

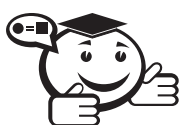
---

# Глава 1

## ПРЕДМЕТ МИКРОЭЛЕКТРОНИКИ

---

### 1.1 Основные положения микроэлектроники



.....  
***Микроэлектроника**— это область электроники, охватывающая исследование, конструирование, производство и применение микроэлектронных изделий, основной разновидностью которых являются интегральные микросхемы.*  
.....



.....  
***Интегральная микросхема (ИМС)**— микроэлектронное изделие, выполняющее определенную функцию преобразования, обработки сигналов и (или) накопления информации и имеющее высокую плотность упаковки электрически соединенных элементов (или элементов и компонентов), которое с точки зрения требований к испытаниям, приемке, поставке и эксплуатации рассматривается как единое целое.*  
.....

В составе микроэлектроники выделяют три основных раздела — физику электронных процессов, технологию и микросхемотехнику.



.....  
***Микросхемотехника (интегральная схемотехника)**— раздел микроэлектроники, охватывающий исследования и разработку электрических и структурных схем, используемых в ИМС и электронной аппаратуре на их основе.*  
.....

Микросхемотехника является самостоятельной ветвью схемотехники, в которой используются оригинальные схемные и структурные решения, эффективно использующие специфические особенности интегральных микросхем с целью улучшения их основных характеристик. Эти особенности обусловлены интегральной технологией изготовления, которая накладывает определенные ограничения на параметры элементов и компонентов ИМС и в то же время открывает новые возможности их использования [1].

Принципы микросхемотехники являются результатом интенсивных исследований, направленных на выявление существенных различий между интегральными микросхемами и схемами на дискретных компонентах, и отражают специфику технологии производства ИМС и тенденцию роста степени интеграции их функциональных узлов. Таких принципа два: принцип взаимного согласования цепей и принцип схемотехнической избыточности при ограничении размеров полезной площади подложки или кристалла.



.....  
 Принцип согласования цепей заключается в такой их конструкторско-технологической реализации, при которой требуемые электрические параметры оказываются пропорциональными друг другу в широком интервале внешних воздействий.  
 .....



.....  
 Принцип схемотехнической избыточности заключается в усложнении схемотехники ИМС для улучшения их качества, минимизации площади кристалла и повышения технологичности.  
 .....

Принципы микросхемотехники обусловлены ограничениями и возможностями технологии изготовления.

*Ограничения.* Технология изготовления полупроводниковых интегральных схем преимущественно ориентирована на создание схем, в которых *n-p-n*-транзисторы имеют оптимальные параметры. При этом характеристики других элементов являются производными и значения их параметров в значительной степени предопределены и ограничены. С целью получения требуемых характеристик таких наиболее важных элементов, как транзисторы со сверхбольшим коэффициентом усиления или полевые транзисторы, в технологический процесс изготовления *n-p-n*-структур иногда вводят дополнительные стадии. Однако основной метод преодоления ограничений, обусловленных технологией изготовления, заключается в приспособлении схемно-конструктивных решений к требованиям технологии, а не в разработке специальной технологии для данной схемы.

Другое ограничение связано с реализацией высокоомных резисторов и конденсаторов с ёмкостями, превышающими десятки пикофард, поскольку это сопровождается увеличением необходимой площади кристалла. Поэтому высокоомные резисторы обычно реализуются в виде большого динамического внутреннего сопротивления активных источников тока на транзисторах (для транзисторов не требуется большой площади), а в усилительных каскадах часто используются

сложные элементы, такие как пары Дарлингтона, составные транзисторы и управляемые источники тока.

Большие ёмкости невозможно реализовать даже посредством увеличения их площади на кристалле. По этой причине недопустимо применение межкаскадных конденсаторов, а проблемы согласования уровней каскадов и стабилизации их режима решают в пределах более технологичной, хотя и усложнённой, схемотехники структур с непосредственными связями.

Резисторы с допустимым разбросом сопротивлений менее  $\pm(5-10)\%$  не могут быть получены без снижения выхода годных. Однако значения отношений сопротивлений с точностью, на порядок превышающей эти значения, можно достичь без дополнительного усложнения технологических процессов. Поэтому схемотехника ИМС направлена на то, чтобы качественные характеристики интегральных схем определялись не абсолютными значениями сопротивлений, а главным образом их отношениями [3].

*Возможности.* Интегральная технология открывает пути создания схемных элементов, позволяющих получить качественно новые свойства. Среди них можно назвать многоэмиттерные транзисторы (которые не могут быть реализованы на дискретных компонентах), согласованные транзисторы и т. п.

В отличие от разработчиков электронных схем на дискретных компонентах, разработчики интегральных схем не имеют возможности произвольно выбирать схемные компоненты, оптимальные с точки зрения выполнения конкретной функции, но они могут в допустимых пределах изменять технологические режимы для достижения желаемых результатов.

В немалой степени схемотехнику интегральных схем определяют допустимая мощность рассеяния, необходимость обеспечения стабильности параметров в широком диапазоне изменения внешней температуры, а также необходимость защиты транзисторов от перегрузок по току.

В настоящее время в результате интенсивных исследований с применением самых современных методов анализа и расчёта разработан набор широко используемых функциональных узлов, а также созданы тщательно отработанные методы объединения этих узлов в полупроводниковые интегральные схемы с требуемыми характеристиками [3].

Интегральные микросхемы проектируются и выпускаются сериями.



.....  
***Серия интегральной микросхемы** — совокупность типов интегральных микросхем, которые могут выполнять различные функции, имеют единое конструктивно-технологическое исполнение и предназначены для совместного применения.*  
.....

## 1.2 Процесс проектирования интегральных микросхем

Важнейшей задачей микросхемотехники является проектирование новых типов интегральных микросхем. Проектирование представляет собой создание опи-

сания, необходимого для построения в заданных условиях еще не существующего технического объекта на основе первичного описания этого объекта (технического задания).



.....  
 В процессе проектирования интегральных микросхем выделяют стадии *структурного проектирования*, *схемного проектирования* и *конструкторско-технологического проектирования*.  
 .....

Стадия структурного проектирования микросхем состоит из структурного синтеза, в ходе которого на той или иной элементной базе создается структурная схема, обеспечивающая выполнение функций, определенных техническим заданием, и структурного анализа, в процессе которого проверяется правильность функционирования синтезированной структуры при различных рабочих условиях и производится приближенная сравнительная оценка ее основных параметров. Обычно при проектировании микросхем создается несколько структурных вариантов, из которых выбираются наилучшие на основании результатов сравнения их параметров [1].

Для выбранных структурных вариантов производится схемное проектирование, результатом которого является электрическая схема разрабатываемой интегральной микросхемы. Схемное проектирование состоит из этапов схемного синтеза, в ходе которого создается электрическая схема, соответствующая выбранному варианту структуры, и анализа созданной схемы, в результате которого определяются ее основные электрические параметры. На этапе анализа решается задача параметрической оптимизации схемы. В процессе схемного проектирования обычно разрабатывается несколько вариантов электрических схем, которые отличаются структурой, элементной базой, значениями основных параметров. По результатам анализа производится выбор варианта электрической схемы, наилучшим образом удовлетворяющего требованиям технического задания.



.....  
 Стадии структурного и схемного проектирование образуют процесс *схмотехнического проектирования* интегральных микросхем.  
 .....

Стадия конструкторско-технологического проектирования включает этапы выбора или разработки технологического процесса для изготовления микросхемы, разработки ее топологии в соответствии с полученной электрической схемой, анализ полученной топологии с целью проверки ее правильности, расчет физико-технических параметров компонентов микросхемы.

Поскольку физико-технические параметры компонентов определяют их электрические параметры, после стадии конструкторско-технологического проектирования требуется повторить электрический анализ схемы с целью уточнения ее характеристик.

## 1.3 Классификация интегральных микросхем

По конструктивно-технологическому признаку различают полупроводниковые, гибридные и прочие (пленочные, керамические и т. д.) ИМС. В полупроводниковых ИМС все элементы и межэлементные соединения выполнены в объеме и на поверхности полупроводниковой подложки. По типу применяемых активных компонентов (транзисторов) полупроводниковые микросхемы разделяют на микросхемы на биполярных транзисторах, микросхемы на МДП-транзисторах (МДП-микросхемы), микросхемы смешанной Би-КМДП-технологии. Гибридные интегральные микросхемы содержат пленочные пассивные элементы и навесные компоненты. В пленочных ИМС все элементы и межэлементные соединения выполнены в виде токопроводящих пленок. В зависимости от способа нанесения пленок на поверхность диэлектрической подложки и их толщины различают *тонкопленочные* (толщина пленок менее 1 мкм) и *толстопленочные* (толщина пленок более 1 мкм) микросхемы.

По функциональному назначению все ИМС делятся на два класса: цифровые и аналоговые [7].

*Цифровые интегральные микросхемы* (ЦИМС) предназначены для обработки информации, представленной в виде цифровых кодов. Характерной особенностью ЦИМС является то, что в виде цифровых кодов представлены и входные, и выходные сигналы. По этому признаку аналого-цифровые и цифроаналоговые преобразователи относятся к классу аналоговых ИМС.

Внутри каждого класса ИМС принята более детальная классификация микросхем по функциональному назначению и по целому ряду других признаков. По функциональному назначению ЦИМС разделяют на подгруппы (логические элементы, триггеры и др.) и виды внутри подгрупп (триггеры: счетные, универсальные, Шмитта и т. д.).

По способу представления двоичной информации цифровые интегральные микросхемы подразделяют на импульсные, динамические, потенциальные. В потенциальных цифровых схемах значения «0» и «1» представляются двумя различными уровнями электрического потенциала: высоким и низким. Для потенциальных элементов используют понятия положительной и отрицательной логики, которые отражают принятый способ кодирования двоичных цифр. При положительной логике высокий уровень электрического потенциала соответствует логической единице, а низкий — логическому нулю. При отрицательной логике высокий уровень электрического потенциала соответствует логическому нулю, а низкий — логической единице.

В импульсных цифровых схемах одно из значений логического сигнала («0» или «1») определяется наличием импульсов определенной длительности и амплитуды, а другое значение — отсутствием импульсов, то есть сохранением какого-либо постоянного потенциала. При положительной логике отсутствие импульсов соответствует логическому «0», а наличие — «1».

В динамических цифровых схемах логическая «1» представляется пачкой импульсов или возобновляемым через необходимый интервал времени потенциалом, а логический «0» — отсутствием импульсов (или наоборот).

В основе классификации цифровых микросхем *по типу логики* лежит принцип схемотехнического построения базового логического элемента серии микросхем. Потенциальные цифровые микросхемы, которые являются наиболее распространенными, по типу логики подразделяют на следующие *основные* классы: *транзисторно-транзисторной логики* (ТТЛ) и *транзисторно-транзисторной логики с диодами Шоттки* (ТТЛШ), *логики на комплементарных МДП-транзисторах* (КМДП, КМОП), *на МДП-транзисторах с каналом *n*-типа* (*n*-МДП, *n*-МОП) и *на полевых транзисторах с затвором Шоттки на основе арсенида галлия* (ПТШ-GaAs).

Степень интеграции ЦИМС характеризуют коэффициентом компонентной интеграции  $k_k$  и коэффициентом функциональной интеграции  $k_\phi$ .

Коэффициент компонентной интеграции определяется выражением:

$$k_k = \lg N_k, \quad (1.1)$$

где  $N_k$  — общее число элементов и компонентов, расположенных на кристалле, и характеризует, главным образом, уровень технологической сложности микросхемы. По величине коэффициента компонентной интеграции различают: ИМС первой степени интеграции, если  $k_k \leq 1$ ; ИМС второй степени интеграции, если  $k_k \leq 2$ ; ИМС третьей степени интеграции, если  $k_k \leq 3$ ; ИМС четвертой степени интеграции, если  $k_k \leq 4$ ; ИМС пятой степени интеграции, если  $k_k > 4$ .

Для определения функциональной сложности ЦИМС используется коэффициент функциональной интеграции:

$$k_\phi = \lg N_\phi, \quad (1.2)$$

где  $N_\phi$  — количество логических элементов И-НЕ либо ИЛИ-НЕ, расположенных на кристалле микросхемы. Если в качестве элементной базы используются другие логические элементы, то величина  $N_\phi$  определяется числом элементов И-НЕ либо ИЛИ-НЕ, требуемых для реализации эквивалентной логической функции микросхемы. По величине коэффициента функциональной интеграции различают: малые интегральные схемы (МИС), содержащие один или несколько логических элементов, когда  $k_\phi \leq 1$  (триггер); средние интегральные схемы (СИС), содержащие один или несколько функциональных узлов, когда  $k_\phi \leq 2$  (счетчик, регистр, сумматор); большие интегральные схемы (БИС), содержащие одно или несколько функциональных устройств, когда  $2 \leq k_\phi \leq 4$  (АЛУ, ЗУ); сверхбольшие интегральные схемы (СБИС), имеющие  $k_\phi > 4$  и выполняющие функции целых цифровых систем (микро-ЭВМ).

Для оценки сложности ЦИМС используется параметр, называемый «плотностью упаковки»  $\gamma = N_k/V$ , где  $V$  — объем кристалла без выводов.

*Аналоговые интегральные микросхемы* (АИМС) предназначены для обработки электрических сигналов, изменяющихся по законам непрерывных функций (аналоговых сигналов). Аналоговые сигналы представляют собой физические величины (напряжение, ток, частота колебаний и т. д.), мера которых отображает (кодирует) информацию.

В зависимости от выполняемой функции аналоговые ИМС подразделяются на следующие классы: операционные усилители, инструментальные ИМС, радиочастотные ИМС, силовые ИМС.



.....  
**Операционный усилитель** — это многоцелевая ИМС, предназначенная для построения схем с фиксированным коэффициентом и точно синтезированной передаточной функцией.  
 .....



.....  
**Инструментальная аналоговая ИМС** — это многоцелевая ИМС, осуществляющая прецизионные преобразования аналоговых сигналов с обеспечением выполнения комплекса требований по точности, частотным свойствам и электрическим параметрам. От операционных усилителей инструментальные ИМС отличаются либо наличием цифровых цепей наряду с аналоговыми, либо внутренними обратными связями, реализующими стабилизацию определённых электрических параметров.  
 .....

*Радиочастотные ИМС* предназначены для усиления и преобразования сигналов радиотехнического диапазона волн.

*Силовые ИМС* предназначены для использования в источниках вторичного электропитания, усилительных и передающих устройствах.

Среди аналоговых ИМС наибольшее применение получили операционные усилители, которые используются как основные функциональные узлы в различных линейных и нелинейных устройствах.



## Контрольные вопросы по главе 1

.....

- 1) Чем обусловлено ограничение на сопротивления резисторов и емкости конденсаторов, применяемых в микросхемных структурах?
- 2) Что подразумевается под схемотехническим проектированием интегральных микросхем?
- 3) К какому классу интегральных микросхем по функциональному назначению относятся микросхемы аналого-цифровых преобразователей?
- 4) Какая полярность логики используется при представлении двоичной информации, если логической единице соответствует потенциал  $U^1 = -1.6$  В, а логическому нулю — потенциал  $U^0 = -0.8$  В?
- 5) Определить коэффициент функциональной интеграции триггера, построенного на основе двух логических элементов И-НЕ.