ИМС делают контактные столбики высотой 10—15 мкм и диаметром 150—200 мкм, расположенные в точном соответствии с расположением шариков на кристалле кремния (рис. 4.2, б).

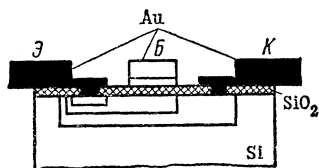


Рис. 4.3. Конструкция бескорпусного транзистора с балочными выводами

Соединение шариков со столбиками осуществляется методом перевернутого кристалла, при котором кристалл транзистора переворачивается шариками вниз и накладывается на столбики подложки (рис. 4.2, в). Подогревая шарики и столбики при определенном давлении, получают их прочное соединение между собой. За одну операцию получают все три необходимых соединения. Количество соединений при таком монтаже вдвое меньше, чем при проволочном, а транзистор не требует специального места на подложке.

Хорошие результаты дают ИМС при использовании бескорпусных транзисторов с балочными выводами (рис. 4.3). В этом случае контактные площадки продлены за пределы кристалла и нависают над его краями на 100—150 мкм (отсюда и название — балки). Толщина балок (10—15 мкм) значительно больше толщины металлической разводки на кристалле. Поэтому их получают не напылением, а электрохимическим осаждением золота (с подслоем из титана). Длина балочных выводов 200—250 мкм (включая выступ), а ширина такая же, как у обычных контактных площадок (50—200 мкм).

Монтаж приборов с балочными выводами может осуществляться так же, как и приборов с шариковыми выводами — методом перевернутого кристалла. При этом выступающие балки хорошо видны и их совмещение с контактными площадками на подложке не представляет затруднений и является более надежным. Можно монтировать кристалл и «лицом вверх», но тогда в подложке делают углубление для кристалла.

Несмотря на то что изготовление шариковых и балочных выводов сложнее и дороже, чем проволочных, они позволяют существенно упростить и удешевить сборочные операции (самые дорогие в технологическом цикле), а также повысить надежность, увеличить выход годных изделий.

Рассмотрим отдельные элементы гибридных ИМС.

§ 4.2. Элементы толстопленочных гибридных ИМС

Толстопленочная гибридная ИМС представляет собой керамическую подложку с пассивными и активными элементами, армированную необходимым числом выводов, закрытую со стороны электрической схемы металлическим колпачком и залитую с обратной стороны эпоксидным компаундом (рис. 4.4).

Основными элементами толстопленочной гибридной ИМС являются подложка, пленочные резисторы, конденсаторы, соединительные проводники и корпус.

К подложкам толстопленочных микросхем предъявляются следующие требования: хорошие механические и диэлектрические свойства, необходимая точность линейных размеров и высокая чистота поверхности, хорошие теплопроводность и адгезия к наносимым материалам, достаточная термическая и химическая стойкость. Этим требованиям удовлетворяет высокоглиноземистая керамика, которая применяется в основном для изготовления подложек толстопленочных микросхем. Подложки в большинстве случаев имеют размеры $10 \times 10 \times 1$ и $16 \times 10 \times 1$ мм. Допуски на размеры подложек достаточно высокие ($\pm 0,05$ мм) для обеспечения высокомеханизированного производства.

Резисторы, конденсаторы и соединительные проводники наносят на подложку в виде пленок через трафареты. Для этой цели используют специальные пасты, которые подразделяют на проводящие, резистивные и диэлектрические. На рис. 4.5 показан пример простейшего рисунка толстопленочной микросхемы. Трафареты изготавливают в виде сетки из нержавеющей стальной проволоки (или

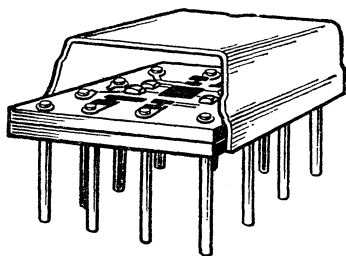


Рис. 4.4. Общий вид толстопленочной гибридной ИМС (увеличено в четыре раза)

других материалов) диаметром 0,04—0,07 мм; размеры ячеек в сетке порядка сотых долей миллиметра. Перед нанесением рисунка сетку равномерно натягивают и закрепляют на жесткую рамку. После тщательного обезжиривания и промывки на сетку равномерным слоем наносят фоторезист. После высыхания фоторезиста на него проектируют рисунок фототрафарета, при этом прямые линии фототрафарета совмещают с линиями сетки. После экспонирования

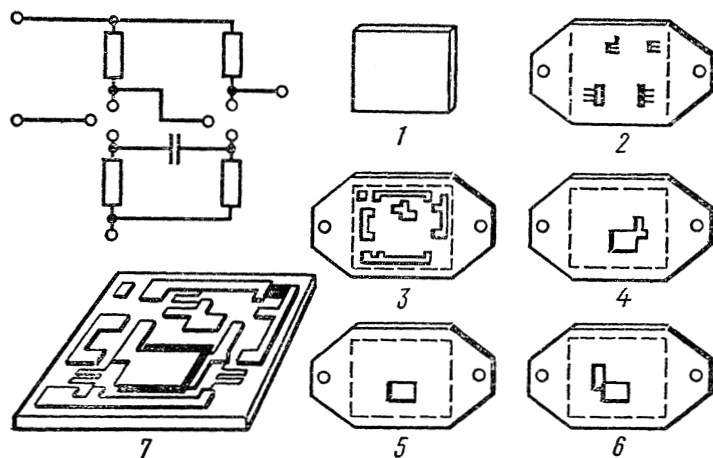


Рис. 4.5. Простейший рисунок толстопленочной гибридной ИМС и трафареты для его получения:

1 — керамическая подложка; 2 — трафарет для резисторов; 3 — трафарет для соединительных проводников; 4 — трафарет для нижней обкладки конденсатора; 5 — трафарет для диэлектрической пленки; 6 — трафарет для верхней обкладки конденсатора; 7 — общий вид рисунка микросхемы

ультрафиолетовым светом пленка полимеризуется, а неэкспонированные участки рисунка растворяют. Таким образом, часть ячеек в трафарете остается открытой, образуя рисунок необходимой конфигурации.

Подложку, на которую наносят пасту, устанавливают под трафаретом на некотором расстоянии от него, пасту размещают поверх трафарета и передвижением ракеля через отверстия в трафарете переносят на подложку в виде столбиков, копирующих отверстия в сетке. Растекаясь, эти столбики соединяются, образуя такой же рисунок, как на трафарете. Схема нанесения пасты через сетку-трафарет показана на рис. 4.6.

После нанесения пасты подложки подвергают термической обработке. Режимы термической обработки зависят от конструкции печи и состава паст. Один из возможных режимов термической обработки паст показан на рис. 4.7. Термическая обработка паст производится в большинстве случаев в конвейерных печах, которые обеспечивают высокую производительность и процент выхода годных изделий.

Основные параметры резисторов и конденсаторов толсто-пленочных микросхем приведены в табл. 4.1.

После получения на подложке проводников, конденсаторов и резисторов производят ее армиро-

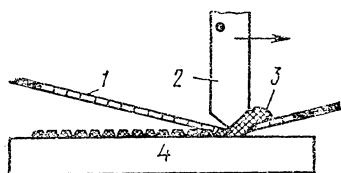


Рис. 4.6. Схема нанесения пасты через сетку-трафарет:

1 — сетка-трафарет; 2 — рапель; 3 — паста; 4 — подложка

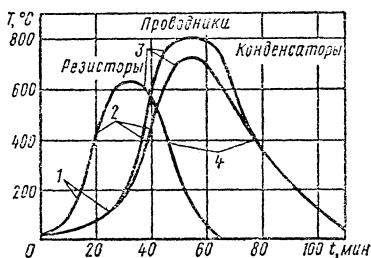


Рис. 4.7. Режим термообработки проводящих, резистивных и диэлектрических паст:

1 — сушка; 2 — выжигание органической связки; 3 — спекание; 4 — охлаждение

вание металлическими штырьками — выводами, обеспечивающими электрические соединения при монтаже в аппаратуре.

Толсто-пленочные резисторы даже при хорошо отработанной технологии имеют разброс сопротивлений порядка $\pm 20 \div 30\%$. Такой разброс в большинстве случаев не удовлетворяет требованиям электрической схемы, и его необходимо значительно уменьшить. Поэтому производят подгонку сопротивлений до нужного номинального значения. Существующие методы подгонки позволяют выполнять ее с точностью до 1% и выше.

Имеются различные методы подгонки сопротивлений: механический, лазерный, токовый, химические и др. При механическом методе подгонку осуществляют алмазным бором, вращающимся с угловой частотой до 100 000 об/мин, путем фрезерования резистивной пленки. Подгоняемое сопротивление соединено с эталоном по мостовой схеме. При достижении необходимого значения подгоняемого сопротивления турбина отключается и процесс подгонки автоматически прекращается.

Таблица 4.1

**Основные параметры резисторов и конденсаторов
толсто пленочных гибридных ИМС**

Параметр	Резисторы	Конденсаторы
Толщина пленки, мкм	15—20	25—30 (диэлектрик)
Минимальный размер, мм	$0,6 \times 0,6$	1×1
Удельное поверхностное сопротивление, Ом/квадрат	20—10 000	—
Удельная емкость, пФ/см ²	—	3700
Температурный коэффициент сопротивления, 1/°С	$\pm 8 \cdot 10^{-4}$	—
Температурный коэффициент емкости, 1/°С	$\pm 2 \cdot 10^{-4}$	$4 \cdot 10^{-4}$
Пробивное напряжение, В	—	150
Диэлектрическая проницаемость	—	250
Тангенс угла диэлектрических потерь	—	0,02
Диапазон номиналов, Ом, пФ	$(5-3) \cdot 10^6$	60—350
Удельная мощность рассеяния, Вт/см ²	0,5	—

При лазерном методе подгонки у резистора удаляется (испаряется) часть проводящей пленки, что приводит к увеличению сопротивления. При подгонке твердотельным лазером, имеющим небольшую частоту подачи импульсов, дорожка подгонки образуется последовательно наложенными друг на друга и частично перекрытыми лунками. При необходимости получения высокой производительности подгонки резисторов целесообразнее применять не твердотельные, а газовые лазеры.

Химический метод подгонки состоит в том, что горячая струя кислорода или водорода, направляемая на резистор, восстанавливает или окисляет его проводящие компоненты, тем самым увеличивая или уменьшая сопротивление резистора.

Наиболее прогрессивным является лазерный метод подгонки сопротивлений. Он обеспечивает высокую производительность за счет большой скорости испарения при воздействии луча лазера; установка подгонки имеет более высокую надежность. Кроме того, в случае применения лазера с модулированной добротностью резонатора, генерирующего излучения длительностью несколько десятков наносекунд, испарение материала происходит лишь на глубину в несколько микрон, что позволяет производить подгонку

емкости конденсатора за счет испарения его верхней обкладки.

В целях дальнейшего увеличения выхода годных изделий кроме перечисленных может быть использован метод

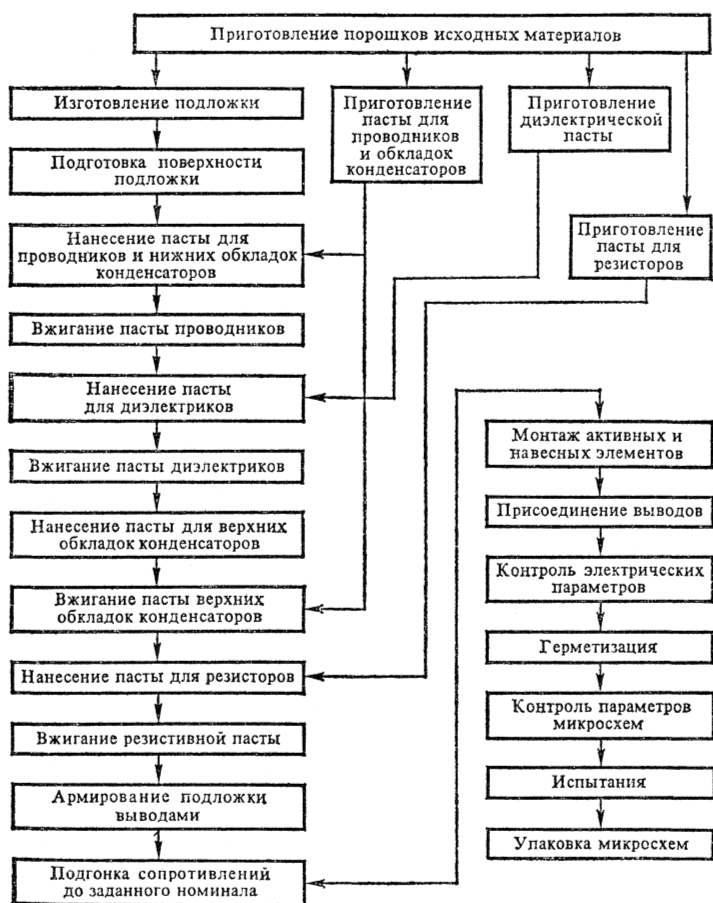


Рис. 4.8. Последовательность операций при изготовлении толстопленочных гибридных ИМС

токовой подгонки сопротивлений, позволяющий корректировать номинал сопротивления в сторону уменьшения за счет уплотнения структуры резистивной пленки под воздействием тока.

После подгонки сопротивлений резисторов монтируют активные элементы (диоды, транзисторы, кристаллы полупроводниковых ИМС) в соответствии с электрической схемой. Заключительными операциями являются герметизация и контроль параметров.

Последовательность операций при изготовлении толстопленочных гибридных ИМС показана на рис. 4.8. Помимо указанных основных операций выполняется ряд подготовительных операций: подготовка паст, изготовление активных элементов, установка и лужение выводов и др.

§ 4.3. Методы получения тонких пленок

В гибридных ИМС тонкие пленки используют для изготовления резисторов, конденсаторов, контактных площадок и соединительных проводников. Существуют различные методы получения тонких пленок: термическое (вакуумное) напыление, катодное напыление, ионно-плазменное напыление, химическое осаждение, электрохимическое осаждение. Наиболее распространено термическое (вакуумное) напыление тонких пленок. Напыление металлических и резистивных пленок производят в специальных установках в среде инертного газа при низком давлении. Испарителями являются проволоочки, ленты, «лодочки», подогреваемые проходящим через них током.

Термическое напыление. На рис. 4.9 показана принципиальная схема установки для термического напыления тонких пленок. Колпак напылителя, установленный на монтажном столе, герметизирует всю систему. Во избежание натекания в систему все вводы и выводы выполняют вакуумно-плотными. Материал, который должен быть осажден, помещают в испаритель, изготовленный из тугоплавкого металла с низкой летучестью (в большинстве случаев вольфрам или молибден). Иногда для изготовления испарителя используют скрученную проволоку. Распыляемый материал должен быть высокой чистоты. Испаритель нагревают до тех пор, пока давление паров материала не превысит давление в вакуумной системе. Атомы испарившегося материала движутся прямолинейно и конденсируются на всех поверхностях, имеющих более низкую температуру, включая подложку. Для обеспечения прямолинейности движения атомов давление в системе должно быть снижено до такого значения, при котором вероятность столкновений между атомами испаренного материала и газа мала. Средняя дли-

на свободного пробега атомов должна быть в несколько раз больше; чем расстояние между источником и подложкой. Опыт показывает, что качество пленки тем лучше, чем выше вакуум напылительной установки.

Основным преимуществом метода термического напыления является его простота и возможность получения при высоком вакууме очень чистых пленок.

Общий вид промышленной установки, используемой при нанесении тонких пленок методом термического напыления, показан на рис. 4.10. Внутрикамерное устройство этой установки содержит восьмипозиционную карусель масок и подложек. Привод, расположенный в верхней части рабочей камеры, может вращать карусель с угловой частотой 40 — 150 об/мин. На одной из позиций карусели устанавливают имитатор с закрепленными на нем датчиками контроля температуры и сопротивления пленки в процессе осаждения. На базовой плите

монтируют пятипозиционную карусель резистивных испарителей. Максимальная температура испарения 1500°C . Диафрагма, расположенная над каруселью на позиции испарения, обеспечивает равномерную толщину наносимой пленки. Поток испаряемого материала прерывают заслонкой с электромагнитным приводом. Над каруселью подложек и масок устанавливают кольцевой нагреватель резистивного типа мощностью $3\text{ кВ} \cdot \text{А}$. Одновременно можно загружать восемь подложек размерами $60 \times 48 \times 0,6\text{ мм}$; допустимая температура нагрева 400°C .

Катодное напыление. Хорошие результаты по воспроизводимости свойств тонких пленок дает катодное напыление. Этот метод широко используется в промышленности для нанесения пленок металлов и окислов. Схема установки для катодного напыления приведена на рис. 4.11.

При катодном напылении энергия, необходимая для отрыва атомов от исходного материала, получается не термическим путем, а в результате бомбардировки ионами

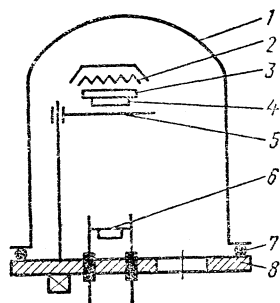


Рис. 4.9. Принципиальная схема установки для термического напыления тонких пленок:

1 — колпак; 2 — нагреватель;
3 — держатель; 4 — подложка;
5 — поворотная заслонка; 6 — испаритель; 7 — прокладка; 8 — опорная плита

высокой энергии. Последние получают с помощью либо высокочастотного разряда, либо тлеющего разряда между двумя электродами в среде инертного газа, например аргона.

Одним из преимуществ метода катодного напыления по сравнению с методом термического напыления является то, что напыление катода не связано с высокой температурой.

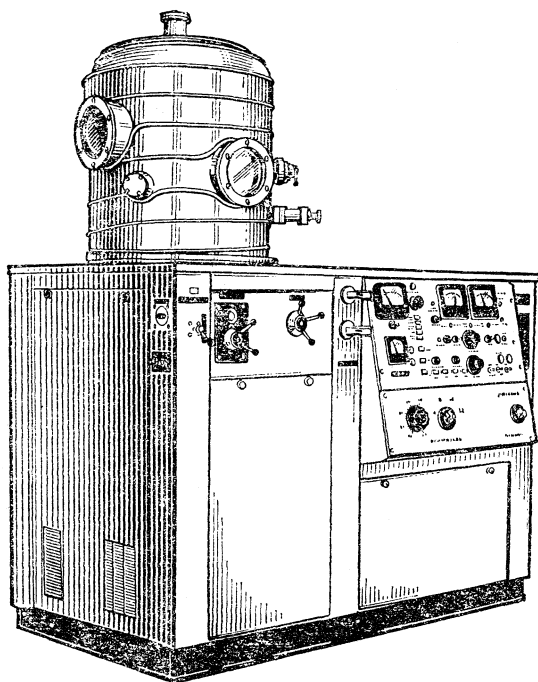


Рис. 4.10. Общий вид вакуумной напылительной установки

Следовательно, исчезают трудности при напылении тугоплавких материалов. Однако при данном методе катод (напыляемый материал), будучи элементом газоразрядной цепи, должен обладать высокой проводимостью. Это требование ограничивает ассортимент напыляемых материалов. В частности, оказывается невозможным напыление диэлектриков.

Указанное ограничение в значительной мере устраняется при использовании *реактивного* (или химического) катод-

ного напыления, особенность которого состоит в добавлении к основной массе инертного газа небольшого количества активных газов, способных образовать необходимые химические соединения с распыляемым материалом катода. Примешивая, например, к аргону кислород, можно вырастить на подложке пленку окисла. Примешивая к аргону азот или моноокись углерода, можно получить нитриды или карбиды соответствующих металлов. В зависимости от парциального давления активного газа химическая реак-

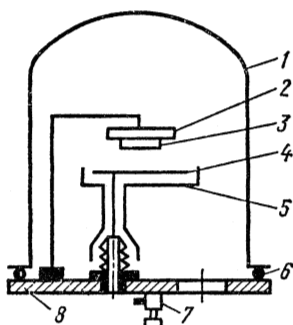


Рис. 4.11. Принципиальная схема установки для катодного напыления:

1 — колпак; 2 — держатель; 3 — подложка; 4 — катод; 5 — испаритель; 6 — прокладка; 7 — штуцер; 8 — опорная плита

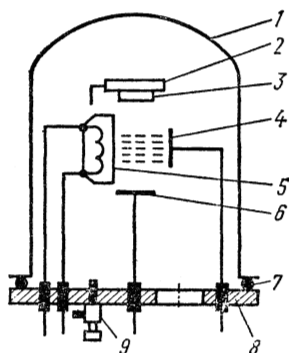


Рис. 4.12. Принципиальная схема установки для ионно-плазменного напыления:

1 — колпак; 2 — держатель; 3 — подложка; 4 — электрод; 5 — электрод; 6 — мишень; 7 — прокладка; 8 — опорная плита; 9 — штуцер

ция может происходить либо на катоде (и тогда на подложке осаждается уже готовое соединение), либо на подложке — аноде.

К недостаткам метода катодного напыления относятся некоторая загрязненность пленок (из-за использования сравнительно низкого вакуума), меньшая по сравнению с термическим методом скорость напыления (по той же причине), а также сложность контроля процессов.

Ионно-плазменное напыление. Принципиальная схема установки для ионно-плазменного напыления показана на рис. 4.12. Основная особенность этого метода по сравнению с методом катодного напыления состоит в том, что в промежутке между электродом 6 — мишенью (с нанесенным на нее напыляемым материалом) и подложкой 3 действует не-

зависимый, «дежурный» газовый разряд. Разряд имеет место между электродами 5 и 4, причем тип разряда — несамостоятельный, дуговой. Для него характерны наличие специального источника электронов в виде накаливаемого катода 5, низкие рабочие напряжения (десятки вольт) и большая плотность электронно-ионной плазмы. Подколпачное пространство, как и при катодном напылении, заполнено нейтральным газом, но при более низком давлении (10^{-3} — 10^{-4} Па).

Процесс напыления состоит в следующем. На мишень относительно плазмы (практически относительно заземленного анода 4) подается отрицательный потенциал (2—3 кВ), достаточный для возникновения аномального тлеющего разряда и интенсивной бомбардировки мишени положительными ионами плазмы. Выбиваемые атомы мишени попадают на подложку и осаждаются на ней.

Начало и конец процесса напыления определяется подачей и отключением напряжения на мишени. Наличие механической заслонки позволяет реализовать важную дополнительную возможность: если до начала напыления закрыть заслонку и подать потенциал на мишень, то будет иметь место *ионная очистка* мишени. Такая очистка полезна для повышения качества напыляемой пленки. Аналогичную очистку можно проводить на подложке, подавая на нее отрицательный потенциал.

При напылении диэлектрических пленок возникает затруднение, связанное с накоплением на мишени положительного заряда, препятствующего дальнейшей ионной бомбардировке. Это затруднение преодолевают путем использования *высокочастотного* (ВЧ) ионно-плазменного напыления.

На рис. 4.13 показана схема основной части установки для ВЧ-напыления диэлектриков. На этой установке диэлектрик бомбардируется поочередно ионами и электронами тлеющего разряда, возникающего в газе при воздействии на него высокочастотного поля. Ионы выбивают из диэлектрика молекулы, которые затем осаждаются на подложке. Электроны предотвращают образование на подложке положительных зарядов. Электроны и ионы образуются в аргоне, окружающем диэлектрик, который служит материалом для осаждения.

Большим преимуществом метода ионно-плазменного напыления перед другими является его безынерционность. Напыление материала происходит лишь при подаче напряжения и сразу прекращается при его выключении, в отли-

чие от термического напыления. Для прекращения напыления применяют специальные заслонки, препятствующие прохождению пара от испарителя к подложке.

Рабочее давление при ионно-плазменном напылении лежит в диапазоне $1,3 \cdot 10^{-1} — 6,5 \cdot 10^{-2}$ Па, что в 50—100 раз меньше, чем при напылении в тлеющем разряде. Длина свободного пробега ионов при этом составляет 5—25 см. Расстояние между источником напыления и подложкой можно установить меньше длины свободного пробега. Благодаря этому напыляемые атомы почти не сталкиваются с молекулами газа и ионами в пространстве между мишенью и подложкой, что уменьшает загрязнение пленки остаточными газами. Состав и свойства пленок, полученных методом ионно-плазменного напыления, ближе к составу и свойствам исходного напыляемого материала по сравнению с пленками, полученными путем напыления в тлеющем разряде. Материал мишени напыляется медленно, и его обычно хватает на несколько тысяч циклов напыления, чем достигается хорошая повторяемость состава пленок.

Прочность сцепления с подложкой (адгезия) пленки, полученной ионно-плазменным методом, очень высока, что объясняется высокой энергией попадающих на подложку напыленных атомов. Эта энергия примерно в 20 раз больше энергии атомов, попадающих на подложку при термическом напылении в вакууме. Высокая адгезия пленки объясняется еще и тем, что при ионно-плазменном напылении поверхность подложки удается предварительно хорошо очистить тлеющим разрядом. При катодном методе, когда напыление начинается сразу же после возбуждения разряда, такую очистку осуществить трудно.

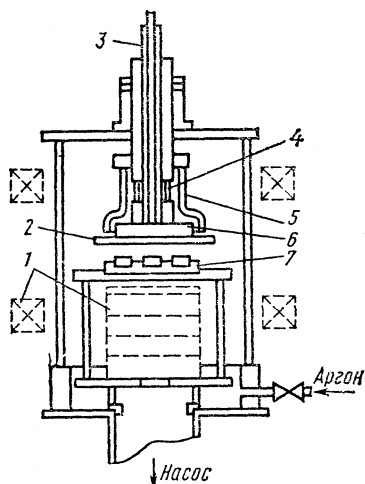


Рис. 4.13. Схема основной части установки для ВЧ-напыления диэлектриков:

1 — электромагниты; 2 — диэлектрик; 3 — высокочастотный водоохлаждаемый ввод; 4 — керамическое уплотнение; 5 — заземленный экран; 6 — высокочастотный электрод; 7 — держатель подложек с системой подогрева и охлаждения

Метод ионно-плазменного напыления является наиболее перспективным в производстве ИМС для получения пленок из разных материалов с различными свойствами.

Электрохимическое осаждение. В технологии микроэлектроники для получения пленочных покрытий с различными свойствами наряду с вакуумными применяют химические методы: электролитическое и химическое осаждение, анодное окисление. В основу данных методов положены реакции, протекающие в водных растворах солей металлов в условиях приложенного электрического поля (или без него). В результате взаимодействия продуктов реакции с подложкой образуется пленка.

Электролитическое осаждение — это осаждение пленок из водных растворов солей металлов (электролитов) под действием электрического тока, которое осуществляют в специальных электролитических ваннах, заполненных электролитом и содержащих два электрода: анод и катод. В качестве подложки, которая является катодом, используют проводящие материалы, анод выполняют из инертного (по отношению к электролиту) материала или из материала, из которого осаждается пленка.

Методом электролитического осаждения получают пленки из различных металлов: меди, никеля, золота, серебра и др.

В тонкопленочной технологии микроэлектроники электролитическое осаждение применяют для изготовления многослойных металлических масок, повышения проводимости внутрисхемных соединений, создания жестких и балочных выводов в ИМС, золочения корпусов. Метод электролитического осаждения широко применяют также для получения тонких магнитных пленок, используемых в качестве элементов памяти.

Химическое осаждение основано на восстановлении металлов из водных растворов их солей ионами гипофосфита и осуществляется без приложения электрического поля. Химическим методом осаждают пленки никеля, серебра, золота, палладия и других материалов как на проводящие, так и на непроводящие подложки.

Анодное окисление — это взаимодействие химически активных металлов с ионами кислорода, выделяющимися у анода при электролизе с образованием окисной пленки. Процесс анодного окисления, или анодирование, имеет много общего с электролитическим осаждением. В отличие от электролитического осаждения в данном случае пленки

образуются на аноде, которым является подложка. В процессе анодирования происходит электрохимическая реакция соединения кислорода с металлом в приповерхностных слоях подложки, причем металл анода не растворяется, а при взаимодействии с кислородом образует плотно сцепленную с подложкой окисную пленку. Механизм роста пленки заключается в переносе ионов кислорода через растущий окисный слой под действием электрического поля, возникающего в пленке с приложением к электродам напряжения от внешнего источника. Скорость роста окисной пленки зависит от природы электролита, условий проведения процесса — электрического режима и температуры. Толщина окисной пленки при анодировании пропорциональна количеству электричества, прошедшего через ванну.

В технологии микроэлектроники анодированием получают окисные пленки из тантала и алюминия. При этом сначала на подложку вакуумным методом наносят пленку исходного металла, которую впоследствии подвергают локальному анодированию. Процесс получения окисных пленок анодированием состоит из первоначальной формовки при постоянной плотности тока и окончательной формовки при постоянном напряжении. Такое ведение процесса обусловлено тем, что с ростом толщины пленки ее возрастающее сопротивление приводит к снижению силы тока.

Особенностью получения анодированных пленок является их рост в условиях приложенного электрического поля, напряженность которого достигает 10^7 В/см. Такие пленки характеризуются высокой электрической прочностью, поэтому их используют в качестве изолирующих и диэлектрических слоев.

Вакуумное нанесение пленок тантала и алюминия с последующим анодированием позволяет создавать высококачественные пленочные конденсаторы и изолирующие слои при многослойной разводке. Основным преимуществом при этом является получение различных пленочных структур из одинаковых исходных материалов.

В технологии микроэлектроники анодирование используют также для получения необходимого значения сопротивления пленочных танталовых резисторов путем превращения верхнего проводящего слоя тантала в непроводящий окисел тантала.

В последнее время широко применяют плазменное анодирование — получение ионов кислорода из кислородной

плазмы в специальных вакуумных камерах с остаточным давлением кислорода около 6 Па при приложении постоянного напряжения 1 кВ.

§ 4.4. Подложки для гибридных ИМС

Подложки в пленочных микросхемах играют важную роль. Во-первых, подложка является конструктивной основой пленочной микросхемы. На нее наносят в виде тонких пленок пассивные элементы и размещают контакты для подключения микросхемы в аппаратуру. Во-вторых, материал подложки и его обработка оказывают существенное влияние на параметры осаждаемых пленочных слоев и надежность всей микросхемы.

К материалу подложки предъявляются следующие основные требования: высокое удельное электрическое сопротивление, механическая прочность при небольших толщинах, химическая инертность к осаждаемым веществам, высокая физическая и химическая стойкость при нагревании до нескольких сотен градусов, отсутствие газовыделений в вакууме, хорошая полируемость поверхности и, наконец, не дефицитность и невысокая стоимость. Кроме того, коэффициент термического расширения материала подложки должен быть по возможности близок к коэффициенту термического расширения напыляемых материалов.

В настоящее время материала, в одинаковой мере удовлетворяющего большому числу разнообразных требований, не существует. К сожалению, большая группа органических материалов не может быть использована в качестве подложек, поскольку технологическая обработка микросхем ведется в вакууме и при повышенных температурах. Поэтому для изготовления подложек выбирают лишь стекло и керамику. При этом рекомендуются только некоторые типы стекол и керамики. Применение монокристаллов в качестве подложек пленочных гибридных ИМС ограничивается трудностью их получения и высокой стоимостью.

Из стекол лучшими для подложек являются боросиликатные и алюмосиликатные сорта. Путем листового проката этих стекол получают достаточно гладкую поверхность, не прибегая к полировке.

К недостаткам подложек из стекла следует отнести плохую теплопроводность, что не позволяет применять их при повышенных мощностях нагрева. При интенсивном на-

греве предпочтительнее стекло типа «Пирекс», а также кварц и кварцевое стекло.

Основным преимуществом керамических подложек по сравнению со стеклянными является их высокая теплопроводность. Так, керамика на основе окиси бериллия имеет в 200—250 раз большую теплопроводность, чем стекло. Однако даже незначительная добавка некоторых примесей (например, окиси алюминия) резко снижает ее теплопроводность. Недостатком керамики является большая шероховатость ее поверхности. Микронеровности необработанной керамики достигают нескольких сотен нанометров и значительно снижаются после полировки, однако последняя может загрязнить поверхность и изменить свойства керамики. Шероховатость можно значительно уменьшить путем глазурования поверхности керамики тонким слоем бесщелочного стекла. При этом высокая теплопроводность керамической основы сочетается с гладкой поверхностью стеклянной глазури.

В настоящее время все большее применение для подложек пленочных микросхем находят такие материалы, как ситалл и фотоситалл.

Ситалл представляет собой стеклокерамический материал, получаемый термообработкой (кристаллизацией) стекла. В отличие от большинства высокопрочных кристаллических материалов он хорошо обрабатывается. Его можно прессовать, вытягивать, прокатывать и отливать центробежным способом. Температурный коэффициент линейного расширения ситалла порядка $5 \cdot 10^{-6} \text{ } 1/^{\circ}\text{C}$ в интервале температур $+20 \div +300^{\circ}\text{C}$, теплопроводность составляет $3,4 \cdot 10^{-3} \text{ Вт/(м} \cdot \text{К)}$, диэлектрическая проницаемость равна 8—9, тангенс угла диэлектрических потерь при частоте $1 \times 10^6 \text{ Гц}$ и температуре $+20^{\circ}\text{C}$ порядка 2×10^{-3} . Температура деформации ситалла выше, чем температура начала размягчения исходного стекла. Ситалл выдерживает резкие перепады температур в воздушной среде: от -60°C до $+700^{\circ}\text{C}$. Он обладает высоким электрическим сопротивлением, которое несколько уменьшается с повышением температуры. По электрической прочности ситалл не уступает лучшим образцам вакуумной керамики. По механической прочности этот материал в 2—3 раза прочнее стекла. Ситалл имеет высокую сопротивляемость истиранию, обладает высокой химической стойкостью к кислотам. Он не порист, дает незначительную объемную усадку,

газонепроницаем и имеет малую газоотдачу при высоких температурах.

Фотоситалл — это стеклокристаллический материал, получаемый путем кристаллизации светочувствительного стекла. Основными составными частями фотоситалла являются окиси кремния (75%), лития (11,5%), алюминия (10%) и калия (3,5%) с небольшими добавками азотнокислого серебра и двуокиси церия. Фотоситалл устойчив к кис-

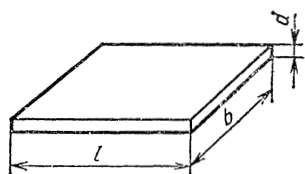


Рис. 4.14. Подложка для гибридных ИМС

лотам, обладает высокой механической и термической стойкостью. Его теплопроводность в несколько раз превышает теплопроводность ситалла, температурный коэффициент линейного расширения в диапазоне температур 20—120° С составляет 9×10^{-6} °С, удельное объемное сопротивление при 150° С равно $10^9 - 10^{10}$ Ом · см.

Подложки, применяемые для гибридных ИМС, имеют, как правило, квадратную и прямоугольную формы (рис. 4.14). Рекомендуются следующие размеры подложек

Ширина b , мм	30	24	20	16	16	16	12	12	10	10
Длина l , мм	48	30	24	60	30	20	48	30	16	12

Толщину d подложек рекомендуется принимать равной 0,6 и 1,6 мм. В отдельных случаях подложки могут быть и более тонкими (до 0,2 мм). Подложки размерами 48 × 60 мм из стекла и ситалла и 100 × 100, 50 × 50 мм из стекла применяют обычно для одновременного напыления одной или нескольких плат с последующей разрезкой в соответствии с размерами, приведенными выше. Материал подложки и технология изготовления должны обеспечивать требуемый класс чистоты ее поверхности. Высокая чистота поверхности подложки необходима для обеспечения однородности и воспроизводимости электрических параметров схемных элементов микросхемы и для создания необходимых предпосылок использования процессов вакуумного осаждения или фототравления.

Поверхность подложки характеризуется двумя параметрами: плоскостностью и микрорельефом. Применяемые подложки микросхем имеют в большинстве случаев удовлетворительную плоскостность, и основное внимание уделяется микрорельефу. Очень важно, чтобы поверхность

пленки имела возможно меньшие неровности по высоте и, главное, была бы без резких выступов и впадин. Диэлектрические пленки особенно чувствительны даже к единичному незначительному дефекту на поверхности подложки. Высота гребешков микрорельефа допускается не более 250 нм.

Микрорельеф меньше влияет на резистивные пленки, чем на емкостные элементы микросхемы. Это связано с тем, что поры и другие единичные дефекты составляют, как правило, лишь небольшую часть ширины полоски сопротивления и обычно не вызывают обрывов или чрезмерной концентрации тока в этих местах. Однако грубый микрорельеф обуславливает дополнительный разброс удельного сопротивления пленки при производстве микросхемы.

§ 4.5. Пленочные резисторы

В гибридных ИМС широко используют тонкопленочные резисторы, которые наносят на подложки в виде узких полосок (или иных конфигураций), заканчивающихся контактными площадками с высокой проводимостью (рис. 4.15). Качество резистивных пленок оценивают удельным поверхностным сопротивлением ρ_s . Значение ρ_s зависит от удельного сопротивления материала и толщины пленки и является постоянным для пленочного резистора квадратной формы любых размеров. Действительно, если принять, что сторона квадрата пленки из материала с удельным сопротивлением ρ равна a , а толщина d , то сопротивление

$$R = \frac{\rho l}{S} = \frac{\rho a}{ad} = \frac{\rho}{d} = \rho_s, \quad (4.1)$$

где R имеет размерность Ом/квадрат.

Ширину резистивной линии принимают обычно не менее 0,2 мм, так как более узкая линия может приводить к обрывам из-за дефектов маски или подложки, а также из-за наличия случайных пылинок. Кроме того, чем уже линия, тем сильнее влияет зона подпыления или тень в щели маски на получение требуемого номинала сопротивления.

Практически установлено, что лучше всего изготавливать резисторы прямоугольной формы. При одной и той же толщине резистивной пленки можно получать различные сопротивления, отличающиеся по номиналу в десятки раз. Для этого достаточно изменять отношение длины пленки к ее ширине. Максимальная мощность, рассеиваемая на резисторе, ограничена его допустимой температурой и зави-

сит от теплопроводности подложки, ее материала, отношения площади, занятой резистором, ко всей площади подложки, а также от выбранного способа охлаждения и температуры окружающей среды.

Материал, используемый для изготовления резистивных пленок, должен обеспечивать возможность получения широкого диапазона стабильных во времени сопротивлений, обладать низким температурным коэффициентом со-

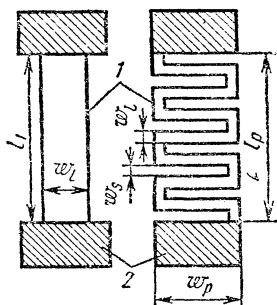


Рис. 4.15. Конструкции тонкопленочных резисторов:
1 — резистивная пленка; 2 — пленочные контактные площадки

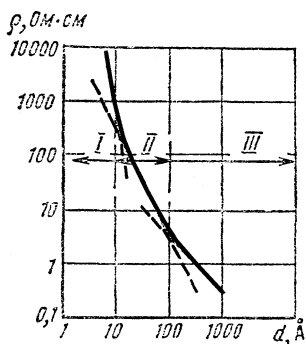


Рис. 4.16. Зависимость удельного сопротивления пленки от ее толщины:
I — область туннельного эффекта; II — область нарушенной поверхности; III — область объемных свойств

противления и высокой коррозионной стойкостью. При напылении он должен образовывать тонкие, четкие линии с хорошей повторяемостью их от образца к образцу. Характеристики некоторых материалов, применяемых при изготовлении тонкопленочных резисторов, приведены в табл. 4.2. Следует отметить, что указанные в таблице значения являются ориентировочными, так как они существенно зависят от метода нанесения пленки и режима ее обработки. Удельное сопротивление пленки определяется как ее составом, так и структурой, которая изменяется в процессе термообработки.

На рис. 4.16 показана типичная зависимость удельного сопротивления пленки от ее толщины. При малых толщинах свойства пленки существенно зависят от характера микронеровностей на поверхности подложки. В этой области могут наблюдаться нарушения непрерывности структуры

Таблица 4.2

Характеристика материалов пленочных резисторов

Материал резистора	Материал контактных площадок	Удельное поверхностное сопротивление ρ_s , Ом/кв.см	Температурный коэффициент сопротивления $\text{ТКС} \times 10^4$, 1/°C	Удельная мощность рассеяния $P_{\text{уд}}$, Вт/см ²	Относительное изменение сопротивления за 1000 ч работы, %	Способ нанесения пленок
Хром	Золото	10—50	—2,5	1	1,5—3	Термическое напыление
Нихром	Медь	300	± 1	2	1,1—1,3	То же
Сплав МЛТ-3М	Медь с подслоем никрома (ванадия)	500	± 2	2	$\pm 0,5$	»
Рений	—	300—7000	0—20	—	—	»
Тантал	Алюминий с подслоем никрома (ванадия)	20—100	—2	3	1	Катодное напыление
Тантал	Тантал	10	—2	3	1	То же
Нитрид тантала	»	200	0	3	0,2	»
Сплав РС3001	Золото с подслоем хрома	1000—2000	—0,2	2	$\pm 0,5$	Термическое напыление
Кермет	» » »	3000—10 000	$-5 \div +3$	2	± 1	То же
Паста ПР	Паста ПП	5—100 000	$-12 \div +10$	3	± 3	Сеткаграфия

пленки. Проводимость здесь обусловлена туннельным эффектом и термоэлектронной эмиссией между отдельными кристаллитами. Наиболее целесообразно использовать пленки такой толщины, при которой становятся заметными их объемные свойства. В этом случае легче регулировать толщину пленки, а нарушения поверхности не имеют большого значения.

Металлическая пленка толщиной порядка 1 нм независимо от природы металла имеет большое удельное электрическое сопротивление, которое экспоненциально уменьшается с увеличением толщины. Пленки такой малой толщины весьма нестабильны и практически не применяются. Для того чтобы заведомо получать сплошную пленку при имеющихся в производстве отклонениях от выбранного технологического режима, считают, что толщина пленки, наносимая вакуумным испарением, должна быть порядка 100 нм. Следует отметить, что пленки тугоплавких металлов могут быть более тонкими, так как они обладают более стабильными характеристиками.

Тонкопленочные резисторы можно изготавливать из металлов, сплавов (в том числе многокомпонентных), полупроводников и керметов (смесей металлов с керамикой).

Широкое распространение находит хромоникелевый сплав (20% хрома и 80% никеля). Поверхностное сопротивление пленки из этого сплава достигает 300 Ом/квadrat при малом температурном коэффициенте сопротивления. Температура испарения сплава значительная (1600°С), причем для получения высококачественного пленочного резистора подложка должна нагреваться до 300—350°С. Из сплава железа с хромом (79% железа, 21% хрома) и железоникелевого сплава (71,5% железа, 21% хрома, 7,5% никеля) изготавливают пленки, обладающие сопротивлением 150 Ом/квadrat, с температурным коэффициентом сопротивления не более 1×10^{-4} 1/°С. Значительно большее поверхностное сопротивление (до 400 Ом/квadrat) имеет многокомпонентный сплав, состоящий из 74% никеля, 20% хрома, 3% железа и 3% алюминия.

Стабильность металлических пленок зависит до некоторой степени от температуры плавления металла, его плотности и возможности образования стабильного окисного поверхностного слоя. Как правило, чем выше температура плавления, тем лучше стабильность пленки. Вольфрам образует высокостабильные пленки в вакууме, однако они нестабильны в воздухе. Свойствами, обеспечивающими образование высокостабильных пленок, обладает рений — тугоплавкий металл, который находит все большее применение для получения пленочных резисторов.

В случае, когда необходимо получить высокостабильные пленки с большим поверхностным сопротивлением (несколько тысяч ом на квадрат) и малым температурным коэффициентом сопротивления, применяют тантал. Это объясняется еще и тем, что поверхность тантала легко покрывается пленкой окиси и становится малоактивной,

хотя сам металл относится к активным; тонкий прозрачный поверхностный слой окиси хорошо связан с танталом, обладает высоким сопротивлением износу и коррозии в различных атмосферных условиях и не поддается воздействию многих кислот; реакция окисления тантала легко управляется и может быть использована для регулирования толщины пленки и ее сопротивления; пентоксид тантала является хорошим диэлектриком, что позволяет использовать его для изготовления и пленочных конденсаторов.

Большим поверхностным сопротивлением (до 10 000 Ом/кв.дм) обладают пленки из сплава, содержащего 24% хрома и 76% кремния. Напыление пленок в данном случае производится по методу «вспышки», при котором порошок или небольшие кусочки сплава падают на разогретый до высокой температуры вольфрамовый испаритель. Образующееся при этом облако пара конденсируется на подложке, нагретой до 200—500°C. Полученные таким путем пленки отличаются малым температурным коэффициентом сопротивления ($5 \cdot 10^{-5}$ 1/°C) и высокой стабильностью (после 2000 ч работы изменение сопротивления не превышает 0,2%, а после 5000 ч — 3%).

Еще ббльшим поверхностным сопротивлением (до 50 000 Ом/кв.дм) обладают пленки из керметов. Типичными керметами являются пленки палладиево-серебряной глазури или танталово-хромового стекла. Резисторы на основе этих пленок используются в схемах, где допустим высокий температурный коэффициент сопротивления. Наиболее удачна пленка из смеси монооксида кремния и хрома. Она однородна, стабильна, имеет высокие адгезионные свойства, высокую теплостойкость и хорошие механические свойства. Сопротивление пленки изменяется в широких пределах в зависимости от состава смеси. Наилучшие характеристики имеют пленки, содержащие 70% хрома и 30% монооксида кремния. Испарение смеси производится с вольфрамовой спирали при температуре 1300—1600°C на подложку, нагретую до 200—250°C. После напыления пленки ее нагревают в контролируемой среде при температуре 400—450°C для стабилизации параметров.

Для регулирования осаждения резистивных пленок в рабочий объем вакуумной установки вблизи напыляемых подложек помещают контрольную подложку с серебряными контактами (свидетель). Когда сопротивление между контактами контрольной подложки достигает определенной величины, испарение прекращается поворотом заслонки. Как показывает опыт, сопротивление обычно уменьшается после того, как подложка извлекается из вакуумной системы, или при ее дальнейшей термообработке. Это объясняется тем, что атомы газа или другие примесные атомы сорбируются пленкой в процессе ее напыления, а затем при нагреве химически реагируют с ней. Другой причиной является возникновение в материале пленки напряжений, которые могут изменяться в процессе отжига.

При изготовлении резисторов можно использовать и химические методы осаждения пленок. При этом необходимую конфигурацию пленки получают с помощью съемной маски.

Наибольшее распространение получили станатные резистивные пленки, состоящие из двуокиси олова. В этих пленках имеется избыток олова по отношению к стехиометрическому составу, благодаря чему в окисле, который в чистом виде относится к классу полупроводников, преобладает электронная электропроводность, обеспечивающая значительную собственную электропроводность. Удельное поверхностное сопротивление станатной пленки без добавок невысокое — до 20 Ом/квadrat. Основными преимуществами станатных пленок являются высокая теплостойкость (до 250°C), высокая химическая и механическая стойкость, влагостойкость, что способствует при хорошей технологичности их широкому применению.

Следует отметить, что чистая пленка двуокиси олова неустойчива при протекании тока, поэтому в нее всегда вводят добавки. Введение окиси сурьмы (до 50%) позволяет повысить устойчивость этих пленок при протекании тока и управлять температурным коэффициентом сопротивления в широких пределах, вплоть до изменения его знака. Добавление в пленку двуокиси титана повышает ее удельное поверхностное сопротивление.

§ 4.6. Пленочные конденсаторы

Пленочные конденсаторы гибридных ИМС изготавливают в большинстве случаев вакуумным напылением. При этом требуется по меньшей мере три напыления: нижней проводящей обкладки, диэлектрической пленки и верхней проводящей обкладки (рис. 4.17). В пленочных конденсаторах больше двух обкладок применять не рекомендуется, так как это затрудняет процесс их изготовления и удорожает стоимость.

Емкость пленочного конденсатора определяется по формуле плоского конденсатора:

$$C = 0,0884 \frac{\epsilon S}{d}, \quad (4.2)$$

где C — емкость, пФ; ϵ — диэлектрическая проницаемость; S — площадь обкладки, см²; d — толщина диэлектрика, см.

Если число обкладок равно n , то емкость конденсатора

$$C = 0,0884 \frac{\epsilon S (n-1)}{d}. \quad (4.3)$$

Основным элементом пленочного конденсатора, определяющим его параметры и свойства, является диэлектрик. В качестве диэлектрика применяют изоляционные материалы, способные образовывать непористые тонкие пленки, обладающие необходимыми электрофизическими свойствами. Материал для изготовления диэлектрических пленок должен удовлетворять следующим основным требованиям: прочно сцепляться с материалом подложки и металлами, быть плотным и не подвергаться механическому разрушению при воздействии температурных циклов, иметь высокое пробивное напряжение и малые диэлектрические потери, обладать высокой диэлектрической проницаемостью и минимальной гигроскопичностью, а также не разлагаться в процессе испарения и осаждения. Кроме того, желательно, чтобы температура испарения материала лежала в диапазоне $1000 - 1800^\circ\text{C}$, поскольку более низкая температура свидетельствует о недопустимо высокой подвижности атомов, а при более высокой температуре испарения возникают трудности в создании испарителей.

Исследования показали, что указанным требованиям удовлетворяет лишь небольшое число диэлектриков. Наиболее часто применяют монооксид кремния SiO_2 , трехсернистую сурьму Sb_2S_3 , монооксид германия GeO . Можно использовать также сульфид цинка ZnS , фтористый магний MgF_2 и некоторые редкоземельные окислы и фтористые соединения. Возможно применение в качестве диэлектрика пленочных конденсаторов пленок титаната бария BaTiO_3 и смеси титаната бария с титанатом стронция $\text{BaTiO}_3 + \text{SrTiO}_3$. Пленки этих соединений, полученные испарением в вакууме, могут иметь в некоторых случаях высокую диэлектрическую проницаемость (до 1000).

Пленки монооксида кремния имеют высокое пробивное напряжение (до 150 В/мм) и диэлектрическую проницаемость, равную 5—6. Наиболее стабильные пленки монооксида кремния можно получить при температурах испаре-

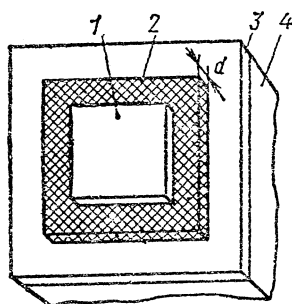


Рис. 4.17. Общий вид тонкопленочного конденсатора: 1 — верхняя проводящая обкладка; 2 — диэлектрическая пленка; 3 — нижняя проводящая обкладка; 4 — подложка

ния 1250—1400° С или при более низких температурах, если во время осаждения в камеру добавить водяной пар. Однако при этом пленки более гигроскопичны. Следует отметить положительный эффект тепловой обработки пленочных конденсаторов с диэлектриком из монооксида кремния. На рис. 4.18 приведены сравнительные температурные зависимости диэлектрической проницаемости пленочного конденсатора на основе окиси кремния на разных частотах до тепловой обработки и после отжига на воздухе при 400° С в течение 30 мин. Эти данные указывают на стабилизацию

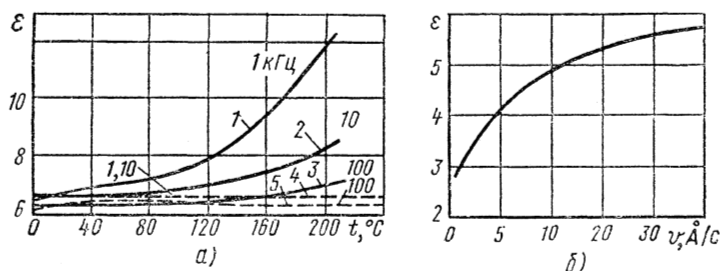


Рис. 4.18. Зависимость диэлектрической проницаемости пленочного конденсатора на основе окиси кремния:

а — от температуры на разных частотах; б — от скорости осаждения (1, 2, 3 — до тепловой обработки; 4, 5 — после отжига при 400° С в течение 30 мин)

параметров конденсаторов и на то, что термообработка увеличивает область рабочих температур до 160—170° С.

Исследования показали, что наилучшим материалом для обкладок пленочного конденсатора является алюминий. Этот металл по сравнению с другими (например, никелем, хромом, золотом) дает значительно меньшее число коротких замыканий. Это объясняется низкой температурой испарения алюминия и пониженной подвижностью его атомов на поверхности подложки из-за тенденции к окислению.

Характеристики материалов пленочных конденсаторов с наиболее часто применяемыми диэлектриками приведены в табл. 4.3.

Диэлектрические пленки можно получать термическим испарением в вакууме (из резистивного испарителя или с помощью электронного луча), катодным напылением, анодированием осажденных на подложку металлических пленок, химическим осаждением — реакцией в газовой фазе и полимеризацией адсорбированных на подложке мономеров.

Таблица 4.3

Характеристика материалов пленочных конденсаторов

Материал диэлектрика	Материал обкладок	Диэлектрическая проницаемость на частоте 1 кГц	Удельная емкость C_0 , пФ/см ²	Тангенс угла диэлектрических потерь $\operatorname{tg} \delta$ на частоте 1 кГц	Температурный коэффициент емкости, $1/^\circ\text{C}$, при $T_{КС} \times 10^4$, $^\circ\text{C}$	Электрическая прочность $E_{пр} \times 10^{-6}$, В/см	Относительные изменения емкости за 1000 ч работы, %	Способ нанесения пленок
Моноксид кремния	Алюминий	5,0—6,0	5000—10 000	0,01—0,02	2—3,5	2—3	$\pm (1,5—6)$	Термическое испарение
Моноксид германия	»	10—12	5000—10 000	0,001—0,005	3—5	1	—1	То же
Двуокись кремния	»	4	20 000	0,5	2	5—10	—	Ионно-плазменное напыление
Оксид алюминия	Алюминий + никель	8	30 000—40 000	0,3—1	3—4	5	—	Реактивное напыление
Оксид тантала	Тантал, тантал + ванадий	20—23	50 000—100 000	0,02	4	2	± 1	Анодное окисление
Паста ПК	Паста ПП	—	3700—7000	0,03—0,04	± 10	—	± 5	Сеткография

ров. Термическое испарение в вакууме — наиболее простой и производительный метод изготовления пленочных конденсаторов, резистивных и коммутационных элементов. Основное преимущество этого метода — унификация технологических операций получения различных элементов, возможность создания микросхемы в едином технологическом цикле.

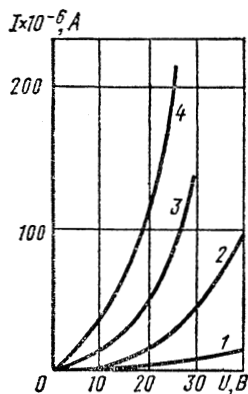


Рис. 4.19. Вольт-амперные характеристики конденсаторов на основе монооксида кремния, напыленных при различном давлении остаточных газов:

1 — $1 \cdot 10^{-4}$ Па; 2 — 1×10^{-5} Па; 3 — 1×10^{-6} Па; 4 — 1×10^{-7} Па

Как отмечалось, монооксид кремния является пока наилучшим диэлектриком для пленочных конденсаторов. Однако и этот материал требует эффективного строгого контроля во время осаждения, так как воспроизводимость одинаковых характеристик пленок существенно зависит от фазового состава исходного материала для напыления и изменения технологических факторов во время напыления (рис. 4.19). Используя эффективные методы контроля во время осаждения монооксида кремния, удастся получать конденсаторы на основе SiO_2 с удельной емкостью до $10\,000$ пФ/см² и хорошими электрофизическими характеристиками.

Катодное напыление получило широкое распространение при осаждении пленок металлов, полупроводников и их композиций. Однако напыление диэлектрических материалов

таким путем практически невозможно, так как на поверхности катода быстро образуется положительный заряд, который не может быть нейтрализован. Для получения окисных диэлектрических пленок катодное напыление металлов производят в атмосфере кислорода, и молекулы металла при испарении, вступая в химическое взаимодействие с атомами кислорода, образуют окислы. При этом определенный состав и композиция окислов обеспечиваются композицией сплава в катоде. Таким путем можно получить, например, окислы Ta_2O_5 , Nb_2O_5 , TiO_2 , SiO_2 и др., которые можно использовать в качестве диэлектриков. Основным недостатком катодного напыления — низкая скорость осаждения (порядка 4 нм/мин) — устраняется при использовании высокочастотного напыления. В этом случае в качестве като-

да можно использовать и диэлектрический материал. Положительный заряд, который возникает на поверхности катода в течение отрицательного периода напряжения, нейтрализуется электронами во время положительного периода. Этим методом можно получать диэлектрические пленки из некоторых типов стекла. Конденсаторы с такими пленками имеют хорошие характеристики.

Методом анодирования получают окисные пленки некоторых металлов (тантал, титан, ниобий, цирконий, алюминий и др.). Наиболее часто на практике применяют пленочные конденсаторы, полученные анодированием пленок тантала. Их осаждают катодным напылением или с помощью электронного луча. Для получения рисунка микросхемы используют методы фотолитографии.

Удельная емкость конденсатора на основе анодированного тантала $C_0 = 0,1 \div 0,2$ мкФ/см², $\operatorname{tg} \delta = 0,01$ (1кГц), $E_{\text{пр}} = (1 \div 1,5) \cdot 10^6$ В/см, $\text{ТКС} = (2 \div 3) \cdot 10^{-4}$ 1/°С. Однако частотный предел этих элементов ограничивается диапазоном 0,1—1,0 МГц вследствие большого удельного поверхностного сопротивления танталовых пленок. Танталовые конденсаторы получили ограниченное распространение из-за малой устойчивости к катастрофическим отказам, особенно в условиях повышенной влажности. Конденсаторы на основе анодированного титана обладают еще большими значениями диэлектрической проницаемости и удельной емкости, однако их устойчивость к катастрофическим отказам ниже, чем у конденсаторов на основе анодированного тантала.

В последнее время находят применение конденсаторы на основе анодированного алюминия. Несмотря на небольшую диэлектрическую проницаемость (8—9), имеют место высокая воспроизводимость и простота получения исходных металлических пленок и стабильность окисной пленки Al_2O_3 . Травление алюминия не представляет трудностей; рисунок на плате может быть получен и обычным масочным способом. Высокая электропроводность обкладок позволяет создавать высокочастотные емкостные элементы. Конденсаторы мало критичны к технологическим факторам при анодировании.

Химические методы получения диэлектрических пленок еще не нашли широкого применения, и исследования в этом направлении продолжаются. Наилучшим пока является метод осаждения диэлектрических пленок реакцией в газовой фазе. Например, разложением тетраэтоксилана

при температуре свыше 600°C и этилсиликатов можно получить пленки двуокиси кремния. Существенным недостатком методов осаждения в газовой фазе является невысокая воспроизводимость параметров пленок, обусловленная наличием примесей.

В качестве диэлектрика пленочных конденсаторов можно использовать полимерные пленки (например, пленки полистирола, полипараксиленона, фторопласта-4 и др.). Хотя диэлектрическая проницаемость полимерных пленок невелика (2—4), они эластичны и имеют хорошие диэлектрические характеристики вплоть до сверхвысоких частот. Одним из существенных недостатков применения в конденсаторах полимерных пленок является трудность получения заданного рисунка микросхемы.

§ 4.7. Индуктивные элементы в пленочных ИМС

В микросхемах, как и в любых радиотехнических устройствах, необходимы индуктивные элементы. Индуктивность зависит от частоты. На частотах 0,1; 0,5; 1,0; 5,0; 10,0; 50,0; 100,0 МГц расчетные значения максимальной индуктивности составляют соответственно 10 000; 1 000; 350; 35; 15; 1,5; 0,5 мкГн.

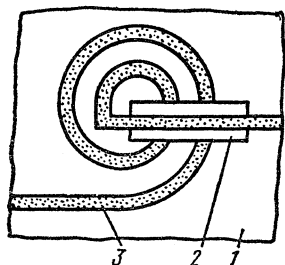


Рис. 4.20. Тонкопленочный спиральный индуктивный элемент:

1 — подложка; 2 — изоляционная пленка; 3 — токопроводящая пленка

Добротность Q таких катушек зависит от функции, выполняемой ими в данной схеме, однако для большинства применений приемлемая величина порядка 100.

Получение пленочных индуктивных элементов в микросхемах с подобными характеристиками практически очень затруднено, хотя работы в этом направлении и ведутся.

Небольшие индуктивности для гибридных ИМС можно получать двумя путями: осаждением на подложку проводящей спирали через соответствующую маску методом вакуумного испарения (рис. 4.20) и изготовлением миниатюрной кольцевой катушки с магнитным сердечником. Характеристики пленочной спирали из 20 витков диаметром 8,3 мм, осажденной на стеклянной и кремниевой подложках с удельным сопротивлением 50 Ом·см, приведены в табл. 4.4.

Таблица 4.4

Характеристики индуктивной катушки, выполненной в виде 20-витковой спирали на стеклянной и кремниевой подложках

f, МГц	Стекло		Кремний	
	L, мкГн	Q	L, мкГн	Q
20	2,18	36,2	2,26	4,9
40	2,33	49,4	2,57	3,4
60	2,82	47,1	3,20	1,7
80	3,91	35,1	4,42	0,9

Из таблицы видно, что индуктивные элементы на стекле имеют добротность на порядок выше, чем на кремнии, однако они еще не полностью удовлетворяют необходимым требованиям. Напыляемые катушки индуктивности могут иметь форму и прямоугольной спирали. Однако во всех случаях не удается получить в приемлемых габаритах индуктивность более 5 мкГн. В некоторых случаях такая индуктивность оказывается достаточной. Обычно конструкторы избегают использовать напыляемые катушки индуктивности в тонкопленочных микросхемах, работающих на частотах ниже 30 МГц.

Индуктивность катушки, выполненной в форме плоской спирали, можно определить по следующей приближенной формуле:

$$L = \left(\frac{k}{d} \right)^2 D_1^3, \quad (4.4)$$

где L — индуктивность, мкГн; k — коэффициент, зависящий от отношения D_2/D_1 (рис. 4.21); d — шаг спирали, мм; D_1 и D_2 — внутренний и внешний диаметры спирали, мм.

Ширину витка при заданной добротности Q находят (без учета влияния поверхностного эффекта) по формуле

$$b_0 = \frac{\rho d (D_2^2/D_1^2 - 1) \cdot 10^{-4}}{16f D_1 k^2 t} Q, \quad (4.5)$$

где b_0 — ширина витка, мм; ρ — удельное сопротивление материала пленки, Ом·см; f — рабочая частота, МГц; t — толщина проводящего слоя, мм.

Внутренний и внешний диаметры спирали выбирают, исходя из возможных размеров индуктивного элемента, размещаемого в гибридной ИМС. Так как формула (4.5) не учи-

тывает влияния поверхностного эффекта, значение b_0 следует увеличивать в 1,5—2 раза. В случае $b_0 \geq d$, оставляя диаметр D_1 прежним и задавая шаг спирали $b_0 \geq d$, из выражения (4.4) определяют диаметр D_2 , при котором можно получить заданную индуктивность.

Если нанести две спирали на обе стороны подложки, то можно получить пленочный трансформатор. Толщина подложки, разделяющей первичную и вторичную обмотки в виде спиралей, определяет взаимную индуктивность. Коэффициент взаимной индуктивности при этом весьма мал, так как материал подложки является обычно диамагнитным.

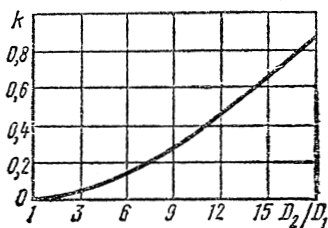


Рис. 4.21. К расчету индуктивности плоской спирали

При необходимости в системах, выполненных на интегральных микросхемах, можно применять миниатюрные кольцевые катушки с сердечником из порошкового железа или из специальных ферритов. Эти катушки можно размещать, например, в корпусе типа ТО-5, в котором размещаются и некоторые типы гибридных ИМС. Во многих случаях вместо катушек допускается использование транзисторных схем, эквивалентных индуктивностям, что в основном и имеет место в ИМС.

§ 4.8. Пленочные проводники и контактные площадки

Для электрического соединения различных элементов микросхем на одной подложке применяют тонкопленочные проводники. Для этой цели требуются материалы с высокой электрической проводимостью и хорошей адгезией к подложке. Необходимо также обеспечить соединение внешних выводов с контактными площадками схемы пайкой или сваркой. Процесс значительно упрощается, если для внутрисхемных соединений и контактных площадок использовать одинаковые материалы.

Для напыления проводников и контактных площадок рекомендуются золото, никель, медь вакуумной плавки и алюминий. Для улучшения адгезии токопроводящих материалов напыляют подслои хрома или нихрома на подложки из ситалла, стекла, керамики или на межслойную изоляцию

из монооксида кремния. В качестве подслоя можно применять также марганец.

В табл. 4.5. приведены характеристики исходных материалов, применяемых для проводников и контактных площадок, а также для подслоя, улучшающего адгезию проводника с подложкой.

Контактирование внешних выводов и навесных элементов с контактными площадками рекомендуется производить с помощью пайки или сварки различными методами, например сваркой ультразвуком, сваркой (пайкой) импульсным косвенным нагревом, сваркой (пайкой) сдвоенным электродом, пайкой микропаяльником.

Таблица 4.5

Характеристика материалов, применяемых для проводников и контактных площадок гибридных ИМС

Материал проводников, контактных площадок и подслоя	Толщина слоя, Å	Удельное сопротивление, Ом/кв.см	Рекомендуемый способ контактирования внешних выводов
Подслой — нихром	100—300	0,03—0,04	Пайка микропаяльником или сварка импульсным косвенным нагревом
Слой — золото	6000—8000	—	
Подслой — нихром	100—300	0,02—0,04	Сварка импульсным косвенным нагревом
Слой — медь	—	—	
Покрытие — никель	—	—	Пайка микропаяльником или сдвоенным электродом, сварка импульсным косвенным нагревом или сдвоенным электродом
Подслой — нихром	100—300	0,02—0,04	
Слой — медь	4000—10 000	—	
Покрытие — серебро	800—1000	—	
Подслой — нихром	100—300	0,02—0,04	Пайка микропаяльником или сварка импульсным косвенным нагревом
Слой — медь	6000—8000	0,02—0,04	
Покрытие — золото	500—600	—	Пайка сдвоенным электродом
Подслой — нихром	400—500	0,1—0,2	
Слой — алюминий	2500—3500	—	
Покрытие — никель	500	—	

§ 4.9. Межслойная изоляция

В конструкции тонкопленочной микросхемы часто возникает необходимость пересечения одного проводника другим. В местах пересечения проводники необходимо изолировать друг от друга тонкой пленкой диэлектрика. Пересечение можно рассматривать как маленький конденсатор, поскольку проводники имеют конечное сопротивление и между ними существует конечная емкость. Экспериментально установлено, что при большом числе пересечений в схеме сопротивление проводников в каждом пересечении должно быть не более $0,8 \text{ Ом} \cdot \text{см}$, а емкость — не более 2 пФ . Для межслойной изоляции применяют в большинстве случаев монооксид кремния и халькогенидное стекло. Характеристики этих материалов приведены в табл. 4.6.

Таблица 4.6

Характеристики материалов, применяемых для межслойной изоляции

Материал диэлектрика	Удельная емкость, $\text{пФ}/\text{см}^2$, не более	Тангенс угла диэлектрических потерь при частоте 1 кГц , не более	Удельное объемное сопротивление, $\text{Ом} \cdot \text{см}$, не менее	Пробивное напряжение, $\text{В}/\text{см}$, не менее
Монооксид кремния	1700	0,03	$1 \cdot 10^{12}$	$0,8 \cdot 10^6$
Халькогенидное стекло	5000	0,01	$1 \cdot 10^{12}$	$1,7 \cdot 10^6$

Иногда для этих целей применяют фоторезисты.

При выборе материала межслойной изоляции и прилегающих проводников необходимо учитывать совместимость материалов. Несовместимость возможна, например, при использовании хрома для проводника и монооксида кремния для изолятора. Хром диффундирует в монооксид кремния, снижая пробивное напряжение. В структурах металл — диэлектрик — металл может возникнуть гальванодиффузионный эффект, который увеличивает ток утечки в месте пересечения проводников и разрушает их. При этом имеет место электрохимическое взаимодействие между двумя проводниками или между одним проводником и кислородом, что, в свою очередь, влечет за собой появление тока между двумя проводниками.

§ 4.10 Методы получения различных конфигураций пассивных элементов гибридных ИМС

Для выполнения заданных функций пленочные элементы ИМС (резисторы, конденсаторы, контактные площадки, внутрисхемные соединения) должны иметь определенную конфигурацию. Обычно пленки определенной толщины обладают конкретными физическими свойствами, номинальные значения параметров элементов на их основе получают за счет необходимых форм и размеров пленок в плане.

Заданную конфигурацию пленочные элементы приобретают в результате методов съемной маски, контактной маски, фотолитографии и др. Выбор метода зависит от способа нанесения пленки, свойств материала пленки, требований по точности, плотности размещения элементов, воспроизводимости, производительности, стоимости и других факторов.

Метод съемной (свободной) маски. Его применяют при нанесении пленок термическим испарением в вакууме. Метод основан на экранировании части подложки от потока частиц напыляемого вещества с помощью специального трафарета — съемной маски.

Маску называют съемной (свободной), потому что она изготавливается и существует отдельно от подложки. Съемная маска — это тонкий экран из металлической фольги с отверстиями, очертания и расположения которых соответствуют требуемой конфигурации напыляемой пленки. При напылении пленочных элементов маску закрепляют в маскодержателе, который обеспечивает плотный прижим и фиксированное положение маски по отношению к подложке. Испаряемое вещество при напылении осаждается на подложку только в местах, не защищенных маской.

Основное требование к маскам — точность их изготовления, что обусловлено необходимой точностью напыления элементов. Так, для получения пленочных резисторов с точностью $\pm 5\%$ и конденсаторов с точностью $\pm 10\%$ требуемая точность выполнения отверстий в маске не должна превышать ± 5 мкм. Кроме того, к съемным маскам предъявляют специальные требования, связанные с условиями эксплуатации: минимальные неровности в плоскости, отсутствие деформаций при напылении и др.

В технологии изготовления пленочных структур применяют монометаллические, биметаллические и биметаллические трехслойные маски. В качестве материалов исполь-

зуют металлы и их сплавы, отвечающие требованиям, предъявляемым к маскам: сталь, молибден, никель, тантал, бериллиевую бронзу и др.

Для изготовления монометаллических масок имеются различные методы: механические, электрохимические, фотохимические, электронно-лучевая обработка. Наибольшее распространение получил фотохимический метод. Основным

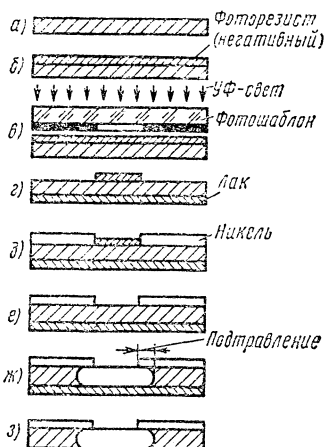


Рис. 4.22. Схема изготовления биметаллических масок:

а — подложка; б — нанесение фото-резистора; в — экспонирование; г — проявление; д — электрохимическое нанесение никеля; е — удаление фоторезиста; ж — селективное травление металла основы маски; з — готовая маска после удаления лаковой защиты

недостатком монометаллических масок является низкая точность воспроизведения геометрических размеров вследствие бокового травления материала маски и низкая механическая прочность.

В промышленных условиях наибольшее применение получили биметаллические съемные маски, которые также изготавливают фотохимическим методом (рис. 4.22). Такие маски представляют собой пластину толщиной 80—100 мкм из бериллиевой бронзы, покрытую с одной или двух (для трехслойных масок) сторон тонким слоем никеля (10—20 мкм). Бронзовая пластина служит механическим основанием, необходимая конфигурация достигается за счет рисунка в слое никеля.

Биметаллические маски рассчитаны на многократное применение. Обычно они выдерживают около ста циклов напыления пленок, после чего подлежат замене.

Метод контактной маски. Этот метод основан на том, что сначала на подложке формируют маску, а затем напыляют пленку для реализации тонкопленочных элементов. При этом маска изготавливается и существует только в процессе изготовления тонкопленочных структур. Необходимая конфигурация тонкопленочных элементов достигается при удалении маски. Такой способ получения пленочных конфигураций иногда называют «взрывной» фотолитографией (проводимое травление материала маски с целью его удаления

приводит к «срыву» материала пленочного элемента, расположенного над маской).

Материал контактной маски должен отвечать определенным требованиям: не испаряться и химически не взаимодействовать с основным материалом, обладать малым коэффициентом диффузии, легко удаляться с подложки способами, не влияющими на свойства материала пленки элемента. Таким требованиям удовлетворяют медь, алюминий, никель, окись висмута, фоторезист.

В зависимости от используемого материала контактной маски существуют два способа получения пленок необходимой конфигурации — прямой и косвенный. При прямом способе материалом маски служит фоторезист, в котором фотолитографией формируется требуемая конфигурация маски, при косвенном (рис. 4.23) — металлическая пленка, конфигурация маски, в которой создается также фотолитографией после нанесения фоторезиста.

Метод контактной маски обеспечивает большую точность и четкость края. Он применим не только для термического испарения, но и для катодного напыления, а также для нанесения тонких пленок химическими методами.

Метод фотолитографии. Он не отличается от фотолитографического процесса в слоях SiO_2 , используемого в полупроводниковой технологии. Метод фотолитографии применяют при изготовлении топологически сложных тонкопленочных структур или одновременно большого числа

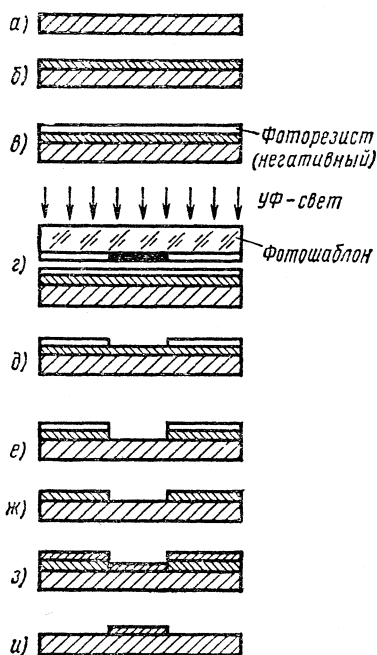


Рис. 4.23. Схема получения тонкопленочных элементов с применением контактной маски:

а — подложка; б — сплошной слой материала контактной маски; в — нанесение фоторезиста; г — экспонирование; д — проявление фоторезиста; е — травление или растворение открытых участков материала контактной маски; ж — готовая контактная маска на подложке; з — нанесение слоя материала тонкопленочного элемента; и — готовый тонкопленочный элемент на подложке

элементов. Данный метод позволяет формировать пленочные резисторы с контактными площадками и необходимыми внутрисхемными соединениями. Существуют две разновидности метода — одинарная и двойная фотолитографии. Одинарная фотолитография служит для формирования пленочных структур в сочетании с методом съемных масок. В этом случае (схема процесса приведена на рис. 4.24) резистивную пленку напыляют в виде сплошного покрытия, и внутрисхемные соединения и контактные площадки — через съемные маски. Затем методом фотолитографии формируют нужную конфигурацию резисторов.

При двойной фотолитографии (рис. 4.25) сначала на подложку последовательно напыляют любым из вакуумных методов резистивный и проводящий слои, после чего формируют конфигурацию проводников и контактных площадок, а затем — резисторов.

Элементы, сформированные напылением пленки с последующей фотолитографией, характеризуются высокой точностью и воспроизводимостью.

Следует отметить, что в тонкопленочной технологии съемные маски используют для формирования резисторов, конденсаторов и внутрисхемных соединений, в то время как методом фотолитографии получают только резисторы и внутрисхемные соединения. Методом фотолитографии целесообразно формировать также пленочные индуктивные элементы.

Метод электронолитографии. Это перспективный метод получения конфигурации элементов с минимальными размерами, основанный на использовании электронного луча для создания необходимого рисунка. Различают последовательную электронолитографию остросфокусированным пучком и проекционную электронолитографию.

При последовательной электронолитографии рисунок создается последовательным перемещением (сканированием) остросфокусированного электронного пучка по технологической площади, покрытой электронорезистом. Управление электронным пучком может осуществляться с помощью фотокопировального устройства или от ЭВМ.

При проекционной электронолитографии электронный пучок одновременно экспонирует всю технологическую площадь. Это достигается с помощью специального фотокаода, эмиссионные области которого воспроизводят требуемый рисунок. При облучении ультрафиолетовым светом фотокаод эмиттирует фотоэлектроны с энергией, равной нескольким

десятым электрон-вольта, которые после ускорения и фокусирования переносят рисунок в масштабе 1:1 на рабочую площадь.

Наиболее перспективным методом получения пленочных конфигураций является ионное травление, заключающееся в удалении рабочего материала с помощью поло-

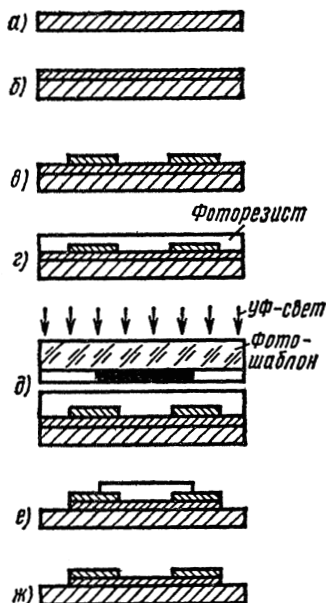


Рис. 4.24. Схема процесса одинарного селективного химического травления (одинарная фотолитография):

а — подложка; б — нанесение резистивной пленки; в — нанесение контактов через свободную маску; г — нанесение фоторезиста; д — экспонирование; е — селективное травление после проявления фоторезиста; ж — удаление фоторезиста и получение готового элемента

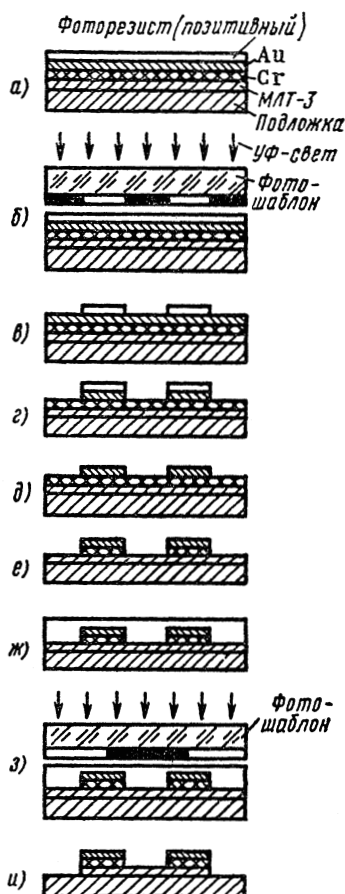


Рис. 4.25. Схема процесса двойного селективного химического травления (двойная фотолитография):

а — заготовка со слоем фоторезиста (позитивного); б — экспонирование; в — проявление фоторезиста; г — селективное травление золота; д — снятие фоторезиста; е — селективное травление хрома; ж — второе нанесение фоторезиста; з — второе экспонирование; и — селективное травление и удаление фоторезиста (получение готового элемента)

жительных ионов, обладающих высокой кинетической энергией.

Применение электронолитографии возможно как в пленочной, так и в полупроводниковой технологии.

§ 4.11. Навесные компоненты гибридных ИМС

В гибридных ИМС в качестве компонентов применяют навесные полупроводниковые микроминиатюрные приборы: дискретные транзисторы и диоды, транзисторы и диодные матрицы, бескорпусные полупроводниковые микросхемы.

Активные компоненты для гибридных ИМС по способу герметизации подразделяют на бескорпусные и корпусные. Корпусные компоненты заключены в миниатюрный корпус. Бескорпусные полупроводниковые приборы обычно имеют малые размеры и массу, т. е. удовлетворяют основному требованию, предъявляемому к приборам, используемым в гибридных ИМС. В этих приборах кристаллы полупроводника защищены от внешних воздействий методами пассивации поверхности и герметизации с помощью специальных защитных покрытий (лаки, стекло, эмали, смолы, компаунды и др.). Бескорпусные приборы для защиты от механических повреждений заключают в специальный пластмассовый корпус, который снимают перед монтажом приборов в микросхему.

В табл. 4.7 приведены некоторые типы диодов и диодных матриц, наиболее широко используемые в гибридных ИМС, и их основные параметры: $U_{обр\ max}$ — максимально допустимое постоянное обратное напряжение на диоде; $I_{пр\ max}$ — максимально допустимый постоянный прямой ток через диод; $U_{пр}$ — прямое падение напряжения на диоде при заданном постоянном прямом токе $I_{пр}$; τ_v — время восстановления обратного сопротивления диода; C_d — емкость между выводами диода при заданном обратном смещении.

В табл. 4.8 приведены типы транзисторов, наиболее распространенные в гибридных ИМС (биполярные, *n-p-n*-типа), и их параметры: $f_{гр}$ — граничная частота коэффициента передачи тока базы транзистора; $\beta_{ст}$ — статический коэффициент усиления; C_k — емкость коллекторного перехода; $P_{a\ max}$ — максимально допустимая постоянная мощность, рассеиваемая на коллекторе; $\tau_v C_k$ — постоянная времени цепи обратной связи транзистора на высокой частоте. Габаритные размеры в табл. 4.7 и 4.8 приведены без учета выводов.

Таблица 4.7

Диоды и диодные матрицы, применяемые в гибридных ИМС

Тип прибора	$U_{обр\ max}$, В	$I_{пр\ max}$, мА	$U_{пр}$ при $I_{пр}=1\text{ мА}$	$\tau_{в, нс}$	$C_{д, пФ}$	Габариты, мм
КД901	10	5	0,7	20	4	1,1×1,3×0,8
КД902	5	5	0,8—0,85	10	2	1,2×1,2×0,8
КД904	10	5	0,8	10	2	1,0×1,0×1,0
КД907	40	50	1,0 при $I_{пр}=50\text{ мА}$	4	4	1,7×1,7×1,0
КД13	10	5	0,7	10	4	1,0×1,0×0,29

Таблица 4.8

Транзисторы, применяемые в гибридных ИМС

Тип транзистора	$f_{гр}$, Мгц	$\beta_{ст}$	C_K , пФ	P_K max, мВт	$\tau_{вC_K}$	Габариты, мм
КТ307	250	Не менее 80	6	15	—	0,7×0,7×0,8
КТ319	100	» » 40	15	15	—	1,3×1,3×1,1
КТ324	600—800	До 250	2,5	15	180	0,5×0,5×0,6
КТ331	250—400	» 120	5	15	120	1,0×1,0×0,8
КТ332	250—500	» 200	5	20	300	1,0×1,0×0,8
КТ336	250—450	» 120	5	50	—	0,7×0,7×0,3
КТ348	100	» 250	11	15	—	1,0×1,0×0,2
КТ354	1000—1300	» 400	1,5	20	50—75	1,0×1,0×0,8
ГТ353	500—1400	» 500	2	30	30—50	1,6×0,7
ГТ612	1500	—	3,5	360	—	7,5×1,6

В качестве активных компонентов гибридных ИМС используют также полевые МДП-транзисторы типа КП201, транзисторные матрицы типа К1НТ291, операционные усилители типов К740УД1А, К740УД3 и др. Транзисторная матрица типа К1НТ291 состоит из двух транзисторов с габаритными размерами 1,2×1,7×9,8 мм и имеет следующие характеристики: разность падений напряжения эмиттер — база не более 3 мВ, отношение статических коэффициентов передачи тока не более 0,83. Применяется в основном для микросхем дифференциальных и операционных усилителей,

где требуется высокая идентичность параметров и температурных зависимостей транзисторов.

Основные параметры бескорпусных операционных усилителей приведены в табл. 4.9.

Таблица 4.9

Электрические параметры бескорпусных операционных усилителей типов К740УД1А и К740УД3

Параметры	К740УД1А	К740УД3
Синфазное напряжение, В	8	3
Мощность, мВт	200	40
Коэффициент усиления	$(20-100) \cdot 10^3$	400-4500
Входное сопротивление, кОм	40-400	20
Граничная частота, МГц	10	20

Активные компоненты с индивидуальной корпусной защитой (ГТ-2109, ГТ-310) работают в диапазоне температур от -20 до $+50^\circ\text{C}$, имеют $\beta_{\text{ст}} = 60 \div 180$, $C_{\kappa} = 30 \div 45$ пФ, помещены в корпус диаметром 3,7 мм и высотой 2,5 мм.

В гибридных ИМС при емкости конденсаторов 2 000 пФ и более применяют миниатюрные навесные конденсаторы. Для этой цели разработаны керамические конденсаторы (типы К10-9, К10-9М, К10-17), стеклокерамические конденсаторы (тип К22-4), матрицы керамических конденсаторов (тип К10-27) и др.

§ 4.12. Корпусы для гибридных ИМС

Корпусы интегральных микросхем должны удовлетворять ряду требований, обеспечивающих их надежную эксплуатацию. Прежде всего корпус должен обладать достаточной механической прочностью, чтобы выдерживать нагрузки, возникающие при сборке, соединении с другими корпусами и во время эксплуатации. Корпус стремятся выполнить возможно меньших размеров и придать ему форму, позволяющую осуществлять компактную сборку. Конструкция корпуса должна позволять легко и надежно осуществлять электрические соединения между схемой, расположенной внутри корпуса, и другими схемами. Паразитные индуктивности и емкости, несмотря на высокую плотность проводников в корпусе, необходимо свести к минимуму.

Элементы в схеме нужно надежно изолировать друг от друга и по возможности снизить тепловое сопротивление между микросхемой и окружающей средой.

В большинстве случаев корпус интегральной микросхемы должен быть герметичным. Внутренняя среда в корпусе не должна сказываться на его рабочих характеристиках и надежности. Корпус должен защищать действующий прибор или микросхему от внешних воздействий, влияния света или другого внешнего излучения. Следует предотвращать возможность химического воздействия на корпус внешней среды, например кислорода или влажности.

По конструктивным разновидностям и габаритным размерам корпуса отечественных гибридных ИМС унифицированы (ГОСТ 17467—79). Установлены четыре типа корпусов, различающихся формой проекции тела корпуса на плоскость основания и расположением выводов (табл. 4.10).

Таблица 4.10

Типы корпусов для гибридных ИМС

Тип корпуса	Форма проекции корпуса на плоскость основания	Расположение проекции выводов на плоскости основания	Расположение выводов относительно плоскости основания
1	Прямоугольная	В пределах проекции	Перпендикулярное
2	То же	За пределами проекции корпуса	То же
3	Круглая	В пределах проекции корпуса по окружности	»
4	Прямоугольная	За пределами проекции корпуса	Параллельное

По габаритным размерам типы корпусов подразделяют на типоразмеры, каждому из которых присваивают шифр, состоящий из индекса К (корпус), обозначения типа корпуса и двузначного числа (01—99), означающего номер типоразмера.

На рис. 4.26 показан внешний вид корпусов типа 1 и приведены различные варианты расположения выводов. Число выводов устанавливается при разработке корпусов.

На рис. 4.27 показан внешний вид корпусов типа 2 и приведены различные варианты расположения выводов. Число выводов устанавливается также при разработке корпусов.

На рис. 4.28 показан внешний вид круглых корпусов типа 3 с числом выводов 8 и 12. Размеры этих корпусов различны. Например, корпуса К303 и К302 имеют высоту 3,0—5,0 и 5,5—7,5 мм соответственно и диаметр 7,5—9,5 мм.

На рис. 4.29 показан внешний вид корпусов типа 4 с планарным расположением выводов.

Корпусы типа 1 (особенно К101, К103, К109, К111) предпочтительно использовать в ИМС с дискретными

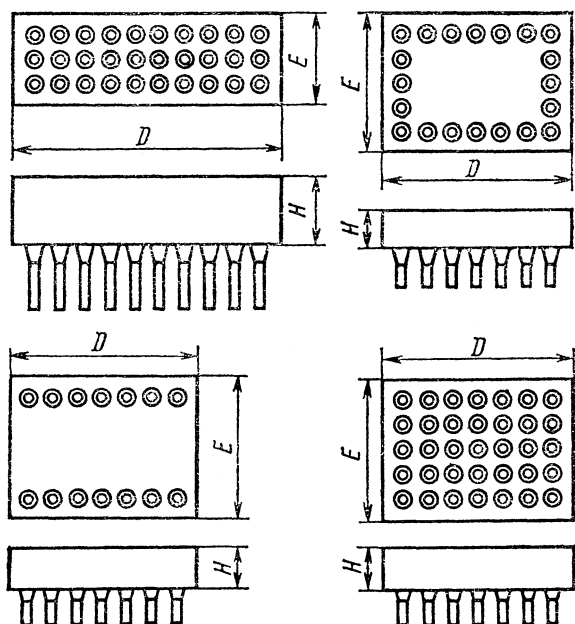


Рис. 4.26. Внешний вид корпусов типа 1 и различные варианты расположения выводов

компонентами, так как они обеспечивают лучшую компоновку, корпуса типов 2 и 4 в импульсных ИМС приемно-усилительной аппаратуры, где практически отсутствуют дискретные компоненты. Корпусы типа 3, применяемые в линейных трактах ИМС, удобны при монтаже в аппаратуре, но проигрывают в плотности упаковки. Эти корпуса с проволочными выводами (см. рис. 4.28), направленными перпендикулярно плоскости основания, герметизируют сварной вакуумной крышкой из ковара или нержавеющей стали.

Корпусы типа 4 имеют планарное расположение выводов, удобное при монтаже на печатных платах аппаратуры, и выполняются металlostеклянными, металлокерамическими или керамическими. В металлокерамических и керамических корпусах для обеспечения более надежной герметизации плоские коваровые выводы не вводят внутрь корпуса, а вместо них на основание корпуса с помощью металлиза-

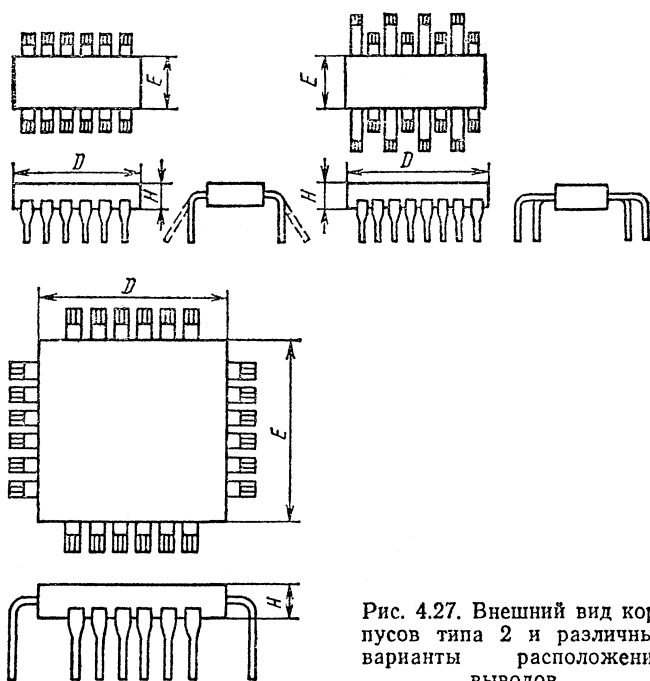


Рис. 4.27. Внешний вид корпусов типа 2 и различные варианты расположения выводов

ции молибденом наносят проводящие дорожки толщиной 12—15 мкм. Основание, крышку и каркас корпуса изготавливают из окиси алюминия, имеющего хорошие прочность и теплопроводность.

Корпусы типов 1 и 2 обычно выполняют металlostеклянными или металлополимерными. Металлополимерные корпуса наиболее просты и дешевы в изготовлении. Однако они допускают малую мощность рассеяния (до 100 мВт) в связи с низкой теплопроводностью пластмассы и заливного компаунда по сравнению с металлом и керамикой.

Учитывая конструкции печатных плат и условия обеспечения автоматизации процессов сборки и монтажа микросхем на печатных платах, стандартом установлен следующий шаг выводов; 2,5 мм — для корпусов типов 1 и 2, под углами 30 и 45° — для корпусов типа 3 и 1,25 мм — для корпусов типа 4.

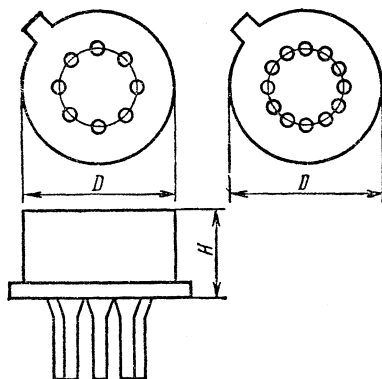


Рис. 4.28. Внешний вид круглых корпусов типа 3 с различным числом выводов (8 и 12)

Поперечное сечение выводов корпуса должно иметь только круглую или прямую форму. Диаметр круглого поперечного сечения выводов установлен в пределах 0,3 — 0,5 мм, а размеры прямоугольного поперечного сечения — в пределах описанной окружности диаметром 0,4—0,6 мм (для корпусов типов 1 и 2).

При выборе того или иного типа корпуса руководствуются требованиями, предъявляемыми к условиям работы гибридной ИМС. Корпусную защиту рекомендуется применять в случаях длительной (более 10 сут) эксплуата-

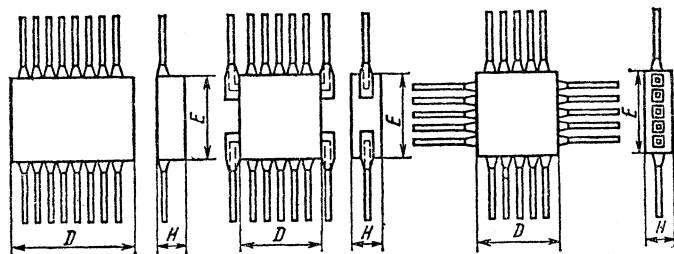


Рис. 4.29. Внешний вид корпусов типа 4 с планарным расположением выводов

тации микросхем в условиях повышенной влажности. Металлостеклянные корпуса обеспечивают длительную работу в условиях повышенной относительной влажности (до 98%) и в температурном диапазоне от — 60 до + 125° С.

§ 4.13. Основные принципы разработки и этапы проектирования гибридных ИМС

В основу разработки гибридных ИМС положены функционально-узловой метод конструирования и групповые методы изготовления. Это означает, что гибридную ИМС выполняют в виде функционально законченного узла, предназначенного для решения определенной задачи дискретного или непрерывного преобразования электрических сигналов. При этом конструкция гибридных ИМС должна обеспечивать не только их применение в различных устройствах, но и контроль параметров отдельных элементов и ИМС в целом на различных этапах изготовления.

При проектировании гибридных ИМС широкого применения разрабатывают, как правило, не отдельный тип микросхемы, а полный состав серии ИМС. Определяющим при этом являются логическая (функциональная) структура радиоэлектронного устройства и технологический процесс изготовления. Структура радиоэлектронного устройства определяет функциональный состав серии, т. е. число типов разрабатываемых ИМС.

При проектировании гибридных ИМС частного применения в каждом конкретном случае разрабатывают отдельные типы микросхем в соответствии с заданной электрической схемой и возможностями технологии.

Функциональный состав серии гибридных ИМС определяют с учетом имеющихся готовых серий ИМС, технологических возможностей их изготовления и возможностей унификации разрабатываемой серии для увеличения круга потребителей.

Техническое задание на проектирование содержит основные сведения о характеристиках разрабатываемой ИМС и является исходной информацией для проектирования. Типовое техническое задание содержит следующие сведения:

- электрическую схему со спецификацией;
- признаки воздействующего сигнала (частота, амплитуда, длительность и др.);
- электрические характеристики разрабатываемой ИМС; напряжения питания;
- условия эксплуатации.

Иногда в техническом задании имеются указания о типе и размерах корпуса для разрабатываемой ИМС (при отсутствии таких указаний корпус подлежит разработке). Техническое задание для гибридных ИМС широкого применения

составляют с учетом технических требований, оговоренных в общих технических условиях (ГОСТ 18725—73).

Данные технического задания позволяют сформулировать требования к технологическому процессу и обоснованно выбрать из всех существующих типовых технологических процессов изготовления гибридных ИМС наиболее приемлемый. В случае, когда существующие технологические процессы не позволяют реализовать разрабатываемую гибридную ИМС в соответствии с техническими требованиями, выбирают метод формирования структуры пассивной части гибридной ИМС, а затем разрабатывают новый технологический процесс.

Проектирование гибридных ИМС включает в себя расчет и конструирование пленочных элементов, а также разработку топологической структуры и конструкции всей микросхемы, что требует решения основных взаимосвязанных вопросов. Этими вопросами являются: общие требования к системе или устройству, в которых будет использована ИМС; технические требования на характеристики микросхемы; свойства пленочных элементов; специфические свойства пленок и методы изготовления пассивной части и сборки гибридных ИМС.

Проектирование гибридных ИМС осуществляют в такой последовательности:

- 1) производят анализ технического задания с учетом особенностей и возможностей пленочной технологии: получения пленочных элементов необходимых номиналов с заданными точностью, пробивным напряжением, мощностью рассеяния и др.; при этом учитывают параметры и конструкции активных и других дискретных элементов, надежность и экономические факторы; при необходимости производят уточненный электрический расчет;

- 2) выбирают тип конструкции гибридной ИМС и тип корпуса, исходя из условия эксплуатации;

- 3) уточняют технологию нанесения пленочных пассивных элементов и выбирают метод сборки ИМС с учетом вида производства;

- 4) определяют площадь подложки, ее форму, размеры и материал;

- 5) производят расчет пленочных элементов с учетом схмотехнических требований и технологических возможностей, определяют форму и геометрию элементов и разрабатывают топологию схемы (эскизный вариант);

- 6) производят оценку емкостных и индуктивных связей;

- 7) производят тепловой расчет;
- 8) производят расчет проектной надежности;
- 9) разрабатывают оригинал топологии ИМС (уточняют эскизный вариант);
- 10) разрабатывают морфологию гибридной ИМС — проектируют топологию каждого слоя схемы;
- 11) разрабатывают конструкцию гибридной ИМС;
- 12) оформляют и осуществляют выпуск технической документации.

По электрической схеме определяют перечень пленочных и навесных элементов. В перечне приводятся сведения о номинальных значениях параметров, допусках на них и других электрических параметрах элементов.

Основной задачей проектирования является разработка топологии и морфологии гибридной ИМС, на основе чего оформляют чертежи для изготовления фотошаблонов (масок) и осуществляют сборку. Разработка топологии является одним из основных этапов проектирования гибридной ИМС, на котором решают задачу компоновки пленочных элементов с учетом общей компоновки микросхемы, ее электрических особенностей и технологических возможностей изготовления.

При разработке топологии проектируют схему взаимного расположения пленочных элементов разрабатываемой ИМС, рассчитывают их геометрические размеры, выбирают форму, компонуют пленочные элементы и компоненты и вычерчивают их размещение в увеличенном масштабе.

Разработка морфологии включает в себя определение степени интеграции, количества пленочных слоев, их конфигурации, геометрии и последовательности формирования. Как правило, каждый слой представляет собой топологическую структуру, создаваемую нанесением пленки одного материала (резистивного, диэлектрического, проводящего, защитного). Необходимо отметить, что проектирование гибридных ИМС должно быть направлено на получение их оптимальной функциональной сложности. Определение функциональной сложности сводится к определению оптимального числа элементов, реализуемых в составе одной ИМС, не только с учетом функционально-узлового метода проектирования, но также с учетом процента выхода годных ИМС и экономических затрат на их производство. В результате определения функциональной сложности оформляется электрическая схема на узел (один или несколько), которая подлежит реализации в гибридном исполнении.

§ 4.14. Исходные данные для проектирования гибридных ИМС

Расчет и проектирование топологической структуры гибридной ИМС должны быть направлены на получение оптимальной конструкции микросхемы, обеспечивающей высокую надежность при минимальных технологических затратах. Оптимальность конструкции в значительной степени определяется полнотой исходных схмотехнических (электрических), технологических, конструктивных и эксплуатационных данных (требований и ограничений).

Схмотехнические данные получают на основе анализа функционального состава разрабатываемой ИМС. Существенным при этом является определение числа выводов ИМС.

Технологические данные определяются конкретной технологией изготовления. Поэтому важным вопросом при проектировании является выбор типового технологического процесса, если это не оговорено заданием на разработку. Выбор типового технологического процесса осуществляют по следующим критериям: вид производства, обеспечение точности изготовления пленочных элементов, стабильность параметров, стоимость, надежность.

Конструктивные данные во многом определяются видом защиты ИМС, что зависит от области применения и условий эксплуатации микросхемы. В случае корпусной защиты необходимо руководствоваться номенклатурой типоразмеров корпусов, разработанных для других ИМС.

Схмотехнические (электрические) данные. Схмотехнические данные являются главными при проектировании гибридных ИМС, так как они определяют связи и параметры элементов, их функциональное назначение и условия эксплуатации. Их подразделяют на основные и дополнительные.

К основным данным относятся:

- электрическая схема с указанием входных и выходных сигналов, режимов питания;

- полный перечень элементов схемы, их параметров и характеристик (номинальные значения: допуск на номинал, электрический и тепловой режимы, стабильность во времени и др.), который приводится в спецификации;

- условия эксплуатации.

К дополнительным данным относятся:

- по электрической схеме — значение сопротивления наиболее критичных коммутационных связей и тип питания; допустимые падения напряжений в определенных провод-

никах; значения реактивных параметров пленочных проводников и проволочных выводов; значения паразитных параметров между отдельными элементами; допустимое значение наведенных сигналов; допустимое значение емкости шин питания; общая мощность, рассеиваемая схемой; наличие контрольных точек;

по параметрам элементов — добротность конденсаторов на определенной частоте, диапазон и шаг регулировки номиналов элементов, требующих подгонки после изготовления.

Технологические данные и требования. Технологические данные и требования характеризуют возможность изготовления схемы с заданными параметрами. Основными технологическими данными являются параметры структурных элементов гибридных ИМС: подложек, пленочных элементов и компонентов (резисторов, конденсаторов, транзисторов, диодов и др.), проводников, контактных площадок, межслойной изоляции и защитного слоя. Это данные о качественных параметрах технологии получения пленок и пленочных сложных структур, параметрах пленок различного назначения (резистивные, проводниковые, контактные, диэлектрические, защитные), комбинации различных пленок, количестве слоев, наносимых в различной последовательности в зависимости от способа изготовления пассивной части схемы и точности изготовления пленочных элементов. Характеристики основных материалов пленочных резисторов и конденсаторов приведены в табл. 4.2 и 4.3.

Технологические данные, как правило, заимствуются из конкретного типового технологического процесса и могут изменяться по мере совершенствования технологии.

Перечислим технологические требования:

последовательность нанесения слоев пленочной структуры должна строго соблюдаться для выбранного метода изготовления;

оригинал гибридной ИМС должен выполняться в прямоугольной системе координат в масштабе 10 : 1 или 20:1;

при разработке топологических чертежей должны предусматриваться технологические поля.

Ограничения, накладываемые тонкопленочной технологией. При разработке топологии и проектировании гибридных ИМС, изготавливаемых по тонкопленочной технологии, необходимо учитывать следующие основные ограничения:

1) пассивные элементы, к точности которых предъявляются жесткие требования, располагают на расстоянии не менее 1000 мкм от краев подложки и осевых линий прижимных перегородок;

2) для совмещения элементов, расположенных в разных слоях, предусматривают перекрытие не менее 200 мкм — при масочном совмещенном методе и не менее 10 мкм — при фотолитографии;

3) для измерения номиналов пленочных элементов и контроля режимов схемы предусматривают контактные площадки размером не менее 200×200 мкм;

4) навесные компоненты устанавливают в специально отведенных местах на расстоянии не менее 0,5 мм от пленочных элементов и не менее 600 мкм от контактной площадки; минимальное расстояние между навесными компонентами составляет 300 мкм;

5) длина проволочных выводов навесных компонентов должна находиться в пределах 600 мкм — 5 мм;

6) минимально допустимое расстояние между пленочными элементами (в том числе контактными площадками) составляет 200 мкм;

7) минимальные значения сопротивлений пленочного резистора устанавливают в 50 Ом, при этом длина резистора не должна быть меньше 500 мкм;

8) минимально допустимая ширина пленочных резисторов составляет 200 мкм — при масочном методе, 100 мкм — при фотолитографии и 50 мкм — при танталовой технологии;

9) у большинства тонкопленочных конденсаторов нижняя обкладка выступает за край верхней не менее чем на 200 мкм, диэлектрик выступает за край нижней обкладки не менее чем на 100 мкм (исключением являются конденсаторы, образованные пересечением двух полосок);

10) минимально допустимая ширина пленочных проводников составляет 100 мкм — при масочном методе и 50 мкм — при фотолитографии и танталовой технологии;

11) минимально допустимое расстояние между пленочными элементами, расположенными в разных слоях, составляет 200 мкм — при масочном и совмещенном методах и 100 мкм — при фотолитографии и танталовой технологии;

12) минимально допустимые размеры контактных площадок составляют: для приварки 200×250 мкм, для припайки 400×400 мкм.

Ограничения, накладываемые толстопленочной технологией. При разработке топологии и проектировании гибридных ИМС, изготавливаемых по толстопленочной технологии, следует учитывать следующие основные ограничения:

1) точность изготовления толстопленочных элементов составляет $\pm (0,05 \div 0,1)$ мм — при использовании проводящих паст и $\pm 0,1$ мм — при использовании резистивных и диэлектрических паст;

2) минимальные расстояния между краями пленочных элементов и платы равны 0,1 мм;

3) минимальные расстояния между краями платы и отверстиями под внешние выводы составляют 0,5 мм;

4) минимально допустимые расстояния между пленочными элементами должны быть 0,3 мм — в одном слое, 0,5 мм — в разных слоях;

5) минимальная ширина пленочных проводников составляет 0,2 мм при нанесении пасты на плату и 0,3 мм — при нанесении пасты на диэлектрический слой;

6) номинальные значения сопротивлений резисторов составляют 5 Ом — 300 кОм;

- 7) минимальная ширина резисторов равна 1,1 мм;
- 8) на одной стороне платы может быть максимально три резистивных слоя;
- 9) допустимое отклонение сопротивления до подгонки не должно превышать 50% от номинального значения: максимальная точность после подгонки $\pm 2\%$;
- 10) у толстопленочных конденсаторов нижняя обкладка выступает за край нижней обкладки не менее чем на 0,2 мм; при проектировании конденсаторов предусматривают компенсаторы (локальное увеличение площади верхней обкладки), учитывающие относительный сдвиг между обкладками;
- 11) минимальные размеры контактных площадок для монтажа компонентов с гибкими выводами и проволочных перемычек методом пайки составляют $0,3 \times 0,4$ мм — при ручном монтаже и $0,6 \times 0,6$ мм — при автоматизированном монтаже; для монтажа нескольких выводов к контактной площадке одну из ее сторон увеличивают на 0,3 мм на каждый вывод;
- 12) минимальные размеры контактных площадок для контроля электрических параметров составляют $0,4 \times 0,4$ мм;
- 13) минимальные размеры контактных площадок для монтажа навесных (дискретных) конденсаторов зависят от размеров конденсаторов и составляют: длина больше на 0,2 мм ширины конденсатора, ширина 0,2 мм;
- 14) минимальное перекрытие проводящего слоя резистивным равно 0,1 мм;
- 15) минимальный размер отверстия межслойной изоляции для соединения двух уровней металлизации равен 0,6 мм;
- 16) размеры внешних контактных площадок зависят от конструкции ИМС и составляют: 1,1 мм — для выводов круглого сечения диаметром 0,9 мм и $0,9 \times 1,6$ мм или $1,4 \times 2$ мм (в зависимости от способа монтажа) — для выводов прямоугольного сечения;
- 17) минимальные расстояния компонентов от края платы составляют 1 мм, а расстояния от края контактных площадок, к которым припаивается их вывод, и от соседних компонентов определяются технологией монтажа;
- 18) максимальная длина гибкого вывода активного элемента до точки контактирования без дополнительного крепления должна быть 2,5—3 мм.

Приведенные ограничения соответствуют современному уровню тонкопленочной и толстопленочной технологии. По мере совершенствования технологии они могут изменяться. Поэтому разработчику перед проектированием топологии необходимо тщательно ознакомиться с технологией изготовления для уточнения всех необходимых ограничений.

Конструктивные данные и требования. Конструктивные данные подразделяются на общие и частные и характеризуют объем и форму гибридной ИМС, размеры подложки, число и расположение выводов, формирование единой топологической структуры для ряда микросхем, размеры и способ монтажа компонентов, способ монтажа ИМС в корпус.

При проектировании топологии гибридной ИМС необходимо учитывать следующее:

1) размер подложки выбирают в соответствии с рекомендуемыми габаритами (см. § 4.4);

2) периферийные контактные площадки располагают по четырем или двум противоположным сторонам подложки (для линейных ИМС допускается расположение с одной стороны);

3) шаг расположения контактных площадок соответствует ряду 0,625; 1,25 и 2,5 мм (для бескорпусной защиты) или расположению выводов корпуса (для корпусной защиты).

Каждая гибридная ИМС должна иметь ключ — увеличенную контактную площадку или специальный знак, расположенный в нижнем левом углу на большей стороне подложки; ключ вычерчивают в процессе проектирования топологии.

Исходными для расчета пленочных элементов являются схемотехнические данные и технологические возможности изготовления. Цель расчета — выбор материалов и определение геометрических размеров и формы пленочных элементов, обеспечивающих получение элементов с воспроизводимыми и стабильными параметрами. Поэтому геометрические размеры пассивных пленочных элементов рассчитывают с учетом технологических характеристик производства и условий эксплуатации гибридных ИМС.

§ 4.15. Проектирование топологии и конструкции гибридных ИМС

Процесс проектирования топологической структуры гибридных ИМС включает последовательное выполнение комплекса работ по расчету пленочных элементов и их компоновке с навесными компонентами на подложке заданных размеров. Комплекс этих работ организационно и технически можно объединить в группы. При этом процесс проектирования сводится к выполнению четырех основных этапов:

1) определение минимальных размеров подложки и выбор типоразмера корпуса;

2) разработка коммутационной схемы соединений элементов на подложке;

3) расчет геометрических размеров и выбор формы пленочных элементов;

4) разработка окончательного варианта топологии — оригинала.

При выполнении каждого из этих этапов необходимо придерживаться определенных принципов, позволяющих решать поставленную задачу оптимально и комплексно, начиная с первого этапа. Общими принципами для всех этапов проектирования топологической структуры являются:

- минимизация площади, занимаемой элементами и схемой в целом; минимизация числа пересечений межэлементных соединений;

- равномерное расположение элементов по площади подложки;

- минимизация числа используемых материалов для реализации пленочных элементов;

- повышение степени интеграции элементов и технологических процессов.

Каждый из этих принципов следует соблюдать при проектировании топологии гибридных ИМС для изготовления как по тонкопленочной, так и по толстопленочной технологии.

Кроме перечисленных для каждого этапа проектирования имеются специфические принципы, которыми руководствуются в практической работе.

Особенно трудной при проектировании топологической структуры гибридных ИМС является ее компоновка (планировка) с соблюдением всех принципов и требований. Поэтому очень важна правильная организация планировки топологической структуры при выполнении первого этапа проектирования.

Первый (предварительный) этап проектирования включает в себя круг вопросов, связанных с анализом электрической схемы, схемотехнических данных, типовых технологических процессов и свойств материалов для пленочных элементов. Его выполняют с целью: выяснить возможность реализации заданной схемы в гибридно-пленочном исполнении при имеющихся технических возможностях; определить функциональную сложность ИМС; определить минимальную площадь подложки, занимаемую гибридной ИМС; выбрать типоразмер корпуса; определить степень интеграции ИМС.

Следует отметить, что топологическую структуру гибридных ИМС проектируют применительно к конкретному типовому технологическому процессу, выбор которого осуществляют (если не оговорено в техническом задании) на более ранних этапах проектирования с учетом многих фак-

торов, в том числе стоимости, надежности и вида производства.

Первый этап выполняют в такой последовательности. Сначала проводят анализ электрической схемы для выделения

пленочных и навесных элементов. К навесным элементам помимо активных можно отнести часть пассивных, реализация которых затруднена технологически или если в пленочном исполнении они занимают большую площадь. Затем выбирают оптимальное значение удельного поверхностного сопротивления резистивной пленки. При этом предполагают, что все резисторы будут изготовлены из одного материала. В качестве критерия оптимальности принимают минимально необходимую площадь, которую займут все резисторы схемы.

Разработка коммутационной схемы соединений (второй этап проектирования) является составной частью топологического проектирования и включает в себя преобразование исходной электрической схемы с целью составления схематического плана размещения элементов и соединений между ними

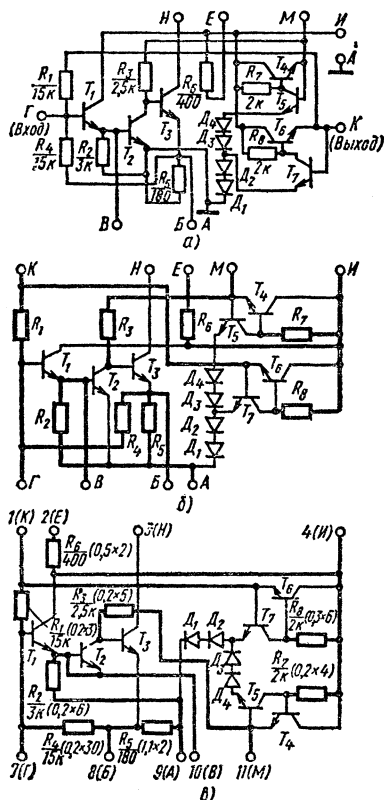


Рис. 4.30. Электрическая схема гибридной ИМС:

а — исходная; б — после преобразования пассивной цепи; в — после преобразования с учетом конструктивных требований

на подложке микросхемы. В качестве примера на рис. 4.30, а приведена исходная электрическая схема гибридной ИМС, а на рис. 4.30, б, в — варианты ее преобразования. Преобразованная схема (рис. 4.30, б) отличается от исходной более простой конфигурацией с меньшим числом пересечений соединений, которые все же имеют место.

Дальнейшее преобразование с целью устранения этого недостатка и учета конструктивных требований приводит к схеме рис. 4.30, *в*, где цифрами обозначены номера выводов корпуса, соответствующие буквенным обозначениям входных цепей на исходной схеме.

На преобразованных схемах размещение периферийных контактных площадок отвечает двустороннему расположению выводов корпуса ИМС. Пассивные элементы и внутрисхемные соединения, выполняемые групповыми методами, на рис. 4.30, *б*, *в* выделены более толстыми линиями. Тонкопленочные резисторы изображены так, что большим номинальным значениям сопротивлений соответствуют более узкие и длинные конфигурации. Такое преобразование облегчает предварительную оценку соотношений топологических зон на начальном этапе проектирования. Отметим, что на преобразованных схемах допускаются и другие обозначения элементов.

Данные, полученные в результате выполнения первых двух этапов, являются исходной информацией, для проектирования топологии ИМС.

Исходными данными для разработки топологии гибридных ИМС являются:

- 1) размер подложки и типоразмер корпуса (результат выполнения первого этапа проектирования);

- 2) схема соединений элементов, т. е. преобразованная электрическая схема (результат выполнения второго этапа проектирования);

- 3) геометрические размеры пленочных элементов (результат выполнения третьего этапа проектирования);

- 4) геометрические размеры навесных дискретных компонентов (заимствуются из справочников);

- 5) конструктивные, технологические и электрические (схемотехнические) данные, требования и ограничения.

Разработку топологии — схемы расположения элементов на плате с учетом всех требований — производят в два приема: сначала разрабатывают эскизный вариант топологии, а затем — оригинал. При этом процесс разработки топологии (эскизного варианта) носит индивидуальный характер и выполняется с учетом следующих особенностей.

Пленочные элементы в процессе их размещения на площади заданных размеров вычерчивают на миллиметровой бумаге в масштабе 10:1 или 20:1 (иногда в масштабе 30:1). При этом пленочные элементы должны иметь, как правило, прямоугольную форму.

Элементы размещаются в соответствии со схемой соединений; рекомендуется последовательно-параллельный метод вычерчивания, начиная с группы элементов, расположенных в одном из углов подложки.

При размещении элементов необходимо стремиться к экономному использованию площади подложки, соблюдая при этом ограничения по минимально допустимым размерам между элементами, элементами и краем подложки.

Все элементы снабжают контактными площадками, расположение и размеры которых должны соответствовать конструктивным и технологическим требованиям и ограничениям. Расположение периферийных контактных площадок, предназначенных для внешних соединений, должно соответствовать выводам корпуса. После окончательного размещения элементов производят раскраску (штриховку) каждого слоя. Разработанный эскизный вариант топологии подвергают оценке качества и уточнению с учетом технологичности изготовления ИМС.

Разработанная топология должна соответствовать электрической схеме; удовлетворять всем конструктивным, технологическим и электрическим требованиям; обеспечивать индивидуальный контроль над каждым элементом в процессе изготовления; иметь размещение элементов на подложке, обеспечивающее нормальную работу ИМС в заданных условиях эксплуатации; обеспечивать требуемый уровень надежности.

Для проверки топологии на соответствие электрическим требованиям производят оценку индуктивно-емкостных связей в наиболее важных участках микросхемы, а для проверки на соответствие условиям эксплуатации — тепловой расчет. Цель теплового расчета — обеспечить равномерное распределение источников тепла по подложке и такой температурный режим работы ИМС, при котором рабочая температура элементов при наибольшей допустимой температуре окружающей среды с учетом перегрева ИМС не превышала бы предельно допустимой температуры каждого элемента и ИМС в целом.

Для этого рассчитывают распределение температурного поля по плате и определяют перепад температуры для каждого элемента. По данным расчета оценивают допустимую мощность рассеяния ИМС и ее соответствие техническим условиям. Данные теплового расчета используют также при завершении конструктивного оформления ИМС.

Проверка разработанной топологии ИМС на соответст-

вие требованиям качества сопровождается уточнением размещения элементов на подложке и, как правило, уточнением топологической структуры. В результате корректировки и уточнения разрабатывают окончательный вариант топологии — оригинал, удовлетворяющий всем предъявляемым требованиям. При корректировке топологии учитывают также простоту конфигурации изготавливаемых на ее основе масок или фотошаблонов и технологичность их изготовления.

На рис. 4.31 показан топологический чертеж гибридной ИМС, электрическая схема которой приведена на дис.

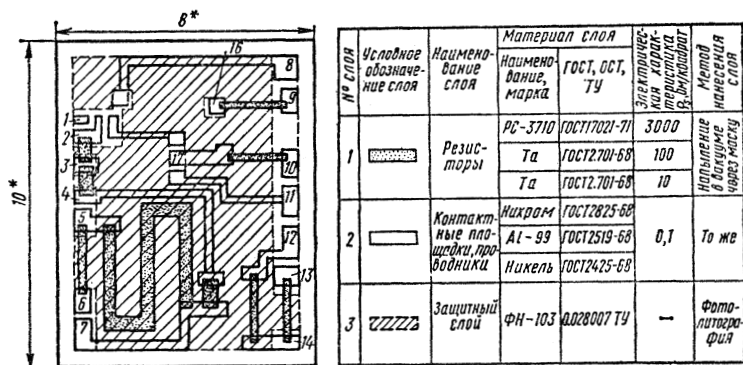


Рис. 4.31. Топологический чертеж гибридной ИМС

4.30. Топологический чертеж является оригиналом топологии и сопровождается таблицей, содержащей информацию о последовательности нанесения слоев, их условном обозначении (штриховке) на сборочном чертеже и основных параметрах каждого слоя.

На основе разработанной топологии составляют морфологию ИМС, т. е. разрабатывают конфигурацию каждого слоя топологической структуры, формирование которого осуществляется из одного материала за один технологический цикл (например, слой с резисторами, слой с соединениями, изоляционный слой и др.).

После этого разрабатывают или уточняют конструкцию гибридной ИМС. При этом формируются требования к технологии сборки и монтажа компонентов и всей ИМС в корпусе, а также требования к защите и обеспечению температурного режима.

Завершающим этапом проектирования гибридных ИМС является разработка комплекта конструкторской докумен-

тации. Основным комплектом конструкторской документации на гибридную ИМС называется совокупность графических и текстовых сведений, относящихся ко всей ИМС. В основной комплект конструкторской документации на гибридную ИМС входят: электрическая схема; спецификация на элементы; сборочный чертеж ИМС в корпусе; топологический чертеж ИМС; топологические чертежи отдельных слоев пассивной части; таблицы координат конфигурации элементов каждого слоя; технические условия.

В случае, когда вместе с разработкой топологии и конструкции гибридной ИМС производится разработка корпуса, в основной комплект конструкторской документации входят чертеж общего вида, а также чертеж узлов и деталей корпуса.

Контрольные вопросы

1. Каковы конструктивные различия тонкопленочных и толсто-пленочных гибридных ИМС?
2. Назовите основные конструктивные элементы гибридной ИМС.
3. Какие основные факторы определяют оптимальную конструкцию гибридной ИМС?
4. Каковы основные элементы толстопленочных гибридных ИМС?
5. Дайте краткую характеристику технологического процесса изготовления толстопленочных гибридных ИМС.
6. Перечислите основные параметры резисторов и конденсаторов толстопленочных микросхем и приведите их примерные значения.
7. Каковы методы подгонки сопротивлений резисторов в гибридных ИМС?
8. Каковы основные методы получения тонких пленок?
9. Дайте характеристику термического напыления тонких пленок.
10. Каковы преимущества и недостатки катодного напыления тонких пленок?
11. Дайте характеристику ионно-плазменного метода нанесения тонких пленок. Каковы его преимущества?
12. Каковы преимущества и недостатки электрохимического и химического осаждения тонких пленок?
13. Каковы роль подложек в гибридных ИМС и их характеристика?
14. Какие материалы используют для подложек гибридных ИМС и какие требования к ним предъявляются?
15. Какие требования предъявляются к подложкам гибридных ИМС при их изготовлении?
16. Дайте характеристику пленочных резисторов и назовите методы их получения.
17. Как определить емкость пленочного конденсатора?
18. Какие диэлектрические материалы используют в пленочных конденсаторах?

19. Какие индуктивные элементы применяют в гибридных ИМС? Каковы их конструкция и основные характеристики?
20. Как осуществляются электрические соединения внутри гибридных ИМС?
21. Каковы основные методы получения конфигураций тонкопленочных структур в гибридных ИМС?
22. В чем состоит метод контактной маски при получении тонкопленочных элементов?
23. Объясните использование метода фотолитографии для получения тонкопленочных элементов. Каковы его особенности и преимущества?
24. В чем заключается перспективность применения электролитографии для получения тонкопленочных элементов?
25. Какие навесные компоненты используют в гибридных ИМС и какова их характеристика?
26. Какие требования предъявляются к корпусам гибридных ИМС?
27. Какие типы корпусов используют для гибридных ИМС и каковы их конструктивные особенности?
28. Из каких основных этапов состоит процесс разработки гибридных ИМС?
29. Что является исходной информацией при проектировании гибридной ИМС и каково ее содержание?
30. Какова последовательность проектирования гибридных ИМС?
31. Какие схемотехнические и технологические данные и требования необходимы при проектировании гибридных ИМС?
32. Перечислите основные ограничения, накладываемые тонкопленочной и толстопленочной технологией при проектировании гибридных ИМС.
33. В чем состоит процесс проектирования топологической структуры гибридных ИМС?
34. Что является исходными данными для разработки топологии гибридных ИМС?
35. Что входит в комплект конструкторской документации на гибридную ИМС?

Глава 5

БОЛЬШИЕ ИНТЕГРАЛЬНЫЕ СХЕМЫ

§ 5.1. Общая характеристика и основные параметры БИС

Главным отличительным признаком и основной тенденцией прогресса современной микроэлектроники является *комплексная интеграция*, т. е. интеграция технологических процессов, элементов на подложке, схемных функций в пределах единой структурной единицы, новых физических явлений и сведений из других отраслей знаний, методов проектирования и этапов процесса создания микросхем.

Важным показателем уровня реализации этого комплекса задач является степень интеграции элементов. Действительно, степень интеграции в ИМС по мере развития микроэлектроники неуклонно возрастает. Если первые ИМС включали единицы и десятки элементов, то в настоящее время число элементов в микросхеме может достигать нескольких сотен и тысяч. Наряду с ростом степени интеграции в последние годы значительно возросла и функциональная сложность интегральных микросхем. Дальнейшее совершенствование технологических процессов позволит получать на два-три порядка большую интеграцию, что неизбежно приведет к изменению методов проектирования микросхем и аппаратуры на их основе, видоизменению их структуры и функциональных возможностей.

Увеличение степени интеграции связано с уменьшением размеров активных и пассивных элементов, совершенствованием технологии и обработки подложек больших размеров, использованием новых, более совершенных активных элементов, обладающих технологическими и функциональными преимуществами и повышенной надежностью, что может быть достигнуто только при комплексной интеграции.

Увеличение числа элементов и возрастание функциональной плотности привело к созданию микросхем с высокой степенью интеграции — больших интегральных схем (БИС). Следовательно, создание БИС является следствием комплексной интеграции и характеризует новый этап в развитии микроэлектроники.

Определение термина БИС содержит минимум три фактора: количественный, качественный и технологический. Количественный фактор характеризуется числом элементов в БИС, качественный — функциональным назначением БИС, технологический — суммой затрат, необходимых для разработки и производства БИС. Поэтому наиболее распространенным в отечественной практике является такое определение.

БИС — это интегральная микросхема, как правило, третьей или четвертой степени интеграции, содержащая одно или несколько функциональных устройств, т. е. сложные функциональные изделия, содержащие не менее 1000 элементов.

Основными параметрами, характеризующими конструктивно-технологические и схемотехнические особенности БИС, являются: степень интеграции, функциональная сложность, интегральная плотность, функциональная плотность и информационная сложность.

Степень интеграции, количественно определяемая десятичным логарифмом от числа элементов, расположенных на подложке и образующих микросхему, является наиболее общим признаком ИМС с высокой степенью интеграции и характеризует рост числа элементов на подложке в зависимости от технологических совершенств.

Функциональная сложность — это среднее число преобразований в микр осхеме, приходящих на одну переменную:

$$F = \frac{\sum_{i=1}^{i=p} B_i N_{0i}}{U}, \quad (5.1)$$

где $\sum_{i=1}^{i=p} B_i$ — число однокаскадных логических элементов в ИМС; N_{0i} — число разветвлений на выходе каждого i -го каскада; U — число переменных, поданных на входы ИМС.

Интегральная плотность — это число элементов, приходящихся на единицу площади, занимаемой БИС:

$$\omega = \frac{N}{S} = \frac{10^{k_{\text{и}}}}{S}, \quad (5.2)$$

где N — общее количество элементов в ИМС; S — площадь, занимаемая БИС; $k_{\text{и}}$ — степень интеграции.

Функциональная плотность — это число преобразований с одной переменной, приходящихся на единицу площади:

$$\Gamma = F/S. \quad (5.3)$$

Информационная сложность — это среднее число элементов, приходящихся в БИС на преобразование одной переменной:

$$H = \frac{N}{F} \frac{U \cdot 10^{k_{\text{и}}}}{\sum_{i=1}^{i=p} B_i N_{0i}}. \quad (5.4)$$

Наряду с перечисленными БИС характеризуется совокупностью функциональных и электрических (статических и динамических) параметров, аналогичных параметрам ИМС: *нагрузочной способностью, потребляемой мощностью, помехоустойчивостью, быстродействием и др.*

По этим параметрам БИС занимают промежуточное положение между микроэлектронной аппаратурой и ИМС сред-

него уровня интеграции. Отличительной особенностью БИС является то, что они представляют собой сложные микросхемы, в объеме которых реализуются блоки, узлы и целые радиоэлектронные устройства. В силу этого БИС, как правило, не обладают широкой универсальностью и предназначаются для конкретных типов аппаратуры. Примерами БИС могут служить схемы памяти на 4 кбит и более, арифметико-логические и управляющие устройства ЭВМ, цифровые фильтры.

Переход к БИС требует новых качественных изменений в конструировании радиоэлектронной аппаратуры. Если среди ИМС средней степени интеграции можно выделить определенные типовые схемные решения, применимые к большому кругу схемотехнических задач, то в технике БИС таких примеров найдется немного. Вместе с тем БИС присущи общие черты, которые проявляются не в конкретных схемах, а в методах их проектирования и изготовления.

Изготовление в едином технологическом процессе сложного функционального узла позволяет добиться оптимизации его параметров, так как ведется расчет не отдельных элементов, а узла в целом. Объединение элементов в БИС повышает быстродействие узлов, уменьшает их восприимчивость к помехам: сокращается задержка передачи сигнала в соединительных трактах, улучшается защита элементов от внешних помех.

Рассмотрим более подробно целесообразность перехода к БИС. При изготовлении ИМС на полупроводниковой пластине формируют большое число одинаковых микросхем. Затем эту пластину разрезают (скрайбируют) на отдельные кристаллы, каждый из которых содержит одну или несколько микросхем. Кристаллы, устанавливаемые в корпусе, присоединяют к его внешним выводам. После этого изготовитель аппаратуры, применяя полученные отдельные устройства (ИМС), с помощью связей, расположенных вне корпусов, снова объединяет микросхемы, которые находились первоначально на одной общей подложке, чтобы получить нужную подсистему или систему. В БИС все эти операции исключаются. Готовые ИМС на пластине не разделяются на отдельные кристаллы, а объединяются на исходной подложке в желаемую подсистему или систему путем использования металлизации для создания требуемой системы межсоединений.

Помимо повышения степени интеграции в пределах конструктивно оформленной микросхемы БИС позволяет полу-

чить более высокие качественные показатели и большую надежность радиоэлектронных устройств при меньших затратах. Повышение надежности БИС достигается путем уменьшения числа соединений в пределах одного реализуемого узла, уменьшения количества технологических операций, использования при построении систем принципа, основанного на избыточности и мажоритарных схемах. Снижение стоимости БИС по сравнению с узлами на обычных ИМС обуславливается прогрессом технологии, позволяющим увеличивать степень интеграции, и уменьшением объема монтажно-сборочных работ.

§ 5.2. Классификация и области применения БИС

БИС классифицируют по различным признакам: виду обрабатываемого сигнала, конструктивно-технологическому исполнению, областям применения и др. Общая классификация существующих в настоящее время БИС с учетом схемотехнических направлений их разработки и конструктивно-технологических методов изготовления приведена на рис. 5.1.

По виду обрабатываемой информации БИС подразделяют на *цифровые* и *аналоговые*. Цифровые БИС обычно предназначены для устройств обработки дискретной информации. К ним относятся полупроводниковые запоминающие устройства, многоразрядные регистры, счетчики, сумматоры и другие цифровые блоки. Примерами аналоговых БИС являются преобразователи напряжения — код и код — напряжение, блоки аппаратуры связи (тракты высокой и промежуточной частот, формирователи сигналов, многокаскадные схемы радиоустройств и др.).

По конструктивно-технологическому признаку различают *полупроводниковые* и *гибридные* БИС. Внутри каждой из этих БИС можно выделить множество разновидностей, отличающихся количеством кристаллов, типом применяемых активных элементов, способами нанесения соединений и монтажа кристаллов. Так, для построения гибридных БИС применяют многослойную толсто- или тонкопленочную разводку или их комбинацию в сочетании с бескорпусными ИМС среднего уровня интеграции и пленочными пассивными элементами.

Для монтажа дискретных компонентов и бескорпусных ИМС используют шариковые или балочные выводы. При этом разводку по слоям и изготовление трафаретов реали-

зуют методами машинного проектирования. При изготовлении полупроводниковых БИС могут быть применены базовые кристаллы в виде матриц биполярных транзисторных структур или МДП-транзисторов. Фотошаблоны для таких БИС проектируют и изготавливают также машинными методами.

По степени применяемости БИС в разработках аппаратуры различают БИС *общего* и *частного* применения. При-

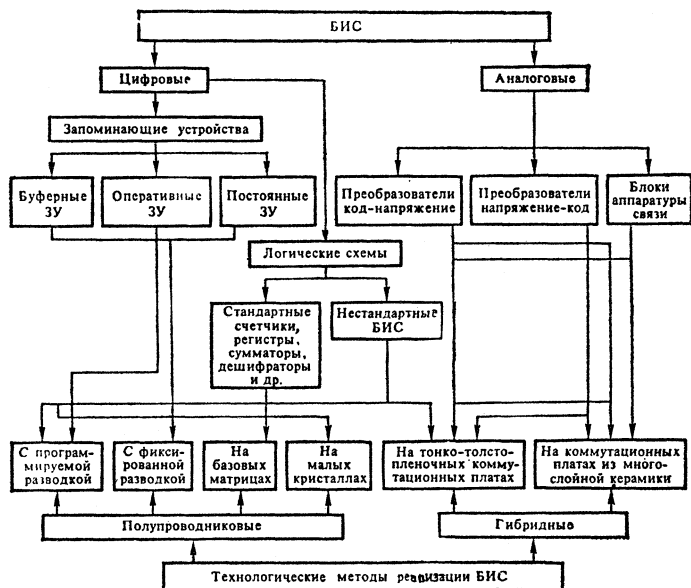


Рис. 5.1. Классификация БИС по схмотехническим и конструктивно-технологическим методам реализации

мерами цифровых БИС общего применения являются различные полупроводниковые запоминающие устройства, регистры, дешифраторы, частного применения — это подсистемы, специализированные применительно к отдельным моделям той или иной структуры и специальных вычислителей. Аналоговые БИС общего применения — это подсистемы взаимного преобразования напряжения в код, прецизионные операционные усилители высшего класса, усилители для высококачественного воспроизведения звука, СВЧ-

субсистемы модулей для фазированных антенных решеток и другие устройства. К аналоговым БИС частного применения относятся усилительные тракты радиоприемных и радиопередающих устройств на фиксированные частоты, формирователи частот из последовательности, определяемой задающими генераторами или внешней тактовой частотой, и др.

В связи с различными назначением и областями применения существуют специальные термины для характеристики БИС по этим признакам. Приведем определения основных из них.

Унифицированная БИС — это БИС, которая может служить для построения различных средств обработки информации.

Заказная БИС — это БИС, которая может быть использована при построении только одного изделия либо узкого класса средств обработки информации.

Комплект БИС — это совокупность типов БИС одной или нескольких серий, выполняющих различные функции, совместимых по конструктивно-технологическому исполнению и предназначенных для совместного применения при построении средств электронной аппаратуры. Комплекты БИС могут быть базовыми, унифицированными, заказными и целевого состава. Совокупность комплектов БИС, обеспечивающих возможность построения архитектурно-совместимых устройств обработки информации, составляет *семейство комплектов БИС*.

Наибольшее применение БИС получили в вычислительных системах с микропрограммным управлением и производительностью порядка нескольких миллионов операций в секунду, где используют полупроводниковые (в основном) и гибридные БИС.

В настоящее время утвердилось мнение, что элементной базой ЭВМ четвертого поколения являются БИС, т. е. схемы высокой функциональной сложности, определяемой большой степенью интеграции. К таким БИС следует отнести в первую очередь микропроцессорные схемы, схемы оперативной, постоянной и полупостоянной памяти, а также схемы, осуществляющие функции управления, преобразования, стыковки с реальным объектом и т. д.

Объективной предпосылкой появления микропроцессорных БИС послужила возможность получения технологическими методами микроэлектроники ИМС с большим числом элементов (логических вентилей). Это позволило получить БИС памяти большой информационной емкости и БИС мик-

рокалькуляторов. Высокая элементная насыщенность первых и функциональная сложность вторых позволили перейти к изготовлению вычислительных устройств в кристалле ИМС — микропроцессоров. Такой подход обеспечивает не только малые габариты вычислительных средств, но и создание машин-сверхгигантов и многопроцессорных (многомашинных) систем.

Доля БИС в ЭВМ четвертого поколения составит 30—70% всей элементной базы (большую часть они будут составлять в микро-ЭВМ, несколько меньшую — в больших универсальных ЭВМ), причем по числу корпусов будут преобладать схемы памяти (70—95%). Если же представить электрическую схему ЭВМ четвертого поколения в элементах И, ИЛИ, НЕ, то на долю БИС будет приходиться 90—98% всех этих элементов.

Появление БИС, в которых закладываются функции устройств ЭВМ, потребовало в корне изменить организацию разработки ИМС.

Микропроцессорные БИС (МП БИС), включающие целые устройства ЭВМ, неизбежно требуют еще большего участия разработчика изделий электронной техники в создании ЭВМ и ее математическом обеспечении.

Большинство выпускаемых МП БИС изготавливают по *n*-МДП-технологии, которая в настоящее время хорошо отработана и позволяет получать ИМС высокой степени интеграции с приемлемыми характеристиками быстродействия. По *n*-МДП-технологии выпускают, как правило, микропроцессорные БИС с фиксированной разрядностью (однокристалльные микропроцессоры), что позволяет использовать их в качестве ядра процессора ЭВМ.

По биполярным технологиям (И²Л, ТТЛ, ЭСЛ) выпускают так называемые микропроцессорные секции (или секционированные микропроцессоры), при использовании которых можно формировать процессоры ЭВМ с разрядностью обрабатываемых чисел, кратной разрядности секции. Это свойство микропроцессорных БИС называют наращиваемостью по разрядности (разрядность $2n, 4n, 8n, \dots$, где $n = 1, 2, 3, \dots$), на таких микропроцессорах можно строить ЭВМ с разрядностью обрабатываемых чисел 4, 8, 16, 32 и более.

Считают, что история развития микропроцессорных ИМС не превышает 10 лет. Однако за это сравнительно небольшое время появилось четыре поколения микропроцессоров, отличающихся своими тактико-техническими характери-

ками: первое поколение — медленно действующие четырех-разрядные МП БИС, изготавливаемые по *p*-МДП-технологии; второе поколение — четырех- и восьмиразрядные МП БИС среднего быстродействия, изготавливаемые по *n*-МДП-и КМДП-технологиям; третье поколение — быстродействующие биполярные секционированные МП БИС; четвертое поколение — однокристалльные микропроцессоры, процессорные секции и микро-ЭВМ.

Номенклатура МП БИС определяется системным подходом к разработке, производству и применению микропроцессорных БИС и вычислительных средств, основанным на глубоком анализе алгоритмов выполнения широкого круга задач и путей их реализации в кристалле БИС с учетом технологических ограничений, накладываемых микроэлектронной технологией (ограничения по степени интеграции, числу выводов корпуса БИС, времени выполнения операций и т. д.). При этом в едином цикле уже на начальном этапе проектирования МП БИС должна быть детально проработана архитектура вычислительных машин, включающая все уровни программных и технических средств с учетом достижений микроэлектроники.

В целях максимального удовлетворения потребностей большого круга потребителей при едином подходе к построению структуры БИС должны быть разработаны комплекты МП БИС по различным технологиям, отличающиеся внешними параметрами: временем выполнения операций, потребляемой мощностью и др.

Системный подход к построению МП БИС не исключает появления отдельных узкоспециализированных, но имеющих высокую тиражность БИС. На базе системного подхода отечественной промышленностью налажен выпуск микропроцессорных БИС по различным технологиям.

Микропроцессорные комплекты БИС серий К536 и К581 можно называть узкоспециализированными: они предназначены для построения конкретных моделей микро-ЭВМ массового применения. Микропроцессоры серий К580 и К584 вместе с разрабатываемыми вспомогательными схемами предназначены для построения широкого круга вычислительных средств (контроллеров, микро-ЭВМ и т. д.) с фиксированной разрядностью обрабатываемых данных. Комплект серии К589 используют для построения быстрых вычислительных средств с неограниченной разрядностью. Комплекты серий К587 и К588 предназначены для построения вычислительных средств, одной из важнейших характе-

ристик которых является низкая потребляемая мощность. Кроме того, они характеризуются высокой помехоустойчивостью и приемлемым для многих случаев применения быстродействием.

§ 5.3. Элементная база БИС

Функциональный состав БИС зависит от выбора элементной базы, под которой понимают схемное решение элементарных функций преобразования и обработки информации.

На первых этапах проектирования БИС в качестве базовых элементов использовали схемы, выполняющие типовые логические функции И, ИЛИ, И — НЕ, ИЛИ — НЕ и др. В структурно-топологическом отношении такие элементы представляют собой сформированные в кристалле полупроводника активные и пассивные элементы, расположенные в отдельных изолированных областях и объединенные в функциональную схему металлизацией. Типовые элементы для реализации основных логических функций рассмотрены в гл. 6. В таких элементах схемотехнические и структурно-топологические решения слабо взаимосвязаны. При создании БИС на их основе это приводило к наличию большого числа контактов, сложному рисунку металлизации, большой площади, занимаемой изолирующими областями и металлизацией. Эти недостатки существенно сдерживают повышение степени интеграции.

Возрастание уровня технологии позволило сочетать схемотехнические и структурно-топологические решения при разработке базовых элементов. Это привело к созданию так называемых *функционально-интегрированных* элементов, в которых функционально независимые элементы объединены в одной структурной области. Использование функционально-интегрированных элементов для построения БИС позволило значительно повысить степень интеграции за счет сокращения площади, занимаемой каждым таким элементом в отдельности и БИС в целом.

Наибольшие успехи в разработке функционально-интегрированных элементов достигнуты при использовании биполярных транзисторных структур для реализации логических схем и схем хранения информации.

Для функционально-интегрированных элементов характерны два признака:

1) наличие функциональной интеграции, положенной в основу интеграции элемента;

2) организация цепи питания, необходимой для подведения энергии к элементу.

Существующие функционально-интегрированные элементы по способу интеграции можно подразделить на три группы:

1) совмещение пассивных элементов с базовыми или коллекторными областями транзисторов;

2) совмещение рабочих областей различных активных элементов (диодов или транзисторов), обладающих вертикальной структурой;

3) совмещение областей различных транзисторов, например, *n-p-n* или *p-n-p*-типа с вертикальной и горизонтальной структурами.

В функционально-интегрированных элементах совершенствование цепи питания привело к замене традиционной резистивной цепи питания новыми. Наибольшее распространение получили цепь питания с использованием диодов, транзисторная цепь питания и инжекционная цепь питания. Функционально-интегрированные элементы с инжекционным питанием являются наиболее перспективными для построения БИС.

В табл. 5.1 приведены сравнительные данные по конструктивно-технологическим признакам для одной логической схемы, построенной на биполярных транзисторах, МДП-транзисторах и транзисторах с инжекционным питанием. Анализ показывает, что логические и запоминающие ячейки с инжекционным питанием занимают на кристалле приблизительно ту же площадь, что и ячейки на МДП-транзисторах, т. е. на 1—2 порядка меньше, чем обычные биполярные схемы. Малая площадь обусловлена не только уменьшением количества элементов и исключением высокоомных резисторов, но также исключением большей части изолирующих областей. Отдельные транзисторы ячеек не изолируются друг от друга, а требуется изоляция более крупных функциональных узлов, содержащих несколько ячеек, например всех разрядов одного слова оперативного запоминающего устройства. Уменьшение площади ячеек должно привести к повышению процента выхода при производстве цифровых БИС.

Что касается функционально-интегрированных элементов на МДП-транзисторах, то их реализацией могут быть различные схемы на комплементарных МДП-структурах с затворами из различных материалов и барьерами Шоттки, а также схемы инжекционно-полевой логики. Отметим, что

Таблица 5.1

**Сравнительные данные для одной логической ячейки,
построенной на различных элементах**

Параметр сравнения	Биполярные транзисторы		МДП-транзисторы
	стандартная схемотехника	нижекцион- ное питание	
Площадь ячейки в относительных единицах	1	0,01—0,1	0,01—0,1
Работа переключения в относительных единицах	1	0,03—0,1	0,1—1,0
Число операций маскирования	6	4	5
Количество эпитаксиальных слоев	1	0—1—2	0
Число операций диффузии	4	3	2—3
Число операций окисления	4—5	3—4	3—5
Число элементов в логической ячейке	4—10	3	4
Число типов элементов	2—4	1	1—2
Число внутрисхемных соединений	6—10	2	2—10

использование функционально-интегрированных элементов в качестве базовых БИС способствует автоматизации проектирования топологии БИС, так как проектирование топологии элементов и самих БИС может проводиться в значительной степени независимо.

При выборе схемотехнического базиса для построения БИС в каждом конкретном случае необходимо проводить комплексную оценку имеющейся элементной базы по всей совокупности основных критериев. При этом основными критериями являются: быстродействие $t_{\text{а. ср}}$; фактор качества $F = P t_{\text{а. ср}}$ (P — удельная мощность, потребляемая одним элементом); удельная S_N^0 и функциональная S_N плотности компоновки базового элемента; логическая гибкость базового элемента при реализации комплексных логических функций, что определяет добротность $Q_{\text{БИС}} = 1/(P_{\text{БИС}} T_{\text{БИС}})$; тип применяемой технологии и максимальный размер кристалла; работоспособность базовых элементов в составе БИС в диапазоне изменяющихся эксплуатационных воздействий.

Сравнение различных базовых элементов по первым двум критериям сводится к анализу их энергетических характеристик. Сравнение же элементов по другим критериям неоднозначно и требует всестороннего анализа, учитывающего комплекс вопросов, связан-

ных с разработкой и изготовлением БИС. Задача упрощается, если в качестве критерия сравнения использовать коэффициент качественного показателя базового элемента $k = n^0/\bar{F}$ (n^0 — количество элементарных вентилях, приходящихся на единицу площади кристалла). В этом случае при сравнении одновременно учитываются энергетические характеристики и плотность компоновки. При использовании коэффициента k в качестве критерия выбора базового элемента стремятся к получению его максимального значения.

Можно ввести и другие критерии сравнения, например добротность базового элемента, однако ни один из них не является обобщающим для принятия однозначного решения.

Для комплексной оценки при выборе базового элемента с учетом электрических, конструкторско-топологических, технологических и логических характеристик служит метод логического моделирования, который осуществляют с помощью ЭВМ. Для этого информацию о существующих базовых элементах заносят в библиотеку памяти ЭВМ, а для описания БИС задаются их конкретные характеристики, которыми являются потребляемая мощность, быстродействие, количество пассивных и активных элементов, число логических связей, количество необходимых изолированных областей и др.

Существующие программы моделирования позволяют оценить характеристики БИС при возможном использовании любого из базовых элементов и путем сравнения количественных значений характеристик выбрать оптимальный тип базового элемента для конкретного применения.

§ 5.4. Конструкция и технология изготовления полупроводниковых БИС

Конструкция полупроводниковых БИС определяется типом и структурой используемых активных элементов, количеством уровней и методом создания системы внутрисхемных межсоединений, а также типом корпуса. Причем от конструктивных способов реализации БИС зависят их схемотехнические особенности.

Основными активными элементами, на базе которых создаются современные БИС, являются биполярные транзисторы планарно-эпитаксиального типа (БТ) и МДП-транзисторы (МДПТ). Наибольшее распространение получили БИС на основе МДП-транзисторов, что обусловлено их уникальными свойствами и возможностью увеличения степени интеграции. Сравнение БИС одинакового функционального назначения на БТ и МДПТ показывает, что по электричес-

ким параметрам — быстродействию и добротности (отношению быстродействия к потребляемой мощности) — схемы на биполярных транзисторах превосходят схемы на МДП-транзисторах. Однако площадь, занимаемая МДПТ вместе с контактными площадками, примерно в пять раз меньше площади БТ.

Значительно меньшие размеры активных элементов, низкие уровни рассеиваемой мощности и другие схемотехнические возможности, а также сравнительная простота технологии изготовления МДП-структур определили быстрый рост степени интеграции у БИС на МДПТ. Например, БИС процессора карманного микрокалькулятора на МДП-структурах содержит 3400 элементов на кристалле размером $5,2 \times 5,2$ мм, БИС запоминающего устройства этого калькулятора реализована на кристалле размером $3 \times 2,5$ мм с числом элементов 1490.

Технология изготовления полупроводниковых БИС базируется на стандартных технологических методах, используемых при изготовлении ИМС — термическом окислении кремния, фотолитографии, диффузии и эпитаксиальном наращивании. С помощью этих методов в объеме и на поверхности полупроводниковой пластины создают активные и пассивные элементы на основе планарно-эпитаксиальных или МДП-структур и изоляции между ними. Процесс создания элементов БИС полностью совпадает с групповой технологией обработки полупроводниковых пластин при изготовлении ИМС первой и второй степеней интеграции. Отличие в технологии изготовления БИС проявляется лишь после создания элементов, перед нанесением монтажного рисунка внутрисхемных соединений, образующих законченную подсистему.

Создание системы соединений между элементами в БИС является одной из главных схемотехнических задач. Соединения в полупроводниковых БИС можно представить в виде *многоуровневой системы*. На первом уровне реализуются связи между отдельными активными и пассивными элементами, образующие простейшие логические схемы И, ИЛИ, И — НЕ, ИЛИ — НЕ и т. д. Этот уровень соединения соответствует металлизации в полупроводниковых ИМС средней степени интеграции. На втором уровне соединяются схемы типа узла: триггеры, полусумматоры, схемы управления и т. д. На третьем уровне формируются связи в блоках: регистрах, многоразрядных счетчиках, сумматорах, дешифраторах и т. д.

Дальнейшее объединение устройств в более сложные узлы и блоки осуществляется на более высоких уровнях. Решение проблемы выбора числа уровней соединений зависит в каждом конкретном случае от типа логической структуры БИС, ее функциональной плотности и сложности.

Технологически многоуровневая система соединений реализуется с помощью тонкопленочных проводников или высоколегированных диффузионных кремниевых переемычек. Поскольку в БИС все соединения не могут быть выполнены в одной плоскости из-за многократных взаимных пересечений, используют многослойную металлизированную разводку. При этом каждый уровень разводки выполняется одним слоем металлизации; слои расположены в разных плоскостях, изолированных диэлектриком, чаще всего двуокисью кремния.

Так как расположение пленочных проводников, их геометрические размеры и связанные с пересечениями паразитные емкости в большой степени влияют на схемотехнические параметры БИС (быстродействие, рабочие частоты, помехоустойчивость и др.), проектирование многослойной системы проводников требует учета всех этих факторов. Поэтому расчет и проектирование топологии системы соединений, а также ее технологическую реализацию осуществляют машинными методами.

Отметим, что выполнение внутрисхемных соединений связано с дефектностью элементов по пластине, т. е. с выходом годных ИМС среднего уровня интеграции, используемых в БИС. В зависимости от процента выхода годных схем меняется топология соединений, а следовательно, и конструкция БИС. В настоящее время наметилось несколько методов конструктивного и технологического решений многослойной разводки в полупроводниковых БИС, которые применимы как для биполярных, так и для МДП-структур. Рассмотрим основные из них.

БИС на отдельных кристаллах. Эти БИС по конструкции и технологии изготовления являются результатом дальнейшего совершенствования техники полупроводниковых ИМС среднего уровня интеграции, основанным на количественных изменениях в полупроводниковой технологии. Повышение разрешающей способности и прецизионности оборудования, улучшение качества технологии в целом позволили сократить средний размер элемента полупроводниковой ИМС с 0,07 до 0,00063 мм² и увеличить среднюю площадь кристалла, занимаемую схемой, с 1 до 10 мм², а в отдельных

случаях и более. В настоящее время это дает возможность изготавливать БИС с числом элементов до 100 000 (счетчики, регистры, дешифраторы, преобразователи и т. д.). Такие БИС проектируют с помощью ЭВМ, а межсхемные соединения выполняют, как правило, двухслойной разводкой. В качестве активных элементов в них используют в основном биполярные транзисторы. Изготавливают БИС данного типа по планарно-эпитаксиальной или изопланарной технологии. Основные характеристики БИС на отдельных кристаллах, разработанных и выпускаемых зарубежными фирмами, приведены в табл. 5.2.

БИС с фиксированной разводкой. Эти БИС создают в полном соответствии с заранее спроектированной топологией тонкопленочных проводников, соединяющих элементы схемы в жестко фиксированных координатах. При их разработке используют метод машинного проектирования, который основан на многоячеечной структуре полупроводниковой пластины. Задачу проектирования структуры БИС и топологии разводки решают в комплексе с проблемой изготовления с помощью ЭВМ.

На рис. 5.2 приведена упрощенная структурная схема процесса изготовления полупроводниковых БИС на основе многоячеечной структуры. Многоячеечная структура представляет собой логический узел, состоящий из таких схем, как логический элемент или триггер, которые входят в состав сложного функционального узла. В библиотеке программ ЭВМ хранится набор стандартных многоячеечных структур, которые можно использовать в различных комбинациях для получения требуемых БИС. Кроме того, имеется набор стандартных элементов (приборов), из которых можно построить новые или уникальные многоячеечные структуры, удовлетворяющие определенным требованиям. Инженер-разработчик БИС может обмениваться данными с вычислительной машиной посредством пишущей машинки и системы, состоящей из электронно-лучевого индикатора и светового пера.

Машинное проектирование начинается с анализа функциональных требований, которые передаются разработчику в виде технического задания. При этом анализируют все многоячеечные заранее разработанные и хранящиеся в машине структуры, которые могут потребоваться для конкретного применения.

На следующем этапе осуществляют компоновку БИС из многоячеечных структур. Успех этого этапа определяется

Таблица 5.2

Основные характеристики БИС на отдельных кристаллах

БИС	Тип логики	Быстродействие f , МГц; t , нс	Число элементов (эквивалентных ключей)	Размер кристалла, мм ²	Число выводов корпуса	Потребляемая мощность, мВт
Десятичный счетчик с параллельным приемом и выдачей информации	ТТЛ	$f_{сч} = 25$	— (35)	—	14	170
Восьмиразрядный сдвиговый регистр	ТТЛ	$f_{сдв} = 25$	143 (35)	$1,4 \times 2,8$	14	—
Пятиразрядный сдвиговый регистр	ТТЛ	$f_{сдв} = 25$	158 (24)	$1,7 \times 3,56$	16	240
ЗУ на триггерах, 16 дв. ед.	ТТЛ	$t_{сч} = 15$ $t_{зап} = 25$	100 (40)	$1,5 \times 3,05$	14	120
Четырехразрядный счетчик с управляющей схемой переноса	ДТЛ	$t_3 = 25$	288 (32)	$2 \times 2,75$	36	250
Полный сумматор	ЭСЛ	$t_{\Sigma} = 8$	356 (24)	—	14	110
Постоянное ЗУ, 256 дв. ед.	МДПТ	$t_{обр} = 10^3$	—	$1,5 \times 2,0$	11	—
Матрица ЗУ	ТТЛ	—	— (96)	$3,6 \times 3,6$	16, 24, 36	—
Динамический сдвиговый регистр на 128 разрядов	МДПТ	$f_{сдв} = 2,0$	900 (300)	$1,45 \times 1,6$	10	—
Аналого-цифровой преобразователь, 10 разрядов	МДПТ	$f = 0,2$	350 (—)	$1,6 \times 2,0$	40	135

творческими способностями разработчика. Используя пишущую машинку и световое перо, разработчик может перегруппировать ячейки так, чтобы получить удовлетворяющую его конфигурацию. Разработчик имеет возможность изменять взаимное расположение ячеек.

Далее разрабатывают топологию металлизации для объединения различных ячеек в структуру. С помощью различ-

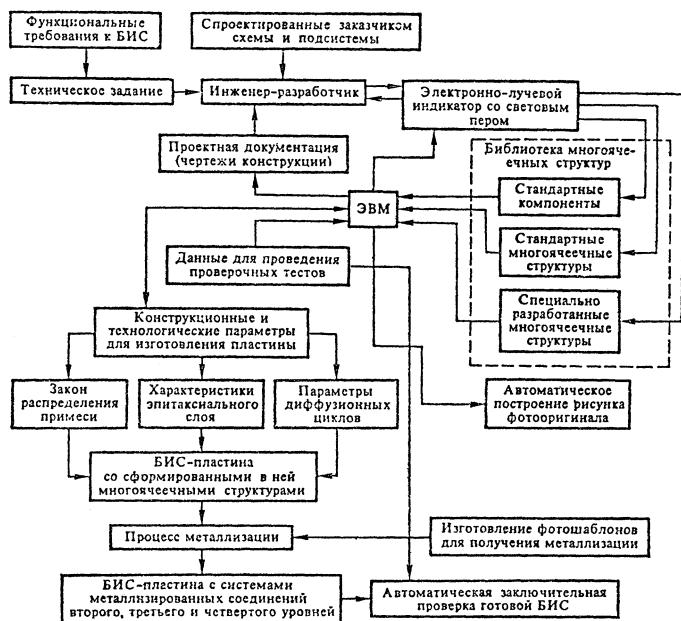


Рис. 5.2. Структурная схема процесса изготовления БИС с фиксированной разводкой

ных алгоритмов, хранящихся в машине, решают задачи трассировки. Проектирование разводки всегда контролируется разработчиком, и топология может быть изменена до получения удовлетворительного решения. Результатом данного этапа проектирования является разработка документации на выполнение металлизации.

Изготовление БИС начинается с того, что с помощью ЭВМ определяют данные, необходимые для обработки базовой пластины: характер распределения примесей, характеристики эпитаксиального слоя, параметры диффузионных

процессов. На основе этих данных в кремниевой пластине формируют многоячеечные структуры. Затем машина выдает топологию межсоединений, на основе чего изготавливают фото-оригиналы и фотошаблоны для каждого слоя металлизации.

Следующим этапом является изготовление металлизированной разводки, для чего проводят операции нанесения диэлектрического слоя, фотолитографии, нанесения алюминия, фотографирования и вжигания алюминия. Заканчивается процесс автоматической проверкой готовой БИС на правильность функционирования.

При таком методе построения БИС можно проектировать систему соединений для наиболее выгодного в схемотехническом отношении варианта расположения элементов схемы. Преимуществом данного метода разводки является конструктивная и схемотехническая гибкость, так как заранее можно учесть паразитные влияния элементов схемы друг на друга, согласовать нагрузки, точно рассчитать время распространения сигналов в проводниках и др. Это позволяет оптимизировать устройство как по мощности, так и по быстродействию. Кроме того, многоячеечные структуры дают возможность использовать минимальное число элементов и их типов, необходимое для получения схемы желаемой конфигурации. Следовательно, при данном методе построения БИС всегда можно добиться высокой элементной и функциональной плотности.

Однако создание указанных БИС возможно только при условии 100%-ного выхода годных элементов на пластине. Выполнить это условие в настоящее время при производстве БИС на больших пластинах практически невозможно. Поэтому при разработке БИС на многоячеечных структурах часто вводят избыточность элементов, а реализуют их на кристаллах ограниченных размеров.

Другим методом, позволяющим проектировать систему фиксированной разводки, обходя условия 100%-ного выхода годных элементов на пластине, является микроматричный. Согласно данному методу для построения БИС используют однотипные микроматрицы с элементарными ячейками на биполярных или МДП-структурах, выполняющих простые логические операции или функции запоминания информации. Каждая ячейка состоит из фиксированного набора элементов. С помощью первого слоя металлизации объединяют различные элементы в пределах каждой ячейки, в результате чего образуются элементарные логические схемы. Вторым и последующим слоями металлизации ячейки

объединяют в микроматрицу. После выполнения металлизации БИС проверяют на функционирование, при обнаружении неработоспособных ячеек их отключают от микроматрицы, что позволяет осуществить верхний слой металлизации.

Введением избыточности ячеек всегда можно получить желаемую структуру БИС. Построение БИС микроматричного типа с фиксированной разводкой также требует машинных методов проектирования, контроля функционирования; выявления и исключения неисправных ячеек из общей структуры.

БИС с программируемой разводкой. Поскольку любая полупроводниковая пластина со сформированными структурами всегда содержит определенное число дефектов, для построения БИС на таких пластинах используют метод избирательного монтажа межсоединений. Этот метод учитывает реальный процент выхода годных элементов по пластине. При создании БИС подобным методом топологию системы тонкопленочных проводников рассчитывают для каждой пластины заново с учетом расположения годных элементов, которое различно для каждой пластины.

Построение таких БИС, называемых БИС с программируемой разводкой, также основано на использовании элементарной схемной единицы — ячейки, которая по своим функциям и структуре эквивалентна ИМС среднего уровня интеграции. После изготовления и проверки на функционирование ячейки избирательным монтажом объединяют в систему БИС.

Упрощенная структурная схема процесса изготовления БИС с программируемой разводкой приведена на рис. 5.3. Согласно этой схеме первая металлизация служит для соединения группы схемных элементов в элементарные ячейки независимо от того, являются ли они исправными (годными). В топологию металлизации данного уровня входит ряд контактных площадок, необходимых для контроля правильности функционирования каждой ячейки в отдельности. Следующей операцией является проверка каждой ячейки на функционирование зондовыми измерительными устройствами. Информация о координатах расположения годных ячеек вводится в ЭВМ для расчета топологии системы проводников. Машина проектирует топологию металлизации и управляет процессом изготовления комплекта фотошаблонов, необходимых для каждого слоя металлизации.

После выполнения первого уровня разводки на пластину наносят изолирующий слой, в котором методом фотоли-

тографии вскрывают окна для образования контактов первого и последующего слоев металлизации. Затем поверхность изолирующего слоя с помощью машинной разводки создают второй слой металлизации. Аналогично создают третий слой металлизации. На этом формирование БИС заканчивается.

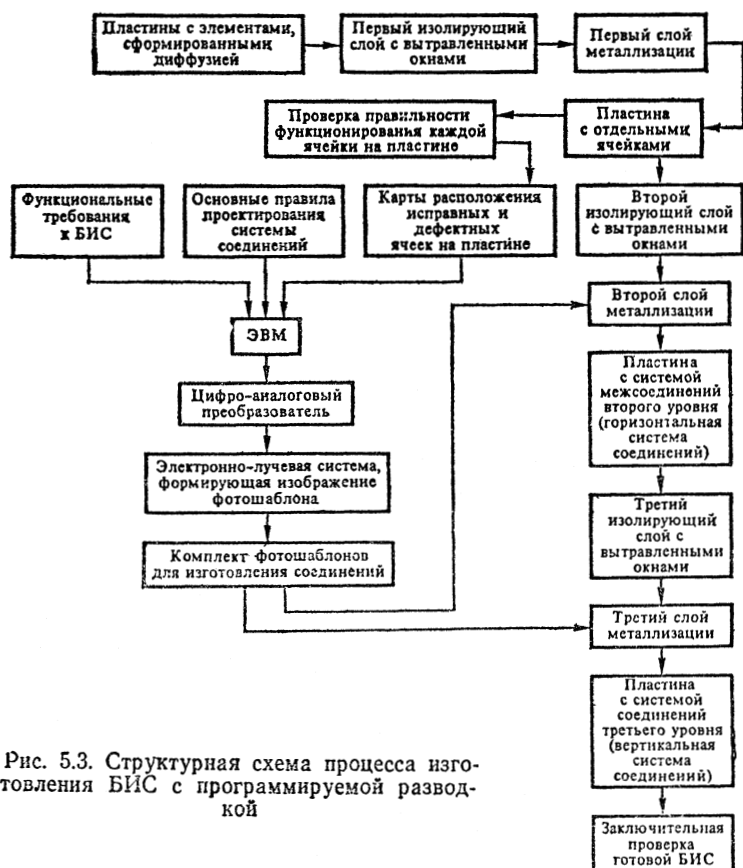


Рис. 5.3. Структурная схема процесса изготовления БИС с программируемой разводкой

При таком методе создания БИС трудно добиться оптимальной системы соединений. Для облегчения проектирования системы соединений в данных БИС также вводят некоторую избыточность элементарных ячеек. Преимуществом этого метода изготовления БИС является повышение выхода

годной продукции в производстве, так как окончательный процент выхода годных изделий определяется только процессами изготовления второго и третьего слоев металлизации и двух последних слоев изоляции. Следует также отметить, что на кристалле БИС данного типа всегда имеются участки с забракованными ячейками, а для разводки проводников требуется большая площадь. Поэтому БИС с программируемой разводкой имеют меньшую степень интеграции, чем БИС с фиксированной разводкой.

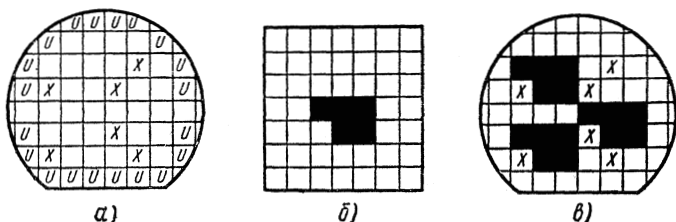


Рис. 5.4. Схемное представление получения БИС, построенных методом базовой матрицы:

a — карта расположения годных ячеек на пластине; *b* — пятиячеечная матрица заданной конфигурации; *в* — готовые матрицы

БИС, построенные методом базовой матрицы. При изготовлении БИС этим методом на пластине выделяют базовые матрицы, оптимальные по проценту выхода годных, систему соединений внутри которых выполняют фиксированной разводкой. Матрицы соединяют между собой программируемой разводкой. На рис. 5.4 *a* — *в* схематически показан процесс создания БИС из трех базовых матриц, каждая из которых содержит пять прилегающих друг к другу ячеек.

Такой комбинированный метод создания БИС позволяет программно осуществить в матрицах систему соединений и вместе с тем за счет программируемой межматричной разводки проводников повысить выход годных схем в производстве. Полупроводниковые БИС, изготовленные данным методом, имеют меньшую степень интеграции, чем БИС с фиксированной разводкой, так как часть площади кристалла занята забракованными матрицами и контактными площадками, к которым подводятся выводы матриц.

Дальнейшим развитием метода базовой матрицы является создание БИС на основе некоммутированных логических матриц. Они представляют собой полупроводниковую пластину, в которой сформированы структурные эле-

менты, объединенные металлизацией в простые, наиболее распространенные для данного класса аппаратуры схемы. Обычно одна матрица содержит около 100 типовых, нескомбинированных между собой схем (например, вентилях, триггеров) с различными параметрами. Функциональное устройство на базе такой матрицы реализуется потребителем путем объединения простых схем с помощью одно-или двухслойной разводки. Тем самым достигается законченная конструкция БИС и решается задача создания БИС различного функционального назначения на базе одних и тех же типовых схем. Указанный метод характерен для цифровых и аналоговых БИС, для изготовления которых применяют различные типовые технологические процессы, в основном изоплазменный, К-МОП, КИД и др.

В настоящее время трудно отдать предпочтение какому-нибудь одному из рассмотренных методов изготовления полупроводниковых БИС. В каждом конкретном случае выбор метода определяется функциональным назначением БИС, степенью подготовленности производства, размером полупроводниковых пластин, предназначенных для формирования структур, возможностями машинных методов проектирования и контроля и другими технико-экономическими факторами. Отметим, что наибольшая степень интеграции достигается в БИС на МДП-структурах с фиксированной разводкой. Что касается их технологичности, то наиболее просто многослойная разводка реализуется в БИС на МДП-транзисторах с молибденовыми затворами, структура которых обеспечивает трехслойную систему соединений.

БИС с инжекционным питанием. ИМС с инжекционным питанием являются одним из наиболее перспективных направлений развития цифровых БИС. По сравнению с ИМС на биполярных транзисторах они имеют минимальное число элементов и внутрисхемных соединений, не содержат резисторов в логических и запоминающих ячейках, не требуют индивидуальной изоляции элементов и даже ячеек. Практически все внутрисхемные соединения, кроме шин питания, используются для создания функциональных связей, в то время как в обычных схемах значительная часть их представляет собой соединения элементов внутри ячеек. Все это позволяет существенно увеличить степень интеграции при сохранении стандартного технологического процесса без уменьшения размеров диффузионных областей и допусков на совмещение. Степень интеграции БИС с инжекционным питанием того же порядка, что и БИС на МДП-тран-

зисторах: она в 1,5—2 раза выше, чем в БИС на МДП-транзисторах с горизонтальными каналами, и приблизительно во столько же раз ниже, чем в МДП-БИС с вертикальными каналами.

Увеличение степени интеграции является одним из наиболее эффективных способов повышения надежности цифровой аппаратуры. Наибольшей степенью интеграции до последнего времени характеризуются цифровые БИС на МДП-структурах, но их эксплуатационная надежность недостаточно высока. Указанное противоречие может быть устранено созданием БИС той же или большей сложности на более надежных биполярных структурах с инжекционным питанием.

Логические и запоминающие ячейки с инжекционным питанием содержат минимальное число элементов, поскольку один многоколлекторный транзистор без дополнительных элементов выполняет функцию инвертора. Логические ячейки ИЛИ — НЕ создаются объединением нескольких (по числу входов) транзисторов по коллекторам, а запоминающие ячейки — соединением двух транзисторов перекрестными связями. Таким образом, цифровые БИС могут быть построены на основе одной типовой структуры многоколлекторного транзистора, а ее разновидности будут различаться только числом коллекторов и площадью переходов.

В БИС с инжекционным питанием энергия, необходимая для преобразования или хранения информации, вводится инжекцией неравновесных носителей заряда через специальный инжекторный переход, смещаемый в прямом направлении. Поэтому напряжение питания может быть уменьшено до значения, соответствующего прямому напряжению на переходе (0,6—0,7 В для кремниевых и 0,3—0,4 В для германиевых переходов). В связи с этим рассеиваемая мощность близка к нижнему теоретическому пределу для схем, содержащих переходы; такие БИС имеют рекордно низкую работу переключения (0,1—1 пДж).

Число внутрисхемных соединений в ячейках с инжекционным питанием ниже, чем в обычных биполярных ИМС и ИМС на МДП-транзисторах. В качестве шины «земля» используется общая эмиттерная область транзистора, а шина, связанная с полюсами источника питания, проходит через области инжекторов. При расположении инжекторной области снизу кристалла обе шины питания могут быть исключены. Поэтому многие цифровые БИС с повышенной степенью интеграции можно выполнить, используя однослой-

ную металлизацию, что невозможно для обычных БИС. Уменьшение числа внутрисхемных соединений и упрощение их конфигураций позволяет повысить как процент выхода годных схем, так и их эксплуатационную надежность.

БИС с инжекционным питанием могут нормально функционировать при изменении тока инжектора в пределах нескольких порядков. Это свойство является уникальным, поскольку схемы других типов работоспособны при жестких допусках на стабильность напряжения и тока источника питания; оно также способствует повышению эксплуатационной надежности.

Цифровые БИС с инжекционным питанием могут работать в диапазоне температур от -60 до $+125^{\circ}\text{C}$, что объясняется их высокой помехоустойчивостью и меньшей зависимостью характеристик от разброса параметров транзисторов. Технологический процесс производства БИС с инжекционным питанием проще, чем других схем на биполярных транзисторах.

БИС с инжекционным питанием являются потенциальными, просто согласуются в аппаратуре с широко распространенными цифровыми ТТЛ-схемами, что повышает их эксплуатационную надежность.

Структуры с инжекционным питанием универсальны; на их основе могут создаваться как арифметические, так и запоминающие устройства ЭВМ среднего и низкого быстродействия.

§ 5.5. Конструкция и технология изготовления гибридных БИС

Основным препятствием увеличения степени интеграции в полупроводниковых БИС является случайное расположение дефектных элементов на полупроводниковой пластине и соответственно отличающийся от 100%-ного выход годных структур. Рассмотренные в § 5.4 методы создания полупроводниковых БИС основаны на индивидуальной обработке каждой полупроводниковой пластины, что резко повышает их себестоимость. Использование однотипных (однородных) структур, специального оборудования и ЭВМ со сложным технологическим и математическим обеспечением и т.д. наряду с малой экономической эффективностью делают применение полупроводниковых БИС в ряде случаев нецелесообразным. Большими возможностями в этом смысле обладают гибридные БИС, конструирование которых основано

на использовании всех годных структур при оптимальной для данного уровня технологии интеграции.

Гибридный метод конструирования и изготовления БИС заключается в способе компоновки бескорпусных дискретных активных элементов и ИМС на пленочной многослойной коммутационной плате, изготовленной на диэлектрической подложке.

Гибридная БИС конструктивно состоит из двух частей: коммутационной платы и дискретных элементов и ИМС, изготавливаемых отдельно. При этом обеспечивается возможность использования интегральных микросхем, изготовленных различными технологическими методами (полупроводниковые, совмещенные, тонкопленочные) и различающихся как по функциональному назначению, так и конструктивному исполнению.

Гибридный метод создания БИС является наиболее универсальным, поскольку он сочетает преимущества пленочной и полупроводниковой технологий, не объединенных одним технологическим циклом. Гибридные БИС по функциональному назначению и степени интеграции превосходят полупроводниковые. Большие функциональные возможности гибридных БИС достигаются за счет использования ИМС и других элементов различного функционального назначения. Поэтому данные БИС наиболее пригодны для построения неоднородных аналоговых устройств, например преобразователей напряжение — код или код — напряжение. Технологически процесс изготовления гибридных БИС значительно проще, чем полупроводниковых, а следовательно, и дешевле за счет применения всех годных структур, стандартной конструкции и возможности автоматизации процесса сборки.

Основным конструктивным элементом гибридной БИС является *многослойная коммутационная плата*, представляющая собой систему многоуровневой разводки и содержащая в отдельных случаях пленочные резисторы и конденсаторы. Поэтому основной проблемой формирования БИС по гибридной технологии являются проектирование и изготовление подложек с многослойной коммутацией. Проектирование коммутационных плат с многоуровневой разводкой осуществляют машинными методами, поскольку топологию пленочных проводников рассчитывают с учетом всех необходимых схмотехнических, конструктивных и технологических параметров для оптимального расположения навесных элементов и ИМС.

Технологические проблемы изготовления многослойных коммутационных плат обусловлены созданием системы пленочных проводников с высокой проводимостью, расположенных в двух-шести слоях (в зависимости от сложности схемы), а также межслойной изоляции с высокой электрической прочностью на подложках большой площади (до 60×48 мм). К элементам пленочной коммутационной платы предъявляются следующие технические требования: удельное сопротивление пленочных проводников $\rho \leq 0,01$ Ом·см, электрическая прочность межслойной изоляции $E \geq 40 \cdot 10^6$ В/см, сопротивление изоляции не менее 1000 МОм при площади пересечения $0,5$ мм², удельная емкость между слоями не более 5 пФ/см². Эти требования ограничивают выбор материалов и технологические возможности изготовления коммутационных плат.

По разрешающей способности и точности изготовления для этих целей наиболее пригодны методы тонкопленочной технологии. Однако тонкопленочные коммутационные платы не могут свети к минимуму паразитные связи и обеспечить высокую надежность, что связано с ограничениями, свойственными тонкопленочному диэлектрику, особенно для БИС, работающих на частотах более 10 МГц.

Для получения высококачественной пленочной межслойной изоляции на подложках большой площади необходимо использовать материал с высокими изоляционными свойствами и толщиной слоя 1—2 мкм, а для уменьшения паразитных связей — увеличивать толщину проводников. Это может быть достигнуто с помощью методов толстопленочной технологии. Но изготовление коммутационных плат по толстопленочной технологии, хотя и уменьшает паразитные связи, не позволяет выполнить жесткие требования по плотности коммутации.

Наиболее приемлемым для изготовления многослойных коммутационных плат является технологический процесс, сочетающий в себе преимущества тонко-и толстопленочной технологии. Существует несколько вариантов изготовления коммутационных плат. В каждом конкретном случае последовательность операций выбирают, исходя из плотности монтажа и схемотехнических требований. Оптимальным считается вариант, при котором обеспечивается последовательная фотолитографическая обработка пленочных слоев (проводящих и диэлектрических). Если коммутационная плата содержит не более двух-трех слоев металлизированной разводки, то все металлические слои создают обычными

тонкопленочными методами, а верхний слой усиливают гальванически, что обеспечивает разводку в этом слое критичных по сопротивлению проводников. Конструкция коммутационной платы гибридной БИС приведена на рис. 5.5. В зависимости от сложности разводки и функциональных требований в настоящее время для изготовления коммутационных плат гибридных БИС используются следующие методы:

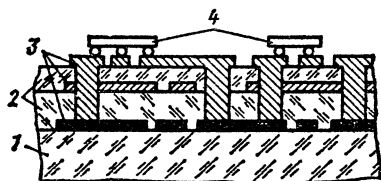


Рис. 5.5. Конструкция коммутационной платы гибридной БИС:

1 — основание; 2 — межслойная изоляция; 3 — многослойная коммутация; 4 — навесные компоненты (ИМС)

тонкопленочная технология;

толстопленочная технология;

комбинированная технология;

технология на основе многослойной керамики;

технология на основе полиимидной пленки.

Тонкопленочная технология. Процесс изготовления коммутационных

плат по тонкопленочной технологии заключается в том, что на ситалловой подложке последовательно формируют проводящие и диэлектрические слои и контактные переходы между слоями с помощью тонких пленок. Процесс включает в себя следующие основные операции: напыление первого проводящего слоя; фотолитографию первого проводящего слоя; напыление первого диэлектрического слоя; фотолитографию первого диэлектрического слоя; напыление второго проводящего слоя; фотолитографию второго диэлектрического слоя.

Особенностью данной технологии является возможность формирования пленочных резисторов (в случае необходимости) перед нанесением первого слоя металлизации. Однако, кроме отмеченных недостатков, коммутационные платы на тонких пленках обладают сравнительно низкой разрешающей способностью и, следовательно, низкой плотностью монтажа (не более 16 кристаллов на подложке размером 24×30 мм). Кроме того, в таких платах качество изоляции между слоями ухудшается с увеличением их количества. Поэтому тонкопленочную технологию используют для изготовления коммутационных плат, содержащих не более двух слоев металлизации.

Толстопленочная технология. Изготовление коммутационных плат по толстопленочной технологии является на-

нболее простым, дешевым и хорошо отработанным процессом. В первом приближении он соответствует технологии изготовления толстопленочных ИМС.

Особенностью данной технологии является двукратное нанесение и вжигание диэлектрического слоя, которое проводят с целью уменьшения паразитных емкостей между проводниками первого и второго коммутационных слоев. По толстопленочной технологии изготавливают коммутационные платы, имеющие не более двух уровней разводки.

Комбинированная технология. Процесс основан на сочетании методов тонко- и толстопленочной технологий. По этой технологии изготавливают платы также с двумя уровнями разводки.

Технология на основе многослойной керамики. Сущность ее заключается в том, что отдельно изготавливают пластины: диэлектрические с толстопленочными проводниками, изоляционные с переходными отверстиями и металлические. После этого пластины в определенной последовательности собирают в «пакет» и «спекают», в результате чего образуется керамическая подложка с многослойной коммутацией. После этого плату подвергают армировке выводами и гальваническому осаждению металла или лужению верхнего коммутационного слоя. Такая технология позволяет изготавливать коммутационные платы с числом металлизированных слоев, достигающим шести.

Технология на основе полиимидной пленки. Данная технология базируется на отдельном изготовлении полиимидной пленки с двусторонней пленочной разводкой и пленочных проводников на ситалловой подложке с последующим монтажом полиимидной пленки на ситалловую подложку. При этом достигается трехуровневая разводка (рис. 5.6). Первый уровень — внутренние и внешние контактные площадки, внутрисхемные соединения и по необходимости пленочные резисторы и конденсаторы — изготавливают по тонкопленочной технологии на ситалловой подложке. Второй и третий уровни формируют на полиимидной пленке, для чего в ней сначала делают металлизированные отверстия для коммутации второго и третьего уровней (рис. 5.6, а). Затем напылением на обе стороны пленки проводящих слоев (рис. 5.6, б), созданием фотомаски (рис. 5.6, в), осаждением слоев Cu и Sn — Bi (рис. 5.6, г) и последующим удалением фоторезиста получают необходимую разводку на каждой из сторон (рис. 5.6, д). После этого полиимидную пленку с помощью балочных выводов, расположенных по

периметру пленки, монтируют на ситалловую (рис. 5.6, е) подложку, чем достигается коммутация между первым и вторым слоями металлизации. Коммутационные платы на основе полиимидной пленки характеризуются высокой разрешающей способностью, что позволяет повысить плотность монтажа до 24 кристаллов на подложке размером 24×30 мм. Благодаря хорошим изоляционным свойствам полиимид-

ной пленки эти платы обладают высокой надежностью.

Формирование гибридной БИС заключается непосредственно в сборке-монтаже навесных элементов и ИМС на коммутационной плате. Монтаж гибридных БИС осуществляют с помощью гибких или жестких выводов (балочных либо шариковых). Жесткие выводы создаются непосредственно на кристаллах навесных элементов и ИМС, предназначенных для сборки БИС. Жесткие выводы повышают надежность соединений и позволяют вести автоматическую сборку гибридных БИС. Современные сборочные автоматы производят монтаж элементов на плату

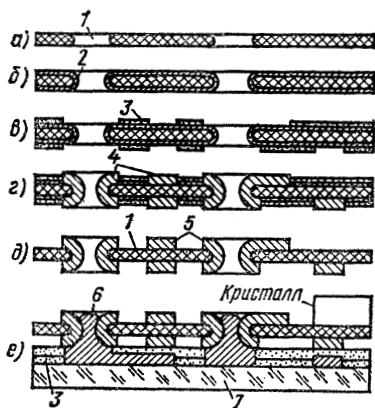


Рис. 5.6. Формирование коммутационной платы гибридной БИС на основе полиимидной пленки: а — полиимидная пленка с отверстиями 1; б — напыление проводящего слоя 2 (Cr — Si — Cr); в — формирование маски из фоторезиста 3; г — электроосаждение слоя 4 (Cu и Sn — Bi); д — удаление фоторезиста (получение двухслойной металлизации 5); е — монтаж с помощью жестких выводов 6 на ситалловую подложку 7

со скоростью, составляющей несколько тысяч кристаллов в час. Такая продолжительность сравнима с групповой технологией изготовления полупроводниковых ИМС.

После сборки гибридные БИС помещают в герметичный корпус, а в отдельных случаях герметизируют все устройство в целом. Это значительно уменьшает габариты устройства.

Важным преимуществом гибридной технологии изготовления БИС (кроме указанных) является ремонтпригодность (замена навесных элементов на этапе сборки или в процессе эксплуатации в случае бескорпусной защиты). Таким образом, гибридные БИС не требуют сложной системы про-

ектирования и изготовления, имеют большую гибкость в отношении реализации различных схмотехнических функций и позволяют использовать последние достижения в технологии полупроводниковых и пленочных ИМС.

§ 5.6. Особенности и основные этапы проектирования БИС

Основной задачей при разработке БИС является повышение степени интеграции. Повышение степени интеграции в микросхемах зависит от нескольких факторов. Один из них — возможность уменьшения геометрических размеров элементов ИМС.

Предельные геометрические размеры элементов ИМС определяются, с одной стороны, необходимыми электрическими параметрами, с другой — разрешающей способностью технологического оборудования и технологическими процессами, с помощью которых создаются определенные структуры в полупроводнике, на его поверхности или на поверхности диэлектрической подложки. Следует отметить, что технологические методы и оборудование в микроэлектронике совершенствуются очень быстро, и сейчас минимальные геометрические размеры элементов приближаются к предельно допустимым, сравнимым с длиной световой волны. Это накладывает определенные требования на проведение технологических процессов при изготовлении БИС по точности, прецизионности и воспроизводимости, что возможно только при автоматических или автоматизированных процессах. Задача усложняется и тем, что для изготовления БИС требуется более сложный технологический процесс, чем для формирования обычных ИМС, а сам процесс существенно влияет на схмотехнические параметры БИС. Это, в свою очередь, выдвигает различные требования и ограничения, которые необходимо учитывать при разработке БИС.

Особенности проектирования. При разработке БИС возникает ряд задач, не связанных с традиционными представлениями о расчете, проектировании и конструировании электронной аппаратуры. Это обусловлено прежде всего структурой самих БИС, интегральной технологией их изготовления и областями применения. По мере совершенствования технологии микроэлектроники, с ростом степени интеграции элементов на подложке функциональная сложность БИС непрерывно возрастает, а функции, выполняемые ими,

приближаются к аппаратурным. Подтверждением этого является построение на одной БИС малых вычислителей (калькуляторов), запоминающих устройств, преобразователей и т. д.

Следовательно, с одной стороны, БИС можно рассматривать как ИМС, с другой — как целое устройство. В связи с этим трудно добиться унификации БИС по сравнению с цифровыми ИМС малой и средней степеней интеграции. Кроме того, сам процесс проектирования аппаратуры на БИС отличается от процесса проектирования на ИМС с малой степенью интеграции. Так, если в период дискретной электроники и электроники ИМС с малой степенью интеграции синтез узлов вычислительных устройств осуществлялся на базе уже известного набора элементов, то в технике БИС синтез схемотехнического решения связан со структурой устройства, предназначенного для интегрального исполнения. В целях унификации БИС целесообразно изготавливать их для определенного класса вычислительных устройств. Наибольшая эффективность достигается при создании БИС регулярных структур (регистры, счетчики, запоминающие устройства и т. д.). Наиболее полно возможности БИС, по-видимому, будут реализованы при создании устройств на однородных настраиваемых вычислительных средах. Большие интегральные схемы призваны уменьшить число межсхемных соединений, поэтому при определении функционального содержания БИС важным критерием их качества является число выводов. Минимизация числа выводов — одна из основных задач при проектировании БИС.

Разработка и проектирование БИС, как правило, должны быть связаны с проектированием всей системы. Здесь следует рассматривать: разбиение системы по функциям на отдельные схемы, определение минимального по числу схем набора БИС, резервирование узлов системы, полное использование допустимой степени интеграции для создания многофункциональных схем. Трудность постановки и решения такой задачи заключается в неоднозначности решения и отсутствия в настоящее время научно обоснованных критериев сравнения отдельных решений.

Основная особенность проектирования БИС заключается в одновременном решении комплекса задач, связанных со структурой системы, структурой БИС, оптимизацией топологии с целью увеличения степени интеграции, уменьшения длины межсоединений, сокращения числа пересечений и паразитных связей, отработкой базовой технологии для про-

изводства набора БИС. Например, электрический расчет схемы невозможен без учета особенностей топологического решения, а основные соотношения для определения геометрических размеров отдельных компонентов обусловлены электрическим расчетом и требуемыми электрическими параметрами проектируемых схем. Пока еще нет строгого алгоритма решения задачи проектирования БИС. Однако на каждом этапе следует учитывать эмпирические результаты, полученные при отработке технологии, в частности при проектировании топологии ИМС с малой степенью интеграции.

В настоящее время разработаны методы оптимального разбиения систем на отдельные БИС, автоматизации проектирования топологии БИС, уменьшения длины межсоединений и сокращения числа пересечений, оптимального расположения функциональных элементов и компонентов.

Вопрос о номенклатуре БИС для системы требует использования метода последовательных приближений. Критериями при определении набора БИС должны быть минимальное их число и универсальность. Требование универсальности, с одной стороны, может привести к росту общего числа ИМС в системе, с другой — при росте степени интеграции — к недоиспользованию логических возможностей схем. При разработке сравнительно простых систем целесообразно пользоваться стандартными интегральными узлами или модулями широкого назначения. При проектировании сложных систем обычно разрабатывают специальные заказные схемы с высокой степенью интеграции. Критериями, которыми должны пользоваться разработчики при определении набора схем, являются общая стоимость системы и количество применяемых ИМС.

Известно, что при малых площадях ИМС их стоимость определяется стоимостью корпуса и сборки. При больших площадях, а следовательно, при высоких степенях интеграции преобладает стоимость изготовления кристалла. Таким образом, прежде чем приступить к разработке структуры БИС, необходимо оценить степень интеграции или площадь кристалла, обеспечивающие желаемый процент выхода годных изделий. Для этого нужно иметь данные по снижению процента выхода годных ИМС, структур и элементов на каждом из этапов технологического процесса. Технологи должны установить зависимость процента выхода годных кристаллов на каждой из пластин от их площади, определить плотность дефектов на пластине и найти закон распределения дефектов в зависимости от расстояния от центра плас-

тины, затем определить зависимость процента выхода годных структур на каждой из операций в процессе изготовления. Критериями оценки могут служить электрические характеристики структур. Набор статистических данных позволит разработчикам систем оценить экономически обоснованную степень интеграции.

Электрический расчет схем позволяет установить основные соотношения между параметрами активных и пассивных компонентов. Он должен быть неразрывно связан с расчетом топологии схем. Повышение качества ИМС и соответствие их электрических параметров техническим условиям должно прогнозироваться с допустимой вероятностью расчетом. Большое значение приобретает оптимизация электрических параметров схем, основанная на результатах расчета и статистических данных технологического процесса. Таким образом, проектирование БИС — это решение комплекса задач схемотехнического, топологического, технологического и конструктивного характера, осуществление которого требует применения машинных методов расчета и проектирования.

Ограничения и проблемы. Особенности разработки БИС накладывают определенные ограничения на процесс их проектирования. Так, высокая плотность упаковки быстродействующих элементов в БИС затрудняет подвод мощности от источника питания и создание многоуровневой разводки. Например, если БИС состоит из 150 быстродействующих ИМС с потребляемой мощностью 50 мВт каждая, то ко всей схеме необходимо подвести ток порядка 2,5 А, что при малой геометрии пленочных проводников связано с большими трудностями. Высокое быстродействие схем (менее 1 мс) и большая плотность размещения обуславливают скорость переключения тока $dI/dt \sim (10 \div 20) \cdot 10^8$ А/с, вследствие чего даже незначительные индуктивности монтажа вызовут существенные колебания напряжения питания.

Передача сигналов с наносекундными длительностями фронтов по многослойной структуре связана с проблемой уменьшения паразитных связей и помех. Эти факторы необходимо учитывать при проектировании многоуровневой разводки с целью обеспечения заданных быстродействия и помехоустойчивости.

Другая важная проблема — отвод тепла. Повышение плотности упаковки приводит к увеличению удельной мощности рассеяния (до 20 Вт/см³), особенно в быстродействующих БИС. Отвод таких мощностей требует разработки спе-

циальных конструкций корпусов с принудительным охлаждением.

Проблема теплоотвода неразрывно связана с обеспечением высокой надежности БИС. Поддержание надежности БИС на определенном уровне по мере повышения степени интеграции при неизменном уровне технологии — задача довольно сложная. Например, если БИС содержит 1000 элементов, то для получения интенсивности отказов $\lambda = 10^{-6} \text{ ч}^{-1}$ надежность каждого составного элемента должна быть значительно выше ($\lambda_i \leq 10^{-9} \text{ ч}^{-1}$).

С повышением степени интеграции усложняются функции, выполняемые БИС. Следствием этого является трудность контроля работоспособности и проведения испытаний БИС, что требует сложного автоматического оборудования с большим числом контрольных тестов, разрабатывать которые необходимо при проектировании схемы.

Существенные ограничения на разработку БИС накладывает выход годных структур. Известно, что требования к качеству технологического процесса можно установить с помощью выражения

$$P_{\text{БИС}} = \exp(-BdS), \quad (5.5)$$

где $P_{\text{БИС}}$ — процент выхода годных БИС; B — коэффициент поражаемости БИС*; d — плотность дефектов **; S — площадь, занимаемая БИС.

Как видно из формулы (5.5), процент выхода годных БИС уменьшается с увеличением площади. Эту зависимость можно улучшить только технологически за счет уменьшения плотности дефектов.

Анализ указанных факторов показывает тесную взаимосвязь между технологией и конструкцией БИС.

Основные этапы проектирования. При разработке больших интегральных схем необходимо стремиться к тому, чтобы спроектированная БИС удовлетворяла следующим требованиям:

выполняла типовые, широко используемые в аппаратуре электрические и логические функции;

имела по возможности максимальные степень интеграции, функциональную сложность и интегральную плотность;

* Коэффициент поражаемости БИС — отношение части площади, дефект которой выводит схему из строя, к полной площади, занимаемой БИС.

** Плотность дефектов — число дефектов, приходящихся на единицу площади пластины.

имела ограниченное число внешних связей (входов и выходов);

обладала наращиваемостью, позволяющей изменять в широких пределах число разрядов и другие характеристики;

обладала логической, электрической и конструктивной совместимостью с ИМС и другими изделиями микроэлектроники.

Удовлетворение этим требованиям может быть достигнуто только при комплексном подходе к процессу проектирования. Поэтому разработку и проектирование БИС следует связывать непосредственно с проектированием всей системы аппаратуры, используя при этом последние достижения в области конструирования и технологии ИМС с целью получения оптимальной функциональной и конструктивно-топологической структуры БИС. Последнее во многом зависит от конструктивно-технологического исполнения и уровня производства. Поэтому при разработке БИС каждого конструктивно-технологического типа имеются свои особенности. Однако независимо от конструктивно-технологического исполнения весь процесс проектирования БИС можно разбить на следующие этапы:

- 1) определение функциональной сложности БИС;
- 2) выбор типа базового элемента — ИМС средней или малой степени интеграции;
- 3) определение функционального состава БИС — количества базовых и других элементов;
- 4) электрический, топологический и конструктивный расчеты;
- 5) разработка топологической структуры и системы соединений;
- 6) разработка корпуса;
- 7) разработка системы тестов для проверки функционирования БИС;
- 8) разработка конструкторско-технологической документации.

Большинство из этих этапов взаимно связаны, их выполнение требует совместного решения задач анализа, синтеза и оптимизации, что может быть достигнуто только при использовании автоматических или автоматизированных методов проектирования.

Системный комплексный характер проектирования БИС с применением методов и средств автоматизации позволяет выделить в общем цикле проектирования следующие его

разновидности: информационно-логическое проектирование; схемное проектирование; конструкторское проектирование.

Задачей *информационно-логического проектирования* является разработка принципов построения БИС, алгоритмов ее функционирования и логического описания схемы с различным уровнем детализации. Результатом данного проектирования является определение функционального состава и сложности БИС. Для решения этих задач используют следующие методы разбиения системы на БИС: функциональное разбиение, разбиение на параллельные фрагменты и разбиение по критерию минимизации соединений между БИС. *Схемное проектирование* заключается в разработке принципиальной электрической схемы и методов ее контроля с помощью макетирования или моделирования. Именно при схемном проектировании осуществляется выбор оптимального базового элемента и определяется количество базовых и других элементов, необходимых для построения БИС.

В задачу *конструкторского проектирования* входит разработка конструкторско-технологической документации, требуемой для изготовления и сборки БИС. Конструкторское проектирование является наиболее сложным в общем цикле, так как оно непосредственно связано с технологией изготовления и должно учитывать все возможности и ограничения технологии, включая процент выхода годных изделий. Основным при конструкторском проектировании является оптимальное размещение базовых и других элементов на подложке (пластине, плате) и разработка системы соединений между этими элементами.

Этап проектирования топологии является заключительным в общем цикле проектирования БИС и считается наиболее сложным и трудоемким. При этом решают следующие взаимосвязанные задачи:

размещение элементов в системе координат пластины (платы) с учетом схемотехнических и конструктивных ограничений;

проведение внутрисхемных соединений (трассировка);
вычерчивание послыльных чертежей с общего вида топологии и составление таблиц координат угловых точек для дальнейшего изготовления комплекта — фотосаблонов.

Наиболее сложным является размещение элементов и трассировка соединений по определенным критериям оптимальности. При разработке каждого вида БИС устанавливают систему критериев оптимальности топологической

структуры. Однако для любых БИС существуют общие критерии оптимальности:

- минимальная суммарная длина внутрисхемных соединений;

- минимальное число пересечений внутрисхемных соединений;

- простота конфигурации внутрисхемных соединений;

- минимальные искажения сигналов;

- наилучшие условия отвода тепла.

Учитывая сложность проектирования по критериям оптимальности, а также большой объем информации, необходимый для описания топологии (до 1000 тыс. координатных точек на один слой), машинные методы обработки топологической информации и разработки топологии в целом следует считать обязательными. Методологические решения основных задач проектирования топологии БИС, а следовательно, построения автоматизированных систем для этих целей являются общими для полупроводниковых и гибридных БИС. Для обоих типов БИС в качестве базовых элементов используют в основном структурные схемы, выполняющие определенные функции и заранее отработанные в топологическом и конструктивном исполнении. Исключения составляют отдельные виды полупроводниковых БИС, разрабатываемые на основе обычных элементов (транзисторов, резисторов и т. д.).

Исходной информацией для проектирования топологии являются принципиальная или функциональная электрическая схема БИС, библиотечный набор элементов, схемотехнические, технологические и конструктивные ограничения.

В качестве математической модели схемы используют представление ее в виде графа, для чего вводят геометрические модели элементов. В основу построения моделей элементов закладывается взаимная ориентация их выходных контактных площадок, что обеспечивает возможные подходы к различным контактам. При этом для наилучшей трассировки служит граф, вершины которого представляют отдельные контактные площадки, а ветви — связи между элементами.

Следует отметить, что практическую задачу размещения элементов и трассировки на сегодняшний день решают последовательно: сначала размещают элементы таким образом, чтобы облегчать последующую трассировку, а затем выполняют внутрисхемные соединения. Для размещения эле-

ментов применяют последовательные и итерационные алгоритмы, а для трассировки — волновые, лучевые и маршрутные алгоритмы.

Процесс проектирования БИС сопровождается большим количеством электрических, технологических и конструктивных расчетов, необходимых для выполнения соответствующих этапов. Рекомендуется такая последовательность расчетов:

- статический расчет элементов с целью определения параметров активных и пассивных элементов, напряжений питания, потребляемой мощности, помехоустойчивости;

- анализ динамических характеристик элементов схемы и системы в целом;

- определение оптимальных электрических параметров функциональных структур;

- расчет оптимальной топологической карты размещения элементов на кристалле;

- определение требований к конструктивным параметрам элементов ИМС;

- статистический вероятностный расчет схем с учетом технологического разброса параметров элементов, разработка требований к параметрам ИМС;

- расчет геометрии элементов и формирование требований к технологическому процессу;

- расчет и конструирование корпуса;

- разработка системы тестов для проверки функционирования БИС.

Естественно, что решение такого круга задач требует организации эффективного машинного проектирования, разработки методов синтеза, анализа и оптимизации параметров электронных цепей и структур, максимальной стандартизации технологии для сокращения расходов на проектирование и производство. Кроме того, поскольку проектирование БИС непосредственно связано с технологией их изготовления и оба эти процесса осуществляются одновременно, требуется высокая оперативность разработки отдельных этапов, в частности топологической структуры межэлементных соединений. Другими словами, практически только с применением ЭВМ при наличии достаточного математического обеспечения можно проектировать БИС. Поэтому при проектировании БИС, учитывая сложный и комплексный характер процесса их создания, необходимо стремиться осуществить:

- дешевое и быстрое машинное проектирование;

- автоматическое изготовление масок и фотошаблонов;

- максимальную стандартизацию технологических процессов изготовления структур БИС с целью сокращения расходов на их проектирование и производство;

автоматизацию технологического и выходного контроля.

Таким образом, в производственный процесс изготовления БИС необходимо ввести машинное проектирование в реальном масштабе времени.

На современном этапе развития микроэлектроники выполнен комплекс работ по использованию вычислительной техники для проектирования БИС. Основными направлениями при этом являются:

разработка системы технических средств и комплектов программ для решения вопросов схемотехники и топологии БИС;

решение задач расчета технологических процессов и параметров элементов ИМС;

создание методов и программ для анализа и синтеза электрических схем БИС;

разработка математического обеспечения задач проектирования топологии и изготовления фотошаблонов.

Выполненный комплекс работ по данным направлениям позволил создать и применить на практике *автоматизированные системы проектирования* (АСП) БИС. Современная система автоматизированного проектирования БИС представляет собой совокупность программно-аппаратных средств, позволяющих одновременно вести оперативное проектирование большого числа БИС. Работа АСП основана на использовании высокопроизводительных ЭВМ для решения задач проектирования БИС, таких, как логическое моделирование, расчет и оптимизация параметров активных элементов и электрических схем, статический анализ, и интерактивных графических мини-систем для проектирования топологии и управления программно-управляемым оборудованием с целью изготовления фотооригиналов и фотошаблонов.

Создание автоматизированных систем проектирования БИС в десятки раз повышает эффективность работы проектировщиков и позволяет решать проблему оперативного и качественного проектирования широкой номенклатуры БИС.

Контрольные вопросы

1. Какую роль выполняют БИС в микроэлектронике?
2. Чем вызван переход от ИМС к БИС?
3. Какими основными параметрами характеризуются БИС? Дайте их определение.
4. По каким признакам классифицируют БИС?

5. Назовите основные области применения БИС.
6. Что такое микропроцессорные БИС? Какую роль они выполняют в современной вычислительной технике?
7. Какие элементы используются в БИС?
8. Что такое функционально-интегрированные элементы?
9. Как осуществляется функциональная интеграция элементов?
10. Дайте определение полупроводниковых БИС.
11. Чем определяется конструкция полупроводниковых БИС?
12. Что такое многоуровневая система соединений? Как она реализуется в БИС?
13. Какие имеются конструктивно-технологические виды полупроводниковых БИС?
14. В чем сущность БИС на отдельных кристаллах?
15. В чем сущность БИС с фиксированной разводкой?
16. В чем сущность БИС с программируемой разводкой?
17. В чем сущность БИС, построенных по методу базовой матрицы?
18. Что такое некоммутированные логические матрицы?
19. Перечислите основные преимущества БИС на инъекционных схемах.
20. Какие технологические процессы используют для изготовления полупроводниковых БИС?
21. Дайте определение гибридных БИС.
22. В чем сущность гибридного метода конструирования и изготовления БИС?
23. Какими преимуществами и недостатками обладают гибридные БИС?
24. Что такое коммутационная плата? Какие требования предъявляются к ней?
25. Какие технологические процессы применяют для изготовления гибридных БИС? В чем их сущность?
26. В чем сущность технологии на основе многослойной керамики?
27. В чем сущность технологии на основе полиимидной пленки?
28. Какими особенностями характеризуется проектирование БИС?
29. Какие существуют ограничения и проблемы при проектировании БИС?
30. Перечислите основные этапы проектирования БИС. В чем их сущность?
31. В чем сущность проектирования топологии БИС?
32. Каковы критерии оптимального проектирования топологии БИС?
33. Какие функции выполняют ЭВМ при проектировании БИС?
34. Что такое АСП БИС? Какие функции она выполняет?

ОСНОВЫ МИКРОСХЕМОТЕХНИКИ И ИНТЕГРАЛЬНЫЕ МИКРОСХЕМЫ ДЛЯ АППАРАТУРЫ СВЯЗИ

§ 6.1. Схемотехнические особенности ИМС

Промышленность электронной техники выпускает большую номенклатуру микросхем, позволяющую создавать радиоэлектронную аппаратуру различного назначения и отвечающую разнообразным требованиям. Аппаратура на интегральных микросхемах имеет малые габариты, массу, потребляемую мощность и высокую надежность. ИМС стали основной элементной базой любой радиоэлектронной аппаратуры.

Развитие микроэлектроники потребовало во многих случаях новых схемотехнических решений по сравнению со схемотехникой на дискретных транзисторах. При разработке электрической схемы интегральных микросхем следовало учитывать, что технологически в полупроводниковых ИМС получать активные элементы (диоды, транзисторы) значительно проще, чем пассивные (резисторы, конденсаторы). Схемотехнические решения в микроэлектронике, используя основные решения дискретной электроники, позволили создавать аппаратуру, выполняющую довольно сложные функции. Микроэлектроника, отличающаяся созданием сложных схем в микрообъемах твердого тела, породила ряд новых схемных решений, которые не были известны и не могли быть реализованы на дискретных компонентах.

Независимо от конструктивно-технологических особенностей и схемотехнических решений все ИМС по виду обрабатываемой информации подразделяют на цифровые и аналоговые.

Цифровые ИМС предназначены для преобразования и обработки сигналов, изменяющихся по закону дискретной функции. Частным случаем цифровой ИМС является логическая микросхема. Цифровые ИМС основаны на использовании элементов и структур с двумя устойчивыми состояниями и применяются главным образом в устройствах дискретной автоматики, вычислительной техники, а в последнее время и в технике связи. Цифровые ИМС реализуются как на биполярных, так и на МДП-транзисторах.

Аналоговые ИМС предназначены для преобразования и обработки сигналов, изменяющихся по закону непрерывной

функции. Они используются в аппаратуре непрерывного действия (радиолокационная техника, СВЧ-техника, приемо-передающая аппаратура, техника связи и т. д.) и реализуются главным образом на биполярных, МДП-структурах и других новых активных элементах.

В основе цифровых ИМС лежат простейшие транзисторные ключи — аналоги электромеханических контактов. Ключи характеризуются двумя устойчивыми состояниями: разомкнутым и замкнутым. На простейших ключах строят более сложные схемы: логические, бистабильные, триггерные (спусковые) и др.

В основе аналоговых ИМС лежат простейшие усилительные ячейки — каскады или ступени. На усилительных каскадах строят многокаскадные усилители, стабилизаторы напряжения и тока, модуляторы, детекторы, генераторы синусоидальных колебаний и др. Такие схемы иногда называют линейными и квазилинейными, хотя это название подходит только для усилителей и стабилизаторов, а для других схем является условным.

Особенности цифровых и аналоговых ИМС удобно пояснить с помощью передаточных характеристик, устанавливающих зависимость выходной величины от входной, например напряжения (рис. 6.1). На рисунке цифрой 1 обозначена характеристика инвертирующих схем, у которых низкое входное напряжение соответствует высокому выходному напряжению, а цифрой 2 — характеристика неинвертирующих схем, у которых низким входным напряжениям соответствуют низкие выходные напряжения. Такие характеристики свойственны и простейшим ключам, и простейшим усилительным каскадам, однако их использование в том и другом классах схем принципиально различно.

В транзисторном ключе два его устойчивых состояния (разомкнутое и замкнутое) соответствуют точкам А и В на рис. 6.1. В точке А ключ разомкнут и на нем падает большое напряжение, а в точке В ключ замкнут и падение напряжения на нем близко к нулю. Входные и выходные сигналы

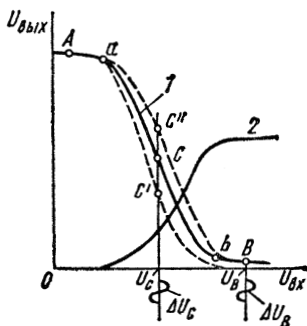


Рис. 6.1. Передаточные характеристики напряжения электронных схем: 1 — инвертирующих; 2 — неинвертирующих

(напряжения) в ключе принимают только два значения: либо $U_{вхA}$, $U_{выхA}$, либо $U_{вхB}$, $U_{выхB}$. Форма передаточной характеристики между точками A и B несущественна; если она изменяется (пунктирные линии), то выходные сигналы остаются практически неизменными. Отсюда следует, что ключи, а значит, и цифровые ИМС мало чувствительны к разбросу (допускам) параметров, их температурной зависимости, изменению параметров во времени, а также к внешним электромагнитным помехам и собственным шумам. На рис. 6.1 это иллюстрируется тем, что небольшие колебания напряжения ΔU_B около точки B (шумы или наводки) практически не изменяют значения выходного сигнала, а следовательно, не влияют на работу ключа.

В усилительном каскаде используется непрерывный рабочий участок передаточной характеристики между точками a и b . Входные и выходные сигналы могут принимать любые значения в пределах этого участка и связаны друг с другом функциональной зависимостью $U_{вых} = f(U_{вх})$. Очевидно, что любая «деформация» характеристики на участке $a - b$, по каким бы причинам она не произошла, будет непосредственно отражаться на указанной функциональной зависимости и работе схемы. Например, при одном и том же входном сигнале $U_{вхC}$ выходной сигнал может принимать различные значения: $U_{выхC}$ и $U'_{выхC}$. Отсюда следует, что усилительный каскад и аналоговые ИМС чувствительны к разбросу параметров, их температурной и временной зависимости, а также к шумам и наводкам. На рис. 6.1 это иллюстрируется тем, что небольшие колебания напряжения ΔU_C около точки C вызывают заметные изменения выходного сигнала в соответствии с функцией $U_{вых} = f(U_{вх})$.

§ 6.2. Основные типы цифровых ИМС на биполярных транзисторах

В основе построения цифровых ИМС лежат логические элементы (электронные схемы), выполняющие простейшие логические операции и различные логические функции. Логические функции и логические операции над ними изучаются в алгебре логики, или булевой алгебре.

Основой алгебры логики являются логические величины, которые обозначим A , B , C и т. д. Логическая величина характеризует два взаимоисключающих понятия: есть и нет, черное и нечерное, включено и выключено и т. д. Если одно из значений логической величины обозначено A , то второе обозначают $\bar{A}$ (не A).

Для операций над логическими величинами удобно использовать двоичный код, полагая $A = 1$, $\bar{A} = 0$ или, наоборот, $A = 0$,

$A = 1$. При этом одна и та же схема может выполнять как логические, так и арифметические операции (в двоичной системе счисления).

Если понятие «не A » обозначить другим символом, например B , то связь между B и A будет иметь вид:

$$B = \overline{A}.$$

Это простейшая логическая функция, которую называют функцией отрицания, инверсией или функцией НЕ, а схему, обеспечивающую выполнение такой функции, — инвертором или схемой НЕ. Функция отрицания является функцией одного аргумента (одной переменной). Имеются логические функции двух аргументов: логическое сложение и логическое умножение.

Логическое сложение, дизъюнкция или функция ИЛИ:

$$C = A + B$$

определяется следующим образом: $C = 1$, если $A = 1$ или $B = 1$ или и $A = 1$ и $B = 1$.

Логическое умножение, конъюнкция или функция И:

$$C = AB$$

определяется таким образом: $C = 1$, если одновременно и $A = 1$, и $B = 1$.

Сочетание функции ИЛИ с инверсией приводит к комбинированной функции ИЛИ — НЕ:

$$C = \overline{A + B},$$

а сочетание функции И с инверсией — к комбинированной функции И — НЕ:

$$C = \overline{AB}.$$

С помощью функций ИЛИ — НЕ и И — НЕ можно реализовать любую другую логическую функцию. При этом число аргументов, а следовательно, и число входов у соответствующих схем может быть равно трем, четырем и более.

В схемах, реализующих логические функции, т. е. в логических элементах, логические нули и единицы обычно представлены разными значениями напряжения: напряжением или уровнем нуля U^0 и напряжением или уровнем единицы U^1 . Разность уровней единицы и нуля называют логическим перепадом:

$$\Delta U = U^1 - U^0.$$

Логический перепад должен быть достаточно большим, чтобы «1» и «0» отличались друг от друга и случайные помехи не давали ложных срабатываний.

Интегральные логические элементы составляют основу более сложных микросхем и аппаратуры в целом. При этом параметры логических элементов оказывают непосредственное влияние на параметры узлов и качественные показатели аппаратуры.

Цифровые (логические) ИМС предназначены для выполнения разнообразных логических функций, запоминания информации и ряда других операций и в совокупности обес-

печивают возможность построения арифметических, запоминающих и управляющих устройств ЭВМ.

Наибольшее распространение получили цифровые ИМС на биполярных и МДП-транзисторах. Развитие цифровых ИМС характеризуется непрерывным увеличением типов логических схем. При этом необходимо обеспечивать высокую надежность и помехоустойчивость схем в широком диапазоне рабочих температур, большое быстродействие и малую потребляемую мощность, повышенную радиационную стойкость и низкую стоимость.

В основу классификации цифровых ИМС могут быть положены различные признаки: вид сигнала, тип основной логической схемы, тип используемых транзисторов, режим их работы, основные параметры и т. д.

По виду сигнала в зависимости от способов кодирования двоичных переменных цифровые ИМС делятся на импульсные, потенциальные и импульсно-потенциальные. Следовательно, и элементная структура цифровых ИМС определяется видом обрабатываемого сигнала. Из всех цифровых ИМС наиболее распространены потенциальные микросхемы. Это объясняется тем, что построение потенциальных ИМС любой сложности возможно без реактивных элементов, что выгодно отличает их от остальных микросхем, поскольку процесс изготовления потенциальных ИМС наилучшим образом соответствует технологическим возможностям микроэлектроники. Отличительными признаками потенциальных ИМС является наличие связи по постоянному току между входами и выходами элементов, а также возможность управления другими микросхемами с помощью сигналов ограниченной (импульсов) и неограниченной (уровней) длительностей.

Схемотехническая реализация многообразия потенциальных ИМС основана на типовых базовых функциональных элементах. По виду реализуемой логической функции функциональные элементы микросхем условно делят на два класса: 1) функциональные элементы одноступенчатой логики, реализующие простейшие логические функции (операции) И, ИЛИ, НЕ, И — НЕ, ИЛИ — НЕ; микросхемы, выполняющие только логические функции И — НЕ или ИЛИ — НЕ; называются основными логическими ИМС; 2) функциональные элементы двухступенчатой логики, реализующие более сложные логические функции И — ИЛИ, ИЛИ — И, НЕ — И — ИЛИ, И — ИЛИ — НЕ, И — ИЛИ — И, и др.

Логические и схемотехнические возможности базовых функциональных элементов определяются совокупностью

электрических и функциональных параметров, которые являются главными для микросхем. Основные параметры цифровых ИМС определяют допустимые сочетания схем в устройстве и в обобщенном виде характеризуют их работоспособность. Основные параметры, число которых одинаково для всех типов ИМС, определяют по измеряемым электрическим параметрам (входным и выходным токам и напряжениям, временным параметрам), число которых зависит от типа ИМС. Поэтому основные параметры являются общими для всех существующих и возможных цифровых (логических) ИМС и позволяют сравнивать между собой микросхемы различных типов.

К основным параметрам относятся: реализуемая логическая функция; нагрузочная способность — коэффициент разветвления по выходу n ; коэффициент объединения по входу m ; среднее время задержки и передачи сигнала $t_{з.ср}$; статическая помехоустойчивость $U_{п}$; потребляемая мощность $P_{ср}$; предельная рабочая частота $f_{пр}$. Эти параметры связаны между собой функциональными зависимостями, специфичными для ИМС различных типов. Однако какими бы различными не были эти зависимости, для всех микросхем характерно то, что улучшение одного из основных параметров при неизменных параметрах элементов в большинстве случаев возможно лишь за счет ухудшения остальных параметров.

Нагрузочная способность характеризует максимальное число ИМС, аналогичных рассматриваемой, которые можно одновременно подключать к ее выходу без искажения передачи информации. Часто нагрузочную способность называют *коэффициентом разветвления по выходу* и выражают целым положительным числом n . Чем выше коэффициент n , тем шире логические возможности микросхемы и тем меньшее число ИМС необходимо для построения сложного вычислительного устройства. Однако увеличение коэффициента n ограничено, поскольку с ростом числа нагрузок ухудшаются другие основные параметры микросхем, главным образом статическая помехоустойчивость и среднее время задержки сигнала. По этой причине в состав одной серии ИМС часто входят логические элементы с различной нагрузочной способностью, которая в зависимости от типа микросхемы и параметров ее элементов колеблется от 4 до 25.

Коэффициент объединения по входу m характеризует максимальное число логических входов функционального

элемента ИМС. С увеличением коэффициента m расширяются логические возможности микросхемы за счет выполнения функций с большим числом элементов на одном типовом элементе И — НЕ, ИЛИ — НЕ и т. д.; при этом для создания сложного устройства требуется меньшее число микросхем. Однако увеличение коэффициента m , как правило, ухудшает другие основные параметры микросхемы — быстродействие, статическую помехоустойчивость, нагрузочную способность. Различают коэффициент объединения по входу И — $m_{\text{И}}$ и по входу ИЛИ — $m_{\text{ИЛИ}}$. Микросхемы различаются схемой реализацией простых логических операций. В существующих сериях ИМС основные логические элементы выполняются обычно с небольшим числом входов ($m_{\text{И}} = 2 \div 6$, $m_{\text{ИЛИ}} = 2 \div 4$). Для увеличения коэффициента m в серию ИМС вводят специальную схему «логического расширителя», подключение которой к основному элементу позволяет увеличить $m_{\text{И}}$ или $m_{\text{ИЛИ}}$ до 10 и более.

Среднее время задержки сигнала $t_{\text{з.ср}}$ является наиболее распространенным параметром, характеризующим быстродействие цифровых ИМС. Оно определяет среднее время прохождения сигнала через одну ИМС в устройстве. Если цепь состоит из N последовательно включенных однотипных логических ИМС (N — четное число), то время прохождения сигнала по цепи

$$T_N = \frac{N}{2} t_3^+ + \frac{N}{2} t_3^-, \quad (6.1)$$

где t_3^+ и t_3^- — времена задержки включения и выключения одной ИМС.

Следовательно, согласно определению среднее время задержки

$$t_{\text{з.ср}} = T_N / N, \quad (6.2)$$

или

$$t_{\text{з.ср}} = (t_3^+ + t_3^-) / 2. \quad (6.3)$$

Параметр $t_{\text{з.ср}}$ зависит от режима работы транзисторов в микросхеме (насыщенный или ненасыщенный) и потребляемой мощности.

Статическая помехоустойчивость характеризует максимально допустимое напряжение статической помехи, действующей на данную (и соседние с ней) микросхему с одной из внешних цепей. При этом сохраняется работоспособность ИМС в устройстве для любого допустимого по техническим

условиям сочетания данной микросхемы с другими аналогичными цифровыми ИМС.

Цифровая ИМС в статическом режиме может находиться в одном из двух состояний — открытом или закрытом. Поэтому различают помехоустойчивость закрытой схемы по отношению к отпирающим помехам U_n^+ и открытой схемы по отношению к запирающим помехам U_n^- . Статическими принято называть помехи, уровень которых остается постоянным в течение времени, значительно превышающего длительность переходных процессов в схеме. Причиной появления таких помех в большинстве случаев является падение напряжения на проводниках, соединяющих микросхемы в устройстве. Наиболее опасные помехи возникают в шинах питания.

К воздействию помех наиболее чувствительны микросхемы, имеющие разброс входных характеристик и низкий перепад логических уровней. Поэтому помехоустойчивость цифровых ИМС зависит от типа схемы, режима работы транзистора, напряжения источников питания и топологии (особенно для ИМС с большой степенью интеграции). Часто используют не абсолютные значения напряжений максимально допустимых статических помех по входу, а их отношения к напряжению минимально допустимого перепада логических уровней ΔU_{min} . В этом случае помехоустойчивость микросхемы характеризуется безразмерной величиной — коэффициентом статической помехоустойчивости:

$$K_n^{\pm} = U_n^{\pm} / \Delta U_{min}. \quad (6.4)$$

Этим коэффициентом удобно пользоваться при сравнении цифровых ИМС различных типов.

Мощность, потребляемая микросхемой от источников питания, определяется выражением

$$P = \sum_{j=1}^{j=n} E_j I_j. \quad (6.5)$$

где E_j — напряжение j -го источника питания; I_j — ток в соответствующем выводе схемы.

Потребляемая микросхемой мощность в любой момент времени не является постоянной, а зависит от логического состояния и типа логического элемента схемы, изменяясь при ее переключении. Поэтому в качестве основного параметра используют не мгновенное, а среднее значение мощ-

ности, потребляемой микросхемой за достаточно большой промежуток времени:

$$P_{\text{ср}} = 1/2 (P_0 + P_1), \quad (6.6)$$

где P_0 и P_1 — мощности, потребляемые микросхемой в состоянии «Включено» и «Выключено» соответственно.

Такое определение справедливо, когда мощность, потребляемая микросхемой во время переходных процессов, значительно меньше мощности, потребляемой в одном из статических состояний. В противном случае микросхемы характеризуются еще и средним значением мощности, потребляемой при максимальной частоте переключения элемента. Учет этой мощности необходим ввиду того, что во время перехода схем из одного состояния в другое резко возрастают токи в цепях питания и, следовательно, повышается потребляемая мощность.

По потребляемой мощности цифровые ИМС подразделяются на:

- мощные ($25 < P_{\text{ср}} < 250$ мВт);
- средней мощности ($3 < P_{\text{ср}} < 25$ мВт);
- маломощные ($0,3 < P_{\text{ср}} < 3$ мВт);
- микромощные ($1 < P_{\text{ср}} < 300$ мкВт);
- нановаттные ($P_{\text{ср}} < 1$ мкВт).

Цифровые ИМС, потребляющие большую мощность, характеризуются наибольшим быстродействием и применяются при создании вычислительных устройств с высокой скоростью обработки информации. Для вычислительных устройств, у которых быстродействие не является определяющим параметром, используют маломощные и микромощные схемы. Снижение потребляемой мощности ИМС при сохранении высокого быстродействия является одной из важнейших проблем микроэлектроники.

Конкретные значения основных параметров цифровых ИМС определяются их конструктивно-технологическими и схемотехническими решениями.

§ 6.3. Схемотехническая реализация основных логических функций ИМС

По схемотехнической реализации основных логических функций логические ИМС на биполярных транзисторах подразделяют на следующие группы:

- 1) транзисторные с непосредственной связью — тран-

зисторная логика с непосредственными связями между логическими элементами (ТЛНС);

2) транзисторные с резистивной связью — резистивно-транзисторная логика (РТЛ);

3) транзисторные с резистивно-емкостной связью — резистивно-емкостная транзисторная логика (РЕТЛ);

4) диодно-транзисторные — диодно-транзисторная логика (ДТЛ);

5) транзистор-транзисторные — транзистор-транзисторная логика (ТТЛ);

6) транзисторные с эмиттерными связями (токовые ключи, или переключатели тока) — эмиттерно связанная логика (ЭСЛ);

7) диодные матрицы (ДМ).

Каждому типу цифровых ИМС, реализующих функции И — НЕ или ИЛИ — НЕ, присуща определенная комбинация положительных и отрицательных свойств. Рассмотрим основные свойства этих схем в том порядке, в каком схемотехнические структуры разных типов воплощались в виде ИМС.

Транзисторные ИМС с непосредственной связью являются одним из первых схемотехнических направлений. На рис. 6.2 приведена логическая схема этого типа, реализующая функцию ИЛИ — НЕ (любой из входных сигналов будет инвертирован на выходе). Преимущества схем ТЛНС — простота (используются только два типа элементов), малая потребляемая мощность и высокое быстродействие; недостаток — влияние разброса входных характеристик транзисторов. Поэтому, обладая высоким коэффициентом объединения по входу ($m \geq 8$), схемы ТЛНС не обеспечивают высокой нагрузочной способности ($n \leq 4$) и имеют низкую помехоустойчивость ($U_{\text{п}} = 0,1 \div 0,15$ В). При построении схем ТЛНС требуется подбор транзисторов с одинаковым входным сопротивлением, что является существенным ограничением для использования в гибридных ИМС. Схемы ТЛНС применяются в сериях 102 и 103 полупроводниковых ИМС.

Дальнейшее улучшение характеристик транзисторных схем связано с созданием ИМС, имеющих компенсирован-

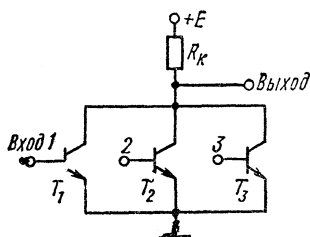


Рис. 6.2. Основная логическая схема ТЛНС

ные связи между элементами — резистивные (РТЛ) и резистивно-емкостные (РЕТЛ). В схемах РТЛ (рис. 6.3, а, б) разброс входных сопротивлений компенсируется включением резисторов в базовые цепи транзисторов. Это позволяет повысить помехоустойчивость, значительно снизить рабочие токи, обеспечить более высокие значения коэффициентов n и m ($n \geq 4$ и $m \geq 9$). Однако в схемах РТЛ значительно снижено быстродействие ($t_{з.ср} = 30 \div 50$ нс). На базе схем РТЛ разработаны серии 113, 114 полупроводниковых и серии 201, 205, 216 гибридных ИМС.

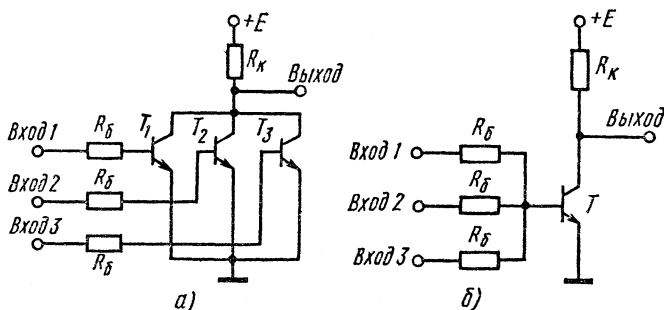


Рис. 6.3. Основные логические схемы РТЛ:

а — с резистивной связью; б — с резистивно-транзисторной связью

Для повышения быстродействия схем РТЛ параллельно базовому резистору включают форсирующие конденсаторы (рис. 6.4), в результате получилась логическая схема РЕТЛ. Предельное быстродействие этой схемы $t_{з.ср} = 10 \div 15$ нс при сохранении параметров $n \geq 4$ и $m \geq 8$. Схемы РЕТЛ просты и экономичны, допускают большие разбросы номиналов элементов и напряжений питания. Их используют в серии 110 полупроводниковых ИМС. Однако ввиду большой площади, занимаемой конденсаторами, микросхемы на основе РЕТЛ наиболее удобны для реализации в гибридном исполнении, где они успешно применяются (серии 204, 216 и др.).

Многие трудности, связанные с применением транзисторных схем с непосредственными резистивными и резистивно-емкостными связями (неравномерное распределение токов во входных цепях, низкая помехоустойчивость, малое быстродействие и др.), можно устранить, если во входную цепь логического элемента включить диоды. При этом получается схема ДТЛ, с помощью которой в зависимости от включения

и питания диодов можно реализовать функции И — НЕ или ИЛИ — НЕ. Схемы ДТЛ универсальны и имеют относительно низкую стоимость. В отличие от других типов логических схем, применяемых в основном для построения цифровых устройств ЭВМ, схемы ДТЛ широко используют и в устройствах дискретной автоматики. В них удачно сочетаются такие важные параметры, как быстродействие, потребляемая мощность и помехоустойчивость.

Простейшая схема ДТЛ, реализующая функцию И — НЕ

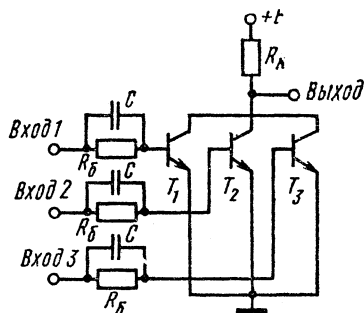


Рис. 6.4. Основная логическая схема РЕТЛ

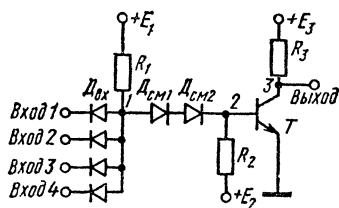


Рис. 6.5. Основная логическая схема ДТЛ с простым инвертором

представлена на рис. 6.5. Схема содержит m входных диодов, которые вместе с резистором R_1 реализуют функцию И. Диоды $D_{см1}$ и $D_{см2}$ предназначены для увеличения порога запирающей схемы, а следовательно для увеличения ее помехоустойчивости. Смещающие диоды включают для того, чтобы падение напряжения на входных диодах не влияло на переключение транзистора. Простой инвертор выполняет логическую функцию НЕ и усиление сигнала. Необходимым элементом схемы является резистор R_2 , который в закрытом состоянии инвертора задает ток через смещающие диоды. При подключении к резистору R_2 отдельного источника питания увеличиваются быстродействие и порог запирающей схемы. Поскольку элементарные логические операции И (ИЛИ) и НЕ осуществляются различными элементами схемы ДТЛ, легко увеличить число входов путем добавления входных диодов. В этом одно из преимуществ схем ДТЛ по сравнению со схемами ТЛНС, РТЛ и РЕТЛ.

Дальнейшее совершенствование схем ДТЛ идет по пути сокращения потребляемой мощности и усложнения инвертора с целью повышения нагрузочной способности. Схемы ДТЛ наиболее легко реализуются в полупроводниковых

ИМС, изготовленных по планарно-эпитаксиальной технологии (серии 104, 109, 121, 152, 156), но находят применение и в гибридных ИМС, например серии 217.

В схемах ТТЛ во входных цепях используются многоэмиттерные транзисторы (рис. 6.6, а). По принципу построения, а также по важнейшим параметрам они близки к схемам ДТЛ. Эмиттерные переходы многоэмиттерного транзистора выполняют функцию, аналогичную функции диодов в схемах ДТЛ, а коллекторный переход играет роль смещающего диода. Многоэмиттерный транзистор — специфичный интегральный полупроводниковый прибор, представляющий

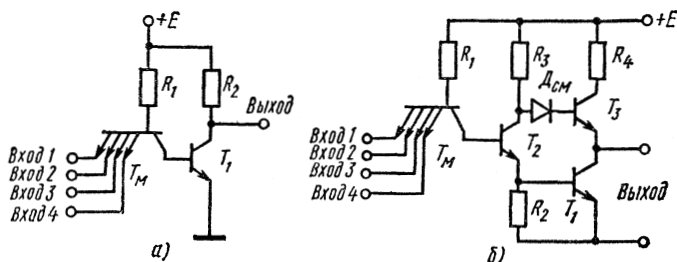


Рис. 6.6. Основные логические схемы ТТЛ с простым (а) и сложным (б) инверторами

собой совокупность транзисторных структур, имеющих общий коллектор и непосредственно взаимодействующих друг с другом за счет движения основных носителей заряда. Схемы ТТЛ отличаются высоким быстродействием ($t_{3, \text{ср}} = 6 \div 15$ нс) и малой потребляемой мощностью (45—15 мВт). Для повышения помехоустойчивости (допустимый уровень $U_{\text{п}} = 1$ В) и нагрузочной способности ($n > 10$) используются схемы ТТЛ со сложным инвертором (рис. 6.6, б).

Схемы ТТЛ в настоящее время наиболее популярны, они реализуются в основном методами полупроводниковой технологии и имеют малую площадь, занимаемую элементами. Разработан целый комплекс полупроводниковых ИМС на основе ТТЛ (серии 106, 130, 133, 134, 135, 136 и др.), которые нашли широкое применение в ЭВМ.

Для построения ЭВМ высокой производительности и систем автоматики повышенного быстродействия наиболее перспективны цифровые ИМС на переключателях тока, так называемые схемы ЭСЛ. Их высокое быстродействие обес-

печивается ненасыщенным режимом работы транзисторов, малым перепадом логических уровней ($\sim 0,7\text{--}0,8\text{ В}$) и малым входным сопротивлением, которое уменьшает влияние нагрузочных емкостей.

Схема ЭСЛ, представленная на рис. 6.7, состоит из двух частей: переключателя тока (дифференциального усилителя) и эмиттерного повторителя. Эмиттерный повторитель обеспечивает согласование между выходными и входными уровнями схемы и ее высокую нагрузочную способность, выполняя роль усилителя мощности. Разработанные на основе схем ЭСЛ интегральные микросхемы серии 137 характеризуются высокими быстродействием ($t_{\text{з.ср}} = 2\div 7\text{ нс}$), нагрузочной способностью (n может достигать 100), помехоустойчивостью ($U_{\text{п}} \approx \approx 0,2\text{ В}$ при $\Delta U = 0,8\text{ В}$). В зависимости от быстродействия мощность, потребляемая схемами серии 137, $P_{\text{ср}} = 45\div 180\text{ мВт}$. ИМС серии 137 изготовляют по планарно-эпитаксиальной технологии.

Диодные матрицы (ДМ) представляют собой набор быстродействующих диодов, соединенных между собой по определенному принципу (256—1024 элементов). Диодные матрицы используют как быстродействующие логические элементы в основном в гибридных ИМС.

§ 6.4. Микро мощные логические ИМС

Применение микро мощных и нановаттных ИМС позволяет сократить габариты и массу источников питания вычислительных устройств и приборов. Использование их особенно важно в БИС, где трудно решаются проблемы теплоотвода. Кроме того, такие микросхемы позволяют значительно снизить расходы при длительной эксплуатации аппаратуры.

Как показывают исследования, наиболее эффективным методом снижения мощности, потребляемой логическими ИМС, является уменьшение их рабочих токов. Снижение напряжений питания и разработка схем, потребляющих мощность только при переключениях, являются дополни-

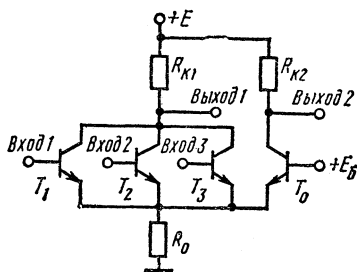


Рис. 6.7. Основная логическая схема ЭСЛ

тельными средствами уменьшения среднего значения мощности.

В связи с этим рассмотрим кратко работу транзистора при малых токах. Основным активным элементом микро-мощных ИМС является биполярный кремниевый транзистор *n-p-n*-типа. Особенность работы этих транзисторов обусловлена малыми коллекторными токами в открытом состоянии.

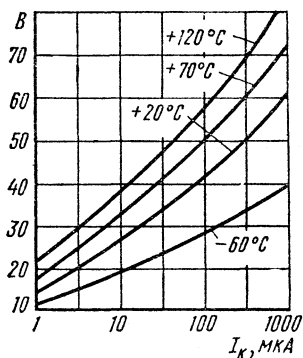


Рис. 6.8. Зависимость коэффициента усиления транзистора от тока коллектора в области малых токов

Как видно из рис. 6.8, в области малых токов наблюдается зависимость коэффициента усиления кремниевого транзистора от тока коллектора: при уменьшении тока коллектора коэффициент усиления уменьшается. Это объясняется влиянием тока рекомбинации в эмиттерном переходе.

В микромощных ИМС предъявляются повышенные требования к барьерным емкостям эмиттерного и коллекторного переходов транзисторов, а также к емкости перехода коллектор — подложка. Это обусловлено тем, что с уменьшением токов включения и выключения транзистора

все большую роль играют процессы перезаряда барьерных емкостей переходов и других паразитных емкостей схемы.

Исследования показали, что для создания микромощных логических ИМС нужны специальные транзисторы, конструкция которых отличается от конструкции транзисторов средней мощности. Для микромощных транзисторов характерны:

а) предельно малые площади эмиттерного, коллекторного переходов и изоляции, определяемые только разрешающей способностью технологического оборудования;

б) повышенные значения времени жизни неосновных носителей заряда в областях транзисторов, особенно в области эмиттерного перехода;

в) большой градиент концентрации примесей в базе и меньший в коллекторе, отсутствие скрытого слоя в коллекторе;

г) повышенное качество пленки двуокиси кремния, обес-

печивающее малую скорость рекомбинации в области эмиттерного перехода.

Резисторы для микромощных логических ИМС должны иметь большие номиналы сопротивлений (обычно не менее 20 кОм) и обладать минимально возможной паразитной распределенной емкостью. Обычно применяют тонкопленочные резисторы из кермета, имеющие большое поверхностное сопротивление и относительно малый температурный коэффициент сопротивления.

При изготовлении микромощных логических ИМС обычно используют метод совмещенной технологии, рассмотренный ранее. Именно этот метод позволяет получать тонкопленочные резисторы с высоким поверхностным сопротивлением и малые размеры активных элементов. Иногда используют также методы гибридной технологии с тонкопленочными пассивными элементами.

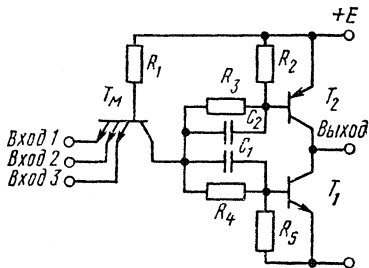


Рис. 6.9. Микромощная логическая ИМС со сложным инвертором на дополняющих транзисторах

Таким образом, микромощные логические ИМС с традиционной схмотехникой отличаются от аналогичных схем диапазона средней мощности лишь номинальными значениями сопротивлений и конструкцией транзисторов. Однако разработаны некоторые типы специальных логических ИМС, предназначенных для работы при малой потребляемой мощности. На рис. 6.9 приведена такая транзистор-транзисторная схема И — НЕ со сложным инвертором, содержащим дополняющие транзисторы n - p - n -типа (T_1) и p - n - p -типа (T_2). Дополняющий транзистор T_2 позволяет уменьшить число транзисторов в схеме и снизить напряжение питания. Минимально допустимое напряжение питания для схем на дополняющих транзисторах имеет приблизительно то же значение, что и для схем с резистивной связью.

Если рассматриваемая схема нагружена на аналогичные схемы и на все ее входы подано высокое напряжение, то транзистор T_1 открыт, а транзистор T_2 закрыт, так что в цепи транзистора T_2 мощность не потребляется. В другом статическом режиме, когда транзистор T_1 закрыт, в коллек-

торной цепи транзистора T_2 может протекать ток, равный сумме входных токов схем-нагрузок. Многоэмиттерные транзисторы имеют достаточно низкие коэффициенты прямой связи между входами, поэтому ток транзистора T_2 в этом режиме также мал и не приводит к увеличению потребляемой мощности.

Схема на дополняющих транзисторах обладает малым входным дифференциальным сопротивлением как в открытом, так и в закрытом состояниях. В процессе выключения благодаря отпиранию транзистора T_2 она обеспечивает

большой ток, необходимый для заряда выходной емкости. Поэтому для обеспечения малой длительности переключения применение этой схемы оказывается наиболее эффективным в случаях, когда паразитные емкости значительно меньше емкости монтажа.

К недостаткам схемы рис. 6.9 следует отнести необходимость в дополняющих транзисторах и ускоряющих конденсаторах C_1 и C_2 , что представляет известные трудности при изготовлении полупроводниковых ИМС. Поэтому для реализации этой схемы используют гибридную конструкцию, содержащую дискретные бескорпусные транзисторы и тонкопленочные пассивные элементы. Отметим, что схема рис. 6.9. потребляет мощность в статическом режиме, причем основная ее часть выделяется в резисторе R_1 . Большой ток в цепи резистора R_1 необходим только в открытом состоянии схемы, когда он проходит в цепь базы транзистора T_1 . В закрытом состоянии ток I_{R_1} протекает в основном во входные цепи и является вредным, поскольку его увеличение приводит к возрастанию коллекторного тока транзистора T_1 предыдущей открытой схемы и уменьшению помехоустойчивости.

Токи во входных цепях закрытой схемы можно уменьшить, заменив резистор R_1 транзистором $p-n-p$ -типа, как показано на рис. 6.10. В этой схеме за счет использования обратной связи транзистор T_3 открыт только тогда, когда на

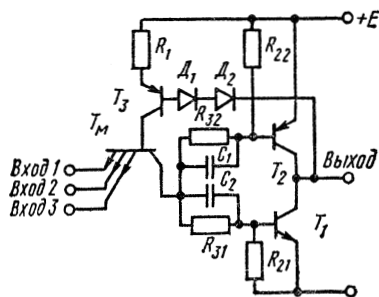


Рис. 6.10. Микрошлюнная логическая ИМС с обратной связью

выходе имеется низкое напряжение. При этом он обеспечивает ток базы транзистора T_1 . Когда на вход схемы подано низкое напряжение от предыдущей открытой схемы, транзисторы T_1 и T_3 запираются и во входной цепи закрытой схемы протекает малый ток.

Диоды D_1 и D_2 служат для смещения уровня напряжения на базе транзистора T_3 и обеспечивают нужный перепад логических уровней на выходе схемы. В этой схеме можно использовать значительно меньшее сопротивление R_1 , чем в схеме рис. 6.9.

§ 6.5. Логические ИМС на МДП-транзисторах

В зависимости от типа электропроводности МДП-транзисторов различают микросхемы:

на МДП-транзисторах p -типа;

на МДП-транзисторах n -типа;

на дополняющих МДП-транзисторах p - и n -типов.

Логические ИМС на МДП-транзисторах p -типа с заземленным истоком требуют отрицательное напряжение питания (схемы отрицательной логики), а логические ИМС на МДП-транзисторах n -типа — положительное напряжение питания (схемы положительной логики). При построении логических элементов на основе дополняющих МДП-транзисторов p - и n -типов возможно создание микросхем как положительной, так и отрицательной логики.

На рис. 6.11 приведены обозначения МДП-транзисторов n - и p -типов (а) и четыре варианта простейших логических элементов — инверторов для реализации функции НЕ на одноканальных МДП-транзисторах (б и в) и дополняющих транзисторах (г и д). Для схем на дополняющих транзисторах «полярность» логики зависит от последовательности включения транзисторов p - и n -типов. Если транзистор n -типа непосредственно подключен к шине «земля», а транзистор p -типа — к источнику питания, то схема работает в режиме положительной логики (рис. 6.11, д). Если же транзистор p -типа непосредственно подключен к шине «земля», а транзистор n -типа — к источнику питания, то схема работает в режиме отрицательной логики (рис. 6.11, г).

Особенностью ИМС на МДП-транзисторах является возможность реализации любых логических функций с помощью только одних МДП-транзисторов, которые играют роль управляющего (логического) и нагрузочного элементов.

Логические ИМС на МДП-транзисторах подразделяют на три группы: статические, квазистатические и динамические.

ческие. Элементарной базой для построения таких микросхем являются базовые логические элементы, выполняющие логические операции ИЛИ — НЕ, И — НЕ, И — ИЛИ — НЕ, НЕ — И — ИЛИ. Для построения базовых логических элементов и, следовательно, для реализации микросхем наибольшее распространение получили МДП-транзисторы p -типа и дополняющие.

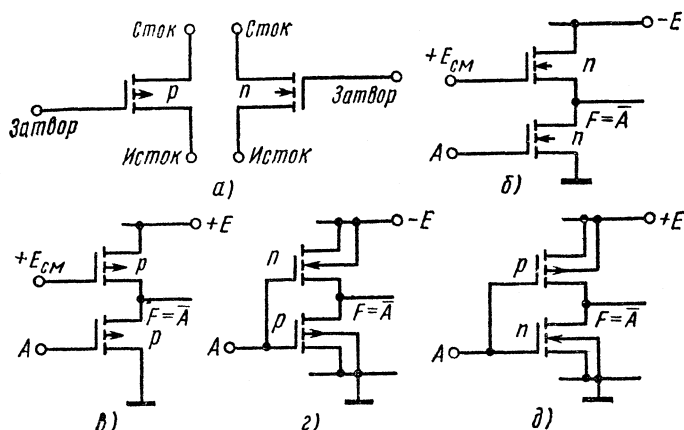


Рис. 6.11. Схемы инверторов на МДП-транзисторах:

a — обозначения МДП-транзисторов n - и p -типов; b — инвертор на транзисторах n -типа; b — инвертор на транзисторах p -типа; g и d — инверторы на дополняющих транзисторах

Принципы построения статических ИМС на МДП-транзисторах p -типа во многом соответствуют принципам построения транзисторных логических ИМС с непосредственными связями. Так, для построения многовходовой схемы ИЛИ — НЕ к одному нагрузочному МДП-транзистору подключают стоком m логических транзисторов, истоки которых заземляют. На рис. 6.12, a приведена логическая схема ИЛИ — НЕ на два входа, содержащая один нагрузочный и два логических транзистора. Поскольку при выполнении операции ИЛИ ток утечки цепи сток — исток всех входных транзисторов (за исключением одного) мал, параметр m или логической схемы может достигать 10 и выше.

Обладая сверхвысоким входным сопротивлением по затвору ($R_{вх} > 10^{12}$ Ом), МДП-транзисторы p -типа позволяют строить микросхемы с высокой нагрузочной способностью ($n = 10 \div 20$). Нагрузочная способность ИМС на МДП-

транзисторах p -типа ограничивается лишь быстродействием, которое снижается с ростом числа нагрузок, так как увеличивается постоянная времени заряда паразитной емкости нагрузки (C_n) током, протекающим через нагрузочный транзистор. В реальных микросхемах сопротивление R_n открытого нагрузочного МДП-транзистора находится в пределах 15 — 50 кОм, что при $C_n = 20$ пФ ($n = 8 \div 10$) дает постоянную времени заряда $R_n C_n \approx 0,5 \div 2$ мкс. При этом рабочая частота $f_p < 1,0$ МГц.

Интегральная технология изготовления МДП-структур позволяет использовать последовательное (ярусное) включение МДП-транзисторов, если в цепь между нагрузкой и

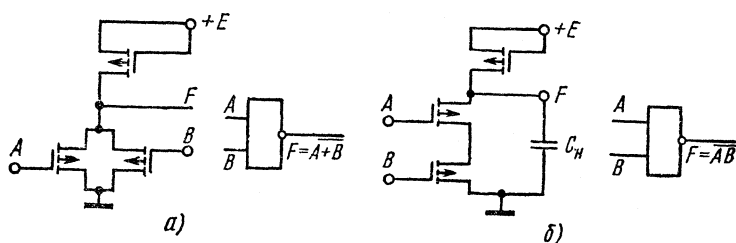


Рис. 6.12. Схемы базовых логических элементов на МДП-транзисторах p -типа:

а — схема ИЛИ — НЕ; б — схема И — НЕ

«землей» включен не один, а несколько МДП-транзисторов по схеме И. При этом исток нижнего логического МДП-транзистора подключают к шине «земля», а его сток — к истоку верхнего транзистора и т. д. В подобной схеме ток через нагрузку протекает лишь в случае, когда открыты МДП-транзисторы всех ярусов. По этому принципу строят схемы И — НЕ (рис. 6.12, б). Как и схемы ИЛИ — НЕ, они имеют высокую нагрузочную способность ($n = 10 \div 20$).

Низкое значение параметра m_n объясняется тем, что при увеличении числа ярусов схемы И — НЕ требуются МДП-транзисторы с более высокой крутизной характеристик, чем в схемах ИЛИ — НЕ, для сохранения одинакового сопротивления последовательно включенных транзисторов. Кроме того, ярусное включение транзисторов усложняет топологию и уменьшает степень интеграции ИМС на МДП-транзисторах p -типа. Вместе с тем ярусное включение МДП-транзисторов позволяет создавать логические ИМС, обла-

дающие большей гибкостью, чем ИМС на биполярных транзисторах при построении сложных функциональных узлов.

На рис. 6.13 представлены сложные логические ИМС на МДП-транзисторах p -типа, реализующие соответственно функции ИЛИ — И — НЕ, И — ИЛИ — НЕ и ИЛИ — И — ИЛИ — НЕ. Для повышения нагрузочной способности в них вводят специальные буферные усилительные элементы, реализующие функции НЕ и И. При этом достигают $n > 20 \div 30$. Возможно построение более сложных узлов, например сумматоров, экономичных по числу используе-

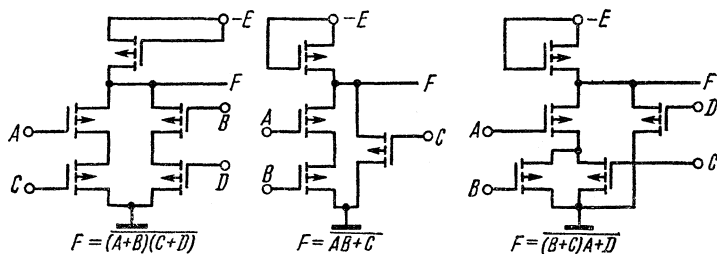


Рис. 6.13. Многоступенчатые логические ИМС на МДП-транзисторах p -типа

мых МДП-транзисторов. Однако в таких ИМС на МДП-транзисторах p -типа значительно возрастает потребляемая мощность, которая достигает 1—10 мВт/вентиль.

Потребляемая мощность значительно уменьшается в микросхемах на дополняющих МДП-транзисторах. Кроме того, логические ИМС на дополняющих МДП-транзисторах выгодно отличаются от микросхем на МДП-транзисторах p -типа, так как они обладают более высоким быстродействием, высокой помехоустойчивостью из-за большого перепада логических уровней, новыми логическими возможностями благодаря дополняющим структурам и высокой нагрузочной способностью ($n \geq 15 \div 20$). В этих схемах для каждого логического входа применяют два транзистора — транзистор n -типа и связанный с ним по затвору транзистор p -типа.

На основе дополняющих МДП-транзисторов можно построить схемы ИЛИ — НЕ положительной логики, если транзисторы n -типа включены параллельно, а транзисторы p -типа — последовательно, и схемы ИЛИ — НЕ отрицательной логики, если транзисторы p -типа включены параллельно, а транзисторы n -типа — последовательно. Для по-

строения схемы ИЛИ — НЕ на m входов требуется последовательное (ярусное) включение m транзисторов n -типа и параллельное включение m транзисторов n -типа (в случае положительной логики). Обычно коэффициент объединения по входу $m \leq 4$. Соответственно для построения схемы И — НЕ положительной логики на m входов требуется ярусное включение m транзисторов n -типа и параллельное включение m транзисторов n -типа. На рис. 6.14, а, б приведены двухвходовые схемы базовых логических элементов положительной логики на дополняющих МДП-транзисторах.

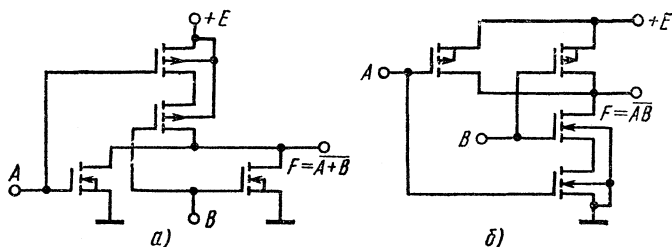


Рис. 6.14. Схемы базовых логических элементов на дополняющих МДП-транзисторах:

а — схема ИЛИ — НЕ; б — схема И — НЕ

Отличительная особенность этих схем — низкая потребляемая мощность: 1 — 5 мкВт/вентиль в статическом режиме и 50 — 400 мкВт/вентиль в динамическом режиме (на порядок ниже, чем в схемах на транзисторах одного типа электропроводности). На основе дополняющих МДП-транзисторов разрабатывают многофункциональные логические элементы, отличающиеся высокой гибкостью построения на одних и тех же структурах.

Еще большие возможности при построении экономичных по числу элементов интегральных микросхем дает применение дополняющих МДП-транзисторов с нагрузочным транзистором. Примером таких схем могут служить сумматоры, которые по сравнению со схемами на транзисторах p -типа содержат меньшее число транзисторов и характеризуются меньшей потребляемой мощностью и повышенным быстродействием. Логические схемы с нагрузочным транзистором являются наиболее перспективными при разработке статических ИМС.

Квазистатические и динамические схемы, использующие специфические свойства МДП-транзисторов — сверхвысокое входное сопротивление и способность паразитной ем-

кости затвора длительное время сохранять заряд и уровень напряжения на затворе, — наиболее широко применяют при построении триггерных устройств для регистровых и счетных схем. Триггерные устройства выполняют на типовых логических элементах И — НЕ, ИЛИ — НЕ, И — ИЛИ — НЕ, НЕ — И — ИЛИ, для реализации которых используют МДП-транзисторы *p*-типа и дополняющие.

Особенностью квазистатических триггеров на МДП-транзисторах является то, что они не требуют тактового питания в период хранения информации, в то время как для динамических триггеров требуется постоянное тактовое питание и в период записи, и в период хранения информации. Для тактового питания служат импульсы (фазы) ограниченной длительности, которая определяется постоянной времени разряда паразитных емкостей затворов МДП-транзисторов. Триггеры такого типа строят по многотактной схеме, при этом число тактов (фаз) равно двум или четырем.

В типовых регистрах на квазистатических триггерах информация передается одноктактным способом (для работы требуется одноктактный внешний сигнал), хотя регистры являются многотактными схемами. Динамические регистры характеризуются многотактным режимом работы, выполняют функции сдвигающих регистров и применяются в качестве элементов задержки. Их отличительная особенность — низкая потребляемая мощность (потребление мощности происходит только во время действия тактовых импульсов, длительность которых составляет 0,5—2,0 мкс).

Различные схемотехнические возможности применения основных логических ИМС на МДП-транзисторах реализованы в сериях цифровых ИМС К147, К178, К107, К108, К176 и др., выпускаемых отечественной промышленностью.

Цифровые ИМС находят широкое применение в измерительной технике. Они позволяют значительно увеличить число измеряемых параметров и повысить точность измерений, в частности существенно улучшить параметры осциллографов. При отображении цифровых сигналов синхронизация развертки с помощью логической пусковой схемы позволяет получить более стабильные изображения на экране электронно-лучевой трубки, а добавление к осциллографу схемы умножения — отображать на экране произведение двух входных сигналов и определять тем самым корреляцию между ними. С помощью осциллографов можно, например, осуществлять измерения переходных процессов при разработке полупроводниковых приборов, очень точные измерения

фазовых соотношений, непосредственные измерения физических величин, которые могут быть преобразованы в электрические сигналы соответствующими датчиками

Особенно эффективным оказалось применение логических ИМС в измерительной аппаратуре с цифровой обработкой сигналов, а также в импульсной измерительной аппаратуре.

§ 6.6. Тенденции развития цифровых ИМС

Основной тенденцией развития цифровых ИМС является повышение их быстродействия, вызванное резким повышением быстродействия ЭВМ. Повысить быстродействие цифровых ИМС в общем случае можно как с помощью технологических и схемотехнических приемов, так и за счет увеличения степени интеграции.

Для получения низких значений времени переключения используют транзисторы с повышенной предельной частотой, малыми емкостью запирающего слоя и сопротивлением. В настоящее время технологически достижима глубина базовой диффузии $< 0,6$ мкм, ширина базы $< 0,2$ мкм, длина и ширина эмиттера соответственно 15 и 2,5 мкм. Это дает возможность получить цифровые ИМС, имеющие время задержки 0,65 нс, мощность рассеяния 20 мВт/вентиль при предельной частоте транзистора $f_{пр} > 2$ ГГц и емкости $C_{кб} > 0,2$ пФ. Однако получение этих значений параметров сопряжено с определенными трудностями и снижением выхода годных ИМС.

Стремление к снижению времени задержки привело к созданию структур на основе транзисторов, работающих в ненасыщенном режиме. Этот принцип использован в схемах ТТЛ с диодами Шоттки и в схемах ЭСЛ. Первые имеют время задержки 3 и 5 нс/вентиль при емкости нагрузки соответственно 15 и 50 пФ в зависимости от температуры и напряжения питания. Скорости нарастания и спада напряжения в пороговой области могут составить > 1 В/нс, что вызывает необходимость более тщательного выполнения межэлементных соединений, чем в обычных схемах ТТЛ. Вторым свойственны меньшее время задержки сигнала, но большая зависимость от температуры и напряжения питания, что вынуждает идти на усложнение схем ЭСЛ, с тем чтобы обеспечить на кристалле компенсацию изменения времени задержки в зависимости от температуры и напряжения питания.

Эффективность цифровых ИМС принято оценивать произведением времени задержки на среднее значение мощности рассеяния: чем меньше полученное значение, тем выше эффективность. Для схем ТТЛ с диодами Шоттки этот показатель при 50%-ной скважности и нагрузке 15 пФ составляет 60 пДж (3 нс, 20 мВт). На частотах выше 10 МГц он возрастает. Для схем ЭСЛ эффективность составляет 50 пДж (2 нс, 25 мВт). Некоторые специалисты считают, что схемы ТТЛ с диодами Шоттки достигли предельных значений параметров, тогда как схемы ЭСЛ являются следующим шагом на пути усовершенствования цифровых ИМС.

Технологическими и схемотехническими методами удается существенно снизить время задержки, если оно определяется структурой кристалла, а не потерями в соединительных проводах и корпусе. В последнем случае целесообразно увеличить плотность монтажа, которая может быть выражена количеством схем, либо функций, приходящихся на корпус. Увеличение плотности монтажа осуществляют двумя принципиально различными путями:

- 1) использованием гибридных (многокристалльных) БИС, в которых содержатся схемы на кристаллах с малым числом элементов;

- 2) использованием монолитных БИС, в которых вся схема выполняется на одном кристалле. При планарной технологии на кремнии в этих схемах достигается быстродействие 0,3—0,4 нс.

Значительные преимущества перед схемами ТТЛ с точки зрения мощности рассеяния имеют комплементарные МДП-ИМС. Преимуществом этих схем по сравнению со схемами ТТЛ является более высокая помехоустойчивость. Маломощные схемы ТТЛ имеют помехоустойчивость 0,4 В при напряжении питания 5 В. У схем на комплементарных МДП-транзисторах при напряжении питания 10 В помехоустойчивость составляет 1,0 В, а при более высоких напряжениях — 3 В. Диапазон напряжений питания маломощных схем ТТЛ $(4,5 \div 5,5) \pm 0,5$ В, а схем на комплементарных МДП-транзисторах 3—15 В. Коэффициент разветвления по выходу у схем ТТЛ равен 10, а у схем на комплементарных МДП-транзисторах 1000 (при соответствующем снижении быстродействия). Схемы на комплементарных МДП-транзисторах примерно вдвое уступают схемам ТТЛ в быстродействии. Схема на комплементарных МДП-транзисторах обладает худшей нагрузочной способностью по сравнению со схемой

ТТЛ, если первая может управлять одной маломощной схемой ТТЛ, то последняя — несколькими МДП-приборами.

Использование диэлектрической изоляции в схемах на комплементарных МДП-транзисторах привело к достижению быстродействия, сравнимого с быстродействием схем ТТЛ. Время задержки при напряжении питания 3 и 10 В равно 50 и 10 нс соответственно, тактовая частота при напряжении питания 5 В составляет 6 МГц, что на 50% превышает тактовую частоту обычных схем на комплементарных МДП-транзисторах; при напряжении питания 10 В тактовая частота ≥ 15 МГц. Кроме того, статическая мощность рассеяния в 10 раз меньше, чем у обычных схем на комплементарных МДП-транзисторах, и на несколько порядков меньше, чем у схем ТТЛ.

Наряду с совершенствованием технологии изготовления схем на комплементарных МДП-транзисторах продолжают исследования других возможностей более полного использования преимуществ МДП-технологии.

По опубликованным данным, созданы МДП-ИМС с применением двойной диффузии. Эффективность их составляет 5 нДж. Это обусловлено тем, что диффузионный МДП-транзистор имеет очень короткий канал, длина которого определяется только разницей в глубине двух диффузий и не зависит от точности совмещения масок. Длина канала примерно равна ширине базы биполярного транзистора и может быть получена с той же точностью. Контролируя уровень легирования канала, можно изготовить микросхемы с очень малым разбросом порогового напряжения.

Разработан новый тип маломощных логических ИМС — комплементарные схемы ТТЛ. Особенность их состоит в том, что на одном кристалле изготавливают транзистор *p-n-p*-типа (три диффузии) и транзистор *n-p-n*-типа (две диффузии, эпитаксиальный коллектор). Процесс диффузии выполняется независимо для каждого транзистора. Резисторы изготовлены при базовой диффузии транзистора *n-p-n*-типа. Конденсаторами служат *p-n*-переходы. Получены следующие параметры: мощность рассеяния 300 мкВт, максимальная рабочая частота 2,5 МГц.

Представляет интерес другой тип биполярных логических ИМС — схемы интегральной инжекционной логики (ИИЛ или И²Л). В них применяются многоколлекторные транзисторы, причем для каждого используется локальная инжекция заряда за счет источника света или диода, смещенного в прямом направлении. Для изготовления схемы

требуется пять масок, при этом обеспечиваются приемлемый выход годных изделий и достаточная их надежность. В отличие от транзисторной логики с непосредственной связью базы и эмиттеры транзисторов в этом случае объединены в общие области. Это дает значительную экономию в межэлементных соединениях и, кроме того, обеспечивает непосредственную связь нагрузочных резисторов. Таким образом, существенно экономится площадь кристалла. Например, управляющая логическая схема, содержащая 980 вентилях, размещается на кристалле размером 4×4 мм, а ПЗУ емкостью 1536 бит, содержащее около 1000 вентилях, имеет размер кристалла 3×4 мм.

Микросхемы с инжекционным питанием характеризуются следующими важными преимуществами.

а) позволяют получить высокую степень интеграции на кристалле (в перспективе 1000 — 3000 вентилях или 10 000 бит памяти);

б) обладают малым значением произведения мощности на время задержки (до 0,1 пДж);

в) имеют высокую относительную помехоустойчивость и могут работать в широком диапазоне быстродействия и потребляемых мощностей.

Небольшая рассеиваемая мощность И²Л-схем объясняется отсутствием резисторов. Большое быстродействие при малых потребляемых мощностях объясняется незначительными паразитными емкостями, отсутствием накопления заряда и малой разницей логических уровней. При использовании инжекционной логики на одном кристалле можно объединять как цифровые, так и аналоговые схемы.

Одним из перспективных направлений изготовления биполярных БИС является использование в них в качестве основного вентиля схемы на эмиттерных повторителях (ЭПЛ).

Дальнейшее совершенствование цифровых БИС идет в направлении значительного увеличения степени интеграции и уменьшения размеров элементов.

§ 6.7. Основные типы аналоговых (линейных) ИМС

ИМС, предназначенная для преобразования и обработки сигналов, изменяющихся по закону непрерывной функции, называется аналоговой. Частным случаем аналоговой ИМС является микросхема с линейной характеристикой — линейная ИМС. Хотя термин «аналоговая микросхема» является более общим, термин «линейная микросхема» полу-

чил большее распространение в литературе. Поэтому оба эти термина можно считать равноправными и пользоваться ими, исходя из конкретной функции рассматриваемого устройства обработки сигнала.

До недавнего времени производство линейных ИМС ограничивалось техническими возможностями изготовления активных и пассивных элементов с требуемыми параметрами, а их применение определялось мощностью и способностью преобразования сигналов переменного тока. По мере усовершенствования технологии и методов проектирования номенклатура и выпуск линейных ИМС увеличиваются. Этому способствуют следующие факторы:

а) создание транзисторных структур с высокими напряжениями пробоя;

б) создание высокочастотных транзисторов в интегральном исполнении;

в) высокая степень согласования одинаковых параметров различных элементов, выполненных на одной подложке;

г) создание транзисторов $n-p-n$ и $p-n-p$ -типов на одной подложке в едином технологическом процессе;

д) технологическая реализация RLC -структур с распределенными параметрами в микроэлектронном исполнении;

е) совершенствование технологических процессов микроэлектроники в целом;

ж) совершенствование методов проектирования, в частности моделирования.

Перечисленные факторы позволяют реализовать в интегральном исполнении различные функциональные элементы и устройства линейной техники, что открывает новые возможности для разработчиков аналоговой и аналогово-цифровой аппаратуры.

Линейные ИМС широкого применения по выполняемым функциям подразделяют на основные группы:

1) многоцелевые усилители без дифференциального входа;

2) многоцелевые дифференциальные усилители, операционные усилители;

3) активные и пассивные фильтры;

4) стабилизаторы напряжения;

5) схемы фазовой автоподстройки частоты;

6) схемы сопряжения с линейными усилителями;

7) прочие.

Многоцелевые усилители предназначены для усиления

сигналов в широком диапазоне частот. К ним относятся усилители низких, промежуточных и высоких частот, видеоусилители и широкополосные усилители.

Дифференциальный усилитель представляет собой симметричную цепь с дифференциальными входами и выходами. Большое распространение получили многокаскадные схемы усилителей с дифференциальными входами — так называемые операционные усилители (ОУ), отличающиеся высокой точностью, согласованием входных и выходных сигналов и широким использованием.

Фильтры относятся к устройствам, выполняющим функцию частотной селекции. Создание микроэлектронных элементов частотной селекции связано с рядом трудностей принципиального и технологического характера (необходимость локализации магнитного поля индуктивных элементов в малом объеме, соблюдение малых технологических допусков, решение проблем регулировки и взаимной подгонки параметров отдельных элементов и т. д.). Вследствие этого в современной микроэлектронной аппаратуре чаще всего используют дискретные микроминиатюрные фильтры (LC -контуры, пьезоэлектрические резонаторы и др.), а специфические методы создания элементов частотной селекции на основе технологических процессов микроэлектроники находятся до сих пор на стадии разработки и лабораторных исследований.

Стабилизаторы напряжения, предназначенные для стабилизации напряжений питания цифровых и линейных ИМС, разрабатывают в виде микросхем централизованной или распределенной стабилизации, причем для сложных систем предпочтение отдают последним.

Схемы фазовой автоподстройки частоты используют в качестве следящих фильтров, усилителей промежуточной частоты и демодуляторов в приемно-усилительных трактах с частотной модуляцией, схем синхронизации.

Схемы сопряжения применяют везде, где требуется передача данных от одного устройства к другому: от ЭВМ — к оконечному устройству, к датчиков — к регистрирующим приборам. Эти схемы служат для передачи цифровой и аналоговой информации, поэтому они могут быть полностью цифровыми, полностью аналоговыми, или, что более распространено, сочетать в себе аналоговые и цифровые элементы. Существуют четыре основные категории схем сопряжения — линейные передатчики, усилители-формирователи запоминающих устройств, усилители считывания и формирователи для внешних устройств.

К линейным ИМС относятся также некоторые схемы формирования или преобразования сигналов: генераторы, детекторы, смесители, дискриминаторы, инверторы, мультивибраторы и т. д. Поскольку число таких схем велико, а стандартизация их затруднена, для сохранения преимуществ групповых методов производства при их построении в качестве базового (усилительного) элемента используют видеоусилители и дифференциальные усилители с дополнительными цепями.

Отметим, что в отличие от цифровых линейные ИМС не характеризуются совокупностью параметров, единых для всех типов схем. Каждая группа линейных ИМС характеризуется определенными параметрами, среди которых общими для каждой группы могут быть входные и выходные сопротивления, частотный диапазон и коэффициент усиления.

Независимо от функционального назначения линейные ИМС реализуются в виде полупроводниковых и гибридных микросхем, причем возможности гибридной технологии значительно шире, чем полупроводниковой.

Основным технологическим процессом изготовления полупроводниковых линейных ИМС является планарно-эпитаксиальный, который обеспечивает выпуск высококачественных микросхем усилительного типа с полосой частот до 150 МГц. В основу базовой конструкции современных линейных ИМС положена диффузионно-эпитаксиальная транзисторная структура n^+-p-nn^+ -типа со скрытым диффузионным слоем n^+ -типа на подложке p -типа. В ряде случаев нашли одновременное применение транзисторы $p-p-p$ - и $p-p-p$ -типов, что значительно упрощает связь по постоянной составляющей многокаскадных схем. При этом возможны три вида структур $p-p-p$ -типа: изолированная с вертикальной инжекцией неосновных носителей заряда, с боковой инжекцией и структура, получаемая при наличии подложки p -типа, в которой эмиттером является базовая p -область транзистора $p-p-p$ -типа.

Иногда используют также МДП-транзисторы, обладающие более высоким входным сопротивлением, чем биполярные. Поэтому они целесообразны во входных каскадах операционных усилителей, где позволяют получить ничтожно малые входные токи, а также в схемах предусилителя и в схемах с высоким входным сопротивлением. Кроме того, МДП-транзисторы имеют лучшие шумовые характеристики по сравнению с биполярными транзисторами.

Для изготовления линейных ИМС в гибридном исполнении наибольшее распространение нашли методы тонкопленочной технологии получения пассивной части. В качестве компонентов используют биполярные транзисторы различных структур и МДП-транзисторы. Большие возможности гибридной технологии при изготовлении линейных ИМС обусловлены хорошей изоляцией между элементами схемы, что позволяет улучшить схемотехнические параметры, в частности частотный диапазон.

Отечественной промышленностью освоен выпуск ряда серий линейных ИМС, изготавливаемых методами полупроводниковой технологии (К101, К118, К124, К140, К143, К162 и др.) и методами гибридной технологии (К218, К224, К228 и др.). Отметим, что число разновидностей серий гибридных ИМС и их состав значительно больше, чем полупроводниковых.

Состав серий аналоговых ИМС разрабатывается не на базе основного функционального элемента, а включает в себя широкий класс микросхем различного схемотехнического (функционального) исполнения, которые в совокупности позволяют реализовать определенную группу устройств аналогового типа в микроэлектронном исполнении. Из всей совокупности линейных ИМС наибольшее распространение получили дифференциальные, операционные и импульсные усилители.

Интегральная технология имеет ряд преимуществ, которые позволяют разрабатывать аналоговые ИМС с параметрами, практически недостижимыми в схемах на дискретных элементах. К этим преимуществам можно отнести: отклонение в одну сторону номинальных значений сопротивлений всех диффузионных резисторов; малый относительный разброс характеристик активных элементов; возможность близкого взаимного расположения элементов, что определяет их практически одинаковую температуру; возможность выбора оптимальных размеров транзисторов.

Дифференциальные и разрабатываемые на их основе операционные усилители занимают одно из ведущих мест в технике линейных ИМС. Основой интегральных микросхем, выполняющих функции дифференциального усилителя, является пара транзисторов с согласованными характеристиками (рис. 6.15, а). Для выполнения основного требования идентичности параметров в диапазоне эксплуатационных воздействий и температур, предъявляемого к транзисторам, последние изготавливают на общей подложке как единый активный прибор. Простейшая схема дифференциального усилителя (рис. 6.15, б) состоит из двух транзисторов и трех резисторов. Поскольку отношение сопротивлений коллекторных резисторов должно быть постоянным в диапазоне температур и эксплуатационных воздействий, монолитный вариант этой схемы является базой для многочисленных разработок ИМС в виде усилителей с дифференциальными входами.

Важным свойством дифференциального усилителя является способность подавлять синфазный сигнал. Эта способность проявляется в том, что при подаче на входы дифференциального усилителя одинаковых (синфазных) сигналов разность напряжений на его выходах меняется мало. В практике часто встречаются дифференциальные усилите.

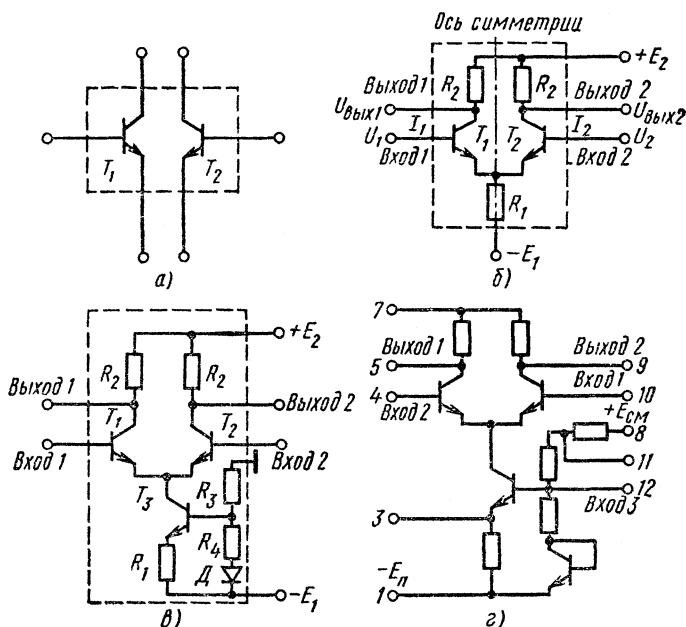


Рис. 6.15. Дифференциальный усилитель:

а — пара транзисторов; б — простейшая схема; в — схема питания через транзисторную схему источника тока; г — полупроводниковая ИМС

ли, один из входов которого заземлен, а на другой поступает сигнал. В этом случае резистор R_1 и источник напряжения E_1 образуют источник тока (рис. 6.15, б). Если оба транзистора точно согласованы между собой, а их базы заземлены, то ток этого источника распределяется поровну между транзисторами. При подаче входного сигнала рабочая точка одного из транзисторов смещается к области насыщения, а другого — к области отсечки. Таким образом, устанавливается линейная переходная область в окрестности рабочей точки. При разбалансе транзисторов рабочая точка на

передаточной характеристике может смещаться, уменьшая возможности входного сигнала управлять схемой и вызывая искажение сигнала.

Естественно, что подавление синфазного сигнала тем лучше, чем больше сопротивление резистора R_1 в схеме рис. 6.15, б. Однако выполнение резистора с большим сопротивлением методами полупроводниковой технологии значительно увеличивает площадь подложки ИМС и мощность рассеяния резистора.

Поэтому более удобна транзисторная схема с источником неизменного тока для эмиттеров транзисторов T_1 и T_2 (рис. 6.15, в). Для ограниченных амплитуд сигналов транзистор в данной схеме эквивалентен резистору с высоким сопротивлением (более сотен килоом). Расход же мощности источника питания соответствует среднему сопротивлению транзистора в активном режиме, составляющему единицы килоом. Режим транзистора T_3 задается резисторами R_1 , R_3 и R_4 . Диод D компенсирует температурные изменения напряжения перехода база—эмиттер транзистора T_3 . Дифференциальные усилители, имеющие структуру, подобную изображенной на рис. 6.15, в, выпускают в виде интегральных микросхем. На рис. 6.15, г в качестве примера приведена схема однокаскадного дифференциального усилителя, реализованная в виде полупроводниковых ИМС типов К1УТ221 и К1УТ181, изготавливаемых по планарно-эпитаксиальной технологии, имеющих коэффициент усиления на частоте 12 кГц не менее 22.

Под операционным усилителем понимают усилитель электрических сигналов, предназначенный для выполнения различных операций над аналоговыми величинами при работе в схеме с глубокой отрицательной обратной связью.

Обычно в операционных усилителях применяют схему дифференциального усилителя для обеспечения устойчивого усиления в целом и возможности использования внешней обратной связи. Большой точности и стабильности характеристик полупроводниковых операционных усилителей добиваются схемотехническим использованием свойств парности или согласованности параметров элементов, изготавливаемых интегральной технологией на единой полупроводниковой подложке. При изготовлении операционных усилителей в интегральном исполнении стремятся также обеспечить их характеристики, которые удовлетворяли бы требованиям, предъявляемым к усилителям в различных устройствах.

Как правило, операционный усилитель содержит входной дифференциальный каскад (дифференциальный усилитель), схему сдвига уровня и выходную цепь, позволяющую получить требуемые динамический диапазон и выходное сопротивление. Наиболее распространенными являются интегральные микросхемы операционных усилителей серий 132, К140.

На рис. 6.16 приведена схема операционного усилителя, предназначенного для использования в аналоговых вычислителях и в качестве нуль-органов в аналого-цифровых преобразователях. Микросхема изготовлена по планарно-эпитаксиальной технологии на кремниевой подложке p -типа со скрытым n^+ -слоем в коллекторе и конструктивно оформлена в виде ИМС типа К1УТ401. Она характеризуется граничной частотой до 20 МГц и коэффициентом усиления от 400 до 12 000 (в зависимости от напряжения источника питания).

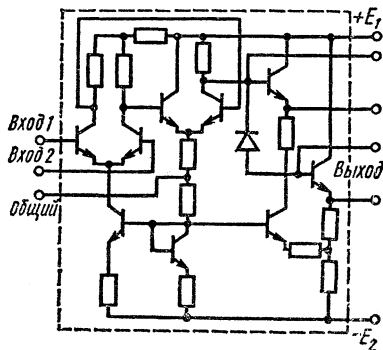


Рис. 6.16. Схема операционного усилителя

Большую группу линейных ИМС представляют импульсные усилители. К ним относятся как простые усилители одно- и биполярных сигналов, в том числе эмиттерные повторители, так и сложные усилители считывания сигналов магнитных запоминающих устройств, а также усилители-формирователи сигналов определенной формы. Наиболее часто такие схемы реализуются в гибридном исполнении.

На рис. 6.17 приведены схемы импульсных усилителей серии К218, предназначенные для использования в различной радиоэлектронной аппаратуре и имеющие следующие параметры: коэффициент усиления не менее трех, сопротивление нагрузки 400 Ом, амплитуду входного импульса не более 1 В, нелинейность амплитудной характеристики не более 10%. Микросхемы данной серии выполнены по гибридной тонкопленочной технологии.

На основе операционных усилителей разработаны и применяются в аппаратуре связи активные RC -фильтры. Использование полупроводниковой интегральной технологии

позволяет найти схемотехнические решения, обеспечивающие повышение качества этих устройств и существенное снижение габаритов по сравнению с аналогичными устройствами на дискретных элементах.

При создании полупроводниковых ИМС для активных RC-фильтров главное внимание уделяется разработке базовых, относительно сложных операционных усилителей. В схеме звена фильтра применяются три высокочастотных усилителя.

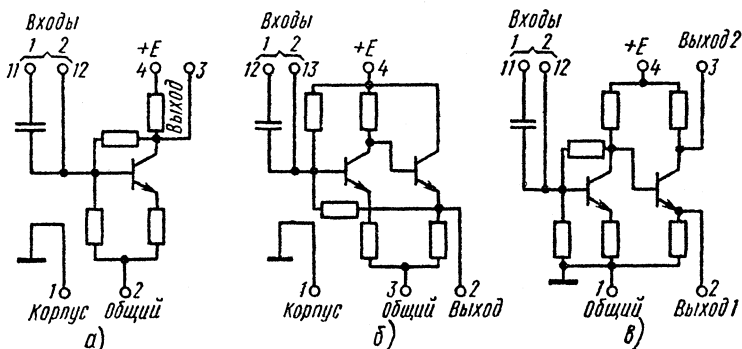


Рис. 6.17. Схемы импульсных усилителей:

а — положительной полярности; б — отрицательной полярности; в — биполярные

В ряде случаев, когда не предъявляются повышенные требования к чувствительности и добротности фильтров, можно применять сравнительно простые микросхемы с небольшим коэффициентом усиления. Например, ИМС типа 529УП1 содержит на одном кристалле три идентичных усилителя (общий ток 3 мА, напряжение одного источника питания 6 В), каждый из которых имеет входное сопротивление 30 кОм и коэффициент усиления 40 дБ. На основе этой микросхемы реализуется типовое звено активного фильтра с добротностью 50 в диапазоне частот до 200 кГц.

§ 6.3. Интегральные микросхемы для аппаратуры связи

Интегральные микросхемы нашли широкое применение в аппаратуре связи. Вся новая аппаратура связи выпускается и разрабатывается с использованием ИМС. В аппаратуре связи распространены аналоговые, а в последнее время и цифровые ИМС. Наибольшее применение имеют полупро-

водниковые ИМС, хотя в ряде случаев обладают преимуществами и гибридные микросхемы.

Из большой номенклатуры аналоговых ИМС в аппаратуре связи наиболее широко используют серии 113, 131, 140, 142, 155, 157, 159, 171, 173, 174, 175, 181 (полупроводниковые), 217, 218, 219, 221, 224 (гибридные) и др.

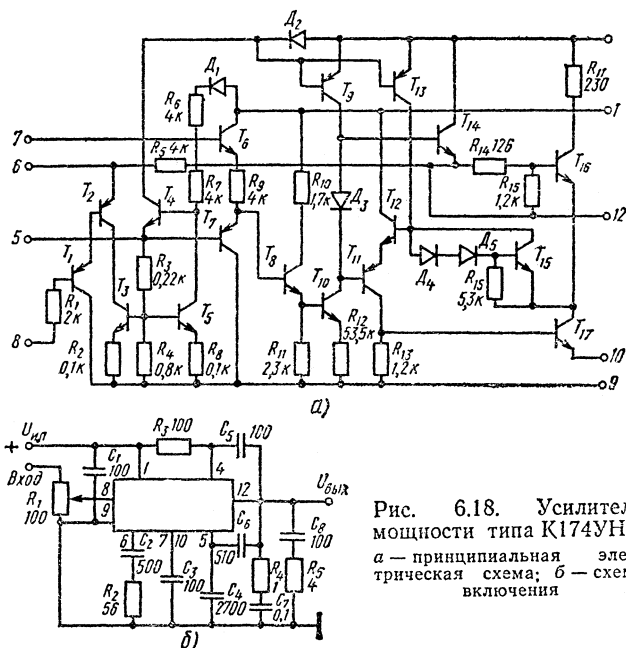


Рис. 6.18. Усилитель мощности типа К174УН7:
а — принципиальная электрическая схема; б — схема включения

Рассмотрим кратко некоторые типы аналоговых ИМС, используемых в аппаратуре связи, включая радиоприемную и телевизионную аппаратуру.

В аппаратуре связи широко применяются усилители низкой частоты (УНЧ). Разработка таких усилителей в виде полупроводниковой ИМС представляет сложную технологическую задачу. Технология изготовления должна позволять получать на одном кристалле n - p - n -структуры с высокой допустимой плотностью тока и повышенным значением коэффициента усиления, а также инжекционные p - n - p -структуры с большим коэффициентом усиления. В настоящее время создана серия 174 таких полупроводниковых ИМС. На рис. 6.18 показана схема усилителя мощности типа

К174УН7, обеспечивающего выходную мощность до 4,5 Вт на нагрузке 4 Ом при напряжении источника питания 15 В.

Входной каскад усилителя построен на составном транзисторе $p-n-p$ -типа (на схеме транзисторы T_1, T_2), нагрузкой которого служит транзистор T_3 . Предусилительный каскад выполнен на транзисторах T_7, T_8, T_{10} . Для уменьшения нагрузки на входной каскад транзисторы T_7 и T_8 включены по схеме с общим коллектором. Нагрузкой транзистора T_{10} является генератор тока, выполненный на транзисторе T_9 . Мощный выходной каскад построен на транзи-

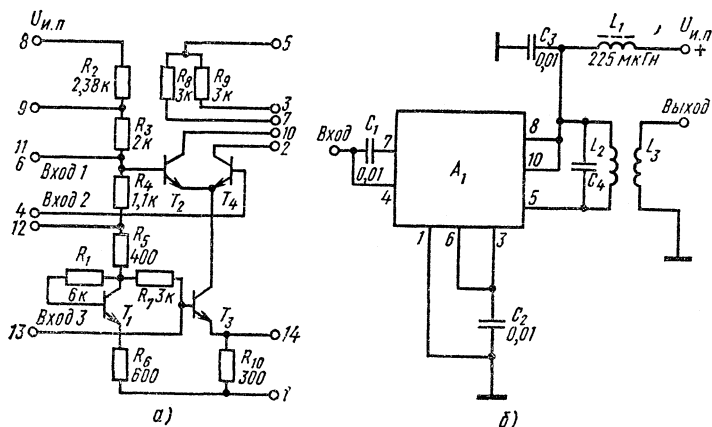


Рис. 6.19. Усилитель высокой частоты типа К175УВ4:
а — принципиальная электрическая схема; б — схема включения

сторах $T_{14}, T_{16}, T_{11}, T_{17}$ и обеспечивает выходной ток 1 А. Ток смещения выходного транзистора T_{10} определяется током транзистора T_9 и падением напряжения на диоде D_3 . Ток смещения выходного транзистора T_{17} определяется током транзистора T_{13} и падением напряжения на $p-n$ -переходах (D_4, D_5, T_{15}). На транзисторах T_4 и T_5 выполнена цепь стабилизации рабочей точки усилителя по постоянному току. К выводу 5 подключается внешняя цепь, корректирующая частотную характеристику на высоких частотах, а к выводу 6 — цепь обратной связи, которая служит для регулировки коэффициента усиления.

Примером дифференциального усилителя высокой частоты (УВЧ) может служить микросхема К175УВ4 (рис. 6.19) с полосой пропускания 150 МГц. Такой простей-

ший дифференциальный усилитель с генератором стабильного тока и схемой смещения широко используется во всех каскадах приемно-усилительного тракта: УВЧ, смесителях, гетеродинах, ограничителях, регулируемых и нерегулируемых каскадах усилителей промежуточной частоты, детекторах амплитудно- и частотно-модулированных сигналов.

Режим по постоянному току усилителя задается смещением транзистора T_1 (с помощью резистора отрицательной обратной связи R_1). Переключая вывод делителя (9, 11, 12), можно регулировать уровень коллекторного тока транзистора T_3 . Транзисторы T_2 и T_4 образуют дифференциальный усилитель, который питается стабильным током от транзистора T_3 . Уровень шумов микросхемы не превышает 6—8 дБ. Разработаны модификации этой ИМС с улучшенными характеристиками.

В аппаратуре связи в последнее время стали широко применяться цифровые системы передачи и приема информации, в основном цифровые ИМС серий 133, 136, 155, 158, 176, 530, 561, 564 и др.

Рассмотрим одну из микросхем серии 155, представляющую собой полупроводниковую ИМС ТТЛ. На рис. 6.20 показана схема JK -триггера типа К155ТВ1 этой серии. Как видно из рис. 6.20, все устройство состоит из основного T_1 и вспомогательного T_2 триггеров. Информация записывается в основной триггер в момент прихода положительного импульса синхронизации на вход C . Во время действия импульса синхронизации в верхнем, вспомогательном триггере сохраняется информация, записанная в предыдущем такте. По окончании импульса синхронизации информация из основного триггера переписывается во вспомогательный.

Возможны три режима работы этого двухступенчатого триггера. В первом режиме на информационные входы J и K подается сигнал, соответствующий «1», на вход C поступает импульс синхронизации. При этом JK -триггер работает в режиме делителя на два (т. е. в счетном режиме). Этот режим используется при построении последовательных счетчиков и делителей частоты любой сложности. Во втором режиме на информационные входы J и K подается парафазный логический сигнал. При этом триггер работает в режиме синхронной записи информации с входом J и K .

После подачи тактового импульса эта информация появляется на выходах Q и $\overline{Q}$, т. е. сдвигается в следующую ячейку. Данный режим используется при построении сдви-

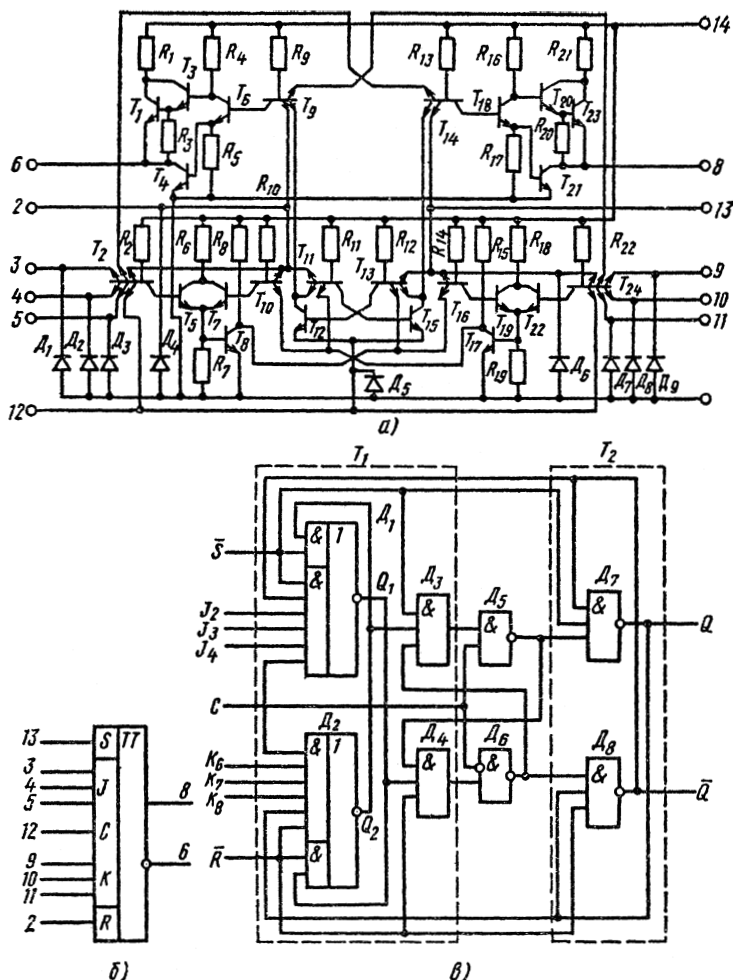


Рис. 6.20. JK-триггер типа К155ТВ1 с логикой на входе ЗИ:

a — принципиальная электрическая схема; *б* — функциональная электрическая схема; *в* — логическая структурная схема

гающих регистров, распределителей импульсов, синхронных счетчиков. И наконец, информация в виде уровня «0» подается на входы *R* или *S*. При этом происходит принудительная установка триггера в состояние «0» или «1» (состояние входов *J*, *K*, *C* произвольны). Следует учесть, что состояние, когда на входы *R* и *S* одновременно поступает сиг-

нал, соответствующий уровню «0», является неопределенным. Возможность возникновения такого состояния должна быть исключена.

В аппаратуре связи для передачи информации используются аналоговые и цифровые системы. Поэтому возникает необходимость преобразования цифровой информации в аналоговую и наоборот (например, на городских и междугородных телефонных сетях).

Преобразователи цифровой и аналоговой информации подразделяют на две группы: аналого-цифровые преобразователи (АЦП), служащие для преобразования исходной аналоговой величины в соответствующий ей цифровой эквивалент (или код), и цифро-аналоговые преобразователи (ЦАП), предназначенные для создания выходной аналоговой величины, соответствующей цифровому коду, поступившему на вход преобразователя.

ЦАП и АЦП состоят из цифровых и аналоговых узлов. Цифровые узлы (счетчики, регистры, дешифраторы, сумматоры, программируемые запоминающие устройства) осуществляют управление процессом преобразования в соответствии с алгоритмами преобразования. Аналоговые узлы генерируют высокочастотные эталонные напряжения, коммутируют аналоговые уровни, усиливают и преобразуют их в заданном масштабе, осуществляют мгновенное запоминание и интегрирование.

АЦП и ЦАП не должны вносить ограничений по точности и быстродействию при обработке информации. Этому уровню полностью удовлетворяют интегральные микросхемы. Современные достижения микроэлектроники позволяют использовать ЦАП и АЦП в виде больших интегральных схем (БИС) и даже в одной БИС.

Из всех видов ЦАП наибольшее применение получили преобразователи кода в напряжение (ПКН) и преобразователи кода в ток (ПКТ). Эти ЦАП используют для создания связи между ЦВМ и другими частями системы, воспринимающими управляющие сигналы в виде напряжения или тока, как один из основных узлов преобразователя напряжения в код (ПНК) и как элемент, обеспечивающий связь между цифровой и аналоговой частями вычислительных устройств. В настоящее время ПКН и ПКТ выпускаются серийно промышленностью в виде одной или нескольких БИС.

В зависимости от вида выходного сигнала ПКН и ПКТ подразделяют на две группы, в первой из которых на выхо-

де получаются сигналы постоянного, а во второй — переменного тока.

Из всех видов АЦП наибольшее применение получили преобразователи напряжения в код (ПНК). Имеется большое число типов ПНК, построенных на различных принципах. Преобразователь напряжения в код, построенный по методу поразрядного кодирования с ПКН в цепи обратной связи, является наиболее распространенным. Отечественный ПНК поразрядного кодирования выполнен на БИС серии 252 и имеет следующие основные характеристики:

Диапазон входных напряжений, В	± 4
Число выходных разрядов	9
Длительность цикла преобразований, мкс	5
Амплитуда импульсов внешней синхронизации, В	$3 \pm 0,3$

Рассматриваемый ПНК состоит из двух частей: аналоговой и цифровой. В аналоговую часть входят входной операционный усилитель, схемы сравнения, два преобразователя кода в ток (положительной и отрицательной полярности). Цифровая часть состоит из двух сдвигающих регистров на восемь разрядов каждый, цепочки из восьми триггеров, двух схем И, схемы ИЛИ, отдельного триггера и генератора тактовых импульсов.

§ 6.9. Микропроцессоры

Успехи в разработке больших и сверхбольших интегральных схем, создание микро-ЭВМ обусловили появление микропроцессоров, характеризующих новый этап развития микроэлектроники.

Микропроцессором называют функционально законченное устройство цифровой обработки информации, реализованное в виде одной или нескольких БИС. Микропроцессоры изменили характер проектирования цифровых устройств. Вместо разработки схем при использовании микропроцессоров составляются программы. Это ускоряет и удешевляет проектирование, обеспечивает легкость внесения изменений в способ функционирования устройства, осуществляемого путем замены хранящейся в запоминающем устройстве (ЗУ) программы новой программой.

Выполнение микропроцессором определенных функций связано с последовательным выполнением обычно значительного числа команд, на что затрачивается большое время, и быстроедействие устройств, использующих микропро-

цессоры, оказывается относительно невысоким. Высокое быстродействие легче обеспечить в устройствах, в которых функционирование определяется не программой, записанной в ЗУ (устройства с программируемой логикой), а определенным соединением элементов в схеме (устройства с жесткой логикой).

Первые микропроцессоры появились в начале 70-х годов и быстро получили широкое распространение благодаря малым габаритам, невысокой стоимости и малому потреб-

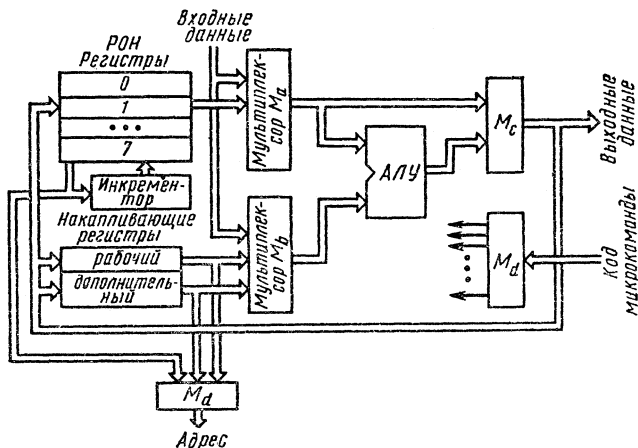


Рис. 6.21. Структурная схема микропроцессоров серий К582 и К584

лению мощности. Их используют в устройствах цифровой обработки данных, управляющих устройствах станков, измерительных приборах и др. В технике связи микропроцессоры найдут широкое применение в управляющих комплексах систем коммутации каналов и сообщений, аппаратуре уплотнения цифровых систем, телефонных аппаратах и т. д.

Отечественная промышленность выпускает большое число серий микропроцессоров, имеющих различную структуру. На рис. 6.21 показана для примера упрощенная структурная схема микропроцессоров серий К582 и К584.

В микропроцессоре предусмотрено выполнение простейших операций, реализуемых одной микрокомандой за один такт работы. Они представляют собой операции пересылки кодовых слов, арифметические операции сложения и вычитания чисел, логические операции, выполняемые над от-

дельными разрядами кодовых слов, сдвиг кодовых слов влево или вправо и некоторые другие.

Для выполнения арифметических и логических операций в микропроцессоре предусмотрено арифметико-логическое устройство (АЛУ). Операнды A и B подаются на входы АЛУ через соответствующие мультиплексоры M_a и M_b . Мультиплексор M_a выбирает операнд A из одного из регистров общего назначения (РОН), либо с шины входных данных; мультиплексор M_b выбирает операнд B из накапливающего регистра, либо с шины входных данных. Результат выполненной в АЛУ операции через мультиплексор M_c выдается на шину выходных данных. Он может быть принят в один из регистров РОН или в один из накапливающих регистров. Мультиплексор M_c может передавать на свой выход операнд A без сдвига либо со сдвигом влево или вправо.

Выполняемая в микропроцессоре операция соответствует микрокоманде, код которой поступает из управляющей памяти. С помощью дешифратора код микрокоманды преобразуется в микрокоманду, т. е. в сигналы на соответствующих выходах дешифратора, поступающие в качестве управляющих сигналов в различные блоки микропроцессора. В процессе выполнения микрокоманды в микропроцессоре формируется адрес, по которому из управляющей памяти выбирается очередная микрокоманда. Для формирования адреса используется один из регистров РОН. Содержимое регистра поступает в инкрементор, где оно увеличивается, после чего возвращается в тот же регистр и совместно с инкрементором образует счетчик. Формируемый в счетчике адрес микрокоманды через мультиплексор M_d выдается на шину адреса, откуда он поступает в управляющую память. В качестве адреса мультиплексором M_d может быть выдано содержимое накапливающих регистров. Управляющая память представляет собой постоянное ЗУ, выполненное на отдельной БИС.

Рассмотренное устройство называется центральным процессорным элементом (ЦПЭ). Наряду с ЦПЭ в микропроцессор может входить ряд других устройств, выполненных на отдельных БИС, например управляющая память, буферные устройства обмена данными и др.

Иногда управляющая память входит в состав ЦПЭ (выполняется в общей БИС с ЦПЭ). При этом в отличие от рассмотренного микропроцессора, называемого микропрограммируемым, образуется не микропрограммируемый микропроцессор. На вход такого микропроцессора подаются

команды, под действием каждой из которых управляющая память формирует в ЦПЭ последовательность некоторого числа микрокоманд. Выполнение каждой команды занимает несколько тактов работы микропроцессора.

Микропроцессор оперирует с числами, имеющими определенное количество разрядов. Выпускаются микропроцессоры, выполняющие действия над двух-, четырех-, восьми- и шестнадцатиразрядными числами. Использование n ЦПЭ позволяет строить микропроцессоры для обработки чисел с разрядностью, в n раз большей разрядности одиночного ЦПЭ

Микропроцессоры и микропроцессорные системы находят все большее применение в аппаратуре связи. В первую очередь это относится к сетям и системам передачи данных, средствам и системам коммутации, сервисным системам электросвязи.

В сетях и системах передачи данных микропроцессоры используют в основном как специализированные процессоры в узлах и абонентских пунктах. Наиболее целесообразны они в системах, в которых обмен данными производится через общую память, подключенную к каналам ввода—вывода данных узла сети.

В системах коммутации микропроцессоры и микропроцессорные системы применяют главным образом в качестве базы устройств управления коммутации. С их помощью решают задачу выбора соединительного пути для установления тракта передачи между абонентами и узлами коммутации. Кроме того, микропроцессоры обеспечивают дополнительные возможности — изменение характера обслуживания абонентов в зависимости от их категории, текущий и периодический контроль за установлением соединения, диагностики оборудования и выполнения ряда других сервисных и служебных функций.

В системах преобразования информации микропроцессоры широко используют для построения концентраторов данных. Концентратор данных принимает данные, поступающие по нескольким низкоскоростным линиям, и передает их по одной высокоскоростной линии или наоборот.

Микропроцессоры и микропроцессорные системы применяют в сервисных системах в основном для расширения возможностей и удобств телефонных и телеграфных абонентов, телексных сетей. В качестве примера можно привести телефонный аппарат марки «ВЭФ», который может запоминать четыре вызываемых номера, циклически повторять

вызовы этих номеров, фиксировать соединение и оповещать абонента об установлении соединения с данным номером. Сервисная система этого аппарата построена на базе отечественного микропроцессора серии К589.

Использование микропроцессоров позволяет успешно решать проблему преобразования звуковых сигналов в цифровой код и обратно для передачи по линиям связи только цифровой информации. От телефона будущего применение микропроцессоров позволяет ожидать реализацию таких свойств, как:

- кнопочный набор с преобразованием сигнала в импульсы дискового набора;

- передача тональных вызывных сигналов с управлением их амплитудой и частотой;

- отображение на цифровом индикаторе: времени суток, продолжительности соединения, набираемого номера, последнего набранного номера, номера, повторно передаваемого из ЗУ автонабора, и др.;

- автонабор по номерам, хранящимся в ЗУ, с возможностью их перезаписи;

- программирование номеров для экстренных соединений при нажатии кнопки;

- подключение к внутренним линиям связи.

§ 6.10. Интегральные микросхемы СВЧ-диапазона

Интегральные микросхемы сверхвысоких частот (СВЧ) охватывают в основном следующие поддиапазоны радиоволн: дециметровые (0,3—3 ГГц); сантиметровые (3—30 ГГц), миллиметровые (30—300 ГГц).

Совокупность элементов, объединенных в общую цепь с электромагнитными связями, выполняющую заданную функцию по отношению к СВЧ-сигналу, называют СВЧ-схемой. Типичными СВЧ-схемами являются СВЧ-генераторы, СВЧ-усилители, преобразователи частоты, коммутирующие устройства, фазосдвигающие устройства (фазовращатели) и т. д. Если размеры СВЧ-схемы малы по сравнению с длиной волны в свободном пространстве, то такую схему называют микроминиатюрной СВЧ-схемой. Отдельные элементы этой схемы, включая элементы с распределенными параметрами, в принципе можно отделить друг от друга (разобрать схему на детали).

СВЧ-интегральная микросхема (СВЧ-ИМС) реализуется из элементов, органически связанных между собой (не отделимых друг от друга), т. е. в ней принципиально не-

возможна замена отдельных элементов в процессе обработки, проверки и эксплуатации. В СВЧ-ИМС не применяется механическая подстройка и регулировка элементов, для этих целей служат электронные элементы, включенные в схему.

СВЧ-ИМС подобно низкочастотным интегральным микросхемам могут быть полупроводниковыми или гибридными. Для полупроводниковых ИМС активные элементы выращивают на поверхности полупроводниковой подложки или в ее объеме, а пассивные элементы и контакты к активным элементам изготавливают нанесением металлической пленки в областях, где удален эпитаксиальный слой.

В гибридных СВЧ-ИМС активные элементы включают как дискретные, заранее изготовленные одним из методов полупроводниковой технологии. В основном применяют планарные приборы, которые можно монтировать с линией двояко: последовательно — в разрыв микрополоскового проводника либо параллельно — между ними и металлизированной (заземленной) нижней поверхностью подложки. Активные приборы располагают как на поверхности подложки, так и в ее объеме (в углублениях или отверстиях).

Пассивные элементы образуют осаждением тонких и толстых пленок, а активные (в корпусном или бескорпусном исполнении) крепят к подложке и присоединяют к пассивной части схемы.

Гибридные СВЧ-ИМС подразделяют на два основных типа: 1) с распределенными параметрами; 2) с сосредоточенными параметрами. Одна и та же микросхема в ряде случаев может содержать элементы с сосредоточенными и распределенными параметрами.

СВЧ-ИМС имеют ряд преимуществ перед обычными СВЧ-схемами. К ним прежде всего относится существенное уменьшение габаритов и массы. Плоская конструкция СВЧ-ИМС очень удобна при размещении в аппаратуре и дешевле по сравнению с обычными схемами — волноводными и коаксиальными. Хорошее соединение отдельных элементов друг с другом и подложкой обеспечивает более высокую надежность интегральных СВЧ-ИМС по сравнению с обычными схемами. Общий вид некоторых типов гибридных СВЧ-ИМС показан на рис. 6.22.

Пассивные элементы СВЧ-ИМС (конденсаторы, индуктивности, резонаторы, элементы связи, нагрузки и т. д.) могут быть как с распределенными параметрами (в виде отрезков и комбинаций полосковых линий), так и с сосредото-

точными параметрами. В сантиметровом диапазоне возможно использование элементов обоих типов и их комбинаций. Применение элементов с сосредоточенными параметрами наиболее целесообразно в дециметровом диапазоне, где размеры полосковых линий уже велики, а размеры элементов с сосредоточенными параметрами еще не слишком малы и их можно реализовать без больших затруднений.

В качестве активных элементов СВЧ-ИМС могут служить полупроводниковые приборы СВЧ, выполняющие при

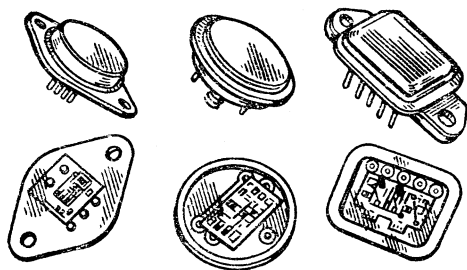


Рис. 6.22. Общий вид некоторых типов гибридных СВЧ-ИМС

низких уровнях мощности все основные радиотехнические функции. Эти приборы в бескорпусном исполнении малы (объем не превышает долей кубического миллиметра) и хорошо вписываются в гибридные микросхемы. В гибридных СВЧ-ИМС уже применяются СВЧ-усилители на транзис-

торах, генераторы на транзисторно-варакторных цепочках, лавинно-пролетных диодах и диодах Ганна, переключатели и фазовращатели на диодах *p-i-n*- и *p-n*-типов, смесители на диодах с барьером Шоттки и т. д.

Рассмотрим более подробно отдельные элементы СВЧ-ИМС. Подложка является одним из основных элементов гибридных СВЧ-ИМС и в значительной степени определяет их параметры. К подложкам предъявляется ряд требований, главными из которых являются: высокая диэлектрическая проницаемость ($\epsilon \geq 10$); небольшие диэлектрические потери ($\operatorname{tg} \delta < 1 \cdot 10^{-4}$); стабильность диэлектрической проницаемости в широком диапазоне частот ($10^3 \div 10^{10}$ Гц) и температур ($-80 \div +200^\circ \text{C}$); минимальная пористость (0,5—1,0%); высокая чистота поверхности (12—13-й классы чистоты); хорошее сцепление с проводниками схемы; высокая диэлектрическая прочность; хорошая теплопроводность.

Для уменьшения размеров СВЧ-ИМС необходимо выбирать материал с более высокой диэлектрической проницаемостью. Однако следует помнить, что длина согласованной

линии и частота обратно пропорциональны, причем на более высоких частотах ($f > 30$ ГГц) размеры линии на подложке, имеющей диэлектрическую проницаемость порядка 10, настолько малы, что их дальнейшее уменьшение за счет использования материала с очень высокой диэлектрической проницаемостью затрудняет изготовление СВЧ-ИМС.

Наибольшее применение для подложек СВЧ-ИМС получила алюмооксидная керамика. Этот материал имеет сравнительно низкие диэлектрические потери, большую стабильность электрических параметров в диапазоне температур, а также невысокую стоимость. Для обеспечения хорошего согласования и малых диэлектрических потерь рекомендуется применять хорошо шлифующиеся подложки из сапфира. Подложки из титаната магния, имеющего высокую диэлектрическую проницаемость в сантиметровом диапазоне, целесообразно использовать, когда особенно важна стабильность диэлектрической проницаемости.

Полупроводниковые материалы, такие, как арсенид галлия и кремний, мало пригодны для подложек на низких частотах (их проводимость сравнительно велика), но могут применяться на частоте свыше 20 ГГц, так как на высоких частотах затухание быстро уменьшается.

Микрополосковые линии передачи применяются в основном в СВЧ-ИМС с распределенными параметрами. Наибольшее распространение получила несимметричная микрополосковая линия передачи (рис. 6.23). Она наиболее проста в изготовлении, обладает малыми габаритами, имеет высокую надежность и сравнительно малые потери. О габаритах линии можно судить из следующего примера: микрополосковая линия с волновым сопротивлением 50 Ом на подложке из алюмооксидной керамики (диэлектрическая проницаемость $\epsilon \approx 10$) имеет ширину проводника $b = 0,6$ мм при толщине подложки $d = 0,635$ мм.

В несимметричной микрополосковой линии передачи часть электромагнитной энергии находится в пространстве над проводником. Этот воздушный зазор определяет ограничения по частоте и мощности, так как возникают труд-

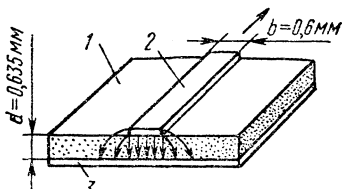


Рис. 6.23. Несимметричная микрополосковая линия передачи: 1 — подложка; 2 — тонкопленочный проводник; 3 — проводящий слой заземления

ности согласования сопротивлений открытого пространства и микрополосковой линии передачи.

Указанные ограничения в значительной степени можно преодолеть, применив симметричную микрополосковую линию передачи (рис. 6.24). Здесь полосковый проводник, расположенный на диэлектрической подложке, подвешивается между двумя экранными плоскостями при одинаковом воздушном зазоре с каждой стороны подложки. Иногда эту линию называют микрополосковой линией с «подвешенной подложкой».

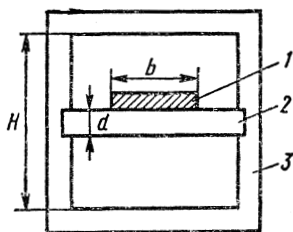


Рис. 6.24. Симметричная микрополосковая линия передачи с «подвешенной подложкой»:

1 — тонкопленочный проводник; 2 — диэлектрическая подложка; 3 — металлический или металлизированный корпус

Так как структура симметрична и слой воздуха—диэлектрика частично нагружен подложкой, на частотах до 20 ГГц могут быть получены уровни мощности СВЧ до 100 Вт.

При выборе материалов проводников СВЧ-ИМС в первую очередь принимают во внимание их сопротивление на высокой частоте, адгезию к подложке и коэффициент термического расширения.

Металлы для проводников СВЧ-ИМС подразделяют на две группы: 1) с хорошей электропроводностью, но плохой адгезией

к подложке; 2) с плохой электропроводностью, но хорошей адгезией. Только алюминий обладает сравнительно хорошими электропроводностью и адгезией. В настоящее время наиболее часто используемый проводник представляет собой слой хрома толщиной около 10 нм, на который нанесен слой золота, равный примерно утроенному значению глубины проникновения тока на верхней частоте диапазона, но не менее 25 мкм. В ряде случаев на подложку предварительно наносят тонкий слой хрома, обеспечивающий хорошую адгезию и мало влияющий на высокочастотные потери в полосковых линиях.

В тех случаях, когда необходима высокая степень миниатюризации, применяют элементы с сосредоточенными параметрами. Индуктивности, конденсаторы и резисторы в СВЧ-ИМС изготавливают обычно методами пленочной технологии. Это объясняется тем, что значения индуктивностей, емкостей и сопротивлений, необходимые для СВЧ-ИМС, как правило, невелики.

Индуктивности изготавливают в форме плоской, круглой (рис. 6.25) или прямоугольной спирали. Значение индуктивности таких спиралей в зависимости от числа витков изменяется в пределах от нескольких наногенри до 50 нГн при добротности порядка 100. Резонансные частоты спирали с тремя витками порядка 5 ГГц, а спирали с пятью витками — 2 ГГц. На рис. 6.25 показана индуктивность, включенная последовательно в микрополосковую линию передачи с волновым сопротивлением 50 Ом. Ее центр соединен с внешним выводом тонкой проволокой. При ширине проводника 50 мкм диаметр спирали равен 1,5 мм, индуктивность 20 нГн, а собственная резонансная частота 2,7 ГГц. Индуктивности менее 1 нГн реализуются в виде коротких отрезков проводника (например, длиной 1 мм при ширине 10 мкм).

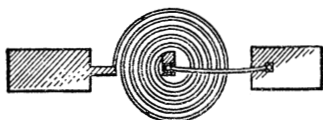


Рис. 6.25. Индуктивность для СВЧ-ИМС

В микросхемах используют пленочные плоские конденсаторы емкостью от 1 нФ до нескольких нанофард, образованные двумя перекрывающимися участками проводника с диэлектрической прослойкой между ними. При толщине диэлектрического слоя из окиси кремния 1 мкм конденсатор площадью 1 мм² имеет емкость около 40 пФ.

Резисторы в зависимости от назначения изготавливают различными способами. Резисторы в цепях постоянного тока (используемые для установления рабочей точки) охватывают диапазон сопротивлений от нескольких ом до нескольких мегаом. Пленочные резисторы, применяемые в качестве оконечной нагрузки, в большинстве случаев имеют сопротивление 50 Ом.

В СВЧ-ИМС относительно крупные пассивные элементы создают непосредственно на керамике методами тонкопленочной и толстопленочной технологии, которая позволяет получить характеристики, достаточно точно удовлетворяющие поставленным требованиям. На рис. 6.26 показано поперечное сечение резистора, конденсатора и проводников, полученных методом тонкопленочной технологии. Для уменьшения потерь толщина проводника должна быть не менее 10 мкм, что соответствует превышению в несколько раз глубины проникновения тока для самых низких частот СВЧ-диапазона.

Дискретные активные элементы используют в основном в гибридных СВЧ-ИМС. При этом применяют в основном

полупроводниковые СВЧ-приборы, которые конструктивно должны выполняться таким образом, чтобы их было удобно монтировать. Имеются три вида конструкции полупроводниковых приборов для СВЧ-ИМС: бескорпусный для монтажа методом перевернутого кристалла (рис. 6.27, а), с балочными выводами (рис. 6.27, б), в керамическом держателе (рис. 6.27, в), дискретные диоды (рис. 6.27, г, д). На рисунке примерные размеры даны в миллиметрах. Тран-

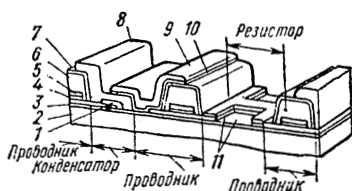


Рис. 6.26. Поперечное сечение резистора, конденсатора и проводников, полученных методом тонкопленочной технологии:

1, 11 — пятки тантала; 2 — диэлектрик; 3 — нитрид тантала; 4, 10 — хром; 5, 9 — золото; 6 — медное покрытие; 7 — золотое покрытие; 8 — оксид кремния

зисторы и диоды, работающие на частотах ниже 2 ГГц, обычно присоединяют к пассивной части с помощью волоочных выводов. На более высоких частотах используют полупроводниковые приборы с выводами в виде шариков или столбиков, изготовленных из пластичных металлов (золото, серебро, алюминий, медь).

Наиболее распространенным является модульное конструирование СВЧ-ИМС обеспечивающее электромаг-

нитное экранирование, механическую прочность и защиту от воздействий окружающей среды. Большинство СВЧ-модулей герметизируют, что обеспечивает стабильность их характеристик. Кроме того, конструкция модуля должна обеспечивать проведение испытаний и оптимизацию отдельных узлов до их объединения в блок, герметизацию для защиты открытых полупроводниковых переходов, охлаждение модуля, а также его малые размеры и массу.

Применяют два способа сборки сложных СВЧ-ИМС из отдельных узлов. Один из них — непосредственное соединение отдельных ИМС, представляющих элементы СВЧ-тракта, на плоском основании. Для более плотного монтажа подбирают такую конфигурацию проводника на составляющих микросхемах, которая обеспечивала бы ее непосредственную стыковку с соседней схемой. При подобном соединении составляющих микросхем коэффициент связи между ними может достигать 55 дБ. При повышенных требованиях к защите от радиопомех и межсхемной изоляции модули собирают из отдельных полностью экранированных отсеков, развязка между которыми достигает более 100 дБ.

Этот способ уменьшает время сборки и настройки модуля, обеспечивает минимальный объем, дополнительную механическую защиту, возможность быстрой замены отдельных элементов модуля.

Для герметизации СВЧ-модуля широко используют цельнометаллические корпуса из латуни или алюминия с углублениями, выфрезерованными для размещения модуля. Наиболее экономичны корпуса, изготовленные методом литья под давлением или методом штамповки. Ведутся разработ-

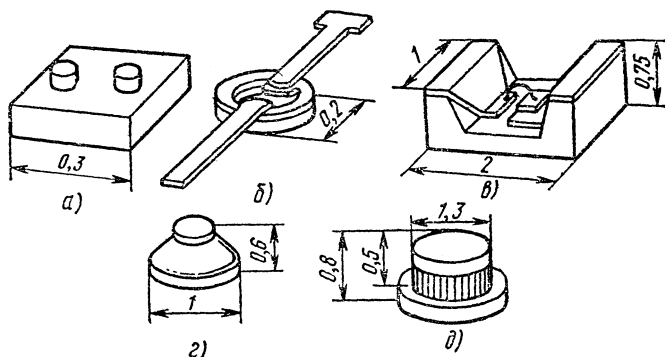


Рис. 6.27. Конструкции полупроводниковых приборов, применяемых в СВЧ-ИМС:

а — для монтажа методом перевернутого кристалла; *б* — с балочными выводами; *в* — в керамическом держателе; *г, д* — дискретные диоды

ки корпусов на основе керамики и других материалов. Металлические корпуса обеспечивают экранирование СВЧ-модулей от внешних электромагнитных полей.

В аппаратуре широко применяются различные типы СВЧ-ИМС. Разработаны целые комплексы СВЧ-модулей для радиорелейной аппаратуры, самолетных радиолокаторов, аппаратуры связи, измерительных приборов и других видов аппаратуры. Приведем характеристики некоторых типов СВЧ-ИМС.

Антенный переключатель «прием—передача» на планарных диодах. Диапазон частот 9—10 ГГц, прямые потери 1,5—2 дБ, развязка между двумя каналами 25—27 дБ, мощность СВЧ-сигнала 1 Вт в непрерывном режиме и 50 Вт в импульсном режиме. ИМС выполнена на подложке из высокоомного кремния размером $2,5 \times 2,5 \times 0,25$ мм.

Балансный смеситель на диодах с барьером Шоттки. Частота сигнала 9 ГГц, частота гетеродина 8,97 ГГц, ко-

эффект шума 7 дБ при мощности гетеродина 1 мВт и 8 дБ при мощности 5 мВт. Гибридная ИМС выполнена на керамической подложке размером 4×8 мм.

Умножитель частоты ($\times 4$) на планарных варакторах. Входная частота 2,25 или 2,125 ГГц, выходная частота 9 или 8,5 ГГц. Входная мощность 2 Вт или 10 мВт, выходная мощность соответственно 1 Вт или 2 мВт. Гибридная ИМС изготовлена на подложке размером $9,6 \times 22$ мм.

Фазовращатель на планарных диодах *p-i-n*-типа (аналогичных применяемым в переключателе). Рабочая частота 2,25 и 2,125 ГГц. Ступень фазового сдвига 45° , точность установки фазового сдвига $\pm 2^\circ$. Вносимые потери 3 дБ. Гибридная ИМС изготовлена на керамической подложке размером 21×38 мм.

Усилитель импульсной мощности на транзисторах. Частота сигнала 2,25 ГГц. Входная мощность 10 мВт, выходная мощность 2 Вт (коэффициент усиления 23 дБ). Гибридная ИМС изготовлена на керамической подложке размером 15×23 мм.

Маломощный усилитель на туннельном диоде для приемопередатчика. Рабочая частота 9 ГГц, полоса усиления 100 МГц, коэффициент усиления 14 дБ, коэффициент шума 6 дБ. Гибридная ИМС изготовлена на керамической подложке размером $10 \times 10 \times 1,25$ мм.

Генератор транзисторный на диапазон частот 0,39—1,55 ГГц, в котором использована микрополосковая структура на подложке из окиси алюминия размером $17,8 \times 15,2 \times 1,25$ мм. Генератор содержит транзистор на 2 Вт, 2 ГГц и отдает мощность 250 мВт на частоте 1,7 ГГц. Развязка 6 дБ на выходе обеспечивает стабильность частоты $\pm 0,5$ МГц.

Переключатель однополосный на диапазон частот 0,8—1,4 ГГц с развязкой не хуже 25 дБ и временем переключения менее 60 мс. Вносимые потери меньше 0,5 дБ, максимальная входная мощность в импульсе 1,5 кВт, средняя мощность 15 Вт. В переключателе использованы два кристалла со структурами диодов *p-i-n*-типа, включенные в параллель на расстоянии $\frac{1}{4}$ длины волны от узлового соединения, а также шесть кристаллов со структурами микроконденсаторов для блокирования постоянных токов и замыкания цепей по высокой частоте. Размер корпуса переключателя $31,8 \times 31,8 \times 9,4$ мм. Эквивалентный переключатель на полосковых схемах имел бы размер $82,5 \times 82,5 \times 12,7$ мм.

Уникальное сочетание полусосредоточенных элементов с микрополосковой техникой использовано в фильтре нижних частот и направленном ответвителе. Фильтр построен с линией низкого входного сопротивления для параллельно включенных емкостных элементов и линией высокого сопротивления для последовательно включенных индуктивных элементов. Малый зазор между параллельно включенными конденсаторами позволяет создать последовательно включенный индуктивный элемент. Конфигурация фильтра с сосредоточенными параметрами дает возможность уменьшить вдвое размеры схемы по сравнению с микрополосковым вариантом, в котором используются распределенные емкости и индуктивности. Кроме того, при этом увеличивается избирательность. При граничной частоте 1,2 ГГц затухание на частоте 1,5 ГГц составляет 30 дБ, а на частоте 1,9 ГГц — до 60 дБ. Потери в тракте в диапазоне частот 1,02—1,1 ГГц не превышают 0,8 дБ.

Дальнейшее развитие СВЧ-ИМС происходит в различных направлениях. В дециметровом и значительной части сантиметрового диапазона волн преимущественное применение получили транзисторные СВЧ-ИМС на основе планарной технологии. Это связано с большими успехами в разработке полевых транзисторов на основе эпитаксиального арсенида галлия. Созданы транзисторы с граничной частотой порядка 30 ГГц и усилением 6 дБ на частоте 8 ГГц и 3 дБ на частоте 16 ГГц с коэффициентом шума 3 дБ на частоте 4 ГГц и 5 дБ на частоте 8 ГГц.

Широкое развитие получили СВЧ-ИМС с использованием в качестве активных элементов лавинно-пролетных диодов (ЛПД). Эти микросхемы могут быть использованы в широкополосных волноводных линиях связи миллиметрового диапазона волн.

Весьма перспективны активные элементы, основанные на эффекте Ганна, при разработке интегральных модулей маломощных передатчиков и приемников.

Контрольные вопросы

1. Дайте определение цифровых и аналоговых ИМС.
2. Каковы особенности цифровых и аналоговых ИМС?
3. Какие признаки положены в основу классификации цифровых ИМС?
4. Назовите основные параметры цифровых ИМС.
5. Дайте классификацию цифровых ИМС по потребляемой мощности.

6. На какие группы подразделяют логические ИМС по схемотехнической реализации основных логических функций?

7. Дайте краткую характеристику микромощных логических ИМС.

8. Каковы особенности микросхем на МДП-транзисторах?

9. Рассмотрите основные тенденции развития цифровых ИМС.

10. Какие факторы способствовали быстрому развитию аналоговых ИМС?

11. Дайте краткую характеристику дифференциального усилителя.

12. Рассмотрите принцип работы операционного усилителя.

13. Какие микросхемы применяются в аппаратуре связи и каковы их особенности?

14. Для каких целей применяются аналого-цифровые и цифро-аналоговые преобразователи?

15. Для каких целей применяются микропроцессоры?

16. Каковы особенности СВЧ-ИМС?

17. Из каких элементов состоят СВЧ-ИМС и каковы способы их изготовления?

18. Какие микрополосковые линии используются в СВЧ-ИМС?

19. Какие СВЧ-ИМС получили широкое применение в радиоэлектронной аппаратуре?

Глава 7

КАЧЕСТВО, НАДЕЖНОСТЬ И ПРИМЕНЕНИЕ ИНТЕГРАЛЬНЫХ МИКРОСХЕМ

§ 7.1. Основные понятия теории качества

Одним из основных преимуществ микроэлектроники является возможность создания на базе интегральных микросхем высоконадежных узлов, блоков и радиоэлектронной аппаратуры в целом. Поэтому главной проблемой, стоящей перед разработчиками и изготовителями ИМС, является обеспечение требуемого уровня их качества и надежности. Решение этой проблемы является актуальным и многоплановым. Актуальность обусловлена прежде всего постоянно возрастающей функциональной сложностью ИМС и широкими областями их применения. ИМС используется в первую очередь в аппаратуре, где на первое место выдвигаются требования по снижению массогабаритных и энергетических показателей (в переносной, бортовой и космической аппаратуре). Многоплановость состоит в том, что необходимо решать комплекс научных, технических, производственных и организационных вопросов. Важным при этом является обеспечение условий эксплуатации аппаратуры и ИМС.

Условия эксплуатации ИМС характеризуются комплексом воздействующих факторов, которые имеют различную физико-химическую природу, изменяются в достаточно широких пределах и по-разному влияют на работоспособность и надежность ИМС.

Факторы, воздействующие на работоспособность ИМС в процессе эксплуатации, подразделяются на электрические, климатические, механические и радиационные. В зависимости от области применения в процессе эксплуатации ИМС некоторые факторы воздействуют в отдельности, независимо от остальных, а некоторые — в совокупности с другими факторами той или иной группы.

С целью обеспечения требуемого уровня надежности устанавливают предельные значения воздействующих факторов, которым могут подвергаться ИМС в процессе эксплуатации, сохраняя при этом работоспособность. Предельные (допустимые) значения воздействующих факторов устанавливаются в технической документации на микросхемы конкретных типов, чем обуславливаются их условия эксплуатации. Для ИМС широкого применения эти значения оговорены требованиями к устойчивости ИМС к различным воздействиям и стандартизованы ГОСТ 18725—73.

Обеспечение определенного уровня качества и надежности требует знания количественных показателей и критериев качества и надежности. Рассмотрим основные из них.

Понятие «качество» в промышленности используется давно, однако до сих пор не выработан единый подход к его определению. Это объясняется тем, что многие изделия, в частности ИМС, характеризуются большим количеством показателей, которые могут быть использованы в качестве критериев качества. Такими показателями являются значения электрических параметров, потребляемая мощность, процент выхода годных ИМС, габариты, масса, стоимость, надежность и др. Поскольку эти показатели определяются совокупностью схмотехнических, конструктивных, технологических и эксплуатационных факторов, а требования к ним в большинстве случаев являются противоречивыми, количественная оценка качества ИМС по данным показателям затруднена. Задача усложняется и тем, что требуется комплексная оценка качества ИМС.

Наиболее целесообразной является теория «относительного качества», сущность которой состоит в том, что качество продукции определяется ее целевым назначением.

Качество определяется, как степень совершенства продукции, которая фиксируется требованиями, учитывающими запросы потребителя и возможности производства.

В этом случае понятие качества продукции ставят в зависимость от этапов ее создания:

на этапе проектирования — соответствие техническому заданию (ТЗ);

на этапе производства — соответствие требованиям технической документации (ТД);

на этапе применения — степень удовлетворения потребителя.

Такой подход позволяет поставить задачу количественной оценки качества. Его применение для оценки качества ИМС требует разработки стройной системы показателей и критериев качества, в первую очередь обобщенных (комплексных) показателей качества.

Существует ряд методов оценки качества ИМС единым комплексным показателем, например коэффициентом качества. За высшую оценку условно принимают коэффициент качества, равный единице. Он складывается из процента сдачи продукции с первого предъявления, претензий потребителя, величины брака, состояния технологической дисциплины и др. При ухудшении любого из показателей коэффициент качества снижается. В ряде случаев основным критерием качества служит наличие рекламаций на готовые изделия. Иногда уровень качества изделий определяют по результатам сравнения количественных показателей качества рассматриваемого изделия с показателями действующего стандарта.

Наиболее эффективной является количественная оценка качества ИМС комплексным показателем Q , вычисляемым по формуле

$$Q = \frac{\sum_{i=1}^n m_i q_i}{\sum_{i=1}^n m_i}, \quad (7.1)$$

где m_i — весовые коэффициенты каждой группы; q_i — групповые показатели качества.

Согласно методике оценки уровня качества изделий электронной техники имеется восемь групп свойств и соответственно восемь групповых показателей качества: по назначению, надежности, стандартизации и унификации, тех-

нологичности, экономичности, эргономичности и эстетичности, а также патентно-правовые.

Каждая из этих групп описывается совокупностью технико-экономических показателей, количество которых определяется конструктивно-технологическим исполнением ИМС и областью их применения. Тем не менее из всей совокупности групповых показателей качества можно выделить обобщенные, которые характеризуют определяющее значение уровня качества ИМС. Это относится прежде всего к показателям качества по назначению, технологичности и надежности. Так, для цифровых ИМС *показателем качества по назначению* часто используют коэффициент

$$F = Pt_{з.ср}, \quad (7.2)$$

где P — удельная мощность, потребляемая одним элементом или ИМС, мВт; $t_{з.ср}$ — средняя задержка на один элемент, нс.

По значению данного показателя производят не только оценку уровня качества однотипных или разнотипных ИМС, но и их сравнение с целью выбора элементной базы для практического применения.

При повышении степени интеграции помимо необходимости улучшения коэффициента качества важнейшей задачей является уменьшение площади, занимаемой ИМС и приходящейся на элементарный вентиль цифровой ИМС или на одно преобразование информации. В этом случае наиболее целесообразно использование *обобщенного коэффициента*, учитывающего конструктивно-технологическое совершенство ИМС:

$$k = n^0 / Pt_{з.ср}, \quad (7.3)$$

где n^0 — количество элементарных вентилях, приходящихся на 1 мм^2 площади кристалла.

В табл. 7.1 приведены значения коэффициентов показателей качества для основных классов классов цифровых ИМС.

Аналогично показатели качества можно применить и для аналоговых ИМС:

$$k = n^0 / Q, \quad (7.4)$$

где Q — добротность усилительного каскада.

Среди *показателей качества по технологичности* важное место отводится проценту выхода годных ИМС и БИС. Это объясняется тем, что выход годных изделий определяет в комплексе не только уровень и стабильность производства

Таблица 7.1

Значения коэффициентов показателей качества
для различных типов ИМС

Тип логик	P , мВт/вен- тиль	$t_{з.ср}$, нс	F	Количес- тво вен- тилей	Площадь кристал- ла, мм ²	n^0	k
ТТЛ	6,2	5	31	80	7	11,4	0,37
ЭСЛ	10	2	20	80	6,25	12,8	0,64
МТЛ	2	2	4	160	26	6,2	1,55
И ² Л	—	—	1	1000	10	100	100

ИМС, но и их стоимость, а также тем, что между процентом выхода годных изделий и показателями надежности ИМС существует определенная связь.

§ 7.2. Основные понятия теории надежности

Для определения количественных показателей надежности ИМС широко пользуются стандартными понятиями и методами, которые базируются на классической статистической теории надежности.

Надежность — это свойство ИМС выполнять заданные функции, сохраняя во времени значения установленных эксплуатационных показателей в заданных пределах, соответствующих заданным режимам и условиям использования, хранения и транспортировки. Изменение в состоянии ИМС, ведущее к потере этих свойств, рассматривается как отказ. По определению, отказ — это событие, заключающееся в нарушении работоспособности ИМС.

Исходным положением статистической теории надежности является признание случайного или случайно-детерминированного характера отказов. Этим обусловлены методы экспериментального изучения и количественного описания надежности ИМС. Математической теорией надежности является теория вероятностей, теория случайных функций и математическая статистика.

Теория вероятностей позволяет определить законы распределения отказов, возникающих в ИМС. Поскольку отказы ИМС имеют различные причины и проявления, каждый из типов отказов характеризуется своим особым распределением и поэтому требует различной математической обработки.

Известно, что надежность любого изделия обуславливается его безотказностью, долговечностью, сохраняемостью и ремонтпригодностью. Для ИМС характерны первые три свойства.

Безотказность и долговечность определяют свойство изделия сохранять работоспособность в течение заданного времени. Различие между этими понятиями заключается в следующем. Безотказность — свойство изделия непрерывно сохранять работоспособность в течение некоторого времени или некоторой наработки. Количественно его оценивают такими показателями, как вероятность безотказной работы и интенсивность отказов. Долговечность — свойство изделия сохранять работоспособность до наступления предельного состояния при установленной системе технического обслуживания и ремонта. Показателем долговечности ИМС является средний срок службы. Если в процессе опытного производства микросхем необходимо определять безотказность и долговечность, то при серийном производстве представляется оправданным контролировать лишь безотказность.

Сохраняемость — свойство изделия непрерывно сохранять исправное и работоспособное состояние в процессе и после хранения и (или) транспортировки. Показателем сохраняемости может служить средний срок сохранности.

Для практического использования очень удобны временные показатели надежности. Основными временными показателями надежности ИМС служат вероятность безотказной работы, интенсивность отказов, минимальная наработка на отказ, ресурс и срок хранения.

Вероятность безотказной работы $P(t)$ — вероятность того, что в пределах заданной наработки отказ ИМС не возникает. Функция $P(t)$ является интегральной функцией распределения времени безотказной работы. *Интенсивность отказов $\lambda(t)$* — условная плотность вероятности возникновения отказа ИМС, определяемая для рассматриваемого момента времени t при условии, что до этого момента отказ не возник. При этом существует взаимнооднозначное соотношение между $P(t)$ и $\lambda(t)$:

$$P(t) = \exp \left[- \int_0^t \lambda(t) dt \right], \quad (7.5)$$

которое является математическим выражением основного закона надежности.

При вейбулловском законе распределения отказов, которому подчиняются отказы некоторых ИМС, интенсивность отказов определяется соотношением:

$$\lambda(t) = b(t/a)^{b-1}/a, \quad (7.6)$$

где a и b — постоянные (параметры распределения).

При экспоненциальном законе распределения отказов во времени, который применим для большинства ИМС и которым будем пользоваться в дальнейшем, интенсивность отказов не зависит от времени ($b = 1$, $\lambda = 1/a = \text{const}$). Поэтому для экспоненциального закона имеем

$$P(t) = \exp(-\lambda t) = \exp(-t/a), \quad (7.7)$$

или

$$\ln P(t) = -\lambda t. \quad (7.8)$$

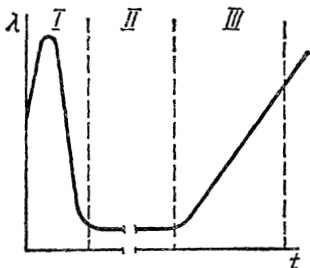


Рис. 7.1. Типичная зависимость интенсивности отказов от времени:

I — начальный период отказов;
II — период служебных отказов (время нормальной работы);
III — период износа (старения)

Исследования долговечности большого числа различных компонентов и ИМС позволили определить общую зависимость интенсивности отказов от времени (рис. 7.1). Форма этой функции практически не зависит от критериев год-

ности, рабочих условий и размера партии ИМС. В начальный период времени интенсивность отказов может сильно изменяться. Эти отказы обусловлены в основном различными производственными дефектами и выявляются в процессе испытаний или специальной тренировки. Во второй период времени интенсивность отказов практически постоянна и обусловлена случайными отказами. Этот период весьма продолжителен и характеризует полезную долговечность или срок службы ИМС. Последующий период времени характеризует отказы, вызванные износом при длительной эксплуатации. Интенсивность отказов в этот период существенно возрастает.

Минимальная наработка на отказ t_n — время работы ИМС в заданном режиме, в течение которого отказы практически отсутствуют.

Ресурс — наработка ИМС до предельного состояния; для оценки ИМС используют гамма-процентный ресурс t_γ .

Срок хранения t_{xp} — время, в течение которого ИМС

сохраняют свои технико-эксплуатационные показатели при хранении их в специальных помещениях или в аппаратуре.

Показатели t_n , t_v , t_{xp} применяют для задания требований по надежности в техническом задании и нормативно-технической документации, в том числе в паспорте на ИМС. Показатель $\lambda(t)$ является справочной величиной и чаще всего указывается в справочниках по надежности. Показатель $P(t)$ обычно используют для расчетов. Значения каждого из этих показателей устанавливают в зависимости от назначения и конструктивно-технологического исполнения ИМС в соответствии с требованиями, оговоренными в ГОСТах и стандартах предприятий. Так, для ИМС широкого применения установлены следующие требования к количественным показателям надежности.

Минимальная вероятность безотказной работы при испытании в максимально допустимом электрическом режиме и при максимальной положительной температуре в течение 500 ч должна быть не менее 0,95 при риске заказчика $\beta = 0,1$ (для ИМС первой степени интеграции), 0,9 при $\beta = 0,2$ (для ИМС второй степени интеграции) и 0,85 при $\beta = 0,2$ (для ИМС третьей степени интеграции).

Минимальная наработка на отказ должна составлять 10 тыс. ч, срок хранения ИМС в корпусном исполнении — не менее шести лет, в бескорпусном исполнении в герметичной упаковке — не менее двух лет.

Однако эти требования постоянно повышаются по мере развития техники ИМС и областей их применения. Уже в настоящее время решается задача изготовления ИМС со следующими эксплуатационными показателями надежности: интенсивностью отказов $\lambda = 10^{-10}$ ч⁻¹, минимальной наработкой на отказ 15—30 тыс. ч, сроком хранения 12—15 лет.

В табл. 7.2 приведены сравнительные данные по надежности некоторых узлов радиоэлектронной аппаратуры, выполненных на различных элементах. Анализ показывает, что в интегральном варианте эти узлы имеют надежность в 500—1000 раз выше надежности аналогичных устройств, выполненных на электровакуумных и полупроводниковых приборах, число различных соединений уменьшается в среднем на 30%. Уменьшение количества комплектующих элементов и контактных соединений повышает надежность аппаратуры, которая определяется надежностью элементов и их соединений:

$$\lambda_{РЭА} = \sum_{i=1}^k N_{oi} \lambda_{oi} + \sum_{i=1}^n N_{ci} \lambda_{ci}, \quad (7.9)$$

Таблица 7.2

**Интенсивность отказов узлов радиоэлектронной аппаратуры,
выполненных на различных элементах**

Узел РЭА	$\lambda_{\text{ср}}$ (ч ⁻¹) узлов РЭА, выполненных на			
	электро- вакуумных приборах ($\times 10^{-4}$)	полупровод- никовых приборах ($\times 10^{-5}$)	высокона- дежных полупровод- никовых приборах ($\times 10^{-6}$)	ИМС ($\times 10^{-7}$)
R-S-триггер	5,1	5,3	3,7	8,5
Полусумма- тор	4,7	3,9	1,7	8,5
Вентиль И— НЕ	4,4	3,9	2,4	8,5
J-K-триггер	9,2	9,5	4,1	8,5

где $\lambda_{\text{РЭА}}$ — интенсивность отказов узлов радиоэлектронной аппаратуры; $N_{\text{эi}}$, $N_{\text{сi}}$ — количество элементов, входящих в состав РЭА, и число соединений между ними; $\lambda_{\text{эi}}$, $\lambda_{\text{сi}}$ — интенсивность отказов i -го элемента и i -го соединения.

Принято считать, что увеличение сложности ИМС, т. е. количества элементов в ИМС, существенно не снижает ее надежности по сравнению со схемами на дискретных элементах. Так, у ИМС, эквивалентной радиоэлектронной схеме из 20 дискретных компонентов, интенсивность отказов при нормальной температуре составляет 10^{-7} ч⁻¹ и при температуре 85°С — $6 \cdot 10^{-7}$ ч⁻¹, что соответствует надежности серийного планарного кремниевого транзистора. Радиоэлектронная схема из 10 транзисторов и 10 других элементов будет иметь $\lambda > (1 \div 6) \cdot 10^{-6}$ ч⁻¹.

Более высокая надежность ИМС по сравнению с электронными узлами на дискретных компонентах обусловлена следующими факторами:

совместимостью материалов, элементов и компонентов в ИМС;

меньшим количеством межсоединений;

защищенностью наиболее чувствительных элементов;

групповой технологией изготовления;

малыми мощностями рассеяния;

невозможностью неправильного применения элементов и компонентов;

конкретной областью применения ИМС;

герметизацией ИМС и др.

Благодаря этим факторам, действующим в комплексе, надежность ИМС независимо от их конструктивно-технологического исполнения значительно выше надежности аналогичных узлов и устройств на дискретных компонентах.

§ 7.3. Методы контроля качества и оценки надежности ИМС

Как известно, качество ИМС в значительной степени определяется технологией их изготовления. Ввиду сложности технологических процессов, состоящих из нескольких десятков различных операций и переходов, несовершенства и нестабильности отдельных технологических операций, приводящих к невоспроизводимости и разбросу параметров изготавливаемых структур, использования ручного труда в проведении большого количества операций, обуславливающего отклонения от технологии вследствие ошибок операторов, появление дефектов в процессе изготовления ИМС неизбежно. Поэтому для обнаружения дефектов и устранения дефектных структур из последующего цикла изготовления, а также для проверки соответствия изготовленной ИМС требованиям технических условий вводят систему контроля качества.

Различают два вида контроля качества ИМС:

- 1) производственный контроль;
- 2) контроль готовых ИМС.

Производственный контроль качества является составной частью типового технологического процесса и сводится к определению двух его составляющих: явных дефектов, характеризующих процент выхода годных изделий, и скрытых дефектов, характеризующих производственную надежность; в обоих случаях контроль может носить как пассивный, так и активный, диагностирующий характер.

Диагностирующим контролем (диагностикой) называют контроль, который дает информацию о природе дефектов, позволяющую вносить необходимые коррективы в производство. *Пассивным* является контроль, который регистрирует только факт существования дефекта по принципу годен—негоден, не вскрывая его механизма. При контроле качества по явным дефектам пассивный контроль сводится к сортировке. Сортировка осуществляется путем разделения изделий или полуфабрикатов на группы, либо по принципу 100%-ного отсева годен—негоден,

Следует отметить, что целью производственного контроля является не только своевременная отбраковка дефектных изделий на различных этапах изготовления, но и обеспечение требуемого уровня качества ИМС, что достигается контролем технологических операций и процессов. Такой контроль может быть осуществлен как измерением параметров структуры, сформированной в результате проведения технологической операции или процесса, так и контролем технологических режимов и параметров, характеризующих данную операцию. Поэтому производственный контроль охватывает целый комплекс различных физических, химических и электрических методов измерений, предназначенных как для контроля параметров материалов, полуфабрикатов, структурных элементов и готовых ИМС, так и для контроля технологических режимов и параметров отдельных операций. Следовательно, производственный контроль качества ИМС включает в себя:

- контроль параметров изготавливаемых структур;
- контроль технологических режимов.

Производственный контроль параметров изготавливаемых структур подразделяется на входной, операционный и приемочный.

Входной контроль — контроль материалов, полуфабрикатов, вспомогательных и комплектующих изделий, поступающих на данную операцию, например контроль качества полупроводниковых материалов, металлов, органических и неорганических продуктов, диэлектриков, деталей корпуса, фотошаблонов, масок, а также дискретных элементов для сборки гибридных ИМС.

Операционный контроль — контроль с целью осуществления качества проводимой операции. Сюда относятся различные операции для контроля качества полупроводниковых и пленочных структур, полученных в результате различных операций, в частности контроль качества очистки, эпитаксиального наращивания, окисления, диффузии, металлизации, напыления, фотолитографии, разделения, монтажа и др. Операционный контроль проводят либо после завершения, либо в ходе технологической операции. При этом в качестве контролируемых объектов используют как изготовленные структуры, так и технологические режимы.

Приемочный контроль — контроль параметров изделий после завершения определенного этапа изготовления ИМС. Сюда относится контроль пассивной части гибридных ИМС, коммутационных плат гибридных БИС, полупроводниковых

ИМС на функционирование на неразделенной пластине и т. д. На завершающем этапе изготовления ИМС приемочный контроль совпадает с контролем готовых ИМС.

Контроль качества ИМС осуществляют путем измерения параметров непосредственно самих изделий либо параметров, специально предназначенных для этих целей элементов — ячеек-«спутников» или тестовых ячеек.

Для производственного контроля качества ИМС отечественной промышленностью разработана и выпускается различная контрольно-измерительная аппаратура — микроскопы, приборы для измерения толщин различных материалов, удельных сопротивлений и емкостей. В то же время все технологическое оборудование (установки для напыления пленок, диффузии примесей, эпитаксиального наращивания слоев и др.) укомплектовано аппаратурой для контроля основных технологических режимов.

Контроль готовых ИМС является завершающей контрольно-измерительной операцией в типовом технологическом процессе. Кроме того, такой контроль применяют при практическом использовании ИМС (например, перед установкой в аппаратуру) или при исследовании ИМС (например, при испытаниях в процессе анализа отказов). Контроль готовых ИМС осуществляют путем измерения электрических параметров, характеризующих функциональную принадлежность микросхемы. Такие измерения проводят либо при нормальных условиях, либо в режимах, имитирующих условия эксплуатации. В последнем случае контроль готовых ИМС осуществляют путем их испытаний с последующим измерением электрических параметров. Организационно контроль проводят сплошным, когда контролируется 100% изделий, или выборочным, когда контролируется определенная часть изделий, результаты контролируемых параметров которых подлежат статистической обработке. Для этого контроля применяют специализированную аппаратуру, разработанную для конкретных типов ИМС, либо универсальные измерительные комплексы.

Оценку качества и надежности изготовленных ИМС в настоящее время осуществляют путем их испытаний. Испытания являются основой экспериментального изучения качества и надежности и имеют своей целью определение критериев качества и показателей надежности.

Испытания на надежность, так же как и испытания по контролю качества ИМС, проводят по заранее разработанным планам, на основе которых составляют программы испы-

таний. Планирование испытаний на надежность, их проведение и обработку результатов осуществляют установленными методами испытаний на надежность, которые являются обязательными для заказчиков, разработчиков и изготовителей ИМС при проектировании, производстве и приемке опытных партий и серийно выпускаемых микросхем.

Количественные значения показателей надежности ИМС определяют путем математической обработки данных об отказах, происшедших во время испытаний, а также на основе обобщения опыта эксплуатации. Наибольшее применение получил вероятностно-статистический метод оценки надежности ИМС. В соответствии с установленными методами оценки надежности проводят испытания ИМС по планам однократной, двукратной или накопленной выборки. По результатам испытаний определяют количественные показатели надежности. Так, среднестатистическое значение вероятности безотказной работы $P_{ст}$ на время гарантированной наработки t_r по результатам испытаний k выборок ИМС вычисляют по формуле

$$P_{ст} = \frac{\sum_{i=1}^k (n_i - d_i)}{\sum_{i=1}^k n_i}, \quad (7.10)$$

где n_i — размер i -й выборки ($i = 1, 2, \dots, k$); d_i — число отказавших ИМС в выборке n_i .

Формула (7.10) справедлива для случая, когда время испытаний $t_n = t_r$. При $t_n \neq t_r$ среднестатистическое значение вероятности безотказной работы ИМС при экспоненциальном законе распределения отказов на время t_r по k выборкам определяют из соотношения

$$P_{ст} = \frac{\sum_{i=1}^n P_{опi}(t_r)}{k}, \quad (7.11)$$

где

$$P_{опi}(t_r) = [P_{опi}(t_{ni})]^{(t_r/t_{ni})} \quad (7.12)$$

— приведенные к одному времени t_r опытные значения вероятности безотказной работы.

Опытное значение вероятности безотказной работы $P_{оп\ i}(t_{иi})$ на время испытаний $t_{иi}$ рассчитывают для каждой выборки:

$$P_{оп}(t_{иi}) = (n_i - d_i)/n_i. \quad (7.13)$$

Среднестатистическое значение интенсивности отказов находят по следующим формулам:

$$\lambda_{ст} = (1 - P_{ст})/t, \text{ при } P_{ст} \geq 0,9; \quad (7.14)$$

$$\lambda_{ст} = \frac{-2,3 \lg P_{ст}}{t} \text{ при } P_{ст} < 0,9. \quad (7.15)$$

Отметим, что распределение отказов ИМС подчиняется более сложным законам, чем экспоненциальный. На практике широкое применение для характеристики надежности ИМС находят логарифмически-нормальное и weibullовское распределения, для которых получены соответствующие выражения по определению показателей надежности.

Если известна суммарная наработка t_{Σ} ИМС, то интенсивность отказов

$$\lambda = d/t_{\Sigma}, \quad (7.16)$$

где d — полученное число отказов ИМС при испытаниях.

В случае, когда число отказов равно нулю, интенсивность отказов

$$\lambda = 0,69/t_{\Sigma}. \quad (7.17)$$

Высокая надежность ИМС и сравнительно небольшое число их отказов при испытаниях затрудняют получение достоверной информации о надежности. Поэтому статистические методы, основанные на определении или подтверждении заданной интенсивности отказов, оказываются в большинстве случаев нерациональными по технико-экономическим соображениям. Например, если для подтверждения интенсивности отказов 10^{-5} ч^{-1} с достоверностью 0,95 требуется около $5 \cdot 10^5$ элемент-час наработки при выборке в 1000 элементов, то для подтверждения интенсивности отказов 10^{-7} ч^{-1} при тех же условиях потребуется уже более 10 лет. Стоимость таких испытаний составляет сотни тысяч и даже миллионы рублей, а получаемая информация о надежности ИМС из-за большого промежутка времени, истекшего с момента начала испытаний, теряет ценность. Если же учесть, что подобная оценка надежности характерна только для определенного типа ИМС и распространение полученных результатов на другие типы микросхем не всег-

да возможно, то становится очевидной нецелесообразность подобного подхода к оценке высоконадежной продукции.

Другим недостатком этого метода оценки является трудность проводимых испытаний. Поскольку ИМС представляет собой сложный функциональный прибор, работоспособность которого характеризуется многими параметрами, используемая испытательная и измерительная техника должна иметь соответствующую степень сложности. При этом ошибки измерения параметров ИМС по вине персонала и измерительной техники не допускаются. По мере дальнейшего роста надежности ИМС отмеченные трудности в оценке достигнутого уровня надежности будут возрастать. Поэтому применяемые в настоящее время вероятностно-статистические методы оценки надежности используют в основном не для определения физической надежности ИМС, а лишь для подтверждения ее нижней приемлемой границы. Фактическую надежность ИМС определяют по данным эксплуатации микроэлектронной аппаратуры и на основе обобщения большого статистического материала как различных категорий испытаний, так и других исследований.

Существующие трудности в оценке надежности ИМС могут быть преодолены на основе физического подхода к проблеме надежности. Использование для этих целей физико-статистических методов моделирования физики отказов, кибернетических и других методов позволяет получить достоверные сведения о надежности ИМС при меньших затратах и в более короткие сроки. Основной задачей этих методов является создание физико-математической модели отказа на основе знаний об изменениях физико-химических свойств материалов и структур, происходящих со временем и при различных внешних воздействиях, а также о влиянии этих изменений на работоспособность данной ИМС.

§ 7.4. Категории и виды испытаний ИМС

Испытания ИМС имеют своей целью:

- определение количественных показателей качества и надежности;

- установление возможности применения в данной области;

- получение гарантии качества и снижения возможных отказов ИМС в будущем.

Поставленная цель достигается в результате воздействия на ИМС различных внешних факторов, которым они

подвергаются или могут подвергаться в процессе эксплуатации. Испытания должны быть повторяющимися, а для повышения эффективности необходимо проводить их в условиях, близких к эксплуатационным. С экономической точки зрения испытания должны быть простыми и прямыми, без промежуточных расчетов или с минимальным числом простых вычислений.

Испытания ИМС могут осуществляться в лабораторных и эксплуатационных условиях. В промышленности испытания проводят, как правило, в лабораторных условиях путем имитации различных воздействующих факторов с помощью специально предназначенных для этих целей испытательных стендов. Испытательный стенд представляет собой техническое устройство для установки объекта испытаний (в нашем случае ИМС) в заданных положениях, создания воздействий, съема информации и осуществления управления процессом испытаний и объектом испытаний.

В зависимости от поставленной цели и назначения различают испытания, предназначенные для контроля качества, и испытания на надежность.

Для контроля качества ИМС, т. е. для оценки соответствия ИМС требованиям технических условий или другой технической документации, проводят контрольные испытания следующих категорий: квалификационные, приемосдаточные, периодические, типовые и контрольно-выборочные.

Квалификационные (К) испытания проводят с целью определения соответствия ИМС данной серии полному объему требований ТУ и оценки готовности производства к изготовлению ИМС, выпуск которых начат впервые.

Приемо-сдаточные (ПС) испытания проводят для контроля качества каждой предъявляемой к сдаче партии ИМС; по результатам испытаний принимают решение о возможности приемки и поставки данной партии ИМС.

Периодические (П) испытания осуществляют с целью периодического (в определенные сроки) контроля качества ИМС и подтверждения стабильности технологического процесса производства ИМС за контролируемый период. Неудовлетворительные результаты периодических испытаний указывают на дефекты производства или конструкции ИМС, которые не были выявлены ранее.

Типовые (Т) испытания, необходимые в случаях изменений конструкции, технологии, применяемых материалов, полуфабрикатов и компонентов, проводят после внесения таких изменений для проверки соответствия модернизированных ИМС требованиям стандартов и ТУ. По их результатам принимают решение о возможности, целесообразности и эффективности внесения изменений в конструкторско-технологическую документацию и поставки ИМС по измененной документации.

Контрольно-выборочные (КВ) испытания служат для определения соответствия серийно выпускаемых ИМС полному объему требований стандартов или ТУ, а при необходимости и дополнительным требованиям. Их проводят либо в целях контроля качества производства вышестоящей организацией, либо при решении вопроса применения выпускаемых ИМС в новых областях техники.

Испытания на надежность в свою очередь подразделяют на определительные и контрольные.

Определительные испытания ИМС на надежность предназначены для нахождения (определения статистическим путем) фактических значений количественных показателей надежности для одного типа или серии ИМС. Их проводят после освоения вновь разработанных или модернизированных ИМС, изготовленных по технологии, соответствующей предполагаемому виду (серийному или массовому) производства. При определительных испытаниях осуществляется также проверка закона распределения отказов для данного типа ИМС.

Контрольные испытания ИМС на надежность проводят с целью контроля соответствия количественных показателей надежности требованиям стандартов или ТУ.

Поскольку в качестве показателей надежности ИМС приняты вероятность безотказной работы, минимальная наработка на отказ, ресурс, интенсивность отказов и срок хранения, для определения или контроля этих показателей установлены испытания на надежность следующих категорий: на безотказность, на долговечность, ресурсные, специальные и на сохранность.

Испытания на безотказность проводят с целью контроля безотказности ИМС в течение времени, достаточного для выявления дефектов, которые могут возникнуть в процессе изготовления и привести к отказам.

Испытания на долговечность служат для подтверждения установленного в нормативно-технической документации значения минимальной наработки на отказ.

Испытания на безотказность и долговечность являются контрольными испытаниями ИМС на надежность, целью которых является установление соответствия ИМС требованиям стандартов или ТУ по минимальной наработке на отказ. Эти испытания проводят как на этапе разработки ИМС, так и в процессе их серийного производства.

Ресурсные и специальные испытания являются основой для статистического определения количественных показателей надежности и поэтому являются определительными испытаниями ИМС на надежность.

Ресурсные испытания предназначены для определения ресурса ИМС. Они являются либо продолжением испытаний на долговечность, либо самостоятельными.

Специальные испытания служат для определения интенсивности отказов ИМС и проводятся для каждого типа или группы ИМС, имеющих одинаковое функциональное назначение и конструктивно-технологическое исполнение. Следует отметить, что результаты ресурсных и специальных испытаний не являются основанием для отбраковки ИМС при их приемке.

Испытания на сохранность проводят с целью проверки соответствия ИМС требованиям сохранности, накопления информации о техническом ресурсе по сохраняемости, разработки рекомендаций по повышению сохраняемости, а также для уточнения норм на срок хранения. Испытания на сохранность подвергаются ИМС, прошедшие испытания по контролю качества.

Кроме рассмотренных категорий испытаний в производстве ИМС особое место занимают так называемые *технологические испытания*, которые имеют большое значение в практике исследования и повышения качества ИМС. Целью технологических испытаний является своевременная отбраковка потенциально ненадежных ИМС. Их состав и последовательность проведения базируются на использовании существующих видов испытаний и методике их проведения.

По характеру воздействий испытания ИМС классифицируют на конструктивные, электрические, механические, климатические и радиационные.

Конструктивные испытания включают в себя испытания конструкции ИМС в целом и отдельных ее узлов. В конструктивные испытания входят: проверка габаритных и присоединительных размеров, массы и внешнего вида, механической прочности выводов и соединений, качества антикоррозионных покрытий, герметичности, светонепроницаемости и др.

Электрические испытания предназначены для проверки работоспособности ИМС и стабильности их параметров в различных рабочих режимах. Работоспособность ИМС проверяют путем тренировки. Различают два способа тренировки: электрический и термоэлектрический. При электрической тренировке ИМС включают в электрическую схему с максимально допустимыми электрическими параметрами (токами и напряжениями), где выдерживают определенное время в соответствии с ТУ. Термоэлектрическую тренировку ИМС проводят при максимально допустимой повышенной температуре в предельном электрическом режиме.

Механические испытания заключаются в испытании ИМС на виброустойчивость, вибропрочность, ударную прочность, воздействие линейных нагрузок. Испытания на воздействие механических нагрузок осуществляют при жестком креплении ИМС к платформам испытательных стендов, чтобы воздействие нагрузки передавалось испытуемым ИМС с минимальной амортизацией. Обычно механические испытания проводят в двух взаимно-перпендикулярных положениях (наиболее опасных для ИМС), указываемых в ТУ. Время воздействия и параметры механических нагрузок устанавливают в зависимости от назначения испытаний.

Климатические испытания включают в себя испытания на тепло- и холодоустойчивость при эксплуатации и транспортировке, влагостойкость, устойчивость к воздействию пониженного и повышенного атмосферного давления и морского тумана.

Радиационные испытания относятся к числу специальных и проводятся путем облучения испытуемых ИМС заданной дозой ионизирующего излучения: гамма-излучения, рентгеновского излучения, потоком нейтронов и т. д.

При проведении механических и климатических испытаний ИМС подвергают измерениям (контролю) электрических параметров — критериев годности до воздействия нагрузки, после ее снятия и во многих случаях в процессе воздействия.

Состав испытаний по видам и порядок их проведения по каждой категории (как контрольных, так и на надежность) определяют для каждого конструктивно-технологического типа ИМС в зависимости от функционального назначения и условий эксплуатации в соответствии с требованиями стандартов или ТУ. Кроме того, состав испытаний каждой категории может быть разделен на отдельные группы, в каждую из которых входит один или несколько видов испытаний. Такое разделение обусловлено прежде всего различием периодичности и планов контроля качества и целесообразностью параллельного или последовательного способа их проведения.

§ 7.5. Стоимость ИМС и БИС

Стоимость ИМС и БИС определяется многими факторами, основными из которых являются: стоимость разработки и изготовления, материалов и оборудования, контроля и испытаний. На стоимость ИМС и БИС существенно влияет процент выхода годных изделий: чем он ниже, тем дороже обходится производство ИМС. Кроме того, чем сложнее ИМС (чем больше в ней элементов), тем она дороже. Поэтому стоимость и выход годных изделий являются взаимосвязанными показателями.

Выход годных изделий и стоимость в определенной степени влияют и на сложность ИМС как факторы, характеризующие целесообразность постоянного повышения степени интеграции для всех типов ИМС и БИС. Поэтому в интегральной микроэлектронике существует еще один технико-экономический показатель — экономически оптимальная степень сложности ИМС.

В производственных условиях процент выхода годных схем определяется простыми расчетами, для чего подсчитывают количество ИМС, соответствующих ТУ, и количество ИМС, забракованных после каждой технологической операции, включая контрольные. Однако важным является прогнозирование процента выхода годных ИМС при разра-

ботке и повышение его в процессе производства. Поскольку выход годных ИМС влияет на их стоимость, в условиях производства микросхем правильный, технически и экономически обоснованный выбор технологических процессов приобретает огромное значение.

Выход годных ИМС зависит в первую очередь от сложности технологического процесса. Чем меньше технологических операций включает в себя типовой технологический процесс, тем выше будет ожидаемый процент выхода годных изделий. Поэтому выход годных гибридных ИМС всегда будет выше, чем полупроводниковых, так как гибридная технология проще. По той же причине выход годных полупроводниковых ИМС на МДП-транзисторах будет выше, чем ИМС на биполярных транзисторах.

В то же время выход годных ИМС, изготавливаемых по одному и тому же технологическому процессу, но на разных заводах-изготовителях, не является постоянным и по мере развития и совершенствования технологии может изменяться в течение определенных промежутков времени. Следовательно, для каждого конструктивно-технологического вида ИМС процент выхода годных изделий зависит от уровня технологии. Уровень технологии влияет также на стоимость ИМС.

Поскольку стоимость ИМС зависит только от степени интеграции, по стоимости отдельных ИМС невозможно установить экономический критерий оптимальности производства, в том числе прогнозируемый процент выхода годных ИМС. При этом пользуются понятием удельной стоимости—средней стоимости одного интегрированного элемента ИМС, что позволяет установить сравнительно простые соотношения между стоимостью и выходом годных ИМС.

При определении экономического оптимума уровень технологии оценивают процентом выхода годных ИМС. При этом необходимо различать выход годных ИМС при формировании структур, для чего используют групповые методы, и выход годных ИМС после сборки. В первом случае уровень технологии можно характеризовать числом дефектов, приходящихся на единицу площади пластины. Такой параметр количественно определяет степень совершенства технологических процессов на каждом этапе групповой обработки. Во втором случае не удастся установить количественные показатели, характеризующие уровень каждой операции сборки. Поэтому этап сборки ИМС характеризуется обобщенным статистическим параметром — выходом год-

ных ИМС после сборки. При этом предполагается, что на сборку поступают подложки с годными структурами.

Стоимость ИМС с учетом групповой технологии и сборки определяется выражением

$$C = \frac{1}{P_2} \left(\frac{C_{пл}}{N} \frac{1}{P_1} + C_{сб} \right), \quad (7.18)$$

где $C_{пл}$ — стоимость групповой обработки одной пластины; $C_{сб}$ — стоимость сборки одной ИМС; P_2 — выход годных ИМС после сборки; P_1 — выход годных кристаллов после групповой обработки; N — число кристаллов на пластине.

Практика показывает, что при существующем уровне технологии наименьшим оказывается выход годных пластин после групповой обработки (P_1). В то же время стоимость пластины $C_{пл}$ велика.

Соотношение величин $C_{пл}$ и $C_{сб}$ зависит от многих факторов, в том числе от объема производства. Естественно, что при увеличении объема производства затраты на изготовление пластин, а следовательно, и на одну ИМС будут снижаться, как показано на рис. 7.2. Следует отметить, что в полную стоимость ИМС входит и стоимость разработки, которая очень часто бывает преобладающей. Снижение этой составляющей

стоимости возможно при использовании машинных методов проектирования. Автоматизация технологических процессов приводит также к снижению стоимости ИМС.

Экономически оптимальную степень сложности ИМС необходимо рассматривать, исходя из стоимости для определенного уровня производства. При этом существенную роль играет площадь, занимаемая ИМС. Выход годных изделий всегда возрастает с уменьшением площади ИМС и БИС.

Поскольку стоимость ИМС и БИС зависит от степени интеграции (определяющей процент выхода годных пла-

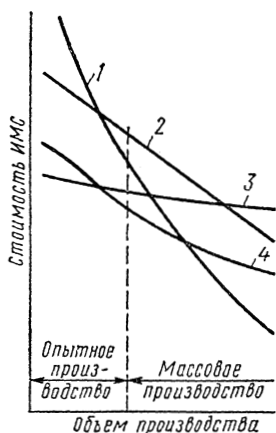


Рис. 7.2. Зависимость стоимости различных типов ИМС от объема производства:

1 — полупроводниковые ИМС; 2 — тонкопленочные ИМС; 3 — схемы на дискретных компонентах; 4 — толстопленочные ИМС

стин), вводят понятие удельной стоимости одного элемента C_0 , которая определяется отношением полной стоимости C ИМС к степени ее интеграции n :

$$C_0 = \frac{C}{n} = \frac{a_0}{A - A_0} C. \quad (7.19)$$

Если A — вся площадь ИМС (БИС), A_0 — площадь ИМС, не занятая элементами, $A_{пл}$ — площадь пластины,

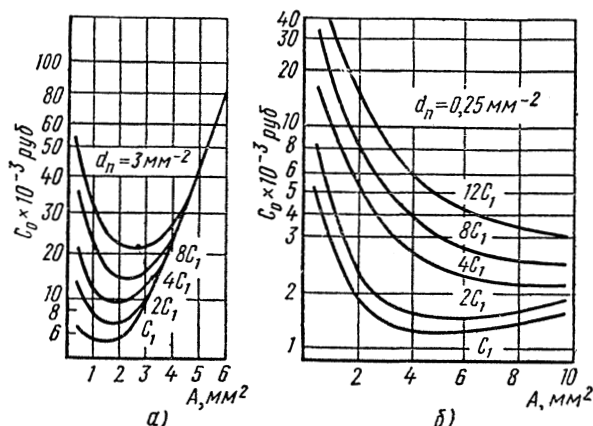


Рис. 7.3. Зависимость удельной стоимости от площади кристалла, стоимости сборки и плотности дефектов

а a_0 — средняя площадь элемента, то с учетом (7.18) удельная стоимость

$$C_0 = \frac{a_0}{A - A_0} \frac{1}{P_2} \left(\frac{C_{пл}}{A_{пл}} A e^{B d_n A} + C_{сб} \right), \quad (7.20)$$

где B — коэффициент поражаемости ИМС дефектом; d_n — плотность дефектов.

Удельная стоимость одного элемента C_0 , рассматриваемая как функция площади A ИМС, принимает минимальное значение при некотором значении площади $A_{опт}$, определяемом из выражения (7.20) путем его дифференцирования:

$$\frac{dC_0}{dA_s} = \frac{C_{пл}}{A_{пл}} e^{B d_n A} [B d_n A (A - A_0) - A_0] - C_{сб} = 0. \quad (7.21)$$

Для оптимального производства величина $A = A_{опт}$, получаемая из (7.21), является оптимальной площадью ИМС. Результаты исследований выражения (7.20) с целью определения $A_{опт}$ для различных уровней производства приведены на рис. 7.3.

При низком уровне технологии (рис. 7.3, а) $d_n = 2 \div 3 \text{ мм}^{-2}$, минимумы C_0 имеют острый характер. Следовательно, как простые, так и относительно сложные ИМС будут приводить к существенному повышению C_0 . В этих условиях разработчик не может создавать ИМС различной функциональной сложности, поскольку лишь узкий диапазон степени интеграции соответствует экономическому производственному оптимуму.

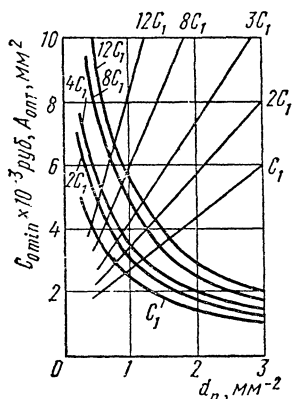


Рис. 7.4. Зависимость минимальной удельной стоимости и оптимальной площади кристалла от стоимости сборки и плотности дефектов

При высоком уровне технологии (рис. 7.3, б) $d_n = 0,25 \div 0,5 \text{ мм}^{-2}$, минимумы C_0 становятся широкими и практически не зависят от площади кристалла при $A = 2 \div 10 \text{ мм}^2$. Это соответствует высокой степени интеграции (до 2000 элементов на один кристалл), и все ИМС лежат в пределах экономического оптимума. В этих условиях разработчик получает большую свободу при выборе функциональной сложности ИМС.

Зависимость минимальной удельной стоимости и оптимальной площади от стоимости сборки и плотности дефектов приведена на рис. 7.4. Видно, что оптимальная площадь ИМС быстро уменьшается при увеличении плотности дефектов, что препятствует достижению желаемых степеней интеграции ИМС.

Следует отметить, что затраты, направленные на улучшение технологии, дадут ощутимый результат лишь при одновременном увеличении степени интеграции. Действительно, улучшение технологии (уменьшение дефектов) сравнительно слабо сказывается на удельной стоимости ИМС среднего уровня интеграции, но может значительно увеличить выход годных и уменьшить удельную стоимость сложных ИМС.

Отметим, что при достижении определенного уровня выхода годных кристаллов по пластине относительная стоимость сборки возрастает. Поэтому при высоком проценте выхода годных кристаллов основным путем снижения стои-

мости ИМС, определяемой в основном стоимостью сборки, корпуса и контрольно-измерительных операций, является автоматизация процессов сборки, герметизации и контроля.

§ 7.6. Пути повышения качества и надежности ИМС

Надежность ИМС закладывается при проектировании, обеспечивается при изготовлении и поддерживается в эксплуатации. Исходя из этого, надежность ИМС можно условно представить состоящей из конструктивной (проектной), производственной и эксплуатационной надежности.

Конструктивная надежность определяет уровень потенциальной надежности ИМС, обусловливаемой выбранными схемотехническими решениями, топологией и технологией. Другими словами, это потенциальная надежность, которая обеспечивается конкретной совокупностью элементов, схемно связанных между собой в единый функциональный узел.

Производственная надежность обусловлена данным уровнем производства. Она определяется: степенью автоматизации производственных процессов и контрольных операций; квалификацией персонала; уровнем технологической дисциплины; качеством и эффективностью контроля за соблюдением технологии и поддержанием на требуемом уровне культуры производства; действенностью входного контроля исходных материалов, энергоносителей и полуфабрикатов; наличием и эффективностью системы отбраковки потенциально ненадежных образцов; своевременностью и эффективностью контроля качества и надежности; анализом отказов и управлением производственными процессами.

Эксплуатационная надежность определяется в эксплуатации, когда на ИМС действуют одновременно несколько эксплуатационных факторов. На эксплуатационную надежность влияют электрические режимы, условия работы схем в радиоэлектронных устройствах, наличие и степень резервирования в аппаратуре.

Несмотря на то что ИМС по своей природе более надежны, чем аналогичные схемы на дискретных компонентах, возрастающая функциональная сложность микроэлектронной аппаратуры, различные области применения микросхем, повышение степени интеграции элементов требуют повышения качества и надежности ИМС.

Технические пути повышения надежности ИМС могут быть разными: развитие научных основ проектирования из-

делий (аппаратуры) с целью обеспечения заданных требований к надежности и долговечности, принятие ряда мер по совершенствованию методов конструирования, улучшение технологии, применение более надежных материалов и комплектующих изделий, использование специальных приемов, изучаемых теорией надежности (например, резервирования), и др. Результаты испытаний микросхем на надежность и

прогнозирование надежности показывают, что очень полезным инструментом для повышения надежности ИМС, особенно тех, которые должны иметь высокую надежность, является анализ отказов. Анализ отказов на основе механизмов, возникающих при ускоренных испытаниях ИМС на надежность, требует понимания физики отказов.

Анализ отказов ИМС и БИС различного конструктивно-технологического исполнения показывает, что для современного этапа развития микроэлектроники характерно преобладание полных отказов (до 80 % от общего их количества), вызванных разрушением элементов конструкций из-за несовершенства технологических операций, нарушений или ошибок в процессе производства, несоблюдения требований нормативно-технической документации. Обобщенные результаты анализа отказов полупроводниковых ИМС и БИС в условиях эксплуатации с указанием их видов и причин приведены на рис. 7.5.

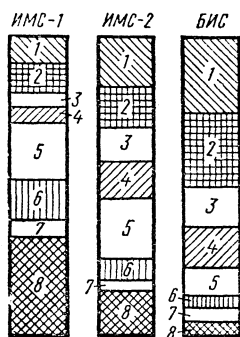


Рис. 7.5. Зависимость относительного распределения отказов ИМС и БИС, обусловленных дефектами:

1 — металлизация; 2 — диффузии; 3 — из-за наличия инородных частиц; 4 — из-за неопознанных причин; 5 — кристалла и окисла; 6 — герметизации и приварки; 7 — кристаллодержателя; 8 — из-за неправильного применения

Дальнейшее повышение надежности ИМС требует выяснения причин отказа или ухудшения рабочих характеристик схем и устранения этих причин или ослабления их действия. Причем вначале из всех возможных отказов следует выделить отказы, наиболее типичные для микросхем, т. е. обусловленные физикой поверхности, нарушением кристаллической структуры полупроводника, химическим взаимодействием различных материалов, несовершенством термокомпрессии и сварки, усадкой компаунда при герметизации, механическими повреждениями схемы, а затем определить и устранить их причины.

Так как надежность ИМС, заложенная при проектировании, должна быть обеспечена в процессе их изготовления, то выбор технологии и ее совершенствование являются во многом определяющими при разработке высоконадежных микросхем. Поэтому достичь высокой надежности изделий микроэлектроники можно путем реализации единой системы мероприятий, включающих:

- оптимизацию проектирования микросхем по критерию надежности;

- использование оптимального построения технологического процесса, исходя из принципа контролируемости каждой технологической операции;

- применение систем автоматизированного управления качеством технологического процесса изготовления микросхем;

- тщательный анализ отказов микросхем при испытаниях и эксплуатации.

Необходимым условием обеспечения высокой надежности при реализации данных мероприятий является введение рациональной системы контроля качества исходных материалов, полуфабрикатов, элементов, комплектующих изделий и микросхем в целом на этапах разработки, при опытном и серийном производстве, при всех видах испытаний и эксплуатации. Естественно, что такая система контроля качества должна базироваться на комплексе методов разрушающих и неразрушающих испытаний при обязательном исследовании физики отказов.

Особое место среди мероприятий, обеспечивающих выпуск высококачественных изделий, занимают *технологические испытания* интегральных микросхем. Главной целью их является своевременное выявление дефектных ИМС на всех этапах изготовления. Технологические испытания включают термоциклирование, испытание на вибропрочность, центрифугирование, высокотемпературное старение, проверку герметичности и термотоковую тренировку. В процессе этих испытаний выявляются образцы, имеющие производственные дефекты. От объема испытаний и степени жесткости режимов зависят количество и степень опасности выявляемых дефектов и число отбракованных ИМС. Кроме того, при этом получают информацию, необходимую для управления производственным процессом. Технологические испытания подразделяются на собственно технологические, проводимые в процессе изготовления ИМС, и отбраковочные, проводимые на готовых микросхемах.

Отбраковка в процессе изготовления ИМС включает в себя операции разбраковки структур по электрическим параметрам, отбраковки поврежденных структур посредством визуального контроля и, наконец, контроль собранных и испытанных на центрифуге ИМС перед их герметизацией. На последнем этапе контроля выявляется основная часть дефектных микросхем, обычно отказывающих в экс-

плутации из-за дефектов соединительных выводов, обрывов контактных соединений и внутрисхемной разводки, коротких замыканий проволочных выводов между собой и на другие элементы ИМС, царапин и загрязнений поверхности структуры, дефектов кристаллической структуры, неправильного монтажа кристалла на основании корпуса, наличия инородных частиц и др.

Роль отбраковочных испытаний заключается в своевременном выявлении и устранении из всей выпускаемой продукции ИМС, имеющих скрытые производственные дефекты, для выявления которых требуется более продолжительное время и более высокие уров-



Рис 7.6. Основные пути повышения качества и надежности ИМС

ни нагрузки, чем при технологических испытаниях. Кроме того, при этом выбраковываются образцы, у которых дефекты появились после герметизации. Большинство дефектов этой категории выявляется лишь при продолжительном воздействии термоэлектронной нагрузки. Поэтому ИМС с подобными дефектами являются потенциально ненадежными.

Эффективность программы отбраковки потенциально ненадежных микросхем зависит от многих факторов и должна оцениваться с учетом экономической целесообразности. Помимо экономической целесообразности при определении оптимальной программы отбраковочных испытаний необходимо исходить из соображений обеспечения гарантии сохранности хороших ИМС. Известно, что такие испытания, как термоциклирование, испытания на вибропрочность и влагостойкость и др. в ряде случаев являются ресурсными. Чрезмерно жесткие режимы проведения подобных испытаний, включенных в состав отбраковочных, могут привести к обратному эффекту — выработке ресурса и снижению надежности хороших ИМС.

В обобщенном виде комплекс организационных, производственных и научно-технических мероприятий, выполняемых на основе системного подхода для повышения качества и надежности ИМС и БИС, можно представить, как показано на рис. 7.6.

В промышленных условиях задач обеспечения и повышения качества и надежности занимаются специально предназначенные для этого службы. Главным для обеспечения надежности ИМС при эксплуатации является их правильное применение.

§ 7.7. Основы применения ИМС и БИС

В настоящее время отечественной промышленностью налажен выпуск большого числа различных серий цифровых и аналоговых ИМС и БИС, обладающих высокой надежностью и различающихся методом изготовления, функциональными возможностями и техническими характеристиками. Однако применение высоконадежных ИМС и БИС не всегда автоматически обеспечивает выпуск столь же надежной аппаратуры. Сохранение высокой надежности ИМС и БИС при построении на их основе микроэлектронной аппаратуры и тем самым достижение высокой надежности этой аппаратуры в значительной степени определяются правильностью применения микросхем на всех стадиях разработки, изготовления и эксплуатации аппаратуры. Под правильностью применения ИМС и БИС понимают:

- правильный, наиболее эффективный выбор серии применяемых микросхем;

- выполнение рекомендаций по обеспечению электрического режима и унификации схемных решений;

- обеспечение рекомендуемой методики монтажа;

- использование средств защиты ИМС и БИС от статического электричества, тепловых, механических и других воздействий.

Разумеется, достижение и поддержание максимальной эксплуатационной надежности ИМС и БИС существенно зависят от уровня процессов проектирования аппаратуры, подготовки производства, наладки оборудования, квалификации персонала и других факторов.

Из всех мероприятий, направленных на эффективное применение ИМС и БИС для создания высоконадежной аппаратуры и решаемых на первых этапах ее разработки, наиболее важными являются выбор серии, обеспечение электри-

ческого режима и унификации схемных решений, монтаж микросхем.

Выбор серии ИМС и БИС. При разработке аппаратуры выбор серии микросхем можно осуществлять, пользуясь различными критериями сравнения, значения которых определяются системой основных параметров ИМС (для цифровых ИМС m , n , $P_{\text{ср}}$, $K_{\text{п}}$, $t_{\text{з.р.ср}}$).

В ряде случаев, обусловленных спецификой разрабатываемой аппаратуры, к этим критериям относят массу, габаритные размеры, тип корпуса, степень интеграции, радиационную стойкость, стоимость ИМС и др. Из всей совокупности определяют минимальный набор указанных критериев, по которым производят выбор серии ИМС. Однако при таком подходе может оказаться, что выбранная серия ИМС не дает оптимального решения. Более правильный результат при выборе серии ИМС можно получить, используя коэффициенты важности для основных параметров ИМС. При этом предпочтение отдается той серии ИМС, параметры которой обладают максимальным коэффициентом важности. Однако данный подход не учитывает всю совокупность параметров ИМС в их взаимосвязи.

Поэтому при выборе серии ИМС часто используют обобщенные параметры, определяемые комбинацией основных параметров ИМС. Наиболее часто такими параметрами являются:

фактор качества ИМС $k = P_{\text{ср}} t_{\text{з.р.ср}}$;

добротность $Q = \sqrt{U_{\text{п}}^+ U_{\text{п}}^-} / k$ при $m = \text{const}$, $n = \text{const}$;

коэффициент использования питания — отношение минимальной мощности распространения сигнала к средней мощности, потребляемой ИМС.

Использование обобщенных критериев, хотя и облегчает выбор ИМС, не учитывает ряда характеристик как самих ИМС, так и разрабатываемой аппаратуры.

Наиболее эффективным является выбор серии ИМС по специальной методике, основанной на проведении сравнительной оценки по параметрам, характеризующим производственные и потребительские качества той или иной серии ИМС. Тем самым достигается оптимальный выбор по конструктивным, технологическим, эксплуатационным и экономическим параметрам. Сущность методики заключается в следующем. Вначале определяют состав сравниваемых параметров, которые подразделяются на две группы.

К первой группе относятся параметры, характеризующие качество ИМС и содержащиеся в технической докумен-

тации на нее: устойчивость к различным воздействиям, основные электрические параметры и режимы, функциональные параметры, показатели надежности, функциональная сложность, стоимость, количество выводов и др.

Ко второй группе относятся параметры, определяемые возможностями устройств на ИМС той или иной серии и содержащиеся в конструкторской документации на устройство: максимальная частота работы, надежность, потребляемая мощность, стоимость, объем, масса и др.

После определения состава параметров обеих групп для каждой серии их сводят в матрицу параметров вида

$$\mathbf{X} = \begin{vmatrix} x_{11}, & x_{12}, \dots, & x_{1m} \\ x_{21}, & x_{22}, \dots, & x_{2m} \\ \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & x_{ij}, & \cdot & \cdot \\ x_{n1}, & x_{n2}, \dots, & x_{nm} \end{vmatrix}, \quad (7.22)$$

где $i = 1, 2, \dots, n$ — номер серии ИМС; $j = 1, 2, \dots, m$ — номер учитываемого параметра.

Затем каждому параметру x_{ij} присваивают весовой коэффициент b_j , значение которого определяется типом аппаратуры и условиями эксплуатации, причем $\sum_{j=1}^m b_j = 1$. При этом параметры матрицы $\mathbf{X}$ приводят к такому виду, чтобы большему численному значению параметра соответствовало лучшее качество серии ИМС. Параметры, не удовлетворяющие этому условию, пересчитывают по формуле

$$y_{ij} = 1/x_{ij}. \quad (7.23)$$

В результате получают матрицу приведенных параметров:

$$\mathbf{Y} = |y_{ij}|. \quad (7.24)$$

После этого производят нормирование параметров матрицы $\mathbf{Y}$ по максимальному значению j параметра $y_{\max j}$:

$$\alpha_{ij} = (y_{\max j} - y_{ij})/y_{\max j} \quad (7.25)$$

и получают матрицу нормированных параметров:

$$\mathbf{A} = |\alpha_{ij}|. \quad (7.26)$$

Используя оценочную функцию

$$\varphi_i = \sum_{j=1}^m \alpha_{ij} b_j, \quad (7.27)$$

определяют ее значение для каждой серии ИМС. Серию ИМС, для которой значения φ_i минимальны, признают оптимальной.

Особенностью данной методики является необходимость в схемно-конструкторской документации на разрабатываемую аппаратуру. В случае ее отсутствия, как это часто имеет место при разработке, проводят предварительный анализ функционального состава по данным аналогичной аппаратуры с целью определения примерного содержания типовых функциональных схем, либо устанавливают их на основе разработки типового узла (устройства).

Применение данной методики позволяет осуществить выбор серии ИМС, оптимально удовлетворяющей требованиям разработчика, изготовителя и потребителя аппаратуры.

Обеспечение электрического режима. Вопросы практического применения ИМС и БИС оговорены в нормативно-технической документации, в частности в руководствах по применению. Такие руководства, как правило, разрабатываются для каждой серии ИМС и БИС. В них приводятся как электрические параметры с описанием принципа работы и общие рекомендации по применению ИМС, так и конкретные схемные решения, которые способствуют сокращению времени на проектирование и унификации схемных решений. В руководствах по применению содержатся также рекомендации по конструированию ячеек и аппаратуры на ИМС и выбору наиболее целесообразных схемных решений для аппаратуры определенного функционального назначения.

Для цифровых ИМС на биполярных транзисторах (типа ТТЛ) обеспечение электрического режима достигается комплексом мероприятий по размещению ИМС на плате, их соединению с другими ИМС, реализации электрических связей и режимов питания. В частности, необходимо одновременно переключающиеся элементы размещать в разных корпусах микросхем и подключать их к различным шинам разводки питания и земли. При этом шины питания и земли должны занимать большую площадь по сравнению с сигнальными шинами. Сигнальные шины по возможности должны быть короткими. Для уменьшения рассеиваемой мощности и повышения помехоустойчивости неиспользованные входы ИМС следует заземлить, а для получения максимального быстродействия их нужно объединить с рабочими входами. Для подачи на вход логической «1» можно использовать его соединение через резистор с источником питания. Не рекомендуется подключать входы к низкоомным источникам.

Электрические связи между ИМС выполняют печатным или печатно-проводным монтажом.

Для ИМС на МДП-транзисторах и их модификаций требуется соблюдение следующих правил.

Запрещается подведение каких-либо электрических сигналов, в том числе напряжений питания, к корпусу и к неиспользованным выводам ИМС. Пайку необходимо начинать с вывода «Источник питания», а пайку остальных выводов производить в любой последовательности.

Все неиспользованные входы ИМС должны соединяться с выводом «Источник питания» или «Общий» в зависимости от выполняемой логической функции. В любых режимах работы напряжения на входах ИМС не должны превышать напряжение на выводе «Источник питания». Электрическую схему устройства необходимо разрабатывать так, чтобы обеспечить первоочередное относительно напряжения питания включение входных сигналов и первоочередное относительно входных сигналов включение источника. Электрические линии связи между ИМС внутри блоков могут быть выполнены печатным или проводным монтажом с сечением не менее $0,05 \text{ мм}^2$. При смешанном монтаже проводники следует прокладывать перпендикулярно печатным проводникам. При этом длина соединительных проводников должна быть минимальной. В то же время система шин питания и общих должна иметь минимально возможные сопротивление и индуктивность при возможно большей емкости. Для этого нужно увеличивать ширину печатных шин до 2,5 мм.

В каждом блоке в цепях питания ИМС необходимо устанавливать развязывающие конденсаторы, а для фильтрации по НЧ и ВЧ — и фильтрующие конденсаторы.

Соблюдение требований по обеспечению электрического режима и унификации схемных решений обеспечивает надежное функционирование ИМС и БИС в составе аппаратуры.

Монтаж ИМС и БИС. Основными операциями монтажа ИМС и БИС являются резка, формовка и лужение выводов, установка корпуса ИМС на печатные платы, пайка.

Резку и формовку выводов осуществляют на определенном расстоянии от корпуса (не менее 1 мм), с тем чтобы не нарушать герметичности паяного соединения токовывода с корпусом. Формовке подвергают, как правило, ИМС в корпусах с планарными выводами, для чего используют специальные полуавтоматические штампы. При формовке должны быть соблюдены допустимые радиусы изгибов (не менее

двух толщин вывода), а прикладываемые усилия растяжения не должны превышать установленных значений.

При лужении выводов не допускается касание припоя гермовводов корпуса, керамических и стеклянных частей корпуса ИМС. Граница растекания припоя по выводам должна быть не ближе чем на расстоянии 1 мм от корпуса ИМС.

Установку корпусов ИМС на печатные платы осуществляют с учетом обеспечения механической прочности при воздействии механических нагрузок и эффективного отвода тепла за счет конвекции воздуха. При этом допускается устанавливать ИМС вплотную на печатную плату, на промежуточную прокладку или с зазором 0,3—3 мм в зависимости от типа корпуса. Планарные корпуса рекомендуется приклеивать по всей плоскости основания.

Пайку выводов (в металлизированные отверстия или на контактные площадки платы) следует проводить при постоянной температуре в контролируемом режиме, не допуская перегрев зоны контактирования и корпуса ИМС.

Таким образом, оптимальный выбор серии ИМС и выполнение рекомендаций по применению ИМС и БИС обеспечивают создание аппаратуры на их основе с надежностью, близкой к надежности самих ИМС и БИС.

Контрольные вопросы

1. Что такое качество ИМС?
2. Какими параметрами оценивают качество ИМС?
3. Дайте определение надежности ИМС.
4. Назовите количественные показатели надежности ИМС.
5. Дайте определение количественных показателей надежности ИМС.
6. Какими факторами обусловлена высокая надежность ИМС и БИС?
7. Как осуществляется контроль качества ИМС в производстве?
8. Какие виды производственного контроля качества вы знаете?
9. Как оценивают надежность ИМС и БИС?
10. Как определяют количественные показатели надежности экспериментальным путем?
11. Как классифицируют испытания ИМС по цели и назначению?
12. Какие категории испытаний проводят для оценки качества ИМС? Дайте их характеристику.
13. Какие существуют категории испытаний на надежность?
14. Дайте характеристику испытаний по видам.
15. Как проводят испытания ИМС?
16. Какие основные факторы влияют на стоимость ИМС?
17. Как определяют стоимость ИМС?
18. Что такое удельная стоимость и как она определяется?

19. Дайте характеристику основных путей повышения качества и надежности ИМС и БИС.

20. Какие организационные, производственные и научно-технические мероприятия направлены на повышение качества и надежности ИМС и БИС?

21. Какими факторами обусловлена эффективность применения ИМС и БИС?

22. Как осуществляют выбор серии ИМС?

23. Как обеспечивается рекомендуемый электрический режим ИМС и БИС?

24. В чем особенности монтажа ИМС и БИС? Какие требования при этом необходимо выполнять?

Глава 8

ФУНКЦИОНАЛЬНАЯ МИКРОЭЛЕКТРОНИКА

§ 8.1. Основные направления развития функциональной микроэлектроники

В основе создания ИМС лежит принцип элементной (технологической) интеграции, сопровождающейся микроминиатюризацией элементов (активных и пассивных) микросхемы. В ИМС можно выделить области, представляющие собой активные (диоды, транзисторы) и пассивные (резисторы, конденсаторы, индуктивные катушки) элементы. В интегральной микроэлектронике сохраняется основной принцип дискретной электроники, основанный на разработке электрической схемы по законам теории цепей. Этот принцип неизбежно связан с ростом числа элементов микросхемы и межэлементных соединений по мере усложнения выполняемых ею функций.

Повышение степени интеграции микросхем и связанное с этим уменьшение размеров элементов имеет определенные пределы. Интеграция свыше нескольких сотен тысяч элементов на одном кристалле оказывается экономически нецелесообразной и технологически трудно выполнимой. Сложными становятся проблемы топологии и теплоотвода. Поэтому в отдаленной перспективе интегральная микроэлектроника уже не будет полностью удовлетворять разработчиков сложной радиоэлектронной аппаратуры.

Функциональная микроэлектроника предлагает принципиально новый подход, позволяющий реализовать определенную функцию аппаратуры без применения стандартных базовых элементов, основываясь непосредственно на

физических явлениях в твердом теле. В этом случае локальному объему твердого тела придаются такие свойства, которые требуются для выполнения данной функции, и промежуточный этап представления желаемой функции в виде эквивалентной электрической схемы не требуется. Функциональные микросхемы могут выполняться не только на основе полупроводников, но и на основе сверхпроводников,

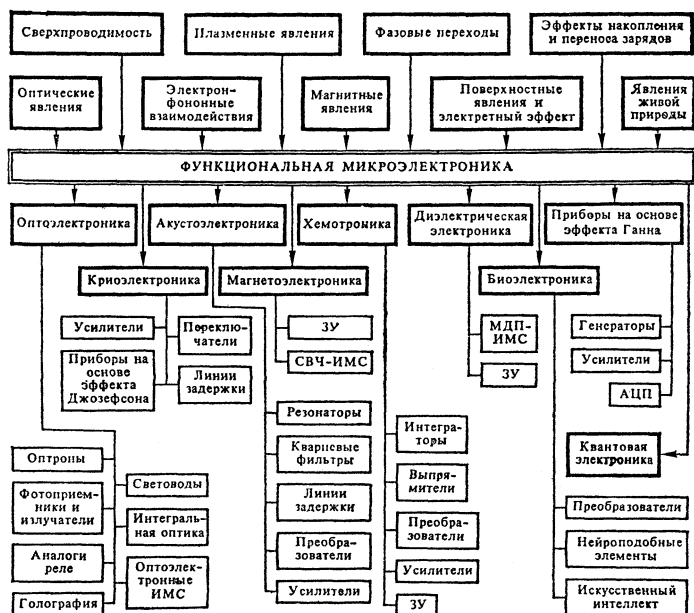


Рис. 8.1. Основные направления развития функциональной микро-
электроники

сегнетоэлектриков, материалов с фотопроводящими свойствами и др. Для переработки информации можно использовать явления, не связанные с электропроводностью (например, оптические и магнитные явления в диэлектриках, закономерности распространения ультразвука и т. д.).

В функциональной микроэлектронике начинают использовать (рис. 8.1):

1. Оптические явления (когерентная и некогерентная оптика, нелинейная оптика, электрооптика, магнетооптика).

Их свойства, связанные со свойствами светового потока, следующие:

зарядовая нейтральность, однонаправленность, отсутствие гальванических связей и электрических контактов; двумерность светового потока и, следовательно, возможность многоканальной обработки информации;

высокая несущая частота, а значит, большая полоса пропускания каналов обработки информации.

Эти особенности стали основой интенсивно развивающегося направления функциональной микроэлектроники — *оптоэлектроники*.

2. Физические явления, связанные с взаимодействием потока электронов с акустическими волнами в твердом теле. Такие явления, как генерация и усиление акустических волн потоком электронов, движущихся со сверхзвуковыми скоростями, обусловили появление нового направления функциональной микроэлектроники — *акустоэлектроники*. Особенность этих явлений заключается в малой скорости распространения акустических волн ($1 \cdot 10^5$ см/с) в отличие от электромагнитных волн ($3 \cdot 10^{10}$ см/с), что позволяет реализовать миниатюрные линии задержки, фильтры с заданными частотными свойствами, а также усилители СВЧ.

Преимущество этого направления состоит в том, что реализация заданной функции обеспечивается лишь выбором конфигурации устройства.

3. Новые магнитные материалы (слабые ферромагнетики и магнитные полупроводники), появление которых привело к созданию нового направления — *магнетоэлектроники*. Отличительной особенностью слабых ферромагнетиков является малая по сравнению с классическими магнитными материалами намагниченность насыщения. Это дает возможность управлять движением магнитных доменов, называемых «пузырями», — в двух и трех измерениях слабыми магнитными полями и осуществлять тем самым функции хранения, перемещения и обработки больших объемов информации.

Характерные размеры «пузырей», составляющие примерно 1 мкм, позволяют достичь высокой плотности записи информации ($1 \cdot 10^8$ бит/см²). Большое преимущество таких систем состоит в том, что хранение информации осуществляется без питания, а перемещение «пузырей» — с малым рассеянием мощности. Ряд новых материалов — магнитных полупроводников, обладающих свойствами

магнетиков и полупроводников, — позволяет создавать приборы с большей функциональной гибкостью.

4. Покоящиеся и движущиеся электрические неоднородности (домены и шнуры) в однородных полупроводниках. Их исследование стимулировало создание функциональных интегральных микросхем.

Так как в данном случае используется однородный материал, то реализация заданной функции может быть достигнута выбором соответствующей конфигурации устройства. Высокие скорости движения неоднородностей электрического поля ($1 \cdot 10^7$ см/с) обуславливают высокое быстродействие (менее $1 \cdot 10^{-9}$ с), а также генерацию и усиление в диапазоне СВЧ.

5. Явления, связанные с изменением структуры конденсированных тел на молекулярном уровне. Они привели к возникновению нового направления — *квантовой микроэлектроники*. К этому направлению относятся фазовые переходы в твердых телах и жидких кристаллах, сопровождающиеся резкими изменениями электрических, оптических и магнитных свойств. Обусловленная этим высокая чувствительность к внешним воздействиям позволяет легко осуществлять ряд операций по управлению и преобразованию потоков информации в различных функциональных системах.

Интересными материалами с еще не вполне раскрытыми перспективами использования их в микроэлектронике являются органические полупроводники.

Микроэлектронные устройства с применением доменов обладают высокими функциональными возможностями.

6. Приборы на основе эффекта Ганна. Помимо генераторов и усилителей СВЧ они позволяют создавать такие функциональные устройства, как импульсно-кодовые модуляторы, компараторы, аналого-цифровые преобразователи, нейристорные линии задержки, полный ряд логических элементов, генераторы колебаний сложной формы, регистры сдвига и запоминающие устройства (ЗУ). На основе этих элементов могут быть созданы сверхбыстродействующие микросхемы (теоретически до 10^{-12} с), превосходящие по быстродействию лучшие кремниевые ИМС, по крайней мере, на порядок при том же уровне рассеиваемой мощности.

Малогабаритные СВЧ-генераторы на диодах Ганна уже миновали стадию лабораторных разработок. Они обладают низким уровнем шумов (сравнимым с клистронами) и мощностью излучения, достаточной для использования их

в радиолокационных устройствах в диапазоне частот 1 — 80 ГГц. Такие диоды в пролетном режиме генерации обеспечивают выходную мощность 20 — 350 мВт в непрерывном режиме и 1 — 400 Вт в импульсном режиме. В режиме ограниченного накопления объемного заряда диоды Ганна позволяют получать импульсную мощность 3 — 6 кВт на частоте 1,5 — 2 ГГц при к. п. д. 10 — 20%.

7. Явления холодной эмиссии, которые позволили создать электровакуумные приборы в микроэлектронном исполнении с применением пленок. Обладая всеми преимуществами вакуумных приборов (высокие входные сопротивления, малые шумы), они характеризуются очень высокой радиационной стойкостью, весьма малыми размерами, высокими рабочими частотами.

8. Явления живой природы, в частности, на молекулярном уровне, позволяющие использовать принципы хранения и обработки информации в живых системах для создания сверхсложных систем обработки информации, приближающихся по своим функциональным возможностям к человеческому мозгу (искусственный интеллект), а также решать проблему эффективной связи «человек—машина». Эти явления открывают новое направление — *биоэлектронику*. Развитие этого направления может привести к научно-технической революции в электронике, последствия которой трудно предвидеть.

9. Приборы на основе эффектов накопления и переноса зарядов, позволяющие реализовать плотность размещения элементов $3 \cdot 10^4$ элемент/см². Такие приборы, по существу представляют собой МДП-структуры, они довольно технологичны (число технологических операций в два раза меньше по сравнению с обычной МДП-технологией). Приборы с переносом заряда (ППЗ), или приборы с зарядовой связью (ПЗС), могут стать основой построения логических схем, линий задержки, схем памяти и систем для получения изображений. Сравнительная простота технологии изготовления ПЗС по сравнению с системами на обычных МДП-транзисторах и почти десятикратное уменьшение площади схемы ($\sim 0,0016$ мм² на 1 бит информации) должны привести к существенному снижению стоимости систем на ПЗС. Использование полевых транзисторов с нитридом кремния в качестве диэлектрика затвора позволяет преодолевать один из основных недостатков полупроводниковых ЗУ — потерю информации при отключении питания. Такие ЗУ дают

возможность реализовать плотность размещения элементов до 10^8 элементов/см² при времени записи 10^{-6} с.

Другой тип управления электрическими неоднородностями в однородном материале — помещение зарядов в потенциальные ямы в приэлектродной области. И здесь выполнение заданных функций достигается топологией контактов. Очень перспективно объединение методов, сочетающих заряд в потенциальных ямах с захватом и хранением заряда в поверхностном слое (электретный эффект), что позволяет совместить длительное хранение больших объемов информации и ее обработку.

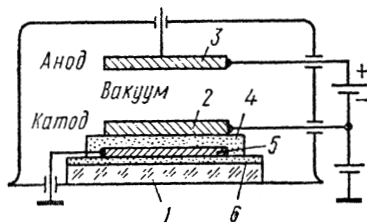


Рис. 8.2. Структура ненакаляемого пленочного эмиттера:

1 — подложка; 2 — алюминий, золото или вольфрам; 3 — золото; 4 — SiO_2 или Al_2O_3 ; 5 — алюминий; 6 — грунтуемый подслей из SiO_2

10. Аморфные материалы (не имеющие кристаллического строения), обладающие симметричной S-образной вольт-амперной характеристикой. Переключатели, созданные на их основе, имеют время переключения $1,5 \cdot 10^{-10}$ с.

На основе элементов из халькогенидных стекол создано постоянное ЗУ на 256 бит с возможностью электрической перезаписи и высокой плотностью упаковки структуры, сравнимой с достигнутой в биполярной и МДП-технологии. Емкость ЗУ может возрасти до 10^6 бит. Эти приборы обеспечивают хранение информации без расхода энергии и считывание без разрушения, обладают симметричностью вольт-амперных характеристик и высокой радиационной стойкостью.

На базе аморфных полупроводников развиваются перспективные приборы — туннельные пленочные эмиттеры (рис. 8.2). По внешнему виду они почти не отличаются от конденсаторных структур типа металл — диэлектрик — металл, однако, принцип их работы иной. Пленка диэлектрика очень тонкая, способная пропускать токи до 0,01 А, верхний электрод также достаточно тонкий (не более 50 нм). Принцип работы пленочных эмиттеров следующий. Электроны из катода (толщиной порядка 0,5 мкм) попадают в диэлектрик и в зависимости от толщины аморфной пленки диэлектрика разгоняются в нем до больших скоростей, либо рассеиваются со значительными потерями энергии.

Толщину диэлектрика выбирают минимальной, однако такой, чтобы сохранилась сплошная структура пленки и не было частичных микропробоев диэлектрика. Рабочая толщина диэлектрика обычно не превышает 40 нм. Так называемые «горячие» электроны просачиваются через потенциальный барьер и мигрируют через наружный электрод в вакуум. Пленочная структура металл — диэлектрик — металл фактически выполняет функцию холодного катода, который в отличие от обычных катодов почти не шумит, обладает повышенной радиационной стойкостью и очень малыми размерами при большом токе эмиссии с единицы поверхности.

11. Приборы на основе эффекта Джозефсона. Суть этого эффекта состоит в том, что через достаточно тонкую (порядка 2 нм) диэлектрическую прослойку между сверхпроводящими слоями при низких температурах в отсутствие разности потенциалов может протекать своеобразный туннельный ток, легко управляемый сравнительно слабыми внешними сигналами. Параметры приборов, основанных на эффекте Джозефсона, значительно превышают соответствующие параметры приборов интегральной микроэлектроники. Исследования показали, что быстродействие отдельных приборов, основанных на эффекте Джозефсона, достигает 20 — 30 пс, а мощность рассеяния равна 100 нВт, т. е. во много раз меньше, чем в обычных ИМС. Основная трудность при изготовлении таких приборов — получение стабильного диэлектрика при толщинах порядка 2 нм.

Рассмотрим более подробно некоторые направления развития функциональной микроэлектроники.

§ 8.2. Оптоэлектроника

Оптоэлектроника является важной самостоятельной областью функциональной электроники и микроэлектроники. Оптоэлектронный прибор — это устройство, в котором при обработке информации происходит преобразование электрических сигналов в оптическое и обратно.

Существенная особенность оптоэлектронных устройств состоит в том, что элементы в них оптически связаны, а электрически изолированы друг от друга. Благодаря этому легко обеспечивается согласование высоковольтных и низковольтных, а также высокочастотных и низкочастотных цепей. Кроме того, оптоэлектронным устройствам присущи и другие преимущества: возможность пространственной

модуляции световых пучков, что в сочетании с изменениями во времени дает три степени свободы (в чисто электронных цепях две); возможность значительного ветвления и пересечения световых пучков в отсутствие гальванической связи между каналами; большая функциональная нагрузка световых пучков ввиду возможности изменения многих их параметров (амплитуды, направления, частоты, фазы, поляризации).

Оптоэлектроника охватывает два основных независимых направления — оптическое и электронно-оптическое. Оптическое направление базируется на эффектах взаимодействия твердого тела с электромагнитным излучением. Оно опирается на голографию, фотохимию, электрооптику и др. Оптическое направление иногда называют лазерным.

Электронно-оптическое направление использует принцип фотоэлектрического преобразования, реализуемого в твердом теле посредством внутреннего фотоэффекта, с одной стороны, и электролюминесценции — с другой. В основе этого направления лежит замена гальванических и магнитных связей в традиционных электронных цепях оптически. Это позволяет повысить плотность информации в канале связи, его быстродействие, помехозащищенность.

Для микроэлектроники представляет интерес в основном электронно-оптическое направление, которое позволяет решить главную проблему интегральной микроэлектроники — существенное уменьшение паразитных связей между элементами как внутри одной ИМС, так и между микросхемами. На оптоэлектронном принципе могут быть созданы безвакуумные аналоги электронных устройств и систем: дискретные и аналоговые преобразователи электрических сигналов (усилители, генераторы, ключевые элементы, элементы памяти, логические схемы, линии задержки и др.); преобразователи оптических сигналов — твердотельные аналоги электронно-оптических преобразователей, видеоконвертеров, электронно-лучевых преобразователей (усилители света и изображения, плоские передающие и воспроизводящие экраны); устройства отображения информации (индикаторные экраны, цифровые табло и другие устройства картинной логики).

Основным структурным элементом оптоэлектроники является оптрон. Различают оптроны с внутренней (рис. 8.3, а) и внешними (рис. 8.3, б) фотонными связями. Простейший оптрон представляет собой четырехполюсник (рис. 8.3, а), состоящий из трех элементов: фотоизлучателя 1, свето-

вода 2 и фотоприемника 3, заключенных в герметичном светонепроницаемом корпусе. При подаче на вход электрического сигнала в виде импульса или перепада входного тока возбуждается фотоизлучатель. Световой поток по световоду попадает в фотоприемник, на выходе которого образуется электрический импульс или перепад выходного тока. Этот тип оптрона является усилителем электрических сигналов, в нем внутренняя связь фотонная, а внешние — электрические.

Другой тип оптрона — с электрической внутренней связью и фотонными внешними связями (рис. 8.3, б) — является усилителем световых сигналов, а также преобразователем сигналов одной частоты в сигналы другой частоты, например сигналов инфракрасного излучения в сигналы видимого спектра. Приемник света 4 преобразует входной световой сигнал в электрический. Последний усиливается усилителем 5 и возбуждает источник света 6.

В настоящее время разработано большое число оптоэлектронных устройств различного назначения. В микроэлектронике, как правило, используются только те оптоэлектронные функциональные элементы, для которых имеется возможность их интеграции, а также совместимость технологии изготовления с технологией изготовления соответствующих интегральных микросхем.

Фотоизлучатели. К источникам света оптоэлектроникой предъявляются такие требования, как миниатюрность, малая потребляемая мощность, высокие эффективность и надежность, большой срок службы, технологичность. Они должны обладать высоким быстродействием, допускать возможность изготовления в виде интегральных устройств.

Наиболее широкое распространение в качестве электролюминесцентных источников получили инжекционные све-

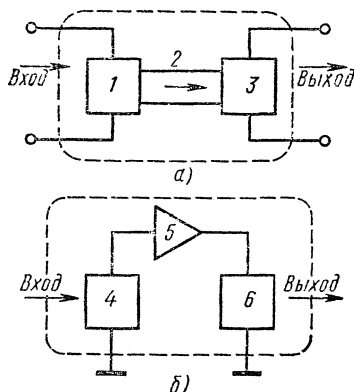


Рис. 8.3. Оптрон с внутренней (а) и внешними (б) фотонными связями:

1, 6 — источники света; 2 — световод; 3, 4 — приемники света; 5 — усилитель

диоды, в которых испускание света определяется механизмом межзонной рекомбинации электронов и дырок.

Если пропускать достаточно большой ток инжекции через p - n -переход (в прямом направлении), то часть электронов из валентной зоны перейдет в зону проводимости (рис. 8.4). В верхней части валентной зоны образуются свободные состояния (дырки), а в нижней части зоны проводимости — заполненные состояния (электроны). Такая инверсная заселенность не является равновесной и приводит к хаотическому испусканию фотонов при обратных переходах электронов. Возникающее при этом в p - n -переходе некогерентное свечение и является электролюминесценцией. Фотон, испускаемый при люминесцентном переходе из заполненной части зоны проводимости

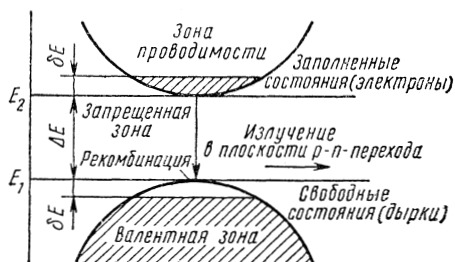


Рис. 8.4. Пояснение принципа действия инжекционного светодиода

в свободную часть валентной зоны, может вызвать индуцированное излучение идентичного фотона, заставив еще один электрон перейти в валентную зону. Однако фотон такой же энергии (от $E = E_2 - E_1$ до $\Delta E + 2\delta E$) не может поглотиться, так как нижнее состояние свободно (в нем нет электронов), а верхнее состояние уже заполнено. Это означает, что p - n -переход прозрачен для фотонов такой энергии, т. е. для соответствующей частоты. Наоборот, фотоны с энергией, большей $\Delta E + 2\delta E$, могут поглощаться, переводя электроны из валентной зоны в зону проводимости. В то же время для таких энергий индуцированное испускание фотонов невозможно, так как верхнее исходное состояние не заполнено, а нижнее — заполнено. Таким образом, вынужденное излучение возможно в узком диапазоне около частоты, соответствующей энергии запрещенной зоны ΔE с шириной спектра δE .

Наилучшими материалами для светодиодов являются арсенид галлия, фосфид галлия, фосфид кремния, карбид кремния и др. Светодиоды имеют высокое быстродействие (порядка 0,5 мкс), но потребляют большой ток (порядка 30 А/см²). В последнее время разработаны светодиоды на основе арсенида галлия — алюминия, мощности которых составляют от долей до нескольких милливатт при прямом

токе в десятки миллиампер. К. п. д. светодиодов не превышает 1 — 3%.

Перспективными источниками света являются инжекционные лазеры, позволяющие концентрировать высокие энергии в узкой спектральной области при высоких к. п. д. и быстродействии (десятки пикосекунд). Эти лазеры можно изготавливать в виде матриц на одном базовом кристалле по той же технологии, что и интегральные микросхемы. Недостатком простых инжекционных лазеров является то, что они имеют приемлемые характеристики лишь при использовании охлаждения до очень низких температур. При нормальной температуре галлий-арсенидовый лазер имеет малую среднюю мощность, низкий к. п. д. (порядка 1%), небольшие стабильность и срок службы. Дальнейшее усовершенствование инжекционного лазера путем создания перехода сложной структуры с использованием гетеропереходов (границы между слоями с одинаковым типом электропроводности, но с разной запрещенной зоной) позволило получить малогабаритный источник света, работающий при нормальной температуре с к. п. д. 10 — 20% и приемлемыми характеристиками.

Дальнейшее усовершенствование инжекционного лазера путем создания перехода сложной структуры с использованием гетеропереходов (границы между слоями с одинаковым типом электропроводности, но с разной запрещенной зоной) позволило получить малогабаритный источник света, работающий при нормальной температуре с к. п. д. 10 — 20% и приемлемыми характеристиками.

Фотоприемники. Для преобразования световых сигналов в электрические используют фотодиоды, фототранзисторы, фоторезисторы, фототиристоры и другие приборы.

Фотодиод представляет собой смещенный в обратном направлении p - n -переход, обратный ток насыщения которого определяется количеством носителей заряда, порождаемых в нем действием падающего света (рис. 8.5). Параметры фотодиода выражают через ток, протекающий в его цепи. Чувствительность фотодиода, которую принято называть интегральной, определяют как отношение фототока к вызвавшему его световому потоку Φ_v . Порог чувствительности фотодиода оценивают по известным значениям интегральной (токовой) чувствительности и темнового тока I_a , протекающего в цепи в отсутствие облученности чувствительного слоя.

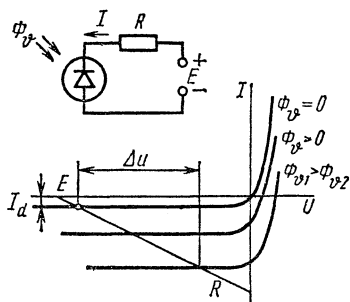


Рис. 8.5. Схема и вольт-амперные характеристики фотодиода

Основными материалами для фотодиодов являются германий и кремний. Кремниевые фотодиоды обычно чувствительны в узкой области спектра (от $\lambda = 0,6 \div 0,8$ мкм до $\lambda = 1,1$ мкм) с максимумом при $\lambda = 0,85$ мкм, а германиевые фотодиоды имеют границы чувствительности $\lambda = 0,4 \div 1,8$ мкм с максимумом при $\lambda \approx 1,5$ мкм. В фотодиодном режиме при напряжении питания 20 В темновой ток кремниевых фотодиодов обычно не превышает 3 мкА, в то время

как у германиевых фотодиодов при напряжении питания 10 В он достигает 15 — 20 мкА.

Фототранзисторы представляют собой приемники лучистой энергии с двумя или с большим числом p - n -переходов, обладающие свойством усиления фототока при облучении чувствительного слоя. Фототранзистор соединяет в себе свойства фотодиода и усилительные свойства транзистора (рис. 8.6). Наличие у фототранзистора

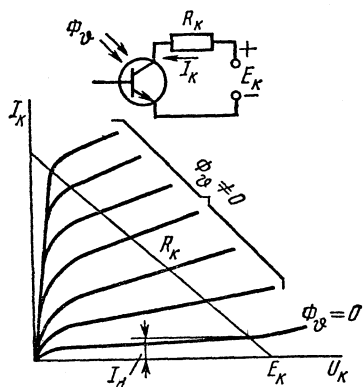


Рис. 8.6. Схема и вольт-амперные характеристики фототранзистора

оптического и электрического входов одновременно позволяет создать смещение, необходимое для работы на линейном участке энергетической характеристики, а также компенсировать внешние воздействия. Для обнаружения малых сигналов напряжение, снимаемое с фототранзистора, должно быть усилено. В этом случае следует увеличить сопротивление выхода переменному току при минимальном темновом токе в цепи коллектора, создавая положительное смещение на базе.

Световоды. Между источником и приемником света в оптроне находится световод. Для уменьшения потерь при отражении от границы раздела светодиода и проводящей среды (световода) последняя должна обладать большим коэффициентом преломления. Такие среды называются иммерсионными. Иммерсионный материал должен обладать также хорошей адгезией к материалам источника и приемника, обеспечивать достаточное согласование по коэффициентам расширения, быть прозрачным в рабочей области и т. д. Наиболее перспективными являются свинцовые стекла с

показателем преломления 1,8 — 1,9 и селеновые стекла с показателем преломления 2,4 — 2,6. На рис. 8.7 показано поперечное сечение твердотельного оптрона с иммерсионным световодом.

В качестве световодов в оптоэлектронике находят применение тонкие нити стекла или прозрачной пластмассы. Это направление получило название волоконной оптики. Волокна покрывают светоизолирующими материалами и соединяют в многожильные световые кабели. Они выполняют те же функции по отношению к свету, что и металлические

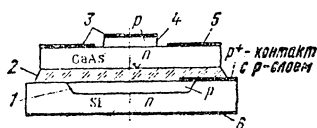


Рис. 8.7. Разрез твердотельного оптрона с иммерсионным световодом:

1 — слой планарной диффузии; 2 — селеновое стекло; 3 — оптические контакты; 4 — диффузионная мезаструктура; 5 — источник света; 6 — приемник света

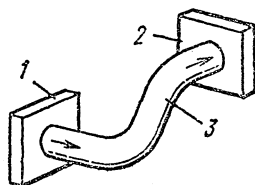


Рис. 8.8. Световод в виде кабеля из светопроводящих волокон:

1 — источник света; 2 — приемник света; 3 — световой кабель

провода по отношению к току. С помощью волоконной оптики можно: осуществлять поэлементную передачу изображения с разрешающей способностью, определяемой диаметром световолокна (порядка 1 мкм); производить пространственные трансформации изображения благодаря возможности изгибания и скручивания волокон световода; передавать изображения на значительное расстояние и т. д. На рис. 8. 8 показан световод в виде кабеля из светопроводящих волокон.

Интегральная оптика. Одним из перспективных направлений функциональной микроэлектроники является интегральная оптика, обеспечивающая создание сверхпроизводительных систем передачи и обработки оптической информации. Область исследований интегральной оптики включает распространение, преобразование и усиление электромагнитного излучения оптического диапазона в диэлектрических тонкопленочных волноводах и волоконных

световодах. Основным элементом интегральной оптики является объемный или поверхностный оптический микроволновод. Простейший симметричный объемный оптический микроволновод представляет собой локализованную по одной или двум пространственным измерениям область с показателем преломления, превышающим показатель преломления окружающей оптической среды. Такая оптическая более плотная область есть не что иное, как канал или несущий слой диэлектрического волновода.

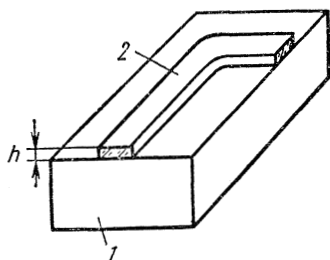


Рис. 8.9. Оптический полосковый микроволновод с прямоугольным поперечным сечением:

1 — подложка; 2 — диэлектрическая пленка

Примером несимметричного поверхностного диэлектрического волновода может служить тонкая пленка оптически прозрачного диэлектрика или полупроводника с показателем преломления, превышающим показатель преломления оптически прозрачной подложки. Степень локализации электромагнитного поля, а также отношение потоков энергии, переносимых вдоль несущего слоя и подложки, определяются эффективным поперечным размером несущего слоя и раз-

ностью показателей преломления несущего слоя и подложки при заданной частоте излучения. Сравнительно простым и наиболее подходящим для твердотельных оптических устройств является оптический полосковый микроволновод, выполненный в виде тонкой диэлектрической пленки (рис. 8.9), нанесенной на подложку методами микроэлектроники (например, вакуумным напылением). С помощью маски на диэлектрическую подложку можно наносить с высокой степенью точности целые оптические схемы. Применение электронно-лучевой литографии обеспечило успехи в создании как одиночных оптических полосковых микроволноводов, так и оптически связанных на определенной длине, а впоследствии расходящихся волноводов, что существенно для создания направленных ответвителей и частотно-избирательных фильтров в системах интегральной оптики.

Оптоэлектронные ИМС. На основе оптоэлектроники разработано большое число микросхем. Рассмотрим неко-

торые оптоэлектронные ИМС, выпускаемые отечественной промышленностью.

В микроэлектронике наиболее широко применяют оптоэлектронные ИМС гальванической развязки. К ним относят быстродействующие переключатели, коммутаторы аналоговых сигналов, ключи и аналоговые оптоэлектронные устройства, предназначенные для использования в системах функциональной обработки аналоговых сигналов.

Основным элементом любой оптоэлектронной ИМС является оптронная пара (рис. 8.10, а, б), состоящая из источника света 1, управляемого входным сигналом, иммерсион-

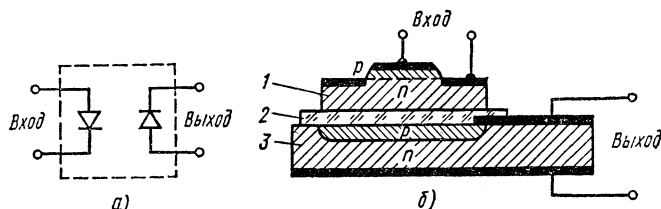


Рис. 8.10. Схема (а) и технологическое выполнение (б) оптронной пары:

1 — источник света; 2 — иммерсионная среда; 3 — фотоприемник

ной среды 2, оптически связанной с источником света, и фотоприемника 3. Параметрами оптронной пары являются сопротивление развязки по постоянному току, коэффициент передачи тока (отношение фототока приемника к току излучателя), время переключения и проходная емкость.

На базе оптоэлектронных пар создаются оптоэлектронные ИМС различного назначения.

1. **Оптоэлектронный переключатель** представляет собой гибридную ИМС, содержащую оптоэлектронную пару и усилитель. В переключателе используются высокоэффективные светодиоды на основе арсенида галлия, легированного кремния, и быстродействующие кремниевые фотодиоды *p-i-n*-типа. Иммерсионной средой является халькогенидное стекло с показателем преломления 2,7. Коэффициент передачи тока в оптоэлектронной паре составляет 3 — 5% при нормальной температуре, времена включения (сумма времен задержки и нарастания фронта) 100 — 250 пс, гальваническая развязка цепи светодиода и фотоприемника по постоянному току 10^9 Ом. Микросхема выполнена в круглом корпусе типа ТО-5.

2. Оптоэлектронный ключ предназначен для коммутации высоковольтных цепей переменного и постоянного токов. Он имеет четыре независимых канала, каждый из которых содержит две оптоэлектронные пары, состоящие из светодиода и высоковольтного фотодиода *p-i-n*-типа. Фотодиоды соединены встречно-последовательно, поэтому сопротивление ключа в закрытом состоянии (в отсутствие тока через светодиоды) независимо от полярности приложенного напряжения определяется темновым сопротивлением смещенного в обратном направлении фотодиода и составляет $\sim 10^9$ Ом.

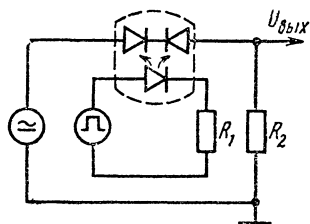


Рис. 8.11. Электрическая схема оптоэлектронного коммутатора аналоговых сигналов

3. Транзисторный ключ предназначен для коммутации постоянных напряжений до 50 В. Он имеет два независимых канала, каждый из которых содержит оп-

тоэлектронную пару, состоящую из арсенид-галлиевого светодиода и кремниевых фототранзистора *n-p-i-n*-типа. Оптоэлектронная пара имеет коэффициент передачи тока, равный двум, номинальный рабочий ток 10 мА, быстрое действие в режиме усиления 100 — 300 нс.

4. Коммутатор аналоговых сигналов предназначен для применения в системах селективной обработки аналоговых сигналов. Электрическая схема одного канала коммутатора приведена на рис. 8.11. Канал содержит оптоэлектронную пару, состоящую из арсенид-галлиевого светодиода и двух включенных встречно фотодиодов *p-i-n*-типа, выполненных в одном монокристалле.

На рис. 8.12 показаны электрические схемы некоторых других типов оптоэлектронных ИМС. Ключевая микросхема (рис. 8.12, а) включает в себя быстродействующую диодную оптоэлектронную пару, согласованную с монолитным кремниевым усилителем. Она предназначена для замены трансформаторных и релейных связей в логических устройствах ЭВМ и дискретной автоматики. Аналоговый ключ (рис. 8.12, б) относится к линейным схемам с оптоэлектронным управлением. При мощности управляющего сигнала 60 — 80 мВт параметры прерывателя достигают значений, необходимых для стандартных полупроводниковых

ИМС. Оптоэлектронное маломощное реле постоянного тока (рис. 8.12, в) предназначено для замены аналоговых электро-механических реле с быстродействием в миллисекундном диапазоне и гарантируемым числом срабатываний $10^4 - 10^7$.

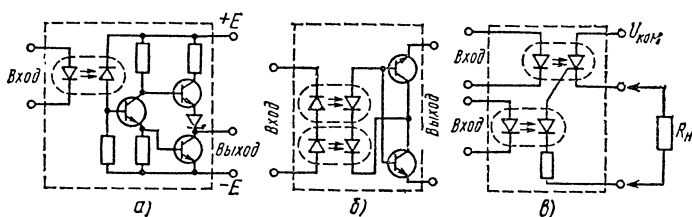


Рис. 8.12. Электрические схемы оптоэлектронных ИМС:
а — ключевая микросхема; б — аналоговый ключ; в — реле постоянного тока

Представляют интерес оптоэлектронные ИМС серии 249, в которую входят четыре группы приборов, представляющих собой оптоэлектронные ключи на основе электролюминесцентных диодов и транзисторов. Электрическая схема всех групп приборов одинакова (рис. 8.13). Конструктивно микросхемы оформлены в прямоугольном плоском корпусе ИМС с 14 выводами и имеют два изолированных канала, что уменьшает габариты и массу аппаратуры, а также расширяет функциональные возможности микросхем. Светодиоды выполнены на основе кремния и имеют $n^+ - p - n_i - n^+$ -структуру. Наличие двух каналов в ключе позволяет использовать его в качестве интегрального прерывателя аналоговых сигналов и получать высокий коэффициент передачи сигнала (10 — 100) при включении фототранзисторов по схеме составного транзистора.

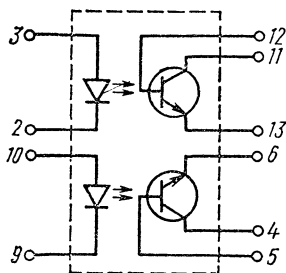


Рис. 8.13. Электрическая схема оптоэлектронных ИМС серии 249

§ 8.3. Акустоэлектроника

Акустоэлектроника — направление функциональной микроэлектроники, связанное с использованием механических резонансных эффектов, пьезоэлектрического эф-

фекта, а также эффекта, основанного на взаимодействии электрических полей с волнами акустических напряжений в пьезоэлектрическом полупроводниковом материале. Акустоэлектроника занимается преобразованием акустических сигналов в электрические и электрических сигналов в акустические.

На принципе электромеханического резонанса основан прибор, называемый резонистором и представляющий собой транзистор с резонирующим затвором (рис. 8.14). Затвор 3,

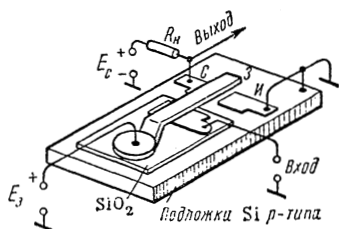


Рис. 8.14. Устройство резонистора

представляющий собой часть балки, противоположный конец которой закреплен на изоляторе, нависает над каналом между стоком *С* и истоком *И*. Под балкой на изоляторе расположен электрод, на который подается входной сигнал. Сила электростатического взаимодействия сигнального электрода с затвором, на который также подано постоянное

напряжение смещения, раскачивает балку в случае, когда частота сигнала совпадает с механическим резонансом балки. Вибрирующий затвор модулирует канал, обуславливает наличие переменной составляющей тока в нагрузке R_n . Консоль из золота имеет длину 0,25 мм. Такие резонисторы на частотах 1 — 45 кГц имеют добротность 100 — 750. При обратной связи с выхода на вход резонистора можно получить тональный генератор, подобный широко известному камертонному генератору. Разработаны и применяются резонисторы и для более высоких частот, приблизительно до 1 МГц.

В некоторых материалах ориентация молекул под действием поля сопровождается структурными изменениями, что приводит к изменению размеров образца. Эти явления носят обратимый и необратимый характер и позволяют создавать линейные и нелинейные устройства. Подобные процессы называются пьезоэлектрическим эффектом, а материалы, в которых наблюдается явление пьезоэффекта, — пьезоэлектриками. К таким материалам относятся турмалин, кварц, сегнетова соль, цинковая приманка и др. На пьезоэлектрическом эффекте основана работа некоторых радиотехнических функциональных приборов — кварцевых гене-

раторов и кварцевых фильтров. К функциональным приборам относятся также ультразвуковые линии задержки, работающие на объемных акустических волнах. Эти устройства позволяют задерживать сигналы на время от долей микросекунды до десятков миллисекунд. Широко используются твердотельные линии задержки из плавленного кварца, стекла и металлов.

Простейшая ультразвуковая линия задержки, работающая на объемных акустических волнах, представляет собой стержень твердого тела длиной l , к противоположным концам которого прикреплены пьезоэлектрические преобразователи (рис. 8.15). На вход подается радиопульс с несущей частотой порядка нескольких десятков мегагерц. Электрические колебания во входном пьезоэлектрическом преобразователе превращаются в акустические и излучаются в звукопровод. Кварцевые преобразователи работают на сжатие. Когда через время, определяемое скоростью звука (значительно меньше скорости распространения электромагнитных волн), акустическое колебание достигает выходного преобразователя, на нем под воздействием акустического сжатия возникает э. д. с., которая после усиления и детектирования образует выходной задержанный видеопульс.

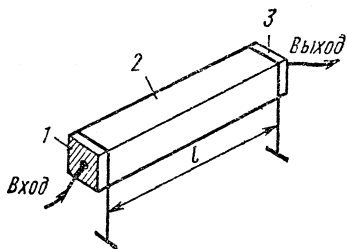


Рис. 8.15. Ультразвуковая линия задержки:

1 — входной преобразователь; 2 — звукопровод; 3 — выходной преобразователь

Пьезоэлектрические преобразователи используют для возбуждения с помощью электрических сигналов акустических волн в ультразвуковых линиях задержки и обратного преобразования их в электрический сигнал. Имеются различные способы получения преобразователей. Наилучшие результаты дает преобразователь, состоящий из пленки сульфида кадмия CdS , осажденной методом вакуумного напыления непосредственно на металлическую пленку, которую в свою очередь наносят на торец звукопровода (рис. 8.16). Такие преобразователи характеризуются малыми потерями и широкой полосой пропускания (порядка 30 %) на частотах 100 — 1000 МГц. Потери на пару преобразователей (входной—выходной) не превышают 12 дБ на частоте

тах 300 — 400 МГц как для продольных, так и для сдвиговых колебаний.

На частотах порядка 10 МГц в качестве преобразователя используют обедненный слой смещенного в обратном направлении p - n -перехода (рис. 8.17). Выбором напряжения смещения $U_{см}$ толщину обедненного слоя доводят до десятых долей микрометра и модулируют высокочастотным напряжением $u_{вх}$.

Ультразвуковые волны одинаково хорошо распространяются как в диэлектриках, так и в проводниках. Однако

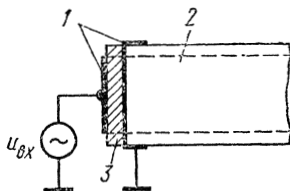


Рис. 8.16. Акустический преобразователь с напыленной пленкой сульфида кадмия:

1 — металлическая пленка;
2 — звукопровод; 3 — напыленная пленка сульфида кадмия

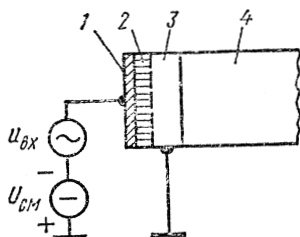


Рис. 8.17. Акустический преобразователь на p - n -переходе:

1 — золото; 2 — обедненный слой; 3 — GaAs n -типа; 4 — звукопровод

при распространении в полупроводниках, по результатам исследований, они имеют малые потери. Это дает возможность изготавливать преобразователи для высоких частот. Используя явления взаимодействия акустических волн с электронами, можно разработать приборы для усиления электрических колебаний посредством усиления бегущей ультразвуковой волны. Для этого требуются высокоэффективные преобразователи (диффузионные с p - n -переходом или напыленные). Усилитель на частоту 1 ГГц с коэффициентом усиления акустических волн 40 дБ, работающий на продольных акустических волнах, в интегральном исполнении имеет вид, показанный на рис. 8.18. На торцах исходного стержня с удельным сопротивлением, достаточным для усиления, путем диффузии индия создаются слои с высокой проводимостью. Эти слои (заштрихованы на рис. 8.18) служат электродами для постоянного поля дрейфа, а

также внутренними электродами преобразователей. Такой усилитель имеет размеры $1,28 \times 0,6 \times 0,6$ мм, мощность рассеяния 3,78 Вт, напряжение питания 227 В, полосу пропускания 300 МГц.

Новым этапом в развитии акустоэлектроники является использование поверхностных акустических волн. Поверхностные волны обладают свойствами объемных волн, доступны для воздействия на всем пути их распространения вдоль линии, а технология изготовления ультразвуковых линий с поверхностными волнами совместима с технологией изготовления интегральных микросхем.

Наиболее широкое распространение в технике получили поверхностные волны ультразвукового диапазона. Применение этих волн в линиях задержки позволило изменить их габариты. На поверхностных волнах разработаны резонаторы, полосовые фильтры, фазовращатели и другие элементы радиоэлектроники. В основу работы этих приборов положено использование упругих релеевских или поверхностных акустических волн, распространяющихся вдоль границы твердого упругого полупространства с вакуумом или другой разреженной средой (например, воздухом).

Линии задержки на поверхностных акустических волнах позволяют реализовать задержку сигнала 0,1 — 100 мкс на частотах $1 — 10^3$ МГц с полосой пропускания до 100% рабочей частоты.

Наряду с линиями задержки большое распространение получили фильтры (полосовые, режекторные и др.), синтезированные по заданным частотным характеристикам. В основе способа изготовления фильтров лежит изменение условий распространения акустических волн, в результате которого изменяется скорость волны и связанная с ней частотная характеристика фильтра. Электроакустический фильтр содержит управляющие электроды, расположенные по обеим сторонам звукопровода, между входным и выходным преобразователями. При изменении управляющего напряжения происходит соответствующее изменение характеристик фильтра.

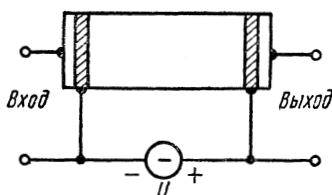


Рис. 8.18. Объемный акустоэлектронный усилитель

На рис. 8.19 показано устройство акустоэлектронного усилителя на поверхностных волнах. Дрейфовая часть представляет собой кремниевый монокристаллический слой n -типа толщиной около 1 мкм, выращенный на сапфировой подложке эпитаксиальным способом. Этот материал имеет

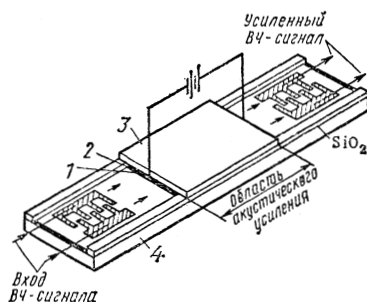


Рис. 8.19. Акустоэлектронный усилитель на поверхностных волнах:

1 — воздушный зазор; 2 — кремниевая пленка; 3 — сапфировая подложка; 4 — акустическая подложка

удельное сопротивление $100 \text{ Ом} \cdot \text{см}$ и подвижность носителей заряда $500 \text{ см}^2/(\text{В} \cdot \text{с})$. Воздушный зазор для работы на частоте 100 МГц составляет 50 нм, а на частоте 1 ГГц — 20 нм. Такие усилители на частоте 108 МГц имеют усиление 30 дБ на длине 10 мм и ширине 1,25 мм при потребляемой мощности постоянного тока 0,7 Вт.

Таким образом, акустоэлектронные устройства являются перспективными, особенно для применения в широкополосных

и СВЧ-схемах. Однако на пути широкой практической реализации этих приборов стоят еще значительные технологические трудности.

§ 8.4. Диэлектрическая электроника

В микроэлектронике широко применяются тонкие пленки металлов и диэлектриков. При переходе к тонким пленкам возникают новые явления и закономерности, не проявляющиеся в массивных образцах и структурах. Для пленок типична возможность создавать управляемые эмиссионные токи, аналогичные токам в вакууме. При контакте неметаллического твердого тела с металлом, обладающим меньшей работой выхода, приконтактная область обогащается свободными носителями заряда, эмиттированными из металла. В массивных образцах эти узкие приконтактные области повышенной электрической проводимости не влияют на токовый режим, определяемый концентрацией свободных носителей заряда в объеме тела. В тонких же пленках эмиттированные носители заряда могут доминировать во всем объеме, определяя закономерности токовых явлений.

С точки зрения теории рассеяния носителей заряда любое неметаллическое твердое тело в толстом слое — полупроводник, а в тонком — диэлектрик.

Эффекты, связанные с протеканием эмиссионных токов в неметаллических твердых телах, не охватываются ни физикой полупроводников, ни физикой диэлектриков. Закономерности этих явлений, а также приборные и схемные разработки на их основе составляют содержание нового раздела физики твердого тела и электроники — диэлектрической электроники.

Если между двумя металлическими электродами поместить тонкую (порядка 1 — 10 мкм) диэлектрическую пленку, то мигрируемые из металла электроны заполняют всю толщину пленки и напряжение, приложенное к такой системе, создаст ток в диэлектрике.

Диэлектрическая электроника изучает протекание токов, ограниченных объемным зарядом в диэлектриках, при термоэлектронной эмиссии из металлов и полупроводников, при туннельной эмиссии и т. д.

Простейшими приборами диэлектрической электроники являются диоды и транзисторы, имеющие характеристики, аналогичные характеристикам электровакуумных приборов. Диэлектрический диод представляет собой пленочную структуру металл — диэлектрик — металл (рис. 8.20). Принцип действия диэлектрического

диода отличен от принципа действия электровакуумного и полупроводникового диодов. Выпрямляющий эффект в диэлектрическом диоде определяется различием работ выхода из истока и стока и может оказаться значительным за счет нанесения на диэлектрик контакта из материала с очень малой работой

выхода. Поэтому в одном направлении возникают большие токи, а в обратном — исчезающие малые токи. Коэффициент выпрямления диэлектрического диода достигает 10^4 и выше.

В диэлектрическом транзисторе управляющий электрод (затвор) размещен в тонком слое диэлектрика между истоком и стоком. В некоторых типах транзисторов эмиссия происходит из полупроводника *n*-типа с электронной электропроводностью в высокоомный полупроводник *p*-типа с дыроч-

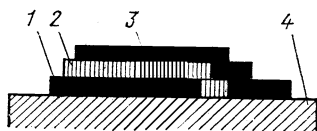


Рис. 8.20. Структура диэлектрического диода:

1 — сток (Au); 2 — пленка CdS; 3 — исток (In); 4 — подложка

ной электропроводностью, который играет роль диэлектрика (рис. 8.21). Низкоомные области, образованные из полупроводника p -типа с высокой дырочной электропроводностью, выполняют роль металлических ячеек сетки электровакуумного триода. Подаваемое на эти области внешнее напряжение управляет величиной тока, протекающего между истоком и стоком.

В другом типе диэлектрического транзистора (рис. 8.22) затвор находится вне диэлектрика CdS ; его роль сводится к изменению распределения потенциала в диэлектрике, что существенно влияет на величину тока. Распространение получили транзисторы с изолированным затвором структуры МОП (металл — окисел — полупроводник) или МДП (металл — диэлектрик — полупроводник).

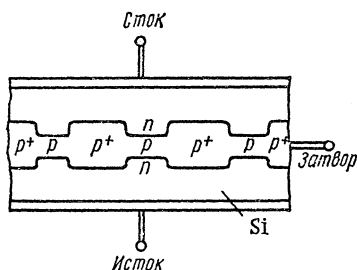


Рис. 8.21. Диэлектрический транзистор (горизонтальный разрез)

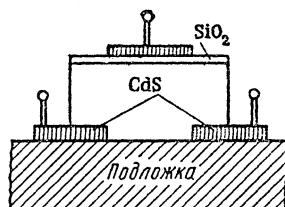


Рис. 8.22. Структура диэлектрического транзистора с изолированным затвором

Приборы диэлектрической электроники удачно сочетают ряд преимуществ полупроводниковых и электровакуумных приборов и лишены многих их недостатков. Эти приборы микроминиатюрны, малоинерционны, обладают хорошими частотными характеристиками, низким уровнем шумов, мало чувствительны к изменениям температуры и радиации. Создание эмиссионных токов в диэлектриках не требует затрат энергии на нагрев эмиттирующего электрода и решения проблемы теплоотвода.

§ 8.5. Хемотроника

Хемотроника как новое научное направление возникла на стыке двух развивающихся направлений: электрохимии и электроники. На первом этапе своего развития хемотроника как техническая отрасль была призвана разрабатывать общие теоретические и технологические принципы

построения электрохимических преобразователей. При этом создавались в основном аналоги электронных приборов с той разницей, что носителями заряда были не электроны в вакууме, газе или твердом теле, а ионы в растворе. Так были созданы электрохимические выпрямители, интеграторы, усилители. Подвижность ионов в растворе намного меньше, чем подвижность электронов в газе или твердом теле, поэтому электрохимические приборы являются низкочастотными по своей физической природе, однако они имеют и ряд преимуществ перед электронными приборами.

В настоящее время хемотроника сформировалась как наука, изучающая перспективы построения информационных и управляющих систем на основе процессов, протекающих в жидкостях и на границе жидких фаз.

В ряде литературных источников вместо термина «хемотроника» по аналогии с электроникой фигурирует термин «ионика», так как во всех электрохимических приборах используются ионные процессы.

Исследования показали, что жидкостные системы имеют ряд важных преимуществ перед системами на основе твердых тел, прежде всего к ним следует отнести компактность и многофункциональность жидкостных элементов, где в небольшом объеме может происходить одновременно с разной скоростью множество разнообразных физико-химических процессов. Эти системы надежны и обеспечивают возможность изменения своей внутренней структуры, т. е. внутреннее управление. Наиболее характерным примером жидкостной системы является человеческий мозг.

Таким образом, перспектива развития хемотроники — это создание информационных и управляющих систем на жидкостной основе, а в более далеком будущем — биопреобразователей информации. Для дальнейшего успешного развития хемотроники требуются фундаментальные исследования не только физики жидкости, но также сложных физико-химических и электрохимических процессов, протекающих в жидкостях и на границе жидких фаз.

В настоящее время на основе электрохимических явлений создан ряд хемотронных приборов: диоды-выпрямители, интеграторы, усилители, электрокинетические преобразователи, твердофазные электрохимические преобразователи и др.

Для электроники особый интерес представляют управляемые сопротивления и запоминающие устройства. Управляемое сопротивление представляет собой бесконтактный

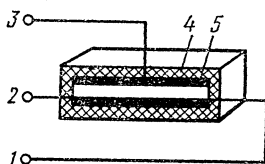


Рис. 8.23. Структура электрохимического управляемого сопротивления:

1, 2, 3 — выводы; 4 — управляющий электрод; 5 — резистивный электрод

аналог переменного резистора, в котором сопротивление изменяется под действием электрического сигнала и может оставаться неизменным («помнить») длительное время после подачи управляющего сигнала. Иногда этот прибор называют мимистором. Управляемое сопротивление размещено в герметически закрытом корпусе (рис. 8.23), где имеются два электрода 4 и 5. Электрод 5, выполненный из инертного металла (платины или родия), является резистивным и имеет некоторое омическое сопротивление, которое и

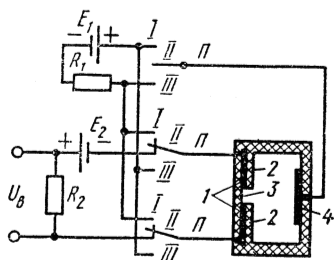


Рис. 8.24. Электрохимическая ячейка памяти (I, II, III — соответственно запись, считывание и стирание информации): 1 — пластинчатые электроды (из Au или Pt); 2 — эпоксидное изолирующее покрытие; 3 — узкий межэлектродный зазор; 4 — электрод из Cu (или из Cr, Zn, Ni)

представляет собой выходную величину. Электрод 4 является управляющим. Обычно его выполняют из металла (например, меди), причем соединение этого металла с кислотным остатком (например, CuSO_4) используют для приготовления электролита. В электролит добавляют также кислоту и вещества, способствующие осаждению металла. Управляемое сопротивление имеет три вывода (1, 2, 3), причем выводы 1 и 2 относятся к резистивному электроду и используются для включения в измерительную цепь.

При подаче управляющего сигнала постоянного тока на выводы 2 и 3 через прибор начинает протекать ток той полярности, при которой резистивный электрод будет катодом; на нем происходит электролитическое осаждение меди из раствора. Управляющий электрод (анод) при этом растворяется. При изменении полярности управляющего сигнала во входной цепи электроды меняются ролями, и состав электролита в ячейке остается неизменным. Растворение меди резистивного электрода или осаждение меди на нем изменяет сечение, а следовательно, и сопротивление электрода.

Применяются электрохимические элементы памяти различной конструкции, например трехэлектродные ячейки, в которых для хранения информации в двоичном коде используется процесс электроосаждения. Принцип действия таких ячеек поясняет рис. 8.24.

На рис. 8.24 показана электрическая схема, в которую

входит электрохимический элемент памяти. Трехпозиционный переключатель *П* служит для подключения трех видов операций — записи, считывания и стирания. При положении *I* переключателя на электроды *1* от источника э. д. с. E_1 через резистор R_1 подается отрицательное относительно электрода *4* напряжение. Происходит запись — в зазоре осаждается медь. При положении *III* переключателя на электроды *1* подается положительное напряжение от батареи E_1 . Происходит стирание — медь в зазоре растворяется. Положение переключателя *II* соответствует процессу считывания, когда к электродам *1* подключается измерительная схема, состоящая из источника э. д. с. E_2 и резистора R_2 . Выходным сигналом служит падение напряжения U_B на резисторе R_2 . При замкнутом зазоре $U_B \approx E_2$, при разомкнутом зазоре $U_B \ll E_2$.



Рис. 8.25. Принцип работы ионистора:

1 — серебряный катод; *2* — твердый электролит; *3* — угольный анод

Представляют большой интерес электрохимические твердотельные элементы — ионисторы, выполненные на основе высокопроводящих твердых электролитов.

Основой ионистора является твердый электролит ($RbAg_4I_5$) с высокой удельной проводимостью (0,27 См/см при температуре 25°C). Во время заряда (минус на серебряном электроде) подвижные ионы серебра, содержащиеся в твердом электролите, мигрируют к катоду (рис. 8.25) и оседают на нем в виде металлического серебра. На положительном угольном электроде происходит разделение заряда и образование двойного электрического слоя. Этот процесс протекает вплоть до напряжения разложения электролита ($E_p = 0,67$ В), по достижении которого на угольном электроде начинает выделяться свободный йод. Во время разряда осевшее серебро растворяется и возвращается в электролит.

Из-за отсутствия диэлектрика рабочее напряжение ионистора мало: оно должно быть меньше напряжения разложения электролита и составлять $\sim 0,5$ В. Для получения более высоких напряжений и токов ионисторы можно соединять последовательно-параллельно, как конденсаторы и батареи.

Конструктивно отечественные ионисторы (тип И50-1) выполнены из трех спрессованных таблеток, герметизи-

рованных в металлическом или пластмассовом корпусе. Ионисторы имеют емкость 50 Ф и более, длительно хранят заряд благодаря малым токам утечки (сохраняют до 97% заряда после 16 месяцев хранения) и устойчиво работают в диапазоне температур от -60 до $+145^{\circ}\text{C}$.

Ионистор может служить интегратором напряжений, источником питания, запоминающим устройством и т. д.

Использование ионистора как интегратора напряжений обеспечивается хорошей воспроизводимостью процесса заряд — разряд. При заряде постоянным током получается зависимость напряжения от времени, близкая к линейной; при разряде наблюдается похожая зависимость, но с отрицательным наклоном. С помощью такой треугольной формы напряжения можно производить интегрирование напряжения.

Последовательным соединением ионисторов можно добиться более высоких рабочих напряжений, применяя такую батарею в качестве источника питания. Например, 10 элементов емкостью по 50 Ф образуют модуль диаметром 25 мм и высотой 64 мм, имеющий емкость 5 Ф и напряжение 5 В. Такой источник питания можно успешно применять в различной микроэлектронной аппаратуре.

Запоминающие модули на ионисторах способны хранить информацию в течение многих часов или дней с временем выборки несколько секунд или минут. Использование ионистора в качестве запоминающего устройства основано на том, что полностью заряженный ионистор соответствует логической «1», а полностью разряженный ионистор — логическому «0». Миниатюрные ионисторы, сформированные на подложках, изготовленных по планарной технологии, могут служить для простых запоминающих устройств.

§ 8.6. Биоэлектроника

Биоэлектроника — одно из направлений бионики, решающее задачи электроники на основе анализа структуры и жизнедеятельности живых организмов. Биоэлектроника охватывает проблемы изучения нервной системы человека и животных и моделирование нервных клеток (нейронов и нейронных сетей) для дальнейшего совершенствования электронной вычислительной техники, техники связи, разработки новых элементов и устройств автоматики и телемеханики.

Исследования нервной системы показали, что она обладает рядом ценных особенностей и преимуществ перед са-

мыми совершенными вычислительными устройствами. Основными из них являются:

1) совершенное и гибкое восприятие внешней информации независимо от формы, в которой она поступает;

2) высокая надежность, значительно превышающая надежность технических систем (последние выходят из строя при обрыве в цепи одного или нескольких элементов; при гибели же миллионов нервных клеток из миллиардов клеток, составляющих головной мозг, работоспособность системы сохраняется);

3) микроминиатюрность элементов (при количестве элементов $10^{10} - 10^{11}$ объем мозга человека составляет $1,5 \text{ дм}^3$; современное устройство на транзисторных структурах с таким же числом элементов заняло бы объем в несколько сотен кубических метров);

4) экономичность работы (потребление энергии мозгом человека не превышает нескольких десятков ватт);

5) высокая степень самоорганизации, быстрое приспособление к новым ситуациям, к изменению программ деятельности.

Нервная система состоит из клеток, получивших название *нейронов*. Нейроны, где бы они ни находились, имеют одинаковую структуру и примерно одинаковые логические характеристики. Они являются наиболее универсальным логическим элементом. На основе нейронов строятся простые и упорядоченные нейронные сети, указывающие на тот, пока еще недостижимый в технике факт, что с помощью единственного элемента можно построить систему, способную выполнять сложнейшие задачи, которые обычно решает человек.

На рис. 8.26 показано схематическое изображение нейрона. Луковичеобразная часть является телом ячейки и называется *сомой*. Ее диаметр лежит в пределах от 10 мкм для связующих нейронов и до 70 мкм для моторных нейронов. Отростки, отходящие от тела нейронов, называются *дендритами* и представляют собой входные связи нейрона. Длинный отросток, отходящий от одной из сторон сомы, называется *аксоном* и служит для передачи выходного сигнала к другим нейронам; длина аксона от долей миллиметра до 1,8 м и более. Аксон постепенно сужается, и на расстоянии 50 — 100 мкм от тела нейрона начинается изолирующий слой. Сам нейрон изолирован от окружающей его жидкости тонкой мембраной и благодаря метаболическому процессу внутри него существует избыточная концентрация

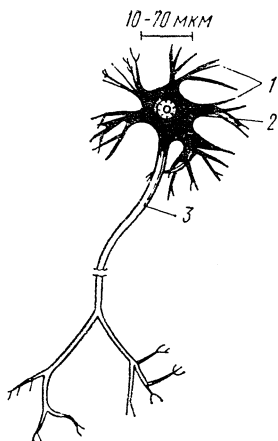


Рис. 8.26. Схематическое изображение нейрона:

1 — дендриты; 2 — тело нейрона (сому); 3 — аксон

отрицательных ионов калия, хотя окружающая нейрон жидкость содержит избыток ионов натрия. Для предотвращения диффузии ионов калия через мембрану на ней поддерживается задерживающий потенциал около 70 мВ. Аксон по своей природе является аналогом соединительного провода электрической цепи. Ближе к концу он разветвляется, и более мелкие ветви образуют контакты с другими нейронами. Дендриты оканчиваются *синапсами*, которые отделены от тела нейрона узким переходом шириной порядка 0,01 — 0,02 мкм.

Нейрон во многом подобен электронному логическому элементу. Выполнив соединение нейрона определенным способом, нетрудно об-

наружить, что он обладает свойствами, аналогичными свойствам одной из обычных схем вычислительной машины. Однако нейрон обладает и другими свойствами, например, способностью увеличивать частоту выходного сигнала с изменением амплитуды входного, суммировать входные сигналы и т. д. Все это показывает, что нейрон — значительно более сложный элемент, чем обычная логическая схема. Нейрон может передавать информацию в аналоговой форме, что позволяет рассматривать нейронную систему как гибридное устройство из логических элементов и аналоговых блоков, в котором направление передачи аналоговой информации определяется коммутируемыми логическими связями между элементами. Адаптивные свойства нейронов могут быть использованы также при создании устройств для распознавания образов и знаков и при построении обучающих машин. Если сравнивать интегральные микросхемы с нейроном, то окажется, что мощность рассеяния в нейроне в 10^7 раз меньше, а степень интеграции в 10^7 раз больше.

Для технической реализации ряда сложных нейронных сетей в первом приближении достаточен нейроноподобный элемент, обладающий аналого-логическими свойствами и по своим функциональным возможностям приближающийся к биологическим рецепторным и некоторым видам центральных нейронов. Основной задачей при создании такого нейроноподобного элемента является реализация зависимости частоты импульсного выходного сигнала от суммарного импульсного «раздражения» на входе. Исследования пока-

зали, что модель нейрона может быть выполнена в виде двух интегральных микросхем на МДП-транзисторах.

Первая микросхема (импульсный сумматор) моделирует синапс биологического нейрона, осуществляя пространственное и временное суммирование импульсных входных сигналов с электрической регулировкой синаптических весов. Вторая микросхема (пороговое устройство) моделирует тело нейрона. Она формирует требуемую передаточную характеристику «напряжение — напряжение» и преобразует напряжение в частоту.

Используя эти микросхемы, можно получить выходные частотные характеристики, близкие к характеристикам определенных классов нейронов. Таким образом, по совокупности свойств рассмотренный нейроноподобный элемент является перспективным для моделирования определенного класса нейронных сетей в бионических системах.

В настоящее время ведутся большие исследования в различных направлениях биоэлектроники. Результаты исследования показывают, что использование явлений живой природы в электронике может привести к новой научно-технической революции в этой области техники.

§ 8.7. Дальнейшее развитие микроэлектроники

Микроэлектроника переживает процесс своего бурного развития. Особенно быстрыми темпами развивается интегральная микроэлектроника. За последние 10 — 15 лет интегральные микросхемы нашли широкое применение практически во всех видах радиоэлектронной аппаратуры. Успехи в развитии микроэлектроники связаны главным образом с развитием планарной технологии, лежащей в основе создания полупроводниковых ИМС на базе машинных методов проектирования, глубокой автоматизации технологических процессов, новых методов интеграции, диагностики и испытаний.

В связи с необходимостью повышения быстродействия ЭВМ, освоения новых диапазонов спектра электромагнитных колебаний, создания высоконадежных приборов и узлов в микроэлектронике все шире обращаются к использованию разнообразных физических явлений в металлах, полупроводниках, диэлектриках, пьезоэлектрических и магнитных материалах. Это привело к возникновению в микроэлектронике многих новых направлений, таких, как оптоэлектроника, акустоэлектроника, магнетоэлектроника, микроэлектроника сверхнизких температур и т. д.

Прогнозирование развития микроэлектроники является сложной научной проблемой. Это объясняется тем, что современная микроэлектроника характеризуется высоким динамизмом, малым ретроспективным периодом развития и тесной зависимостью от состояния и темпов развития многих областей науки и техники. В связи с этим необходимо комплексное изучение функционального назначения изделий микроэлектроники, физических явлений, используемых в приборах, возможностей технологии, условий применения, особенностей эксплуатации приборов, взаимоотношений предприятий-разработчиков со смежными отраслями и многих других факторов, влияющих на темпы развития, экономику, качество, спрос на изделия микроэлектроники.

При прогнозировании развития микроэлектроники используют методы экстраполяции тенденций, информационно-логического анализа и экспертных оценок. Метод экспертных оценок является одним из самых распространенных и хорошо изученных методов прогнозирования. Он дает возможность получения синтетической прогнозной информации при отсутствии возможности решения проблемы путем строгого математического рассмотрения. По точности прогнозные оценки, полученные при экспертных опросах, не уступают, а иногда и превосходят прогнозные оценки, полученные математическими методами. При соблюдении правильной методологии подготовки и проведения экспертного опроса они могут обеспечить точность 5 — 10%, что соизмеримо с точностью многих технических расчетов. В табл. 8.1 приведены сводные данные прогноза наиболее важных событий и сроков их свершения в области микроэлектроники до 1990 г. по экспертным оценкам.

Как видно из табл. 8.1, микроэлектроника будет продолжать развиваться высокими темпами. Наряду с совершенствованием и расширением производства интегральных микросхем будут создаваться сложные твердотельные электронные приборы, выполняющие функции блоков, узлов и аппаратуры в целом.

Уже в настоящее время применяются БИС, содержащие 50 — 100 тыс., а в ряде случаев до 500 тыс. транзисторов на одном кристалле. Подобные БИС позволяют создавать карманные калькуляторы, наручные часы, микропроцессоры, микро-ЭВМ и другие электронные устройства, пригодные для широкого применения в технике и быту. В перспективе можно ожидать, что, например, на кристалле

Таблица 8.1

Прогноз развития микроэлектроники по экспертным оценкам

	1985—1986 гг.	1989—1990 гг.
Изделия микроэлектроники	Микропроцессоры (измерительные системы в промышленности, системах регулировки транспорта, диагностических системах) Логические ИМС (МОП $\tau_a \leq 10^{-9}$ с, биполярные $\tau_a \leq 10^{-10}$ с) Универсальные однокристалльные И²Л-схемы (ЗУ + логика + линейные функции) ПЗС ТВ камеры, ИК ФЭП, однокристалльные устройства МП + ПЗС ФЭП СВЧ-ИМС на GaAs, InP ($\tau_a \leq 10^{-10}$ с) Волоконные системы связи ($N \geq 10^3$ каналов, ширина полосы пропускания десятки мегагерц, потери < 1 дБ/км) Устройства на ПАВ для систем связи и обработки сигналов	Промышленные субмикронные БИС ($d < 1$ мкм) Оптические ЭВМ Центральный процессор на элементах Джозефсона Микроэлектроника для медицинских систем контроля и диагностики Автоматизированные системы обработки и распределения информации (межотраслевые банки данных, прогнозирующие системы и т. д.)
Этапы развития микроэлектроники	Микросхемы, блоки, подсистемы	Микросхемы, блоки, подсистемы, системы
Технология, оборудование, материалы	Промышленное освоение электронно-лучевой и рентгеновской литографии ($d = 0,5$ мкм) Полное освоение ионной имплантации, ионного легирования Промышленное освоение изготовления устройств на новых материалах: магнитных, полупроводниках, InP, GaAs, AlGaAs	Полная автоматизация всех технологических процессов

размером 12×12 мм число элементов достигнет одного миллиона и более. Однако предельная степень интеграции будет определяться экономическими и технологическими ограничениями, связанными с выходом годных микросхем и принципиальной возможностью их получения. Наряду с интеграцией большого числа сходных приборов развивается интеграция в одной микросхеме приборов, использующих различные физические принципы. При этом помимо физических процессов в полупроводниках используют процессы в диэлектриках, сверхпроводниках (эффект Джозефсона), магнитных пленках и т. д.

Развитие функциональной микроэлектроники приведет к дальнейшему повышению степени интеграции. Это связано с тем, что функциональные микросхемы отличаются от интегральных существенно меньшим числом элементов при том же или большем числе функций. Так, применение транзисторного эффекта для создания не только двухуровневых, но и многоуровневых микросхем может дать увеличение на 2 — 3 порядка степени функциональной интеграции логических ИМС вследствие уменьшения в схеме числа элементов, необходимых для выполнения функций. Значительное повышение степени функциональной интеграции микросхем можно ожидать от применения оптоэлектронных ИМС. При переходе на оптический диапазон увеличивается скорость обработки информации, уменьшается количество элементов в схеме, исключаются наведенные помехи и сокращается число пересечений вследствие замены электрических проводников световым лучом.

Основным перспективным направлением развития технологии является непосредственное формирование функциональных элементов микросхем при воздействии различных видов энергии, т. е. полное использование принципов локальности и селективности.

В развитии технологии микросхем можно отметить два основных этапа: 1) применение защитных масок и шаблонов (в том числе фотошаблонов); 2) непосредственное формирование функциональных элементов. На первом этапе локальность и селективность обеспечиваются за счет применения защитных масок, которые в свою очередь формируются с помощью либо шаблонов (фотолитография, рентгенолитография, проекционная электролитография), либо управляемого электронного и лазерного луча (электролитография фокусированным электронным лучом, лазерная технология).

По мере совершенствования технологии с применением управляемых энергетических пучков и повышения прецизионности процессов появляется принципиальная возможность перехода к следующему этапу развития технологии, в которой элементы микросхем формируются (без применения шаблонов и защитных масок) при непосредственном локальном и селективном воздействии энергетических пучков на исходные материалы изделия. Сюда можно отнести, например, изменение свойств SiO_2 или Fe_2O_3 при обработке их электронным пучком, получение токопроводящего покрытия фотохимическим разложением пленок солей серебра, образование токопроводящих шин управляемым лазерным лучом и другие процессы.

Перспективными для осуществления прецизионных процессов с локальным воздействием на материал являются направленные и ненаправленные потоки ионов различных материалов. В зависимости от энергии, направленности потоков, атомного веса и баланса заряженных частиц с помощью ионных пучков можно проводить ряд операций при изготовлении микросхем. С помощью ионно-плазменной технологии создается возможность получения тонких пленок металлов (в том числе тугоплавких), сплавов (в том числе многокомпонентных), полупроводников, полупроводниковых соединений, а при использовании специальных конструкций распылительных устройств — диэлектрических пленок, т. е. пленок почти всех используемых в микроэлектронике материалов при сохранении их стехиометрического состава. Характерной особенностью будущей технологии микроэлектроники является полная автоматизация всех технологических процессов.

Перспективное развитие микроэлектроники невозможно без существенного улучшения качества применяемых материалов и разработки новых высококачественных материалов. Одним из основных материалов, используемых при изготовлении интегральных микросхем, является монокристаллический кремний. Уже теперь необходимы слитки этого материала диаметром 75 — 150 мм с высокой степенью однородности и чистоты. Широко внедряются в микроэлектронику такие материалы, как сапфир, арсенид галлия и галлий-гадолиниевый гранат.

Дальнейшее улучшение качества эпитаксиальных структур кремния проводится одновременно с увеличением их диаметра. В будущем получают широкое применение структуры диаметром до 150 мм и толщиной эпитаксиальных

слоев 0,4 — 80 мкм (отклонение от номинала $\pm 5\%$), удельное сопротивление которых перекрывает диапазон 0,05—80 Ом·см с допустимым отклонением не более $\pm 10\%$, плотностью дислокаций до 10^2 см⁻² и плотностью дефектов упаковки 0 — 10 см².

Новые виды структур антимоноида индия, фосфида индия с диэлектрическим покрытием на основе окиси кремния, нитрида германия либо собственного окисла необходимы для создания приборов с зарядовой связью, функцией которых являются преобразование и статистическая обработка видеонаблюдений в инфракрасной и видимой областях спектра. Основной проблемой в технологии создания этих структур является обеспечение высокого качества поверхности раздела полупроводник — диэлектрик. Любые нарушения этой границы создают неконтролируемые энергетические уровни поверхностных состояний.

Контрольные вопросы

1. Каковы особенности интегральной микроэлектроники?
2. Какие физические явления используются в функциональной микроэлектронике?
3. Что такое оптоэлектроника и какие приборы в ней рассматриваются?
4. Каковы принцип работы оптронов и их разновидности?
5. Каковы основные виды фотоизлучателей и фотоприемников и принципы их работы?
6. Какие основные оптоэлектронные микросхемы можно создать на базе оптоэлектронных пар?
7. Что такое акустоэлектроника и какие приборы в ней рассматриваются?
8. Что такое пьезоэлектрический эффект и где он используется?
9. Что такое акустоэлектронный усилитель на поверхностных волнах и в чем состоит принцип его работы?
10. Опишите устройство диэлектрических диодов и транзисторов и их особенности.
11. Что такое хемотроника и каковы основные направления ее развития?
12. Что такое электрохимические элементы памяти и в чем состоит принцип их работы?
13. Опишите устройство ионистора и возможности его использования.
14. Какие вопросы изучает биоэлектроника и каковы возможности ее использования в электронике?
15. Каковы основные направления дальнейшего развития микроэлектроники?

ЛИТЕРАТУРА

Основная

1. Ефимов И. Е., Козырь И. Я. Основы микроэлектроники. — М.: Связь, 1975.
2. Степаненко И. П. Основы микроэлектроники. — М.: Советское радио, 1980.

Дополнительная

1. Колесов Л. Н. Введение в инженерную микроэлектронику. — М.: Советское радио, 1974.
2. Алексенко А. Г. Основы микросхемотехники. — М.: Советское радио, 1977.
3. Ефимов И. Е., Горбунов Ю. И., Козырь И. Я. Микроэлектроника. Физические и технологические основы, надежность. — М.: Высшая школа, 1977.
4. Ефимов И. Е., Горбунов Ю. И., Козырь И. Я. Микроэлектроника. Проектирование, виды микросхем, новые направления. — М.: Высшая школа, 1978.
5. Курносоев А. И., Юдин В. В. Технология производства полупроводниковых приборов и интегральных микросхем. — М.: Высшая школа, 1979.
6. Аваев Н. А., Дулин В. Н., Наумов Ю. Е. Большие интегральные схемы с инжекционным питанием. — М.: Советское радио, 1977.
7. Микропроцессорные БИС и микро-ЭВМ. Построение и применение/ Под ред. А.А. Васенкова. — М.: Советское радио, 1980.
8. Аналоговые и цифровые интегральные схемы. Якубовский С. В. и др./ Под ред. С. В. Якубовского. — М.: Советское радио, 1979.
9. Преснухин Л. Н., Шахнов В. А., Кустов В. А. Основы конструирования микроэлектронных вычислительных машин. — М.: Высшая школа, 1976.
10. Пономарев М. Ф. Конструкции и расчет микросхем и микроэлементов ЭВА. — М.: Радио и связь, 1982.
11. Епифанов Г. И. Физические основы микроэлектроники. — М.: Советское радио, 1971.
12. Новиков В. В. Теоретические основы микроэлектроники. — М.: Высшая школа, 1972.
13. Пролейко В. М., Чекареев А. А. Качество, надежность и долговечность электронных приборов. — М.: Энергия, 1972.
14. Иванов-Есипович Н. К. Инженерные основы плечной микроэлектроники. — М.: Энергия, 1968.
15. Ермолаев Ю. П., Пономарев М. Ф., Крюков Ю. Г. Конструкции и технология микросхем /Под ред. Ю. П. Ермолаева. — М.: Советское радио, 1980.

16. Курносоев А. И., Брук В. А. Основы полупроводниковой микроэлектроники. — М.: Высшая школа, 1980.
17. Сергеев В. С., Вожегин И. Н. Интегральные гибридные микросхемы. — М.: Советское радио, 1973.
18. Фотолитография и оптика/Под ред. Я. А. Федотова и Г. Поля. — М.: Советское радио, 1974.
19. Наумов Ю. Е. Интегральные логические схемы. — М.: Советское радио, 1970.
20. Шагурин И. И. Транзисторно-транзисторные логические схемы/Под ред. Ю. Е. Наумова. — М.: Советское радио, 1974.
21. Ефимов И. Е., Кальман И. Г., Мартынов В. И. Надежность твердых интегральных схем. — М.: Изд-во стандартов, 1979.
22. Аронов В. А., Федотов Я. А. Испытания и исследования полупроводниковых приборов. — М.: Высшая школа, 1975.
23. Букреев И. Н. и др. Микроэлектронные схемы цифровых устройств. — М.: Советское радио, 1973.
24. Высоцкий Б. Ф. и др. Конструирование микроэлектронной аппаратуры. — М.: Советское радио, 1975.
25. Шило В. Л. Линейные интегральные схемы в радиоэлектронной аппаратуре/Под ред. Е. И. Гальперина. — М.: Советское радио, 1974.
26. Малорацкий Л. Г., Явич Л. Р. Проектирование и расчет СВЧ-элементов на полосковых линиях. — М.: Советское радио, 1972.
27. Свечников С. В. Элементы оптоэлектроники. — М.: Советское радио, 1967.
28. Стрижевский И. В. и др. Хемотроника. — М.: Наука, 1974.
29. Елинсон М. И. Фундаментальные проблемы микроэлектроники и научно-технический прогресс. — М.: Микроэлектроника. Изд. АН СССР, 1972, т. 1, вып. 1.
30. Носов Ю. Р. Оптронные интегральные схемы. — М.: Электронная промышленность, 1973, № 2.
31. Вул Б. М. и др. Актуальные задачи полупроводниковой электроники. — М.: Вестник АН СССР, 1969, № 11.
32. Васенков А. А., Соколова Г. Н., Сретенский В. Н. Прогнозирование развития промышленной микроэлектроники. — М.: Электронная промышленность, 1977, № 6.
33. Васенков А. А., Сретенский В. Н., Федотов Я. А. Три проблемы электроники твердого тела. — В кн.: Микроэлектроника и полупроводниковые приборы. — М.: Советское радио, 1977, вып. 2.
34. Федотов Я. А. Полупроводниковая электроника, год 2001-й. — М.: Советское радио, Будапешт.: Изд-во техн. лит-ры, 1975.
35. Шокин А. И. Полупроводниковая электроника. БСЭ, т. 20, изд. 3-е.
36. Основы проектирования микроэлектронной аппаратуры/Под ред. Б. Ф. Высоцкого. — М.: Советское радио, 1977.
37. Штернов А. А. Физические основы конструирования, технологии РЭА и микроэлектроники. — М.: Радио и связь, 1981.
38. Гитис Э. И., Пискулов Е. А. Аналого-цифровые преобразователи. — М.: Энергия, 1981.

ОГЛАВЛЕНИЕ

Предисловие	3
Введение	5
Глава 1. Основные положения микроэлектроники и направления ее развития	12
§ 1.1. Этапы миниатюризации и микроминиатюризации элементов электронной аппаратуры	12
§ 1.2. Общая характеристика микроэлектроники	18
§ 1.3. История развития микроэлектроники	23
§ 1.4. Изделия микроэлектроники и классификация интегральных микросхем.	27
§ 1.5. Система обозначений интегральных микросхем	32
Глава 2. Физические принципы работы и создания интегральных микросхем	39
§ 2.1. Явления, процессы и методы, используемые в интегральной микроэлектронике	39
§ 2.2. Общая характеристика явлений и процессов, определяющих функционирование ИМС	41
§ 2.3. Базовые физико-химические методы создания микроэлектронных структур	55
Глава 3. Полупроводниковые интегральные микросхемы	80
§ 3.1. Типовые конструкции и структура полупроводниковых ИМС	80
§ 3.2. Биполярные транзисторы	89
§ 3.3. МДП-транзисторы	103
§ 3.4. Диоды	112
§ 3.5. Полупроводниковые резисторы	116
§ 3.6. Полупроводниковые конденсаторы	122
§ 3.7. Технология изготовления биполярных ИМС	127
§ 3.8. Технология изготовления МДП-ИМС	138
§ 3.9. Сборка и герметизация полупроводниковых ИМС	145
§ 3.10. Этапы разработки и проектирования полупроводниковых ИМС	148
Глава 4. Гибридные интегральные микросхемы	155
§ 4.1. Конструкция гибридных ИМС	155
§ 4.2. Элементы толстопленочных гибридных ИМС	159
§ 4.3. Методы получения тонких пленок	164
§ 4.4. Подложки для гибридных ИМС	172
§ 4.5. Пленочные резисторы	175
§ 4.6. Пленочные конденсаторы	180
§ 4.7. Индуктивные элементы в пленочных ИМС	186
§ 4.8. Пленочные проводники и контактные площадки	188
§ 4.9. Межслойная изоляция	190
§ 4.10. Методы получения различных конфигураций пассивных элементов гибридных ИМС	191
§ 4.11. Навесные компоненты гибридных ИМС	196

§ 4.12.	Корпусы для гибридных ИМС	198
§ 4.13.	Основные принципы разработки и этапы проектирования гибридных ИМС	203
§ 4.14.	Исходные данные для проектирования гибридных ИМС	206
§ 4.15.	Проектирование топологии и конструкции гибридных ИМС	210
<i>Глава 5.</i>	<i>Большие интегральные схемы</i>	<i>217</i>
§ 5.1.	Общая характеристика и основные параметры БИС	217
§ 5.2.	Классификация и области применения БИС	221
§ 5.3.	Элементная база БИС	226
§ 5.4.	Конструкция и технология изготовления полупроводниковых БИС	229
§ 5.5.	Конструкция и технология изготовления гибридных БИС	241
§ 5.6.	Особенности и основные этапы проектирования БИС	247
<i>Глава 6.</i>	<i>Основы микросхемотехники и интегральные микросхемы для аппаратуры связи</i>	<i>258</i>
§ 6.1.	Схемотехнические особенности ИМС	258
§ 6.2.	Основные типы цифровых ИМС на биполярных транзисторах	260
§ 6.3.	Схемотехническая реализация основных логических функций ИМС	266
§ 6.4.	Микромощные логические ИМС	271
§ 6.5.	Логические ИМС на МДП-транзисторах	275
§ 6.6.	Тенденции развития цифровых ИМС	281
§ 6.7.	Основные типы аналоговых (линейных) ИМС	284
§ 6.8.	Интегральные микросхемы для аппаратуры связи	292
§ 6.9.	Микропроцессоры	298
§ 6.10.	Интегральные микросхемы СВЧ-диапазона	302
<i>Глава 7.</i>	<i>Качество, надежность и применение интегральных микросхем</i>	<i>312</i>
§ 7.1.	Основные понятия теории качества	312
§ 7.2.	Основные понятия теории надежности	316
§ 7.3.	Методы контроля качества и оценки надежности ИМС	321
§ 7.4.	Категории и виды испытаний ИМС	326
§ 7.5.	Стоимость ИМС и БИС	330
§ 7.6.	Пути повышения качества и надежности ИМС	335
§ 7.7.	Основы применения ИМС и БИС	339
<i>Глава 8.</i>	<i>Функциональная микроэлектроника</i>	<i>345</i>
§ 8.1.	Основные направления развития функциональной микроэлектроники	345
§ 8.2.	Оптоэлектроника	351
§ 8.3.	Акустоэлектроника	361
§ 8.4.	Диэлектрическая электроника	366
§ 8.5.	Хемотроника	368
§ 8.6.	Биоэлектроника	372
§ 8.7.	Дальнейшее развитие микроэлектроники	375
<i>Литература</i>		<i>381</i>