

Лекция №1. Электроника как наука и стоящие перед ней задачи. Электронные приборы, понятие их надежности. Основные этапы и направления развития электроники

Электроника – область науки, изучающая теорию и практику использования электронных приборов и устройств.

Электронный прибор – прибор, принцип действия которого связан с физическими процессами, происходящими при прохождении электронов в вакууме, газовой среде или в твердом теле. Исходя из этого определения, выделяют следующие типы электронных приборов: *электронные лампы*, газонаполненные приборы и *твердотельные электронные приборы*.

Исторически первым поколением электронных приборов являются электронные лампы, работа которых основана на явлении термоэлектронной эмиссии. Однако развитие электроники, основанной на электронных лампах, привело к ряду существенных проблем. В результате перед электроникой встали следующие основные задачи:

- уменьшение габаритов и веса электронных приборов и аппаратуры,
- повышение их надежности,
- уменьшение потребляемой мощности,
- снижение стоимости.

Проблема *надежности* в электронике возникла практически одновременно с появлением многоламповой аппаратуры. Высокая надежность означает, что процент отказов, приходящихся на один час работы должен быть как можно ниже. Для оценки надежности тех или иных изделий электронной техники пользуются величиной, называемой *интенсивностью отказов*. Эта величина указывает, какую долю полного отказа набирает один прибор за час работы.

В развитии электроники выделяют *пять этапов*:

1-й. Конец 19-го века, после того, как в 1895 г. А. Попов продемонстрировал прибор – *первый в мире радиоприемник*. Предназначение – прием и передача электрических сигналов. Состав: резисторы, конденсаторы, катушки индуктивности и другие пассивные элементы.

2-й – эра *электронных ламп* – начало 20 в. после изобретения в 1904 г. Дж. Флемингом вакуумного диода и в 1906 г. – триода (Л. Форест). Это были активные элементы, позволяющие преобразовывать и усиливать электрические сигналы.

3-й – в 1948 г. – изобретение *транзистора* (усиление, генерация и преобразование электрических сигналов). Транзисторы – малые размеры, большая надежность, низкая потребляемая мощность и высокий КПД, что обусловило их широкое применение в радиоэлектронной аппаратуре и ЭВМ. Появление транзисторов – революция в электронике.

4-й – 1957 г. – разработка планарной технологии изготовления полупроводниковых приборов, основанной на диффузионной технологии, оксидном маскировании и фотолитографии.

5-й – появление *интегральных микросхем* и переход к *микроэлектронике*.

Лекция №2. Твердотельная электроника. Планарная технология. Интеграция и миниатюризация твердотельной электроники. Перспективы развития микроэлектроники и ее элементной базы.

После создания транзисторов развитие электроники, решение ее основных задач, происходило в направлении совершенствования технологии изготовления электронных приборов и устройств. В 1957 г. была разработана *планарная технология* изготовления полупроводниковых приборов.

Планарная технология основанна на диффузионной технологии, оксидном маскировании и фотолитографии. Это – вторая, технологическая, революция в электронике, которая привела к интегральным методам изготовления полупроводниковых приборов. С помощью планарной технологии в 1961 г. были получены первые кремниевые интегральные микросхемы с электрическими связями только на одной стороне полупроводниковой подложки. Планарная технология позволила также осуществить изоляцию элементов друг от друга в кристалле.

Использование наряду с планарной технологией *пленочной технологии* позволило значительно уменьшить размеры элементов схем с десятков *мкм* до единиц *мкм* и решить проблему надежности межэлементных соединений. Это привело к развитию *микроэлектроники* – области электроники, занимающейся исследованием, конструированием, изготовлением и применением электронных функциональных устройств микроминиатюрного интегрального исполнения.

Микроминиатюризация – это не только уменьшение объема и массы изделий, но и создание таких устройств, принцип действия которых основан на новых физических явлениях. *Интеграция* - объединение как определенного количества элементов в заданном объеме (не менее 5 элементов/ см^3), так и так и новых технологических методов формирования этих элементов в микросхемы в целом.

В настоящее время интегральные микросхемы являются основой электронной аппаратуры.

Развитие микроэлектроники, в свою очередь, также можно разделить на пять этапов, различающихся между собой сложностью получаемых интегральных микросхем, которая характеризуется *степенью интеграции*. Степень интеграции ИМС определяется количеством элементов и компонентов в ее кристалле.

Принципиальное технологическое преимущество микроэлектроники перед другими направлениями техники – групповой способ производства. Производственной единицей в микроэлектронике является полупроводниковая пластина, содержащая множество элементных чипов. Помимо уменьшения стоимости производства (что принципиально важно), групповой способ производства, по существу, потребовал последовательного уменьшения размеров электронных компонентов. При этом возрастает не только выход приборов с одной пластины, но и повышается быстродействие приборов при одновременном увеличении надежности их работы.

С начала 60-х годов, когда появились первые интегральные микросхемы, размеры транзистора уменьшились от 1 *мм* до нескольких десятых долей микрона. Причем в последней четверти XX века каждые полтора года число транзисторов на одной микросхеме увеличивалось вдвое. При такой скорости нарастания числа транзисторов (по принципу пропорциональной микроминиатюризации) к началу нового столетия мы должны были бы перейти к эре гигамасштабных схем (более 10^9 транзисторов на одну микросхему). Реализация подобных масштабов интеграции требует уже принципиально новых решений.

Таким образом, основной тенденцией микроэлектроники является повышение степени интеграции интегральных микросхем. Однако на пути продолжения этой тенденции – барьеры. Если диапазон 1,0...0,1 *мкм* представляет собой сложный *технологический барьер* (предельное совершенство литографии), который требует смены

парка технологической аппаратуры, то диапазон линейных размеров элементов $0,1 \dots 0,05$ мкм – это *фундаментальный физический барьер*, за которым все свойства твердого тела, включая электропроводность, резко меняются, а наглядные образы и привычные теоретические модели теряют силу. Уменьшение размеров элементов интегральных микросхем на несколько порядков практически меняет физические основы работы ее полупроводниковых элементов. Начинают в полной мере проявляться квантовые эффекты, а физика проводимости определяется *квантово-механической интерференцией* электронных волн.

Наноэлектроника – логическое развитие микроэлектроники. Твердотельные информационные приборы уменьшаются от микро- (10^{-6} м) до нанометрового (10^{-9} м) размера. Под наноэлектроникой понимают направление электроники, в котором изучаются физические явления и процессы взаимодействия электронов с электромагнитными полями, а также разработка *нанотехнологии* создания приборов и устройств, в которых данное взаимодействие используется для передачи, обработки хранения информации. В приборах квантовой наноэлектроники роль носителя информации отводится волновой функции электрона.

Лекция №3. Технология как средство воплощения физических идей в реальность. Технологические основы твердотельной электроники.

Достижения твердотельной электроники базируются на исследованиях и открытиях в области физики твердого тела и твердотельной технологии. С развитием технологии связаны практически все, в том числе и крупнейшие физические достижения.

Технология изготовления интегральных микросхем основана на использовании технологии изготовления дискретных полупроводниковых приборов и пленочной технологии. Производство кремниевых интегральных микросхем базируется на технологических процессах формирования в кристалле кремния большого числа транзисторных структур, соединенных в схемы с заданными функциями.

В настоящее время значительный интерес представляют процессы производства монолитных полупроводниковых схем как на кремнии, так и на арсениде галлия. Производство интегральных схем состоит из более чем несколько сотен отдельных или повторяющихся технологических процессов и операций, являющихся предметом ноу-хау, которые защищены патентами.

Этапы технологических процессов производства ИМС условно можно разделить на четыре группы:

- процессы первичной обработки материалов, результатом которых являются отполированные кремниевые пластины;
- процессы формирования топологии ИМС, в результате которых формируются физические и геометрические параметры активных и пассивных элементов заданной схемы заданного функционального назначения;
- процессы локального изменения физических свойств подложки, в результате которых формируются технологические и топологические параметры элементов заданной схемы заданного функционального назначения;
- сборка микроэлектронных устройств и процессы межоперационного контроля.

В результате всех этих процессов кремниевая пластина трансформируется во множество отдельных ИМС, каждая из которых содержит миллионы транзисторных структур. Каждая ИМС выполняет отдельную функцию или набор функций.

Каждый этап технологического процесса основывается на ключевых физических или химических явлениях, имеющих целью локально преобразовать полупроводниковую структуру так, чтобы выполнялась заданная целевая функция, связанная с процессами обработки и хранения информации.

Первым этапом в изготовлении кремниевой пластины является *очистка* сырьевого кремния от примесей. Для этого обычно используется *зонная плавка* – метод перекристаллизации материалов посредством создания в образце небольшого расплавленного участка и его перемещения по всему образцу. Очистка материала осуществляется за счет явления *сегрегации примесей*. Зонная очистка позволяет получить чистые материалы с содержанием примесей 10^{-7} - 10^{-9} %.

На втором этапе производится *выращивание монокристалла кремния*. Слиток выращивается на основе монокристалла – затравки, помещенной на торце держателя (метод Чохральского). Кристалл-затравка помещается в расплав кремния и, медленно вращаясь, перемещается вверх. Расплавление и последующее охлаждение расплава кремния стимулирует рост монокристалла в соответствии со структурой затравки кристалла. Диаметр цилиндрического слитка кремния, получаемый в процессе роста по методу Чохральского, достигает 120, 150, 200 мм. Длина слитков зависит от непрерывности подачи исходного материала в вакууме и может достигать одного метра и более.

Для получения высококачественных слитков используются автоматизированные системы, позволяющие задать оптимальную скорость вытягивания кристалла. Слитки шлифуются для получения плоской грани, параллельной оси кристалла. Эта грань используется в качестве базовой на протяжении всего процесса изготовления

интегральных схем при совмещении изображений и проведения электрических и оптических измерений.

Следующий этап технологического процесса – разрезание слитка, которое осуществляется с помощью алмазных дисков, вращающихся с большими скоростями. В результате получают отдельные пластины толщиной 0,5-1,0 мм. Поверхность подложки чаще всего ориентируют вдоль кристаллографической плоскости $[111]$. Отклонение плоскости пластины от кристаллографических плоскостей не должно превышать 20 секунд.

Полученные после разрезания слитка пластины затем шлифуют и полируют пастами разных классов. В итоге шероховатость поверхности пластин составляет 0,5-0,05 мкм, что соответствует высшему классу 14.

Толщина механически нарушенного слоя на поверхности пластин может достигать 1 мкм. Для удаления механически нарушенного слоя и получения поверхности высокого класса затем проводится *химическое травление* кремния. В результате получают поверхность оптической чистоты.

В технологии изготовления полупроводниковых приборов и ИМС широко применяют метод *эпитаксиального* наращивания монокристаллических слоев вещества. *Эпитаксией* называют ориентированное наращивание слоев вещества с воспроизведением кристаллической структуры подложки.

При изготовлении полупроводниковых приборов и ИМС в качестве диэлектрических защитных покрытий используют слои диоксида SiO_2 и нитрида Si_3N_4 кремния. Эти слои выполняют несколько разных функций в технологии изготовления приборов и в самих приборах и ИМС.

Группа технологических процессов, предназначенных для формирования топологических параметров транзисторных структур, объединена понятием *литография*.

Литографические процессы формируют заданный рельеф (рисунок) в слое полупроводника, диэлектрика или металла с целью изготовления интегральных схем или других электронных приборов.

Диффузия примесей является в производстве твердотельных полупроводниковых приборов и интегральных микросхем одним из наиболее распространенных способов легирования полупроводника при создании электронно-дырочных структур, изоляции и пассивных элементов ИМС.

P-n переходы получают также методом *ионного легирования*. *Ионное легирование* — это управляемое введение атомов в поверхностный слой подложки путем бомбардировки ее ионами с энергией от нескольких кэВ до нескольких МэВ (обычно 20 - 100 кэВ). Процесс ионного легирования осуществляют для модификации свойств (в первую очередь, электрофизических) поверхностного слоя твердого тела.

Лекция №4. Гетеропереходы

Гетеропереходом (ГП) называют переход, образующийся на границе двух полупроводников разной химической природы и, следовательно, с разной шириной запрещенной зоны.

ГП могут быть образованы как двумя монокристаллическими (аморфными) полупроводниками, так и на контакте монокристаллического и аморфного полупроводников.

На границе ГП происходит изменение свойств полупроводника, в частности, меняется структура энергетических зон, ширина запрещенной зоны, подвижности и эффективные массы носителей заряда.

Различают изотипные и анизотипные гетеропереходы. Анизотипные гетеропереходы создаются в результате контакта полупроводников с дырочным и электронным типами проводимости. Изотипные переходы возникают в результате контакта полупроводников одного типа проводимости.

Примеры гетеропереходов.

Для получения ГП с минимальным количеством дефектов на границе раздела кристаллическая решетка одного полупроводника должна с минимальными нарушениями переходить в кристаллическую решетку другого. В связи с этим полупроводники, используемые для создания ГП, должны иметь близкие значения постоянной решетки и идентичную кристаллическую структуру.

Комбинации различных гетеропереходов образуют гетероструктуры.

Правила построения энергетических диаграмм гетеропереходов.

Эффект выпрямления на гетеропереходе полупроводников с одним типом проводимости.

ГП позволяет осуществлять практически одностороннюю инжекцию носителей заряда, которая сохраняется и при увеличении тока через ГП, тогда как в гомопереходе она нарушается.

Чрезвычайно важным направлением в развитии современной твердотельной электроники и физики является использование полупроводниковых гетероструктур, получаемых эпитаксиальным методом. Эти структуры сегодня очень активно используются и в решении проблем кремниевых интегральных схем ультрамалых размеров (нанoeлектроники).

Солнечные батареи на гетероструктурах составляют мощную ветвь полупроводниковой индустрии, которая будет расти все дальше и дальше и сыграет, по оценкам экспертов, к 2030 г. важную роль в смене примерно 50% освещения на лампах и сэкономит примерно 10% электроэнергии в мире.

Лекция №5. Факторы, определяющие вид вольт-амперной характеристики реального p - n перехода.

ВАХ реального диода отличается от ВАХ идеального диода. Ее вид определяется многими факторами, относительное влияние которых зависит от свойств полупроводникового материала, состояния поверхности полупроводника, температуры окружающей среды, конструкции диода и др.

Прямая ветвь ВАХ. Прямой ток и его зависимость от приложенного к диоду напряжения, в отличие от идеального p - n перехода, определяется рядом физических процессов, протекающих как в самом p - n переходе, так и в базе реального диода. Рассмотрим основные процессы, влияющие на прямой ток.

1. *Влияние последовательного объемного сопротивления базы диода.* В реальных p - n переходах область эмиттера легирована гораздо сильнее, чем база. Если базой является, например, n -область кристалла, то прямой ток обусловлен, в основном, инжекцией дырок из эмиттера в базу. При невысокой степени легирования базы ее объемное сопротивление может оказаться сравнимым по величине с сопротивлением p - n перехода. В этом случае уже нельзя считать, что напряжение внешнего источника приложено только к p - n переходу, как это предполагалось при выводе уравнения ВАХ идеального перехода, и необходимо учитывать падение приложенного напряжения не только на переходе, но и на объемном сопротивлении базы: $U = U_{p-n} + U_{\bar{o}}$. Тогда для J_{np} имеем:

$$J_{np} = J_s \exp[(U - U_{\bar{o}})/kT].$$

2. *Ток рекомбинации.* Прямой ток перехода создается и теми носителями заряда, которые не успевают за время жизни преодолеть потенциальный барьер. В результате прямой ток реального перехода меньше, чем у идеального.
3. *Туннельный ток.* При высокой концентрации примеси в полупроводниковом кристалле получается узкий p - n переход, и возможно туннельное просачивание носителей заряда сквозь потенциальный барьер. При этом прямая ветвь ВАХ диода отличается от идеальной (используется в туннельных диодах).

Обратная ветвь ВАХ. На обратную ветвь ВАХ влияют следующие процессы.

1. *Генерация носителей заряда в p - n переходе.* В области p - n перехода, как и в прилегающих областях кристалла идет процесс тепловой генерации носителей заряда. Возникающие при этом пары электрон-дырка разделяются полем перехода, что приводит к появлению так называемой *генерационной оставляющей обратного тока* диода, которую называют также *термотоком*. С ростом обратного смещения на переходе термоток растет.
2. *Поверхностный ток утечки.* Различные поверхностные загрязнения могут привести к тому, что сопротивление p - n перехода на поверхности кристалла может оказаться меньше его сопротивления в объеме. В этом случае поверхностное сопротивление p - n перехода (*сопротивление утечки*) будет шунтировать его объемное сопротивление. В связи с тем, что обратные токи полупроводниковых диодов малы, поверхностные утечки оказываются иногда довольно существенными.
3. *Пробой p - n перехода.* Пробой перехода характеризуется тем, что малым изменениям напряжения на переходе отвечают значительные изменения силы тока, протекающего через переход. Различают два основных механизма пробоя p - n перехода: *тепловой* пробой и *электронный*. В свою очередь различают два механизма электронного пробоя: *лавинный* пробой (или ударная ионизация) и *туннельный* пробой.

Лекция №6. Эквивалентная схема p - n перехода. Работа p - n перехода на переменном сигнале. Переходные процессы в p - n переходах.

Эквивалентная схема p - n перехода включает сопротивление собственно p - n перехода, сопротивление базовой области кристалла, сопротивление утечки, диффузионную и барьерную емкости перехода. При работе на переменном токе p - n переход шунтируется емкостями, что приводит к ухудшению его выпрямляющих свойств. Чем выше частота переменного тока, протекающего через p - n переход, тем сильнее ухудшаются выпрямляющие свойства перехода.

Рассмотрение физической картины этого процесса.

P - n переход часто используется в таком режиме, когда амплитуда подаваемых сигналов резко изменяется в течение малого промежутка времени, и эти изменения быстро следуют одно за другим (импульсный режим). При работе в таком режиме в p - n переходах имеют место *переходные процессы*, которые в основном связаны с двумя явлениями, происходящими при быстром изменении напряжения или тока через переход.

Первое – накопление неосновных носителей заряда в базе кристалла при его прямом смещении и их рассасывании при уменьшении напряжения. Так как электрическое поле в базе обычно невелико, то движение неосновных носителей заряда в ней определяется законами диффузии и происходит относительно медленно. Поэтому накопление носителей в базе и их рассасывание могут влиять на свойства перехода в режиме переключения.

Второе явление, происходящее в диодах при их переключении – перезарядка барьерной емкости, что также происходит не мгновенно и поэтому может влиять на свойства диодов.

При сравнительно больших плотностях прямого тока через диод существенно накопление неосновных носителей в базе, а перезаряд барьерной емкости является второстепенным процессом. При малых плотностях тока переходные процессы в диоде определяются перезарядом барьерной емкости, а накопление неосновных носителей заряда в базе практически не сказывается.

Временные зависимости тока и напряжения, характеризующие переходные процессы в диоде, зависят также от сопротивления внешней цепи, в которую включен диод. По указанным причинам рассматривают четыре предельных случая переходных процессов в полупроводниковом диоде с несимметричным p - n переходом.

Работа диода на большом переменном сигнале в схеме с генератором напряжения, т.е. при включении диода в цепь с малым полным сопротивлением по сравнению с сопротивлением диода.

Работа диода на большом переменном сигнале в схеме с генератором напряжения, т.е. при включении диода в цепь с малым полным сопротивлением по сравнению с сопротивлением диода.

Работа диода на большом переменном сигнале в схеме с генератором тока, т.е. при включении диода в цепь с большим полным сопротивлением, которое и определяет значение тока в цепи с диодом.

Работа диода на малом переменном сигнале в схеме с генератором напряжения.

Работа диода на малом переменном сигнале в схеме с генератором тока.

Лекция №7. Полупроводниковые диоды. Структура и основные элементы диодов. Основы классификации диодов. Основные параметры диода, их физический смысл.

Полупроводниковый диод – это полупроводниковый прибор с одним выпрямляющим электрическим переходом и двумя выводами, в котором используется то или иное свойство выпрямляющего электрического перехода.

Лекция №8. Выпрямительные диоды. Низкочастотные плоскостные и высокочастотные точечные диоды.

Лекция №9. Диоды с выпрямлением на контакте металл-полупроводник. СВЧ-диоды. Импульсные диоды.

Выпрямляющий контакт металл-полупроводник называют еще барьером Шотки – по имени немецкого ученого В. Шотки, впервые исследовавшего свойства такого контакта. Поэтому и диоды с выпрямлением на контакте металл-полупроводник называют диодами Шотки.

Особенностью этих диодов по сравнению с диодами на p - n -переходах является то, что при прямом смещении контакта металл - полупроводник через него инжектируются основные носители заряда. Инжекции неосновных носителей заряда не происходит. Поэтому в диодах Шотки нет и таких процессов как накопление и рассасывание неосновных носителей заряда в базе, которые обуславливают снижение быстродействия диодов на p - n переходах. Инерционность диодов Шотки определяется лишь величиной их барьерной емкости.

Изготавливаются эти диоды следующим образом. На подложке из сильно легированного кремния с n -типом проводимости эпитаксиальным методом наращивается более высокоомный слой кремния с n -типом проводимости. Затем, методом термического испарения в вакууме, на слой низкоомного кремния осаждается пленка металла, у которого работа выхода электронов превышает работу выхода электронов кремния. В результате на этом контакте образуется барьер Шотки.

Технология изготовления диодов с барьером Шотки позволяет получать диоды с величиной барьерной ~ 1 нФ (за счет малой площади выпрямляющего контакта и создания широкого потенциального барьера на контакте). Малая величина барьерной емкости и последовательного сопротивления диода обуславливают малое время перезаряда барьерной емкости. Благодаря этому диоды с выпрямлением на контакте металл-полупроводник особенно перспективны для применения в качестве высокочастотных и сверхскоростных импульсных диодов. Особенность диодов с барьером Шотки состоит в том, что теплоотвод от разогреваемого в процессе прохождения тока выпрямляющего контакта осуществляется пленкой металла. Теплопроводность металла значительно больше, чем у любого сильно легированного полупроводника. Поэтому скорость теплоотвода, а, следовательно, и рассеиваемая мощность, в таких диодах значительно больше, чем в диодах на p - n -переходах.

Таким образом, использование выпрямления на контакте металл-полупроводник позволяет получать мощные высокочастотные выпрямительные диоды.

Частотный диапазон работы таких диодов можно увеличить, используя точечный контакт металл-полупроводник.

СВЧ – диоды предназначены для работы в диапазоне сантиметровых и более коротких радиоволн, т.е. в области частот от десятков до сотен гигагерц.

Инерционность полупроводниковых диодов, приводящая к ухудшению выпрямительных свойств с ростом частоты подаваемого сигнала и ограничивающая тем самым частотный диапазон работы большинства диодов, обусловлена процессами накопления и рассасывания неосновных носителей заряда в базе диода и зарядом и разрядом барьерной емкости. Возможность работы СВЧ-диодов на очень высоких частотах достигается тем, что в них используется выпрямление на контакте металл-полупроводник, достоинства применения которого в диодах нами рассмотрено выше. Кроме того, выпрямляющий контакт является точечным, что обуславливает малое значение его барьерной емкости.

При работе в области СВЧ в его эквивалентной схеме помимо барьерной емкости перехода $C_{бар}$, сопротивления перехода r_g и сопротивления r_s необходимо учитывать индуктивность контактной пружины L и емкость корпуса $C_{корп}$ (рис.1). Это обуславливает особенности конструкции СВЧ-диода. У СВЧ-диодов пробивное напряжение значительно ниже, чем у точечных высокочастотных диодов из-за использования в них

сильнолегированных полупроводников. Здесь применение низкоомного материала позволяет уменьшить сопротивление растекания диода и время жизни его неосновных носителей. Для изготовления СВЧ-диодов используются германий, кремний и арсенид галлия.

Импульсными диодами называют диоды, которые могут работать при временах переключения 1 мкс и меньше. Импульсные диоды используют в качестве элементов в схемах, работающих при малых длительностях импульсов, поэтому они должны обладать малой инерционностью при переключениях. Свойства и параметры импульсных диодов определяются происходящими в них переходными процессами.

Пусть на диод подается прямоугольный импульс напряжения (рис.2). При переключении напряжения на диоде с прямого на обратное в начальный момент времени после смены полярности через диод протекает ток, значительно превышающий величину обратного тока насыщения. Это обусловлено тем, что при прямом смещении диода в его базе произошло накопление неосновных носителей заряда, и в результате этого сопротивление базы уменьшилось. По мере рассасывания накопленного заряда за счет рекомбинации и вытягивания его из базы полем p - n -перехода величина обратного тока диода уменьшается вплоть до своего стационарного значения $I_{нас}$, т.е. происходит восстановление обратного тока насыщения диода (рис.3). Промежуток времени между моментом переключения полярности напряжения на диоде с прямого на обратное и моментом достижения обратным током значения $I_{нас}$ называется временем восстановления ($t_в$) обратного сопротивления или тока диода. Этот параметр определяет минимальную длительность импульсов, при которых диод сохраняет выпрямляющие свойства.

Если через диод пропустить прямоугольный импульс прямого тока (рис.4), то в начальный момент времени на диоде падает на относительно большое напряжение. В дальнейшем оно уменьшается сопротивление базы диода. После прекращения процесса накопления носителей в базе падение напряжения на диоде достигает стационарного значения (рис.5). Время, в течение которого с момента подачи на диод прямого тока напряжение на диоде достигает 1, 2 стационарного значения, называется временем установления $t_у$ прямого напряжения.

Время восстановления $t_в$ и время установления $t_у$ – специфические параметры импульсных диодов, причем наиболее важным из них является параметр $t_в$. Поскольку эти параметры обусловлены процессами, происходящими в базе диода (изменением заряда в базе диода), они определяются диффузионной емкостью диода. Так как $I_g = \tau_p$, то для уменьшения $t_в$ необходимо обеспечить малое время жизни носителей, инжектированных в базу диода, т.е. обеспечить их быструю рекомбинацию в объеме полупроводника. Это достигается путем создания в базе полупроводника различных дефектов и введением в нее примесей с большим сечением захвата. В запрещенной зоне полупроводника при этом образуются дополнительные уровни, которые облегчают рекомбинацию носителей заряда и, тем самым, способствуют уменьшению $t_в$. С целью уменьшения диффузионной емкости диода его базу делают очень тонкой. В диодах с узкой базой при большой скорости рекомбинации инжектированных носителей в базе диода и на контакте величина диффузионной емкости зависит от толщины базы. Поэтому у диодов с тонкой базой временами $t_в$ и $t_у$ могут быть меньше, чем у диодов с широкой базой.

Электронно-дырочные переходы в импульсных диодах бывают как точечные, так и плоскостные. Большое распространение получили диффузионные импульсные диоды. По специальной технологии создаются микроплоскостные импульсные диоды.

Возможность уменьшения времени восстановления импульсных диодов путем введения большого количества рекомбинационных центров ограничена тем, что рост числа рекомбинационных центров приводит к увеличению обратного генерационного тока p - n -перехода. Поэтому при изготовлении импульсных диодов выбирают материалы с малым временем жизни неосновных носителей заряда. У арсенида галлия время жизни

неосновных носителей заряда много меньше, чем у кремния. Поэтому у импульсных диодов из арсенида галлия можно получить сверхвысокую скорость переключения (t_g порядка 0,1 наносекунд или менее). У кремниевых диодов практически достижимые значения времени переключения находятся в диапазоне от 1 до 5 наносекунд. Как было показано выше, в качестве сверхскоростных импульсных диодов используются также диоды с выпрямлением на контакте металл-полупроводник.

Лекция №10. Стабилитроны. Варикапы. Принцип действия. Основные параметры

В обычных диодах пробой p - n -перехода является нежелательным, так как он ограничивает величину обратного напряжения, которое можно приложить к диоду. Для повышения величины напряжения пробоя приходится использовать более высокоомный материал. Однако пробой p - n -перехода не всегда является отрицательным явлением. В специальных типах приборов он используется как полезный эффект. К числу таких приборов относятся *стабилитроны*.

Стабилитрон, или, как его еще иначе называют, опорный диод, представляет собой плоскостной диод, который работает при обратных напряжениях вплоть до напряжения пробоя. До наступления пробоя диод обладает очень высоким сопротивлением, а после пробоя – очень малым динамическим сопротивлением. Таким образом, происходит ограничение напряжения на уровне напряжения пробоя, и на вольтамперной характеристике стабилитронов появляется область электрического пробоя, т.е. пробой является нормальным режимом работы стабилитрона.

Полупроводниковым материалом, используемым при изготовлении стабилитронов, является кремний, поскольку кремниевые диоды имеют малые токи насыщения в предпробойной области, высокую допустимую температуру p - n -перехода, и их вольтамперная характеристика в рабочей области имеет значительную крутизну. Германий для изготовления стабилитронов не используют, так как у германиевых диодов величина обратного тока значительно больше, чем у кремниевых, и вероятность теплового пробоя существенно выше.

Напряжение пробоя стабилитрона характеризует величину стабилизируемого этим стабилитроном напряжения - U_{cm} . Как известно, напряжение пробоя диода определяется концентрацией основных носителей, поэтому стабилитроны с разной величиной напряжения стабилизации получают путем изменения концентрации примесей в базе диода. Разные типы стабилитронов имеют напряжение стабилизации от 3 до 400 В. Различают низковольтные и высоковольтные стабилитроны. Стабилитроны, у которых $U_{cm} < 6В$, называются низковольтными. Они изготавливаются из сильнолегированного кремния. Ширина p - n -перехода у таких стабилитронов мала, и в них происходит туннельный пробой. К высоковольтным относятся стабилитроны с напряжением стабилизации U_{cm} выше 6 В. Основными параметрами стабилитронов являются: дифференциальное сопротивление (в рабочей точке); статическое сопротивление (в рабочей точке); минимальный ток, с которого начинается стабилизация напряжения $I_{cm\min}$; коэффициент качества β ; температурный коэффициент напряжения стабилизации TKH .

Дифференциальное сопротивление стабилитрона $R_{диф} = \frac{\partial U}{\partial I}$ характеризует его качество – способность стабилизировать напряжение при изменении проходящего тока в рабочем режиме. Большим изменениям тока должны соответствовать малые изменения напряжения, поэтому качество стабилитрона тем выше, чем меньше величина $R_{диф}$. Для разных типов стабилитронов значение $R_{диф}$ изменяется от десятых долей до сотен Ом.

Статическое сопротивление $R_{cm} = \frac{U}{I}$ характеризует потери в стабилитроне в данной рабочей точке. Его величина связана с напряжением стабилизации и рабочим током.

Коэффициент качества $\beta = R_{диф} / R_{cm}$ можно рассматривать как отношение относительного изменения напряжения стабилизации к относительному изменению тока

через диод $\beta = \frac{R_{диф}}{R_{стат}} = \frac{\partial U}{\partial I} \cdot \frac{I}{U} = \frac{\partial U}{U} / \frac{\partial I}{I}$. Максимальным изменениям тока должны соответствовать минимальные изменения напряжения, и величина β должна быть по возможности малой. Для разных типов стабилитронов величина β изменяется от 0,1 до 0,5.

Напряжение стабилизации зависит от температуры. Температурный коэффициент напряжения стабилизации TKH показывает, насколько изменяется относительная величина напряжения стабилизации при изменении температуры стабилитрона на 1 К:

$$TKH = \left(\frac{1}{U_{ст}} \right) \left(\frac{\partial U}{\partial T} \right) = \frac{\partial U_{ст}}{U_{ст} \partial T}. \text{ Он характеризует температурные свойства стабилитронов.}$$

У низковольтных стабилитронов знак $TKH < 0$, у высоковольтных – положительный. Это объясняется разным характером температурной зависимости пробивного напряжения при туннельном и лавинном пробое. При туннельном механизме пробоя напряжение пробоя уменьшается с ростом температуры, поскольку с ростом температуры уменьшается ширина запрещенной зоны полупроводника, и вероятность туннелирования носителей возрастает. Напряжение лавинного пробоя растет с ростом температуры. Это происходит из-за возрастания теплового хаотического движения носителей с ростом температуры. Поэтому для того, чтобы они приобрели достаточную энергию, нужно приложить большее напряжение.

Зависимость TKH стабилитронов от напряжения стабилизации приведена на рис. . Изменение знака TKH соответствует напряжению стабилизации $U_{ст} \approx 6B$, т.е. у стабилитронов с таким значением $U_{ст}$ изменения напряжения стабилизации с температурой минимальны. Можно включить последовательно стабилитроны с отрицательным и положительным температурным коэффициентом напряжения и получить стабилитрон с малым TKH (порядка $10^{-5} K^{-1}$).

Электронно-дырочные переходы для стабилитронов изготавливаются сплавным, диффузионным, диффузионно-сплавным методами. Чаще всего стабилитроны имеют сплавной $p-n$ -переход. Стабилитроны находят широкое применение в стабилизаторах постоянного или импульсного напряжения.

Полупроводниковый диод обладает барьерной и диффузионной емкостями, и он может быть использован как конденсатор с электрически управляемой емкостью. Диоды, изготовленные специально для этой цели, называются *варикапами*. Известно, что при прямом смещении диода проявляется диффузионная емкость перехода, а при обратном – барьерная. Однако при прямом смещении диода через него протекают сравнительно большие активные токи, и велики потери мощности сигнала. Поэтому в варикапах нашла полезное применение барьерная емкость $p-n$ -перехода. Емкость варикапа меняется в широких пределах при изменении приложенного к $p-n$ -переходу обратного напряжения. Величина максимального обратного смещения для варикапа, так же как и для других диодов, ограничивается напряжением пробоя. Варикапы в качестве устройства с реактивным периодически меняющимся сопротивлением применяются в параметрических усилителях, в качестве смесителей, детекторов, а также в схемах электронной настройки резонансной частоты колебательных контуров и в схемах автоматики.

Если к $p-n$ -переходу прикладывать возрастающее обратное напряжение, то ширина перехода увеличивается, и его барьерная емкость уменьшается. Величина емкости варикапа C_v , измеренная при заданном обратном напряжении, является основным параметром варикапа. Наряду с этим параметром варикап характеризуется также

коэффициентом перекрытия по емкости K_c , который представляет собой отношение емкостей варикапа при двух заданных значениях обратных напряжений: $K_c = \frac{C_{\epsilon 1}}{C_{\epsilon 2}}$.

К числу важных параметров варикапа относят его добротность Q_v . Добротность варикапа характеризует качество его емкости и, как и для любого конденсатора, определяется отношением полного реактивного сопротивления к полному активному сопротивлению, (которое представляет сопротивление потерь) при заданном значении емкости или обратного напряжения. Обычно добротность измеряется при тех же значениях напряжения смещения, что и емкость, и варикапа она составляет от нескольких десятков до нескольких сотен единиц. Чем выше добротность варикапа, тем эффективнее он выполняет свои функции в электрических схемах.

Изменение барьерной емкости диода при изменении обратного напряжения на нем обусловлено перемещением основных носителей заряда в n - и p -областях диода, прилегающих к p - n -переходу. Постоянная по времени этого процесса или, иначе, время релаксации τ определяется формулой $\tau = \epsilon \epsilon_0 \rho$, где ϵ - диэлектрическая проницаемость вещества, ϵ_0 - диэлектрическая проницаемость вакуума, ρ - удельное сопротивление полупроводника и составляет величину $\sim 10^{-13}$ с. Такая малая величина τ означает, что инерционность процесса изменения величины барьерной емкости варикапа при изменении напряжения на нем может сказываться только на очень высоких частотах. Однако, как и для любого полупроводникового диода, у варикапа есть параметры, которые могут уменьшать его добротность на низких или высоких частотах. Поскольку варикап работает при обратном смещении, в эквивалентной схеме p - n перехода можно пренебречь диффузионной емкостью, а параллельное соединение r_{p-n} и r_y обозначить через r .

В области низких частот работа варикапа характеризуется цепочкой $rC_{\bar{\sigma}ap}$ и для этого случая показано, что величина добротности варикапа

$$Q_{\epsilon} = \omega C_{\bar{\sigma}ap} r_{p-n}. \quad (8)$$

На высоких частотах сопротивление базы может оказаться сравнительным с емкостным сопротивлением барьерной емкости, и им пренебрегать нельзя. Напротив, активное сопротивление p - n -перехода можно не учитывать, поскольку оно велико в сравнении при высокой частоте параллельно ему включенным емкостным сопротивлением $C_{\bar{\sigma}ap}$. Таким образом, для высоких частот эквивалентная схема варикапа представляет собой последовательное соединение барьерной емкости и сопротивления базы. При этом добротность варикапа определяется соотношением

$$Q_{\epsilon} \approx \frac{1}{\omega C_{\bar{\sigma}ap} r_{\bar{\sigma}}}. \quad (9)$$

Из (8) и (9) видно, что в области низких частот добротность варикапа растет с частотой, а в области высоких частот - убывает. Задаваясь некоторым минимально допустимым значением добротности и, используя формулы (8) и (9), можно определить границы рабочего диапазона варикапа. Максимум добротности обычно растет в интервале от 1 до 10 МГц.

Из формулы (8) можно видеть, что для работы в диапазоне низких частот нужны варикапы, у которых произведение барьерной емкости p - n -перехода на величину его сопротивления велико. Величина этого произведения не зависит от площади p - n -перехода

S , так как $C_{\bar{\sigma}ap} \sim S$, а $r \sim \frac{1}{S}$. Можно увеличить величину сопротивления p - n -перехода

варикапа обратному току, используя для его изготовления полупроводниковые материалы с большой шириной запрещенной зоны, поскольку у этих материалов мала плотность постоянных обратных токов. В качестве такого материала в низкочастотных варикапах используется кремний. Сопротивление перехода r определяется также наличием

сопротивления утечки по поверхности полупроводникового кристалла, которое приводит к уменьшению добротности варикапа на низких частотах. Помимо этого, r_y может изменяться с течением времени, что может быть причиной нестабильности добротности варикапа во времени. Поэтому к технологии изготовления варикапов предъявляются специфические требования.

В области высоких частот добротность варикапа можно повысить, уменьшая величину сопротивления его базы. Сопротивление базы определяется ее геометрическими размерами и удельным сопротивлением исходного полупроводникового материала:

$r_6 = \frac{\rho W}{S}$, где W – толщина базы. Следовательно, уменьшить r_6 можно уменьшая толщину

базы и величину удельного сопротивления ρ . Однако толщину базы нельзя сделать меньше, чем ширина области объемного заряда на p - n -переходе, т.е. возможности уменьшения W ограничены. Малое удельное сопротивление базы можно получить, используя низкоомный полупроводниковый материал, т.е. материал с большой концентрацией свободных носителей заряда n и большой подвижностью μ этих носителей ($\rho \sim \frac{1}{n\mu}$). Здесь также имеется трудность, которая состоит в том, что

использование полупроводникового материала с большой концентрацией носителей приводит к уменьшению ширины p - n -перехода и напряжения его пробоя. Напряжение пробоя p - n -переходов при лавинном пробое почти линейно уменьшается с увеличением концентрации основных носителей. Очевидно, что уменьшение напряжения пробоя ограничивает пределы измерения емкости варикапа. Поэтому при конструировании варикапов выбирают материалы с такой минимально возможной величиной удельного сопротивления, которая позволяет обеспечить необходимую величину напряжения обратного смещения. Уменьшить величину ρ можно путем использования полупроводников с высокой подвижностью носителей. В связи с этим высокочастотные варикапы изготавливаются из германия и арсенида галлия, у которых подвижность носителей больше, чем у кремния. Перспективным является создание варикапов с барьером Шоттки, в которых можно получить меньшие значения сопротивления базы и более резкую, чем в варикапах на основе p - n -перехода, зависимость емкости от напряжения.

Лекция №11. Туннельные диоды. Вольт-амперная характеристика. Основные параметры.

Свое название эти диоды получили благодаря тому, что в основе их действия лежит туннельный эффект проникновения электронов сквозь потенциальный барьер в области р-п-перехода.

Туннельный эффект происходит при определенной напряженности электрического поля, и в обычных диодах он наблюдается при обратной полярности напряжения на р-п-переходе. Туннельные диоды изготавливаются из полупроводникового материала с очень большой концентрацией примесей (порядка $10^{18} - 10^{20} \text{ см}^{-3}$). Поэтому толщина р-п-перехода в таких диодах настолько мала (около 0,01 - 0,02 мкм, т.е. на два порядка меньше, чем в обычных диодах), что туннельный эффект в них происходит не только при обратном, но и прямом смещении р-п-перехода.

При приложении прямого напряжения к диоду через его р-п-переход начинает протекать ток, обусловленный туннелированием электронов из п-области в р-область сквозь потенциальный барьер перехода (туннельный ток). С ростом прямого напряжения туннельный ток через р-п-переход возрастает, достигает своего наибольшего для данного диода значения и уменьшается. Затем, по мере роста приложенного напряжения, в связи с уменьшением высоты потенциального барьера р-п-перехода будет происходить инжекция основных носителей через переход и, как и в обычных выпрямительных диодах, будет возрастать прямой ток диода. Таким образом, участок ОАВ на вольтамперной характеристике туннельного диода обусловлен прохождением туннельного тока через р-п-переход при его прямом смещении, а участок ВС – прохождением обычного диффузионного тока. (рис.)

При обратном смещении на р-п-переходе также возникают условия для туннелирования электронов, но в этом случае электроны туннелируют через переход из р-области в п-область. Возникающий ток будет расти с увеличением обратного напряжения, т.е., что при ничтожно малых значениях обратного напряжения происходит туннельный пробой р-п-перехода туннельного диода. Главной особенностью вольтамперной характеристики туннельного диода является наличие на ее прямой ветви, в некотором интервале напряжений, участка отрицательного дифференциального сопротивления (участок АВ).

Форма вольтамперной характеристики туннельного диода определяется исходным полупроводниковым материалом и концентрацией примесей в обеих областях р-п-перехода. Чем больше ширина запрещенной зоны полупроводника E_g , тем при больших напряжениях наблюдается максимальный туннельный ток диода.

Свойства туннельного диода оценивают по координатам экстремальных точек А и В его вольтамперной характеристики (рис.) пиковому току I_n и напряжению U_n , току впадины I_B и напряжению впадины U_B . На вольтамперной характеристике диода выделяют также напряжение раствора U_{pp} . Это прямое напряжение, превышающее напряжение впадины и соответствующее току, равному пиковому на восходящей ветви характеристики. Величина пикового тока I_n различна для туннельных диодов разного назначения. Напряжение раствора U_{pp} определяется, главным образом, шириной запрещенной зоны. Величина его тем больше, чем больше ширина запрещенной зоны полупроводника, поскольку в случае большой величины E_g заметный по величине диффузионный ток начинается при большем понижении потенциального барьера.

Усилительные свойства туннельного диода характеризуются отношением токов I_n/I_B , и его стараются сделать как можно больше. Величина I_n/I_B тем больше, чем сильнее

легирован полупроводниковый материал. Однако возможность увеличения этого параметра диода ограничена растворимостью примесей в полупроводнике.

Наличие на вольтамперной характеристике туннельных диодов участка отрицательного сопротивления позволяет использовать их в качестве переключателей, усилителей и генераторов электрических колебаний. При этом важными являются частотные свойства туннельных диодов. Принцип действия этих диодов связан с туннельным переносом носителей сквозь потенциальный барьер р-п-перехода. Этот процесс происходит за время $\sim 10^{-3} \text{ с}$. Туннельные диоды работают при малых прямых напряжениях, соответствующих участку ВАХ с отрицательным дифференциальным сопротивлением, поэтому накопление неосновных носителей заряда в базе туннельных диодов практически не происходит. В результате туннельные диоды обладают крайне малой инерционностью и могут работать на частотах до нескольких десятков гигагерц. Предельная частота усиления и генерирования туннельных диодов ограничивается лишь емкостью р-п-перехода, сопротивлением базы и индуктивностью.

Туннельные диоды могут работать в очень широком диапазоне температур от -200 до 400°C . Кроме того, они потребляют мало мощности, малогабаритны и устойчивы к радиации. Поэтому применяются в различных схемах вычислительных устройств, в радиотехнике и др.

При изготовлении диодов главным образом используются такие материалы, как германий, арсенид и антимонид галлия. Германиевые диоды обладают большой стабильностью параметров и распространены наиболее широко. Кремний при изготовлении туннельных диодов не используется

Лекция №12. Распределение стационарных потоков носителей заряда в транзисторе. Принцип действия транзистора.

Лекция №13. Основные параметры транзистора. Частотные характеристики и параметры. Пути расширения частотного диапазона работы биполярного транзистора

Лекция №14. Классификация транзисторов по мощности. Маломощные и мощные транзисторы.

Лекция № 15. Униполярные (полевые) транзисторы. Принцип действия и конструкция транзисторов с р-п переходом в качестве затвора. Статические характеристики

Полевой или канальный транзистор - полупроводниковый прибор, в котором управление проходящим через него током осуществляется электрическим полем.

Рассмотрим устройство и принцип действия полевого транзистора с р-п переходом. Он изготавливается из стержня прямоугольного сечения, из Ge или Si n-типа, торцевые области которого обладают повышенной концентрацией доноров. Одна из этих областей легируется несколько сильнее. Затем к этим областям создаются омические контакты, между которыми проходит управляемый ток основных носителей заряда.

Вокруг центральной части стержня путем вплавления создается область р-типа и, следовательно, р-п переход. Р-п переход включается в обратном направлении. При изменении напряжения на р-п переходе меняется ширина области ПЗ, обедненной основными носителями заряда, а следовательно, и сечение области, по которой проходит управляемый ток основных носителей заряда, т.е. изменяется сопротивление между невыпрямляющими контактами. Область толщина и поперечное сечение которой управляется внешним напряжением – канал. Электрод из которого в канал входят основные носители заряда – исток, а электрод через который основные носители уходят из канала – сток. Электрод, служащий для регулирования поперечного сечения канала – затвор.

Вдоль канала происходит падение напряжения, обусловленное прохождением тока между истоком и стоком. В результате разность потенциалов между р и n областями полупроводникового кристалла в разных частях р-п перехода различна, поэтому канал по мере приближения к стоку сужается.

При подаче на затвор дополнительного сигнала напряжения ширина канала будет меняться, и, тем самым, будет модулироваться ток, текущий от истока к стоку.

Конструкция полевых транзисторов разрабатывается с наименьшим возможным поперечным сечением канала, чтобы получить более сильную его модуляцию. Для этого, например, целесообразно выполнять затвор в виде кольца. Кроме того, для увеличения глубины модуляции площади поперечного сечения канала и его сопротивления исходный кристалл полупроводника должен быть высокоомным. В этом случае при увеличении обратного напряжения р-п переход будет расширяться в сторону канала, как в более высокоомную область.

Конструктивной разновидностью полевого транзистора является алькатрон. Отличительной особенностью его является то, что основные носители двигаются в нем от истока к стоку по радиусам. Кроме того, алькатрон имеет второй р-п переход, с помощью которого начальную ширину канала можно устанавливать точнее, чем при механической обработке кристалла. При наличии второго р-п перехода появляется возможность дополнительного управления полевым транзистором. Полевые транзисторы по принципу действия аналогичны электронным вакуумным лампам. Исток подобен катоду электронной лампы, затвор - сетке, сток - аноду.

Статические вольтамперные характеристики полевого транзистора с р-п переходом в качестве затвора.

Выходные характеристики.

1) Изменение сечения канала. Рассмотрим зависимость силы тока от напряжения стока при постоянном напряжении на затворе. На первом участке ВАХ – замедленный, линейный рост тока стока при увеличении $U_{ст}$ от U_0 до $U_{нас}$. Нелинейность ВАХ на этом участке объясняется расширением области ПЗ р-п перехода и сужением канала с увеличением $I_{ст}$. Наибольшее расширение области ПЗ и сужение канала происходит со стороны стока, т.к. там возникает наибольшая разность потенциалов между каналом и р-областью затвора.....

Лекция № 16. Тиристоры. Структура и принцип действия, основные параметры. Двухэлектродные и триодные тиристоры.

Лекция № 17. Приборы с зарядовой связью. Принцип действия, характеристики и параметры. Конструкция, технология получения.

Лекция № 18. Классификация, методы изоляции элементов интегральных микросхем.

Лекция № 19. Классификация оптоэлектронных полупроводниковых приборов. Некогерентные полупроводниковые излучатели. Принцип действия.

Лекция № 20. Когерентные полупроводниковые излучатели. Инжекционные лазеры на р-п переходах. Принцип действия. Конструкция и технология изготовления.

Лекция № 21. Полупроводниковые приемники излучения. Фотодиоды и фотоэлементы

Лекция № 22. Приемники проникающей радиации и корпускулярно-преобразовательные приборы. Принцип действия. Приемники на основе моно- и поликристаллов

Лекция № 23. Приборы, основанные на эффекте междолинного перехода электронов. Появление отрицательного дифференциального сопротивления при междолинном переходе носителей заряда. Эффект Ганна. Режимы работы.

Лекция № 24. Терморезисторы. Терморезисторы прямого и косвенного подогрева.

Лекция № 25. Варисторы. Принцип действия. Основные характеристики и параметры. Область применения.

Лекция № 26. Тензорезисторы. Принцип действия. Основные характеристики и параметры. Область применения.

Лекция № 27. Фоторезисторы. Принцип действия. Основные характеристики и параметры. Область применения.

Лекция № 28. Датчики магнитного поля. Датчики на основе эффекта Холла.
Магниторезисторы.

Лекция № 29. Принцип действия термоэлектрических приборов. Особенности конструкции.

Лекция № 30. Переключающие элементы и элементы памяти