

**ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ
УЧРЕЖДЕНИЕ ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
«ОРЕНБУРГСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ АГРАРНЫЙ УНИВЕРСИТЕТ»**

**МЕТОДИЧЕСКИЕ УКАЗАНИЯ ДЛЯ ОБУЧАЮЩИХСЯ
ПО ОСВОЕНИЮ ДИСЦИПЛИНЫ**

Б1.В.ДВ.04.01 Элементная база электронных устройств

Направление подготовки (специальность) 35.04.06 Агроинженерия
Профиль образовательной программы Электротехнологии и электрооборудова-
ние в сельском хозяйстве
Форма обучения очная

СОДЕРЖАНИЕ

1. Конспект лекций	3
1.1 Лекция №1 - Основные сведения по физике полупроводников	3
1.2 Лекция №2 - Контактные явления	6
1.3 Лекция №3 - Полупроводниковые диоды	9
1.4 Лекция №4 - Биполярные транзисторы	13
1.5 Лекция №5 - Тиристоры	17
1.6 Лекция №6 - Полевые транзисторы	21
1.7 Лекция №7 - Оптоэлектронные полупроводниковые приборы	23
1.8 Лекция №8 - Интегральные микросхемы	27
2. Методические указания по проведению практических занятий	30
2.1 Практическое занятие №1 - Методы формирования и классификации электронно-дырочных переходов	30
2.2 Практическое занятие №2 - Аналитический расчет плавного электронно-дырочного перехода	32
2.3 Практическое занятие №3 - Расчет распределения неосновных носителей заряда в базе диода	34
2.4 Практическое занятие №4 - Расчет переменных токов и полной проводимости диода	37
2.5 Практическое занятие №5 - Расчет вольт-амперной характеристики диода	39
2.6 Практическое занятие №6 - Принцип выбора полупроводникового диода	44
2.7 Практическое занятие №7 - Статические параметры и характеристики биполярных транзисторов	46
2.8 Практическое занятие №8 - Эквивалентные схемы биполярных транзисторов	50
2.9 Практическое занятие №9 - Диодный и триодный тиристоры	52
2.10 Практическое занятие №10 - Симметричные тиристоры	59
2.11 Практическое занятие №11 - Способы управления тиристорами	60
2.12 Практическое занятие №12 - Расчет выходных статических характеристик полевого транзистора	64
2.13 Практическое занятие №13 - Эквивалентные схемы полевого транзистора	66
2.14 Практическое занятие №14 - Полевые транзисторы с изолированным затвором	68
2.15 Практическое занятие №15 - Светодиоды и принцип их выбора	73
2.16 Практическое занятие №16 - Оптопары и оптоэлектронные микросхемы	79
2.17 Практическое занятие №17 - Задачи и принципы микроэлектроники	81

1. КОНСПЕКТ ЛЕКЦИЙ

1.1 Лекция №1 (2 часа).

Тема: «Основные сведения по физике полупроводников»

1.1.1 Вопросы лекции

1. Энергетические зоны полупроводников.
2. Генерация и рекомбинация носителей заряда.
3. Собственные и примесные полупроводники.
4. Процессы переноса заряда в полупроводниках.
5. Температурные зависимости подвижности носителей заряда и удельной проводимости.
6. Фотоэлектрические явления в полупроводниках.

1.1.2 Краткое содержание вопросов

1. Энергетические зоны полупроводников.

Полупроводник — материал, который по своей удельной проводимости занимает промежуточное место между проводниками и диэлектриками и отличается от проводников сильной зависимостью удельной проводимости от концентрации примесей, температуры и воздействия различных видов излучения.

Все процессы с электронами и дырками в полупроводнике, могут быть описаны с точки зрения энергии, которой обладают частицы, находящиеся в разных состояниях. С этой целью можно воспользоваться так называемыми энергетическими (или зонными) диаграммами, по вертикальной оси которых отложены значения энергии, а по горизонтальной может откладываться координата X в кристалле (см. рис.1).

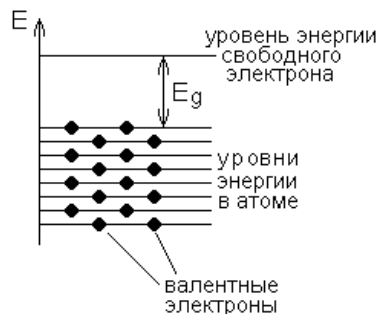


Рис. 1 Энергетическая диаграмма изолированного атома кремния

На рисунке показаны уровни энергии изолированного атома. Значения энергии, которыми может обладать электрон, представляют собой набор отдельных уровней, разделенных интервалами энергий, которыми электроны обладать не могут. На каждом энергетическом уровне, согласно принципу Паули, может находиться не более двух электронов (с противоположными спинами). Остальные электроны, если они имеются в атоме, распределены по другим разрешенным уровням.

Поскольку вне разрешенных уровней электрон находиться не может, он изменяет свою энергию в атоме скачкообразно, перепрыгивая с одного уровня энергии на другой.

2. Генерация и рекомбинация носителей заряда.

Появление свободных носителей заряда может быть связано с облучением фотонами или частицами большой энергии, ударной ионизацией, введением носителей заряда в полупроводник из другого тела (инжекция) и др. Возникшие таким образом

избыточные носители заряда называются неравновесными. Процесс введения неравновесных носителей заряда называют инжекцией. Таким образом, полная концентрация носителей заряда равна:

После прекращения действия механизма, вызвавшего появление неравновесной концентрации носителей, происходит постепенное возвращение к равновесному состоянию. Процесс установления равновесия заключается в том, что каждый избыточный электрон при встрече с вакантным местом (дыркой) занимает его, в результате чего пара неравновесных носителей исчезает. Явление исчезновения пары носителей получило название рекомбинации. В свою очередь, возбуждение электрона из валентной зоны или примесного уровня, сопровождающееся появлением дырки, называется генерацией носителей заряда.

На рис. 2 G – это темп генерации, а R – темп рекомбинации свободных носителей заряда в собственном полупроводнике.

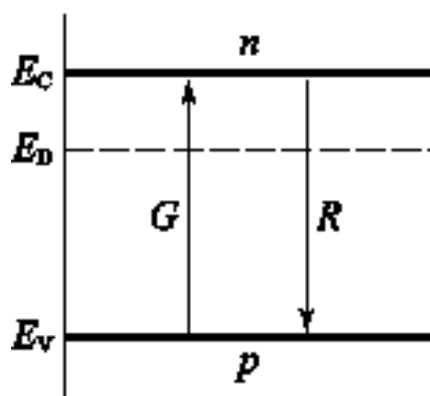


Рис. 2 Генерация и рекомбинация свободных электронов и дырок в полупроводниках

Скорость (темп) рекомбинации R пропорциональна концентрации свободных носителей заряда:

$$R = \gamma \cdot n \cdot p,$$

где γ – коэффициент рекомбинации.

3. Собственные и примесные полупроводники.

Собственный полупроводник — полупроводник, не содержащий примесей или с концентрацией примеси настолько малой, что она не оказывает существенного влияния на удельную проводимость полупроводника. При температуре абсолютного нуля в собственном полупроводнике отсутствуют носители заряда, так как валентная зона полностью занята электронами (там нет дырок), а в зоне проводимости нет электронов. При температурах выше абсолютного нуля некоторые электроны валентной зоны могут быть переброшены в зону проводимости — возможна тепловая генерация пар носителей заряда, в зоне проводимости передаются свободные электроны, а в валентной зоне — дырки.

Примесными называют полупроводники, содержащие донорные и (или) акцепторные примеси.

Примесь, имеющую валентных электронов больше, чем необходимо для завершения связей между ближайшими атомами основного вещества, и в результате этого способную отдавать электроны, называют донорной, а полупроводник с такой примесью — полупроводником с электронной электропроводностью (или n -типа).

Примесь, имеющую валентных электронов меньше, чем это необходимо для завершения связей между ближайшими атомами основного вещества, и вследствие этого

способную захватить электроны, называют акцепторной, а полупроводник с такой примесью – полупроводником с дырочной электропроводностью (или р-типа).

4. Процессы переноса заряда в полупроводниках.

В полупроводниках процесс переноса зарядов может наблюдаться при наличии электронов в зоне проводимости и при неполном заполнении электронами валентной зоны. При выполнении данных условий и при отсутствии градиента температуры перенос носителей зарядов возможен либо под действием электрического поля, либо под действием градиента концентрации носителей заряда.

Дрейфом называют направленное движение носителей заряда под действием электрического поля.

Электроны, получая ускорение в электрическом поле, приобретают на средней длине свободного пробега добавочную составляющую скорости, которая называется дрейфовой скоростью $v_{др}$, к своей средней скорости движения.

Дрейфовая скорость электронов мала по сравнению со средней скоростью их теплового движения в обычных условиях.

При неравномерном распределении концентрации носителей заряда в объеме полупроводника и отсутствии градиента температуры происходит диффузия – движение носителей заряда из-за градиента концентрации, т. е. происходит выравнивание концентрации носителей заряда по объему полупроводника.

Удельная электрическая проводимость любого материала определяется концентрацией и подвижностью свободных носителей заряда, значения которых зависят от температуры.

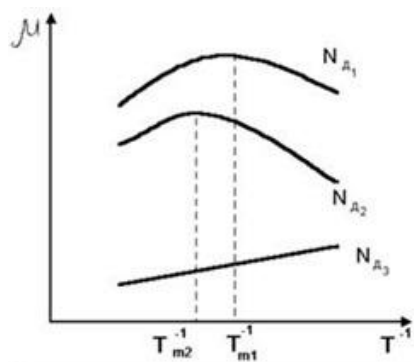


Рис. 3 Зависимости подвижности свободных электронов от температуры в полупроводнике n-типа

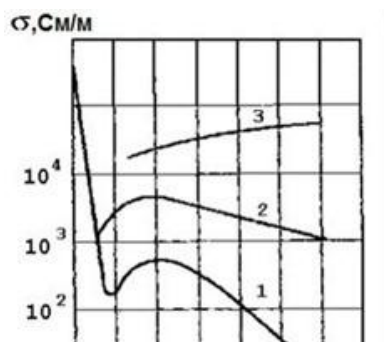


Рис. 4 Температурная зависимость удельной электрической проводимости кремния, содержащего различное количество донорной примеси N_D :

Подвижность μ свободных носителей заряда характеризует их рассеяние и определяется как коэффициент пропорциональности между дрейфовой скоростью $v_{др}$ и напряженностью электрического поля e : $v_{др} = \mu e$.

С повышением температуры при рассеянии на ионах примеси подвижность увеличивается, а затем вследствие все возрастающих колебаний кристаллической решетки и обусловленного ими рассеяния – уменьшается. Величина и положение максимума кривой $\mu(T^{-1})$ зависят от концентрации примеси. С ее увеличением максимум смещается в область более высоких температур, а вся кривая – вниз по оси ординат. При концентрации примеси, равной $N_{дз}$, соответствующей вырожденному полупроводнику, подвижность уменьшается с ростом температуры аналогично тому, как это происходит в проводниковых материалах.

Концентрация свободных носителей заряда в полупроводниках увеличивается с ростом температуры по экспоненциальному закону, а температурная зависимость подвижности имеет в общем виде характер кривой с максимумом и степенной закон изменения.

Рассмотрим экспериментальные кривые температурной зависимости удельной электрической проводимости кремния, содержащего различное количество донорной примеси.

Повышение удельной проводимости кремния с увеличением температуры в области низких температур обусловлено увеличением концентрации свободных носителей заряда – электронов за счет ионизации донорной примеси. При дальнейшем повышении температуры наступает область истощения примеси – полная ее ионизация. Собственная же электропроводность кремния заметно еще не проявляется.

В условиях истощения примеси концентрация свободных носителей заряда практически от температуры не зависит и температурная зависимость удельной проводимости полупроводника определяется зависимостью подвижности носителей от температуры. Наблюдаемое в этой области уменьшение удельной проводимости кремния с ростом температуры происходит за счет снижения подвижности при рассеянии свободных носителей заряда на тепловых колебаниях кристаллической решетки.

6. Фотоэлектрические явления в полупроводниках.

В современной электронной технике широко используются полупроводниковые приборы, основанные на принципе фотоэлектрического преобразования сигналов, который обусловлен изменением электрофизических свойств вещества в результате поглощения в нем световой энергии (квантов света). При этом изменяется проводимость вещества или возникает э. д. с., что приводит к изменениям тока в цепи, в которую включен фоточувствительный элемент.

Явлением фотопроводимости называется увеличение электропроводности полупроводника под воздействием электромагнитного излучения.

При освещении полупроводника в нем происходит генерация электронно-дырочных пар за счет переброса электронов из валентной зоны в зону проводимости. Вследствие этого изменяется проводимость, а следовательно, внутреннее сопротивление полупроводника, указанное явление было названо фоторезистивным эффектом. Основное применение фоторезистивный эффект находит в светочувствительных полупроводниковых приборах – фоторезисторах, которые широко используются в современной оптоэлектронике и фотоэлектронной автоматике.

Фотопроводимость полупроводников может обнаруживаться в инфракрасной, видимой или ультрафиолетовой частях электромагнитного спектра в зависимости от ширины запрещенной зоны, которая, в свою очередь, зависит от типа полупроводника, температуры, концентрации примесей и напряженности электрического поля.

1.2 Лекция №2 (2 часа).

Тема: «Контактные явления»

1.2.1 Вопросы лекции

1. Электронно-дырочный переход.
2. Методы формирования и классификация электронно-дырочных переходов.
3. Барьерная емкость электронно-дырочного перехода.
4. Омический переход на контакте полупроводников с одним типом электропроводности.
5. Выпрямляющие и омические переходы на контакте металла с полупроводников.

1.2.2 Краткое содержание вопросов

1. Электронно-дырочный переход

Граница между двумя соседними областями полупроводника, одна из которых обладает проводимостью n-типа, а другая p-типа, называется электронно-дырочным переходом (p-n-переходом). Он является основой большинства полупроводниковых приборов. Наиболее широко применяются плоскостные и точечные p-n-переходы.

Плоскостной p-n-переход представляет собой слоисто-контактный элемент в объеме кристалла на границе двух полупроводников с проводимостями p- и n-типов (рис. 1, а). В производстве полупроводниковых приборов и интегральных микросхем применяются переходы типа p⁺-n- или p-n⁺ переходы. Индекс «+» подчеркивает большую электропроводность данной области монокристалла.

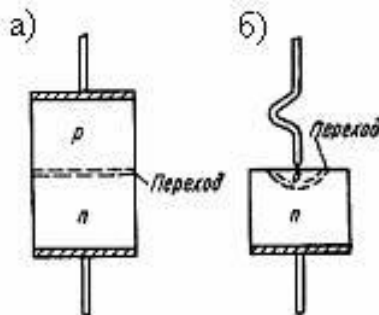


Рис. 1 Плоскостный (а) и точечный (б) p-n переходы

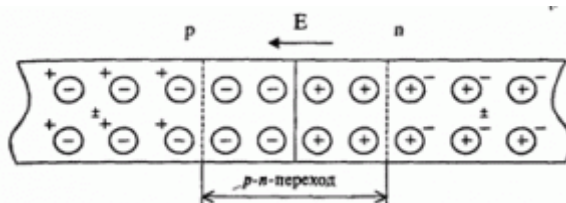


Рис. 2 Структура p-n перехода

2. Методы формирования и классификация электронно-дырочных переходов

Среди разнообразных методов формирования p-n-переходов наибольшее значение имеют два: метод сплавления и метод диффузии примесей. Электронно-дырочный переход, полученный методом сплавления в полупроводник металла или сплава, содержащего донорные или акцепторные примеси, называют сплавным переходом, а переход, полученный в результате диффузии атомов примеси в полупроводник – диффузионным. Диффузионные p-n-переходы могут быть нескольких разновидностей. Диффузионный p-n-переход, образованный в результате диффузии примеси сквозь отверстие в защитном слое, нанесенном на поверхность полупроводника, называют планарным p-n-переходом. Основой такой технологии является фотолитография. Электронно-дырочный переход, образованный в результате конверсии полупроводника, вызванной обратной диффузией примеси в соседнюю область, или активацией атомов примеси, называют конверсионным p-n-переходом. При производстве полупроводниковых приборов широко используют эпитаксиальное наращивание –

наращивание монокристаллических слоев полупроводника на поверхности монокристаллической подложки того же, а иногда и другого по химическому составу полупроводника. При эпитаксиальном наращивании в зависимости от использованной примеси можно получить эпитаксиальный слой с тем же типом электропроводности, что и исходный полупроводник, но с другим удельным сопротивлением, а можно – эпитаксиальный слой с другим типом электропроводности, называемый эпитаксиальным р-п-переходом. Перспективным методом формирования р-п-переходов является метод ионного внедрения или ионной имплантации.

По характеру распределения концентрации примеси различают резкие и плавные р-п-переходы. Переход, в котором толщина области изменения концентрации примеси значительно меньше толщины р-п-перехода, называют резким р-п-переходом. Переход, в котором толщина области изменения концентрации примеси значительно сравнима или больше толщины р-п-перехода, называют плавным р-п-переходом.

По соотношению концентраций основных носителей заряда или соответствующих примесей в р- и п-областях различают симметричные и несимметричные р-п-переходы. У симметричных р-п-переходов концентрации основных носителей заряда в прилегающих к переходу р- и п-областях приблизительно равны у несимметричных существует их неравенство.

3. Барьерная емкость электронно-дырочного перехода

Барьерная (или зарядная) емкость обусловлена нескомпенсированным зарядом ионизированных атомов примеси, сосредоточенными по обе стороны от границы перехода. Эти объемные заряды неподвижны и не участвуют в процессе протекания тока. Они и создают электрическое поле перехода.

При увеличении обратного напряжения область пространственного заряда и сам заряд увеличиваются, причем это увеличение происходит непропорционально.

Барьерная емкость определяется как

$$C_{бар} = \frac{dQ}{du},$$

и равна

$$C_{бар} = S_{пер} \sqrt{\frac{\varepsilon \cdot e N_A}{2(\Delta \varphi + u)}},$$

где $S_{пер}$ – площадь перехода.

Барьерная емкость составляет десятки - сотни пикофард.

4. Омический переход на контакте полупроводников с одним типом электропроводности

Контакт полупроводников с одним типом электропроводности, но с разной концентрацией примесей обозначают р⁺-р или п⁺-п (знаком "плюс" отмечается полупроводник с большей концентрацией примесей). В таких контактах носители из области с большей концентрацией примеси переходят в область с меньшей концентрацией. При этом в области с повышенной концентрацией нарушается компенсация зарядов ионизированных атомов примеси, а в другой области создается избыток основных носителей зарядов. Образование этих зарядов приводит к появлению на переходе собственного электрического поля и контактной разности потенциалов, определяемой следующими соотношениями: для р⁺-р перехода

$$U_K = \varphi_T \ln(p_p^+ / p_n),$$

$$\text{для п}^+\text{-п перехода } U_K = \varphi_T \ln(n_p^+ / n_n).$$

В этих переходах не образуется слой с малой концентрацией носителей зарядов, и их сопротивление определяется в основном сопротивлением низкоомной области. Поэтому при прохождении тока непосредственно на контакте падает небольшое напряжение и выпрямительные свойства этих переходов не проявляются. В p^+-p и n^+-n переходах отсутствует инжекция неосновных носителей из низкоомной области в высокоомную. Если, например, к переходу n^+-n подключен источник тока плюсом к n -области, а минусом к n^+ -области, то из n^+ -области в n -область будут переходить электроны, являющиеся в ней основными носителями зарядов. При изменении полярности внешнего напряжения из n^+ -области в n -область должны инжектироваться дырки, однако их концентрация мала, и этого явления не происходит. Переходы типа p^+-p и n^+-n возникают при изготовлении омических контактов к полупроводникам.

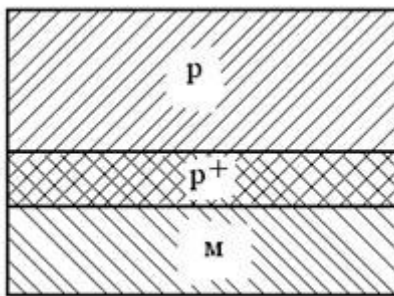


Рис. 3 Структура омического контакта.

5. Выпрямляющие и омические переходы на контакте металла с полупроводников

Свойства контакта металла с полупроводником зависят от работы выхода электронов из металла (W_{0m}) и из полупроводника (W_{0n} или W_{0p}). Электроны переходят из материала с меньшей работой выхода в материал с большей работой выхода. При контакте металла с электронным полупроводником при выполнении условия $W_{0n} < W_{0p}$ электроны переходят из полупроводника в металл. Если осуществлен контакт металла с дырочным полупроводником и выполняется условие $W_{0m} < W_{0p}$, будет происходить переход электронов в полупроводник. И в том, и в другом случае произойдет обеднение свободными носителями заряда приконтактной области полупроводника.

Обедненный слой обладает повышенным сопротивлением, которое может изменяться под воздействием внешнего напряжения. Следовательно, такой контакт имеет нелинейную характеристику и является выпрямляющим. Перенос зарядов в этих контактах осуществляется основными носителями, и в них отсутствуют явления инжекции, накопления и рассасывания зарядов. Таким образом, выпрямляющие контакты металл-полупроводник малоинерционны и служат основой создания диодов с барьером Шоттки, обладающих высоким быстродействием и малым временем переключения.

Омическими называют контакты, сопротивление которых не зависит от величины и направления тока. Другими словами, это контакты, обладающие практически линейной вольт-амперной характеристикой.

Если при контакте металла с полупроводником выполняется условие $W_{0m} < W_{0m}$ или $W_{0m} > W_{0p}$, то приконтактный слой полупроводника обогащается основными носителями заряда и его сопротивление становится низким при любой полярности внешнего напряжения. Такой контакт имеет практически линейную характеристику и является невыпрямляющим.

1.3 Лекция №3 (2 часа).

Тема: «Полупроводниковые диоды»

1.3.1 Вопросы лекции

1. Структура и основные элементы.
 2. Вольт-амперная характеристика диода при инжекции и экстракции носителей заряда.
 3. Физический смысл параметров диодов.
 4. Виды пробоев.
 5. Процессы в диодах при больших прямых токах. Переходные процессы в диодах.
- Основные виды диодов и их параметры.

1.3.2 Краткое содержание вопросов

1. Структура и основные элементы

Полупроводниковым диодом называется электропреобразовательный полупроводниковый прибор с одним выпрямляющим электрическим переходом, имеющий два вывода.



Рис. 1 Структура полупроводникового диода с электронно-дырочным переходом (а) и его условное графическое обозначение (б)

Буквами р и n обозначены слои полупроводника с проводимостями соответственно р-типа и n-типа.

Основные элементы диода – р-n-переход и невыпрямляющий контакт металл–полупроводник.

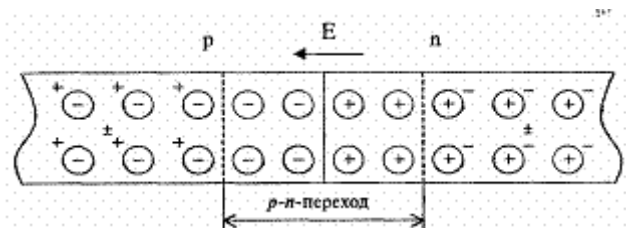


Рис. 2 Контактующие слои полупроводника

В контактирующих слоях полупроводника имеет место диффузия дырок из слоя р в слой n, причиной которой является их значительно большая концентрация в слое р. Аналогичная причина обеспечивает диффузию электронов из слоя n в слой р. Диффузия дырок из слоя р в слой n, во-первых, уменьшает их концентрацию в приграничной области слоя р и, во-вторых, уменьшает концентрацию свободных электронов в приграничной области слоя n вследствие рекомбинации. К аналогичным результатам приводит и диффузия электронов из слоя n в слой р.

В итоге в приграничных областях слоя р и слоя n возникает обедненный слой, в котором мала концентрация подвижных носителей заряда (электронов и дырок). Обедненный слой имеет большое удельное сопротивление. Ионы примесей обедненного слоя не компенсированы дырками или электронами. В совокупности ионы образуют нескомпенсированные объемные заряды, создающие электрическое поле с напряженностью E (см. рис. 2). Это поле препятствует переходу дырок из слоя р в слой n и переходу электронов из слоя n в слой р. Оно создает дрейфовый поток подвижных неосновных носителей заряда: дырок из слоя n в слой р и электронов из слоя р в слой n. В установившемся режиме дрейфовый поток равен диффузионному. В

несимметричном р-п-переходе более протяженным является заряд в слое с меньшей концентрацией примеси, т.е. в базе.

2. Вольт-амперная характеристика диода при инжекции и экстракции носителей заряда.

При прямом напряжении на диоде внешнее напряжение частично компенсирует контактную разность потенциалов на р-п-переходе, так как внешнее электрическое поле при прямом включении диода направлено противоположно диффузионному полю. Поэтому высота потенциального барьера перехода уменьшается пропорционально приложенному к диоду напряжению.

С уменьшением высоты потенциального барьера увеличивается количество носителей заряда, которые могут преодолеть потенциальный барьер и перейти в соседнюю

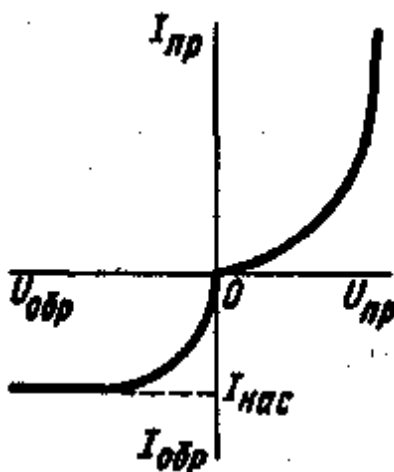


Рис. 3 Вольт-амперная характеристика диода при инжекции и экстракции носителей заряда

область диода, где они окажутся неосновными носителями. Этот процесс называют инжекцией неосновных носителей заряда через р-п-переход.

Так как высота потенциального барьера уменьшается пропорционально приложенному напряжению, а носители заряда распределены по энергиям по экспоненциальному закону в соответствии со статистикой Ферми — Дирака или Максвелла — Больцмана, то прямая ветвь ВАХ диода должна быть похожа на экспоненту (рис. 2).

При обратном включении диода внешнее электрическое поле и диффузионное поле в р-п-переходе совпадают по направлению, происходит экстракция неосновных носителей заряда из прилегающих к переходу областей. Это приводит к уменьшению граничной концентрации неосновных носителей заряда около р-п-перехода и к появлению диффузии неосновных носителей к переходу — идет диффузионный ток неосновных носителей, возникающих в результате тепловой генерации в объеме п- и р-областей диода, а также на омических переходах.

За время жизни до р-п-перехода могут продиффундировать неосновные носители, возникшие в п- и р-областях на расстоянии, не превышающем соответствующей диффузионной длины. Остальные неосновные носители, не успев дойти до перехода, рекомбинируют в объеме. Это справедливо для разных обратных напряжений на диоде, если толщины прилегающих к переходу областей превышают диффузионные длины неосновных носителей заряда. Поэтому обратный ток начиная с очень малых значений обратного напряжения не будет изменяться с изменением напряжения (см. рис. 3). Этот неизменный с изменением напряжения обратный ток через диод называют током насыщения.

3. Физический смысл параметров диодов

К основным параметрам диодов относят:

- максимально допустимый постоянный прямой ток, А;
- максимально допустимый импульсный прямой ток, А;
- максимально допустимое постоянное обратное напряжение, В;
- максимально допустимое импульсное обратное напряжение, В;
- обратный ток, протекающий через диод в обратном включении при приложенном к его выводам максимально допустимом постоянном напряжении, мкА;
- статическое сопротивление диода в прямом включении, равное отношению падения напряжения на диоде в прямом включении к силе прямого тока, Ом;
- статическое сопротивление диода в обратном включении, равное отношению величины обратного напряжения к силе обратного тока, МОм;
- динамическое сопротивление диода в прямом включении, составляющее отношение изменения падающего на диоде постоянного напряжения в прямом включении к величине изменения силы прямого тока, Ом;
- динамическое сопротивление диода в обратном включении, равное отношению изменения обратного напряжения к изменению величины обратного тока, Ом;
- полная ёмкость запёртого диода, пФ;
- максимально допустимая частота протекающего по диоду переменного тока, Гц, и др.

4. Виды пробоев

Возможны обратимые и необратимые пробой. Обратимый пробой – это пробой, после которого р-n-переход сохраняет работоспособность. Необратимый пробой ведет к разрушению структуры полупроводника.

Существуют четыре типа пробоя: лавинный, туннельный, тепловой и поверхностный. Лавинный и туннельный пробой объединяются под названием – электрический пробой, который является обратимым. К необратимым относят тепловой и поверхностный.

Лавинный пробой происходит под действием сильного электрического поля с напряженностью $E \approx (8...12) \cdot 10^4 \frac{\text{В}}{\text{см}}$.

Туннельный пробой происходит в очень тонких р-n-переходах, что возможно при очень высокой концентрации примесей $N \approx 10^{19} \text{ см}^{-3}$, когда ширина перехода становится малой (порядка 0,01 мкм) и при небольших значениях обратного напряжения (несколько вольт), когда возникает большой градиент электрического поля.

Тепловым называется пробой р-n-перехода, обусловленный ростом количества носителей заряда при повышении температуры кристалла.

Распределение напряженности электрического поля в р-n-переходе может существенно изменить заряды, имеющиеся на поверхности полупроводника. Поверхностный заряд может привести к увеличению или уменьшению толщины перехода, в результате чего на поверхности перехода может наступить пробой при напряженности поля, меньшей той, которая необходима для возникновения пробоя в толще полупроводника. Это явление называют поверхностным пробоем.

5. Процессы в диодах при больших прямых токах. Переходные процессы в диодах. Основные виды диодов и их параметры

При быстрых изменениях напряжения на полупроводниковом диоде на основе обычного р-n перехода значение тока через диод, соответствующее статической вольт-амперной характеристике, устанавливается не сразу. Процесс установления тока при

таких переключениях обычно называют переходным процессом. Переходные процессы в полупроводниковых диодах связаны с накоплением неосновных носителей в базе диода при его прямом включении и их рассасывании в базе при быстром изменении полярности напряжения на диоде. Так как электрическое поле в базе обычного диода отсутствует, то движение неосновных носителей в базе определяется законами диффузии и происходит относительно медленно. В результате кинетика накопления носителей в базе и их рассасывание влияют на динамические свойства диодов в режиме переключения.

Выпрямительные диоды - диоды, в которых используется такое свойство p-n перехода, как односторонняя проводимость (прямая проводимость в тысячи раз больше обратной). Применяются для выпрямления переменного тока.



Рис. 4 Классификация и условно-графические обозначения диодов (направление стрелки на условно-графическом обозначении совпадает с направлением прямого тока)

Стабилитроны - диоды с участком резко выраженного электрического пробоя при обратном напряжении. Применяются для стабилизации напряжения.

Варикапы - диоды, емкость которых изменяется в зависимости от приложенного напряжения. Применяются в качестве элементов с электрически управляемой ёмкостью.

СВЧ-диоды - диоды, имеющие малые значения паразитных индуктивности и ёмкости, что позволяет использовать их в СВЧ технике.

Обращенные диоды - это туннельные диоды без участка с отрицательным дифференциальным сопротивлением и имеющие инверсную вольтамперную характеристику с точки зрения выпрямительных диодов, то есть высокую проводимость при приложенном обратном напряжении и малую при прямом. Высокая нелинейность вольтамперной характеристики при малых напряжениях вблизи нуля (порядка микровольт) позволяет использовать обращенные диоды для детектирования слабых сигналов в СВЧ-технике.

Туннельные диоды - диоды, имеющие вольтамперную характеристику с участком отрицательной проводимости, на котором с ростом прямого напряжения прямой ток уменьшается.

Светодиоды - диоды, которые при пропускании прямого тока излучают фотоны в видимой или инфракрасной области спектра.

Фотодиоды - диоды, которые при большой освещенности могут служить источниками электрической энергии.

1.4 Лекция №4 (2 часа).

Тема: «Биполярные транзисторы»

1.4.1 Вопросы лекции

1. Структура и основные режимы работы.
2. Статические параметры и характеристики.
3. Работа транзистора при малом переменном сигнале.
4. Эквивалентные схемы. Частотные характеристики. Работа транзистора на импульсах. Надежность транзистора.

1.4.2 Краткое содержание вопросов

1. Структура и основные режимы работы

Биполярный транзистор — трёхэлектродный полупроводниковый прибор, один из типов транзистора.

Биполярный транзистор состоит из трёх различным образом легированных полупроводниковых слоёв: эмиттера Е, базы В и коллектора С. В зависимости от типа проводимости этих зон различают NPN (эмиттер — n-полупроводник, база — p-полупроводник, коллектор — n-полупроводник) и PNP-транзисторы. К каждой из зон подведены проводящие невыпрямляющие контакты. База расположена между эмиттером и коллектором и слаболегирована, поэтому имеет большое омическое сопротивление.

Режимы работы биполярного транзистора:

- нормальный активный режим
- инверсный активный режим
- режим насыщения
- режим отсечки
- барьерный режим

2. Статические параметры и характеристики

Статической характеристикой называют зависимость тока электрода транзистора от одного из аргументов при фиксированном значении другого и медленном уменьшении варьируемых величин, при котором режим работы практически сохраняется статически. Каждая точка такой характеристики соответствует определённому статическому режиму транзистора.

Входными характеристиками транзисторов в схеме с ОБ представляют собой зависимость вида:

$$I_B = f(U_{BE}) \text{ при } U_{CE} = \text{const.}$$

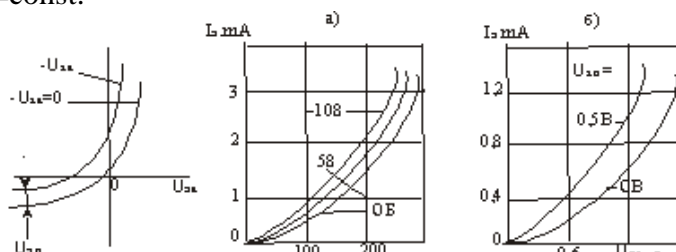
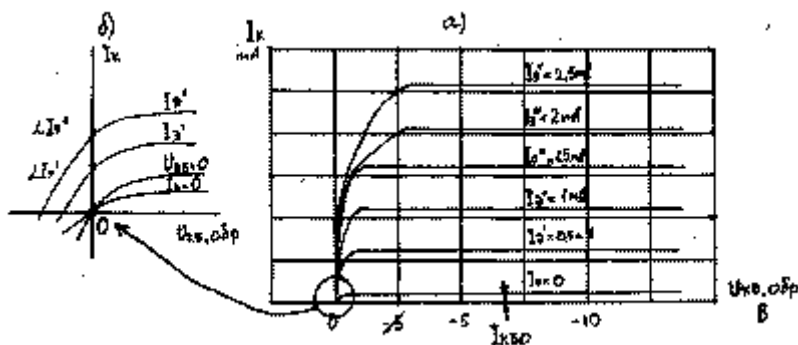


Рис. 1 Входные характеристики биполярных транзисторов в схеме с ОБ: а) германиевых типа МП -14 маломощных; б) кремниевых типа 2Т – 925 мощных

Выходные характеристики в данной схеме включения транзистора (ОБ) определяются зависимостью вида (рис. 2).



3. Работа транзистора при малом переменном сигнале

Постоянные токи, протекающие через транзистор, являются нелинейными функциями приложенных напряжений. Но, если на постоянные составляющие накладываются переменные сигналы с амплитудами малыми по сравнению со значениями постоянных составляющих, между переменным входным напряжением и переменным выходным током будет существовать линейная зависимость, и работа транзистора будет иметь линейный характер.

4. Эквивалентные схемы. Частотные характеристики. Работа транзистора на импульсах. Надежность транзистора

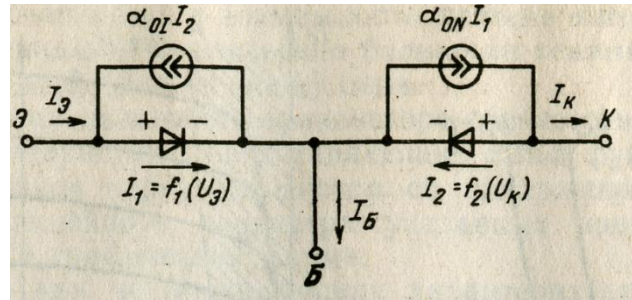


Рис.3 Эквивалентная схема транзистора в виде модели Эберса-Молла (Эквивалентная схема биполярного транзистора на постоянном токе)

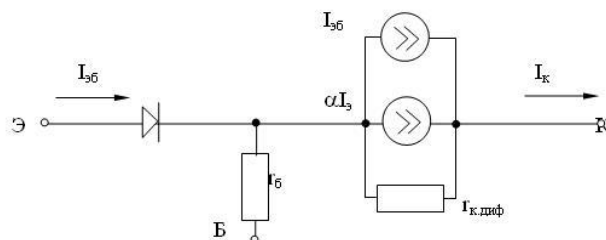


Рис. 4 Эквивалентная схема транзистора по постоянному току, включенного по схеме с ОБ

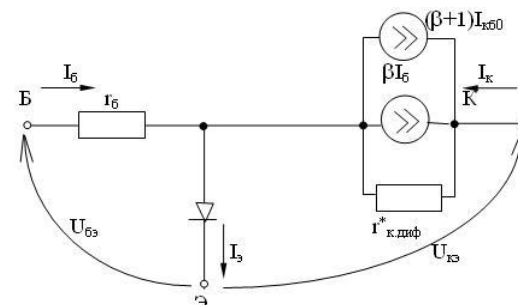


Рис. 5 Эквивалентная схема транзистора по постоянному току, включенного по схеме с ОЭ

Частотная характеристика – зависимость коэффициента усиления транзистора от частоты входящего сигнала. С повышением частоты, способность транзистора усиливать сигнал постепенно падает. Причиной тому являются паразитные емкости, образовавшиеся в PN-переходах. На изменения входного сигнала в базе транзистор реагирует не мгновенно, а с определенным замедлением, обусловленным затратой времени на

наполнение зарядом этих емкостей. Поэтому, при очень высоких частотах, транзистор просто не успевает среагировать и полностью усилить сигнал.

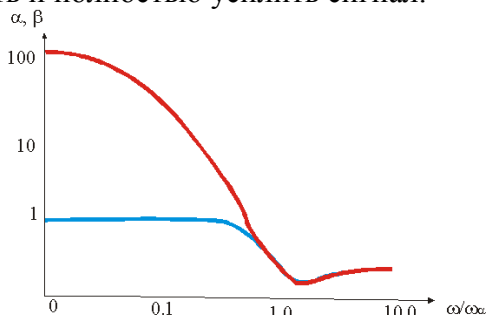


Рис. 6 Частотная зависимость модуля коэффициентов передачи по току в схеме ОБ - α и ОЭ - β .

Биполярные транзисторы широко используются в цифровой технике в качестве электронных ключей. В этих устройствах используются сигналы в виде почти прямоугольных (трапецеидальных) импульсов большой амплитуды. В общем случае для описания работы транзистора в импульсном (ключевом) режиме необходимо использовать нелинейные динамические модели транзистора (например, динамические компьютерные модели Эберса - Молла). Однако в большинстве случаев ограничиваются расчетом амплитуды и длительности фронтов импульсных сигналов.

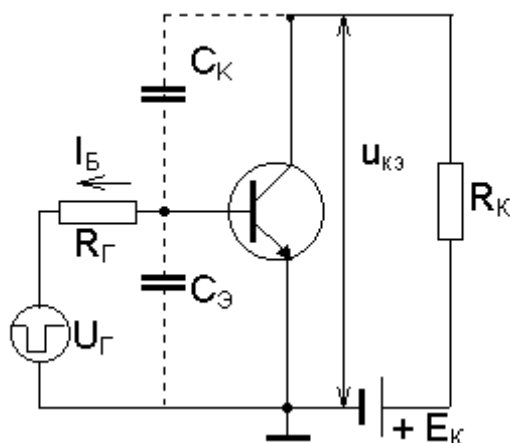


Рис. 7 Схема транзисторного ключа на биполярном транзисторе

Катастрофические отказы связаны с полной потерей работоспособности прибора и происходят в результате обрывов или коротких замыканий внутренних или внешних выводов, пробоя р-п-перехода, трещин стекла. Они обусловлены главным образом недостатками конструкции или нарушением технологического процесса. Катастрофические отказы не являются основными для транзисторов - на их долю приходится примерно 20 % всех наблюдаемых отказов. В основном же отказы транзисторов обусловлены постепенным изменением параметров сверх допустимых отклонений.

Отказы, вызываемые постепенным изменением основных параметров и выходом их значений за установленные нормы, иногда называются условными отказами. Условность отказа определяется выбором критериев годности. Условно отказавший транзистор может быть фактически вполне работоспособным в таких радиоэлектронных схемах, которые не критичны к изменению параметра в рассматриваемых пределах.

1.5 Лекция №5 (2 часа).

Тема: «Тиристоры»

1.5.1 Вопросы лекции

1. Диодные тиристоры. Триодные тиристоры.
2. Симметричные тиристоры. Способы управления тиристорами.
3. Конструкция и технология изготовления тиристоров.

1.5.2 Краткое содержание вопросов

1. Диодные тиристоры. Триодные тиристоры

Тиристор — полупроводниковый прибор, выполненный на основе монокристалла полупроводника с тремя или более p-n-переходами и имеющий два устойчивых состояния: закрытое состояние, то есть состояние низкой проводимости, и открытое состояние, то есть состояние высокой проводимости.

Динистором, или, по-другому, диодным тиристором, называют переключательный компонент с двумя выводами, который переходит в открытое состояние при превышении определённого напряжения, которое прикладывают между его выводами. Динисторы содержат три электронно-дырочных перехода. Схематичное изображение структуры динистора дано на рис. 1.

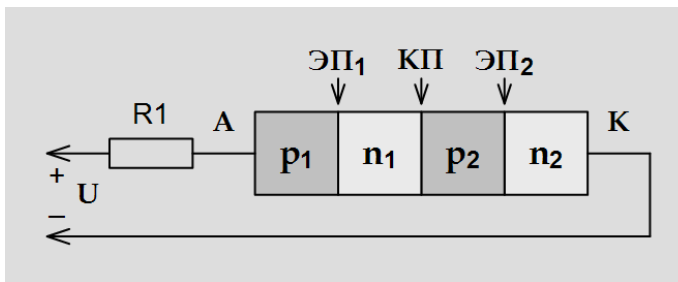


Рис. 1 Схематичное изображение структуры динистора

Вывод от внешней зоны n2 называют катодом, а от зоны p1 — анодом. Зоны n1 и p2 носят название баз динистора. Переход между зонами p1, n1 и p2, n2 именуют эмиттерным, а между зонами n1 и p2 — коллекторным переходом.

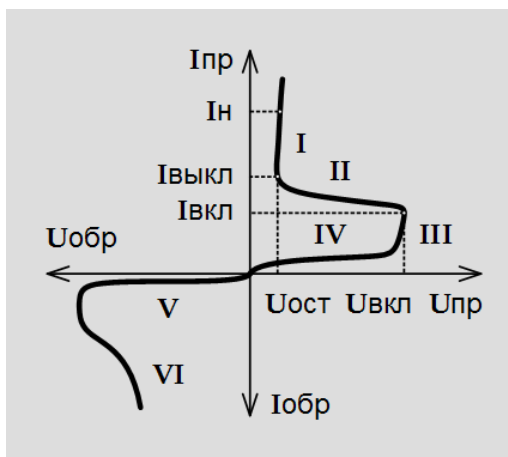


Рис. 2 ВАХ динистора

ВАХ динистора: I — участок открытого состояния динистора, на котором его проводимость высока; II — участок отрицательного сопротивления; III — участок пробоя коллекторного перехода; IV — участок в прямом включении, на котором динистор заперт,

и приложенное к его выводам напряжение меньше, чем необходимо для возникновения пробоя; V – участок обратного включения динистора; VI – участок лавинного пробоя.

Тринистором, или, иначе, триодным тиристором, называют переключательный компонент с тремя электронно-дырочными переходами, и тремя выводами – анодом, катодом и управляющим электродом. Тринисторы обладают аналогичной динисторам структурой, а отличие состоит в наличии управляющего электрода – дополнительного вывода, подключённого к одной из баз. Если через управляющий электрод тринистора пропустить отпирающий ток, то тринистор перейдёт в открытое состояние. В зависимости от того, к какой именно из баз будет подсоединён управляющий электрод, можно организовать включение тринистора при приложении отпирающего напряжения между управляющим электродом и либо анодом, либо катодом. Вольтамперная характеристика тринистора похожа на вольтамперную характеристику динистора. Однако отпирание тринистора обычно происходит при существенно более низком прямом напряжении, чем необходимо динистору, и к открыванию тринисторной структуры приводит протекание тока через управляющий электрод. Чем больше ток управляющего электрода, тем при более низком прямом напряжении тринистор перейдёт в открытое состояние, что отражено на вольтамперной характеристике тринистора, изображённой на рис. 3.

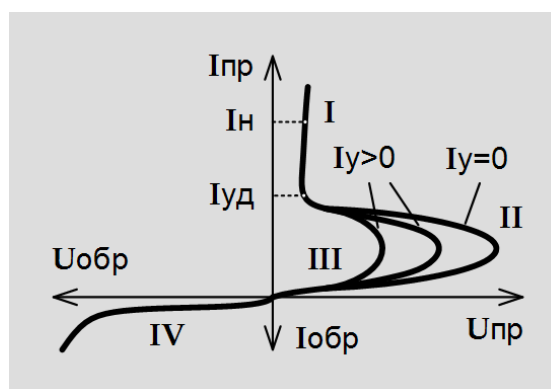


Рис. 3 ВАХ тринистора

ВАХ тринистора: I – участок, на котором тринистор открыт; II – участки отрицательного сопротивления и пробоя коллекторного перехода; III – участок запертого состояния тринистора в прямом включении; IV – участок обратного включения динистора.

2. Симметричные тиристоры. Способы управления тиристорами

Симисторы, в отличие от обычных тиристоров, проводят ток анод-катод при протекании тока по управляющему электроду, как в прямом направлении, так и в обратном. В результате этого их вольтамперная характеристика симметрична.

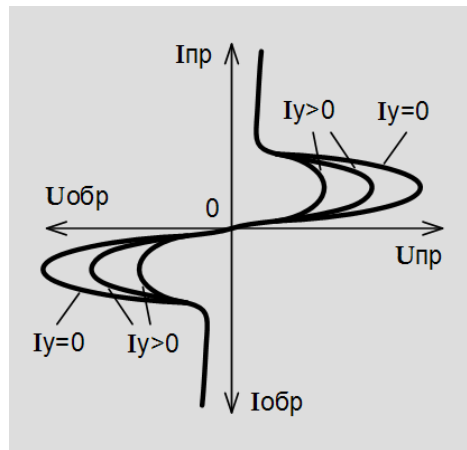


Рис. 4 ВАХ симистора

Таким образом, на вольтамперной характеристике каждого симистора присутствуют два участка отрицательного дифференциального сопротивления. Структура симистора содержит пять слоёв.

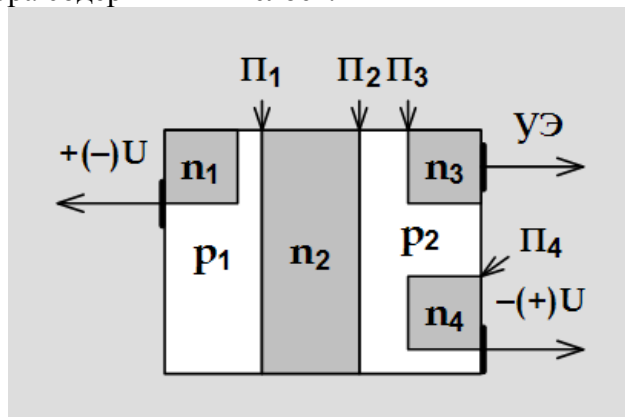


Рис. 5 Структура симистора

Практически включение тиристоров осуществляется одним из следующих способов:

- увеличение прямого напряжения до $U_{пер}$;
- увеличением тока управления I_y ;
- подачей импульса напряжения с крутым фронтом и величиной ниже напряжения переключения на постоянном токе.

При таком включении осуществляется бросок емкостного тока через барьерные емкости переходов.

Для перехода тиристора из открытого состояния в закрытое необходимо уменьшить основной ток ниже тока удержания $I_{уд}$. Это можно осуществить одним из следующих способов:

- разрывом цепи основного ток;
- снижением напряжения до величины, при которой ток станет меньше тока удержания;
- сменой полярности напряжения;
- пропуском кратковременного импульса тока обратного направления, например, от предварительно заряженного конденсатора.

Отдельные типы тиристоров можно выключить подав на управляющий электрод импульс обратной полярности (запираемые тиристоры). В обычных тиристорах этого делать нельзя, т.к. ток управления должен быть равен основному току, а это может привести к пробоем эмиттерного перехода.

3. Конструкция и технология изготовления тириستоров

Получение структуры с чередующимися областями **P**- и **N**- типов в современных условиях может быть осуществлено различными технологическими методами: диффузией, сплавлением, сочетанием диффузии и сплавления, эпитаксиальным методом и др.

В современном отечественном производстве кремниевых управляемых и неуправляемых вентилей наибольшее применение находит диффузионная технология изготовления многослойных структур.

Основой структуры при использовании этого метода является диск из монокристаллического кремния **N**-типа толщиной 0,5...0,7 мм и диаметром 17...70 мм (определяется типоразмером прибора). После тщательной шлифовки и очистки диска с обеих сторон при определенных температурных режимах производится диффузия примесей **P**-типа. В результате получается **PNP**-структура.

Если изготавливается структура тиристора, то с одной из сторон **PNP**-структуры, исключая небольшие участки в местах последующего монтирования управляющего электрода и шунтирования эмиттерного перехода, повторной диффузией внедряют примеси **N**-типа.

Причем концентрация донорных атомов должна быть больше концентрации первоначально введенных примесей **P**-типа (рисунок 6).

Шунтировка (закоротка малым сопротивлением) эмиттерного перехода реализуется при сборке вентильного элемента, показанного на рисунке 7. Она служит для улучшения температурной стабильности и повышения предельного напряжения тириستоров.



Рис. 6 - Распределение концентрации примесей при изготовлении многослойных полупроводниковых структур

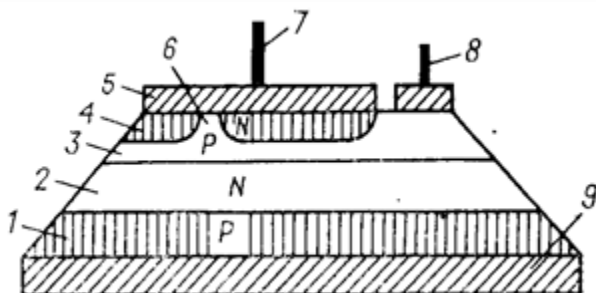


Рис. 7- Схематический разрез вентильного элемента тиристора: 1 - **P**-слой; 2 - **N**-база; 3 - **P**-база; 4 - **N**-слой; 5 - вольфрамовый электрод; 6 - шунтировка; 7 - катодный вывод; 8 - вывод управляющего электрода; 9 - вольфрамовый электрод

Изготовленные таким образом структуры тиристора после снятия фаски по внешнему диаметру напаваются на вольфрамовый диск, а затем монтируются в герметичный корпус.

Фаска, снимаемая под определенным углом к плоскости кремниевой шайбы (рисунок 7), обеспечивает уменьшение напряженности электрического поля на PN-переходах в местах выхода их на боковую поверхность.

1.6 Лекция №6 (2 часа).

Тема: «Полевые транзисторы»

1.6.1 Вопросы лекции

1. Полевые транзисторы с управляющим переходом. Эквивалентные схемы полевого транзистора с управляющим переходом.
2. Полевые транзисторы с изолированным затвором. Параметры и свойства полевых транзисторов с изолированным затвором.

1.6.2 Краткое содержание вопросов

1. Полевые транзисторы с управляющим переходом. Эквивалентные схемы полевого транзистора с управляющим переходом.

Полевой транзистор — полупроводниковый прибор, в котором ток изменяется в результате действия «перпендикулярного» току электрического поля, создаваемого напряжением на затворе.

Полевой транзистор с управляющим р-п переходом — это полевой транзистор, затвор которого изолирован (то есть отделён в электрическом отношении) от канала р-п переходом, смещённым в обратном направлении.

Такой транзистор имеет два невыпрямляющих контакта к области, по которой проходит управляемый ток основных носителей заряда, и один или два управляющих электронно-дырочных перехода, смещённых в обратном направлении (см. рис. 1). При изменении обратного напряжения на р-п переходе изменяется его толщина и, следовательно, толщина области, по которой проходит управляемый ток основных носителей заряда. Область, толщина и поперечное сечение которой управляется внешним напряжением на управляющем р-п переходе и по которой проходит управляемый ток основных носителей, называют каналом. Электрод, из которого в канал входят основные носители заряда, называют истоком (Source). Электрод, через который из канала уходят основные носители заряда, называют стоком (Drain). Электрод, служащий для регулирования поперечного сечения канала, называют затвором (Gate).

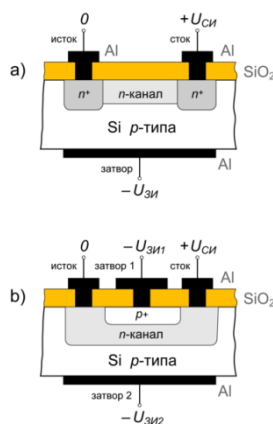


Рис. 1 Устройство полевого транзистора с управляющим р-п переходом

На рис. 2 показана эквивалентная схема полевого транзистора, основным элементом этой схемы, характеризующим усилительные свойства прибора, является зависимый генератор тока SU_z . Частотные и импульсные характеристики транзистора

определяются емкостями электродов: затвор - сток $C_{зи}$, затвор - сток $C_{зс}$, сток - исток $C_{си}$. Емкости $C_{зи}$ и $C_{зс}$ зависят от площади затвора и степени легирования канала, емкость $C_{си}$ - самая маленькая среди рассмотренных.

Сопротивления утечки $R_{зс}$, $R_{зи}$, $R_{си}$ весьма велики и учитываются, как правило, при расчете электрометрических усилительных каскадов постоянного тока. При расчете импульсных каскадов и усилительных каскадов переменного тока их, как правило, не учитывают, поскольку проводимость емкостей обычно всегда больше шунтирующих их проводимостей утечки электродов.

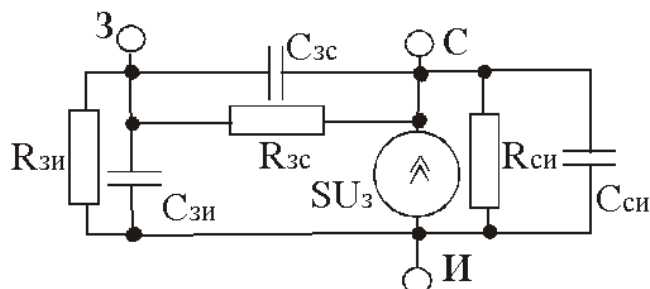


Рис. 2 Эквивалентная схема полевого транзистора с управляющим рп переходом.

2. Полевые транзисторы с изолированным затвором. Параметры и свойства полевых транзисторов с изолированным затвором.

Полевой транзистор с изолированным затвором — это полевой транзистор, затвор которого отделён в электрическом отношении от канала слоем диэлектрика.

В кристалле полупроводника с относительно высоким удельным сопротивлением, который называют подложкой, созданы две сильнолегированные области с противоположным относительно подложки типом проводимости. На эти области нанесены металлические электроды — исток и сток. Расстояние между сильно легированными областями истока и стока может быть меньше микрона. Поверхность кристалла полупроводника между истоком и стоком покрыта тонким слоем (порядка 0,1 мкм) диэлектрика. Так как исходным полупроводником для полевых транзисторов обычно является кремний, то в качестве диэлектрика используется слой двуоксида кремния SiO_2 , выращенный на поверхности кристалла кремния путём высокотемпературного окисления. На слой диэлектрика нанесён металлический электрод — затвор. Получается структура, состоящая из металла, диэлектрика и полупроводника. Поэтому полевые транзисторы с изолированным затвором часто называют МДП-транзисторами.

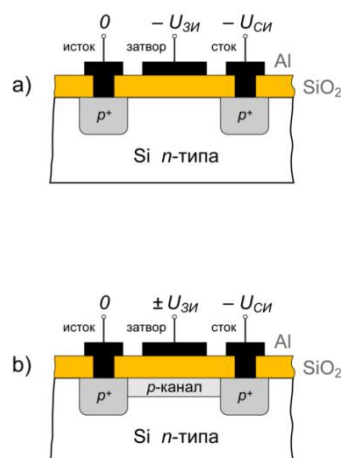


Рис. 3 Устройство полевого транзистора с изолированным затвором.

Входное сопротивление МДП-транзисторов может достигать $10^{10} \dots 10^{14}$ Ом (у полевых транзисторов с управляющим р-п-переходом $10^7 \dots 10^9$), что является преимуществом при построении высокоточных устройств.

К основным параметрам полевых транзисторов относятся:

$$S = \frac{di_c}{du_{\text{зп}}}$$

- Крутизна характеристики при $U_{\text{сп}} = \text{const}$, $U_{\text{зи}} = \text{const}$. Типичные значения параметра (0,1...500) мА/В;

$$S = \frac{di_c}{du_{\text{зп}}}$$

- Крутизна характеристики по подложке при $U_{\text{сп}} = \text{const}$, $U_{\text{зи}} = \text{const}$. Типичные значения параметра (0,1...1) мА/В;
- Начальный ток стока $I_{\text{с.нач.}}$ – ток стока при нулевом значении напряжения $U_{\text{зи}}$. Типичные значения параметра: (0,2...600) мА – для транзисторов с управляющим каналом р-п переходом; (0,1...100) мА – для транзисторов со встроенным каналом; (0,01...0,5) мкА – для транзисторов с индуцированным каналом;
- Напряжение отсечки $U_{\text{зи.отс.}}$. Типичные значения (0,2...10) В; пороговое напряжение $U_{\text{п}}$. Типичные значения (1...6) В;
- Сопротивление сток-исток в открытом состоянии. Типичные значения (2...300) Ом

$$r_i = \frac{du_{\text{зп}}}{di_c}$$

- Дифференциальное сопротивление (внутреннее):
Статистический коэффициент усиления: $\mu = S \cdot r_i$

1.7 Лекция №7 (2 часа).

Тема: «Оптоэлектронные полупроводниковые приборы»

1.7.1 Вопросы лекции

1. Классификация оптоэлектронных полупроводниковых приборов.
2. Полупроводниковые приборы отображения информации и инфракрасные излучающие диоды.
3. Лазеры. Фоторезисторы. Фотодиоды. Оптопары и оптоэлектронные микросхемы.

1.7.2 Краткое содержание вопросов

1. Классификация оптоэлектронных полупроводниковых приборов.

Оптоэлектроника – это раздел электроники, связанный главным образом с изучением эффектов взаимодействия между электромагнитными волнами оптического диапазона и электронами вещества (преимущественно твердых тел) и охватывающий проблемы создания оптоэлектронных приборов (в основном методами микроэлектронной технологии), в которых эти эффекты используются для генерации, передачи, обработки, хранения и отображения информации.

Оптоэлектронными называют приборы, чувствительные к электромагнитному излучению в видимой, инфракрасной и ультрафиолетовой областях, а также приборы, производящие или использующие такое излучение.

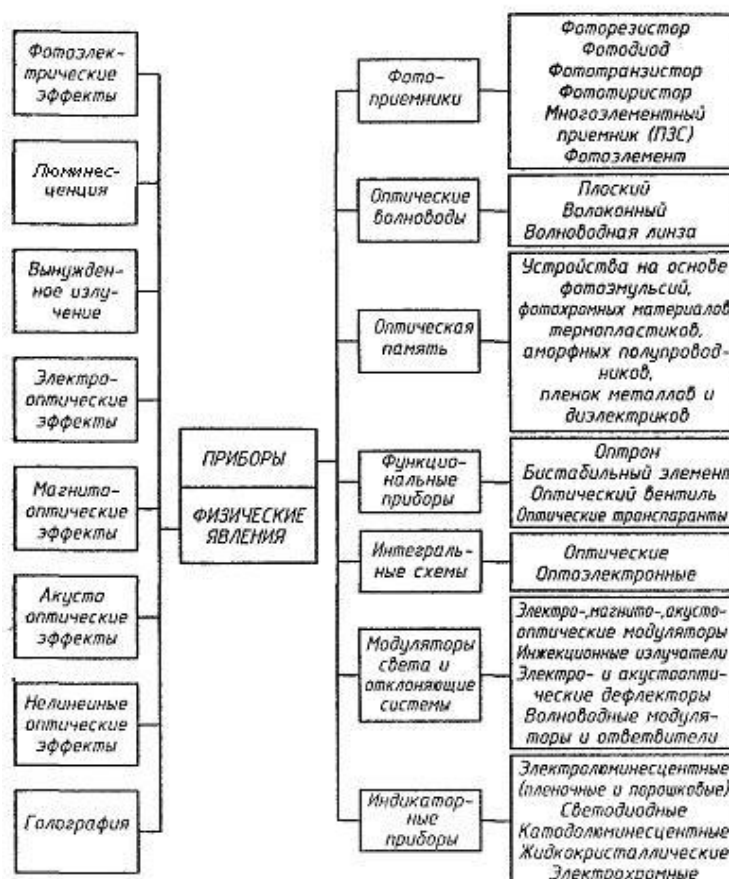


Рис. 1 Классификация оптоэлектронных приборов и физические эффекты, лежащие в основе их работы.

2. Полупроводниковые приборы отображения информации и инфракрасные излучающие диоды.

Многие полупроводниковые излучатели могут излучать только некогерентные электромагнитные колебания. К ним относятся полупроводниковые излучатели видимой области спектра - полупроводниковые приборы отображения информации (светоизлучающие диоды, полупроводниковые знаковые индикаторы, шкалы и экраны), а также полупроводниковые излучатели инфракрасной области спектра - инфракрасные излучающие диоды.

Излучение полупроводниковых приборов отображения информации и инфракрасных излучающих диодов вызвано самопроизвольной рекомбинацией носителей заряда при прохождении прямого тока через выпрямляющий электрический переход. Рекомбинация носителей заряда может происходить как в самом выпрямляющем электрическом переходе, так и в прилегающих к этому переходу областях структуры.

Полупроводниковый прибор отображения информации - это полупроводниковый излучатель энергии видимой области спектра, предназначенный для отображения визуальной информации.

Светоизлучающий диод (СИД) - полупроводниковый прибор отображения информации, представляющий собой диод.

Полупроводниковый излучающий элемент - часть полупроводникового прибора отображения информации, состоящая из излучающей поверхности и контактов для подключения к электрической схеме.

Полупроводниковая шкала - это полупроводниковый прибор отображения информации, состоящий из полупроводниковых излучающих элементов, предназначенный для представления аналоговой информации.

Полупроводниковый экран - это полупроводниковый прибор отображения информации, состоящий из излучающих элементов, расположенных вдоль одной линии, и содержащий p строк излучающих элементов, предназначенный для использования в устройствах отображения аналоговой и цифровой информации.

Полупроводниковый знаковый индикатор - полупроводниковый прибор отображения информации, состоящий из полупроводниковых излучающих элементов, предназначенный для представления информации в виде знаков и организованный в один или несколько разрядов. При этом под излучающим элементом понимается часть прибора, состоящая из излучающей поверхности и контактов для подключения к схеме.

3. Лазеры. Фоторезисторы. Фотодиоды. Оптопары и оптоэлектронные микросхемы.

Полупроводниковый лазер — твердотельный лазер, в котором в качестве рабочего вещества используется полупроводник. В таком лазере, в отличие от лазеров других типов (в том числе и других твердотельных), используются излучательные переходы не между изолированными уровнями энергии атомов, молекул и ионов, а между разрешенными энергетическими зонами или подзонами кристалла. В полупроводниковом лазере накачка осуществляется:

- непосредственно электрическим током (прямая накачка);
- электронным пучком;
- электромагнитным излучением.

Под именем полупроводниковых часто встречается гибридный лазер из мощного светодиода накачки и наклеенного на него твердотельного активного элемента. Плюс таких лазеров в том, что светодиодную структуру накачки можно сделать довольно протяженной и, соответственно, мощной. Механические деформации от нагрева меньше сказываются на активном элементе. «Полупроводниковые» лазеры с мощностями единицы-десятки ватт делают в основном именно по такой технологии. Визуально отличить гибридный лазер от полупроводникового довольно сложно.

Поскольку в полупроводниковом лазере возбуждаются и излучают коллективно атомы, составляющие кристаллическую решётку, сам лазер может обладать очень малыми размерами.

Другими особенностями полупроводниковых лазеров являются высокий КПД, малая инерционность, простота конструкции.

Типичным представителем полупроводниковых лазеров является лазерный диод — лазер, в котором рабочей областью является полупроводниковый p - n переход. В таком лазере излучение происходит за счет рекомбинации электронов и дырок.

Фоторезисторами называют полупроводниковые приборы, проводимость которых меняется под действием света.



Рис. 2 Монокристаллический фоторезистор

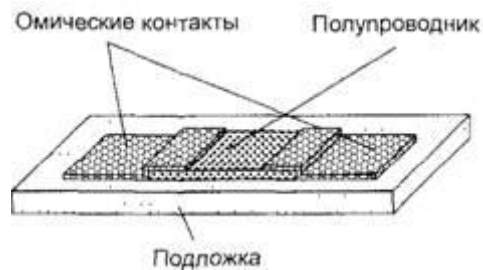


Рис. 3 Пленочный фоторезистор

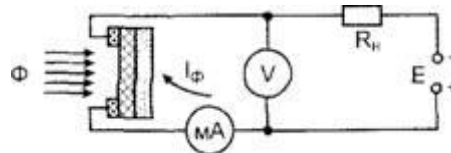


Рис. 4 Включение фоторезистора в цепь постоянного тока

Конструкция монокристаллического и пленочного фоторезисторов показана на рис. 2, 3. Основным элементом фоторезистора является в первом случае монокристалл, а во втором — тонкая пленка полупроводникового материала.

Если фоторезистор включен последовательно с источником напряжения (рис. 4) и не освещен, то в его цепи будет протекать темновой ток:

$$I_T = E / (R_T + R_H),$$

где E — ЭДС источника питания;

R_T — величина электрического сопротивления фоторезистора в темноте, называемая темновым сопротивлением;

R_H — сопротивление нагрузки.

При освещении фоторезистора энергия фотонов расходуется на перевод электронов в зону проводимости. Количество свободных электронно-дырочных пар возрастает, сопротивление фоторезистора падает, и через него течет световой ток, обусловленный формулой:

$$I_c = E / (R_c + R_H).$$

Разность между световым и темновым током дает значение тока I_Φ , получившего название первичного фототока проводимости $I_\Phi = I_c - I_T$.

Полупроводниковый фотодиод — это полупроводниковый диод обратный ток которого зависит от освещенности.

Обычно в качестве фотодиода используют полупроводниковые диоды с р-п переходом, который смещен в обратном направлении внешним источником питания. При поглощении квантов света в р-п переходе или в прилегающих к нему областях образуются новые носители заряда. Неосновные носители заряда, возникшие в областях, прилегающих к р-п переходу на расстоянии, не превышающем диффузионной длины, диффундируют в р-п переход и проходя* через него под действием электрического поля. То есть обратный ток при освещении возрастает. Поглощение квантов непосредственно в р-п переходе приводит к аналогичным результатам. Величина, на которую возрастает обратный ток, называется фототоком.

Оптопара или оптрон — электронный прибор, состоящий из излучателя света (обычно — светодиод, в ранних изделиях — миниатюрная лампа накаливания) и фотоприёмника (биполярных и полевых фототранзисторов, фотодиодов, фототириستоров, фоторезисторов), связанных оптическим каналом и как правило объединённых в общем корпусе. Принцип работы оптрона заключается в преобразовании электрического сигнала в свет, его передаче по оптическому каналу и последующем преобразовании обратно в электрический сигнал.

На основе оптоэлектроники разработано большое число микросхем. Рассмотрим некоторые оптоэлектронные микросхемы, выпускаемые отечественной промышленностью. В микроэлектронике наиболее широко применяют оптоэлектронные микросхемы 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 микросхемы является оптронная пара (рис. 5, а, б), состоящая из источника света 1, управляемого входным сигналом, иммерсионной 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 микросхемы различного назначения.

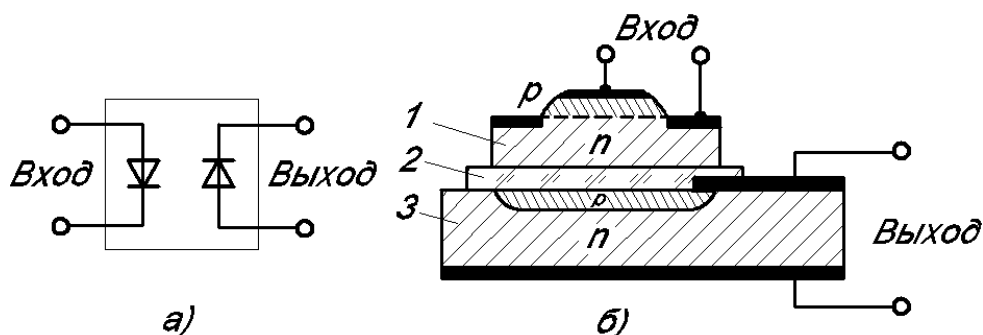


Рис. 5 Схема и технологическое выполнение оптронной пары:
1 – источник света; 2 – иммерсионная среда; 3 – фотоприемник.

1.8 Лекция №8 (2 часа).

Тема: «Интегральные микросхемы»

1.8.1 Вопросы лекции

1. Классификация интегральных микросхем.
2. Методы изоляции элементов интегральных микросхем.
3. Активные и пассивные элементы.

1.8.2 Краткое содержание вопросов

1. Классификация интегральных микросхем.

Интегральная микросхема — микроэлектронное устройство — электронная схема произвольной сложности (кристалл), изготовленная на полупроводниковой подложке (пластине или плёнке) и помещённая в неразборный корпус, или без такового, в случае вхождения в состав микросборки.

Классификация:

В зависимости от степени интеграции:

- малая интегральная схема (МИС) — до 100 элементов в кристалле,
- средняя интегральная схема (СИС) — до 1000 элементов в кристалле,
- большая интегральная схема (БИС) — до 10 тыс. элементов в кристалле,
- сверхбольшая интегральная схема (СБИС) — более 10 тыс. элементов в кристалле.

кристалле.

Технология изготовления

- Полупроводниковая микросхема — все элементы и межэлементные соединения выполнены на одном полупроводниковом кристалле (например, кремния, германия, арсенида галлия, оксид гафния).

- Плёночная интегральная микросхема — все элементы и межэлементные соединения выполнены в виде плёнок:

- толстоплёночная интегральная схема;
- тонкоплёночная интегральная схема.

- Гибридная микросхема (часто называемая микросборкой), содержит несколько бескорпусных диодов, бескорпусных транзисторов и(или) других электронных активных компонентов. Также микросборка может включать в себя бескорпусные интегральные микросхемы. Пассивные компоненты микросборки (резисторы, конденсаторы, катушки индуктивности) обычно изготавливаются методами тонкоплёночной или толстоплёночной технологий на общей, обычно керамической подложке гибридной микросхемы. Вся подложка с компонентами помещается в единый герметизированный корпус.

- Смешанная микросхема — кроме полупроводникового кристалла содержит тонкоплёночные (толстоплёночные) пассивные элементы, размещённые на поверхности кристалла.

Вид обрабатываемого сигнала

- Аналоговые.
- Цифровые.
- Аналого-цифровые.

2. Методы изоляции элементов интегральных микросхем.

Для разрыва путей токов утечки между элементами ИМС локальные области, в которых формируются ЭМ элементы, должны быть изолированы друг от друга.

В технологии изготовления биполярных ИМС могут использоваться несколько методов изоляции, важнейшими из которых являются:

1. Изоляция обратнo смещенными р-п переходами;
2. Изоляция диэлектрическими материалами (оксидом кремния, нитридом кремния, поликристаллическим кремнием, ситаллом, оксидом аммония);
3. Изоляция путем формирования активных и пассивных элементов на непроводящих подложках;
4. Изоляция путем создания меза-структур с помощью вертикального анизотропного травления;
5. Изоляция обратнo смещенными р-п переходами.

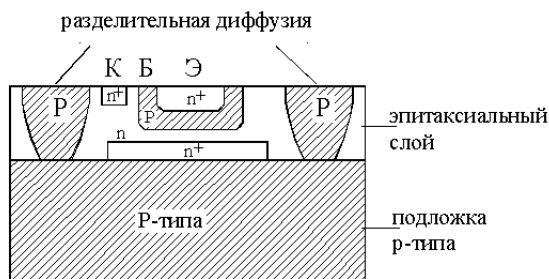


Рис. 1 Изоляция обратнo смещенным р-п переходом

Недостатки: достаточно большие площади изолирующего р-п перехода, а значит низкая степень интеграции. Кроме того, изолирующие переходы мешают нормальной работе схемы (электрические потери, токи утечки). Немаловажная роль в потерях принадлежит р-п-транзисторам, возникающим между базой и изолирующим слоем р+ типа.

Изоляция диэлектрическими материалами.

Этот метод не имеет предыдущих недостатков.

При этом методе на подложку наносится эпитаксиальный слой того же типа проводимости, но с большей концентрацией основных носителей (см. рис. 2).

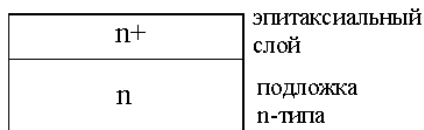


Рис. 2 Подложка с нанесенным эпитаксиальным слоем

Затем поверхность окисляют в сухом кислороде и глубокой фотолитографии вытравливают канавки.

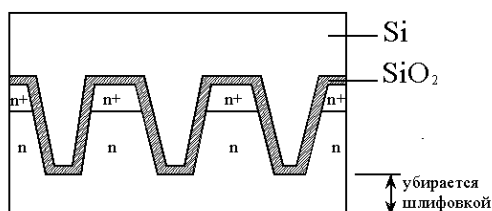


Рис. 3 Изоляция диэлектрическими материалами

Далее на внутренней поверхности канавок создают слой оксида кремния. Затем со стороны окисленных канавок наращивают поликристаллический кремний Si , который является опорным. С нижней стороны шлифовкой убирается часть подложки до достижения оксида кремния. Затем образец переворачивается, и в образовавшихся нишах формируются элементами одним из вышеописанных методов. При таком методе изоляции расстояние между элементами составляет 8 - 10 мкм (см. рис. 3).

3. Активные и пассивные элементы

Элементом называется часть интегральной микросхемы, в которой реализуется функция какого-либо радиоэлемента (транзистора, диода, резистора и т. д.) и которую нельзя отделить от схемы и рассматривать как самостоятельное изделие. Элементы выполняются на полупроводниковой пластине в едином технологическом процессе. В некоторых случаях в состав микросхемы входят компоненты (конденсаторы, резисторы, бескорпусные транзисторы и др.), которые устанавливаются при сборочно-монтажных операциях. Компоненты являются самостоятельными изделиями и могут быть отделены от микросхемы и заменены другими.

Элементы любых электронных схем делят на активные и пассивные.

Активным элементом называют элемент, обладающий свойством преобразования электрической энергии - выпрямления, усиления, генерирования, управления. К ним относятся, например, диоды, транзисторы и т. д.

Пассивными элементами являются резисторы, конденсаторы, катушки индуктивности.

2. МЕТОДИЧЕСКИЕ УКАЗАНИЯ ПО ПРОВЕДЕНИЮ ПРАКТИЧЕСКИХ ЗАНЯТИЙ

2.1 Практическое занятие №1 (2 часа).

Тема: «Методы формирования и классификации электронно-дырочных переходов»

2.1.1 Задание для работы: понять принцип формирования и классификацию электронно-дырочного перехода

2.1.2 Краткое описание проводимого занятия:

Среди разнообразных методов формирования р-п-переходов наибольшее значение имеют два: метод сплавления и метод диффузии примесей. Электронно-дырочный переход, полученный методом сплавления в полупроводник (с последующей рекристаллизацией полупроводника) металла или сплава, содержащего донорные или акцепторные примеси, называют сплавным переходом, а переход, полученный в результате диффузии атомов примеси в полупроводник, — диффузионным.

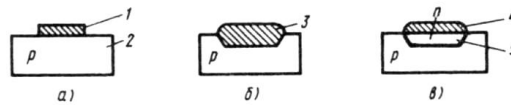


Рис. 1 Технологические стадии сплавления примесей в монокристалл полупроводника: а — навеска впаляемого материала 1, содержащая донорную примесь, на поверхности монокристалла полупроводника 2 перед впавлением, б — расплав материала навески с полупроводником 3 при высокой температуре впавления, в — избыточный слой материала навески 4 на поверхности рекристаллизованного полупроводника 5 после охлаждения

При сплавлении в полупроводник металла или сплава, содержащего донорные или акцепторные примеси, полупроводник с навеской впаляемого материала нагревают до расплавления навески, в результате чего часть кристалла полупроводника растворяется в расплаве навески. При последующем охлаждении происходит рекристаллизация полупроводникового кристалла с примесью впаляемого материала. Если рекристаллизованный слой получился с другим типом электропроводности по сравнению с электропроводностью исходного полупроводника, то на границе их раздела возникает р-п-переход (рис. 2).

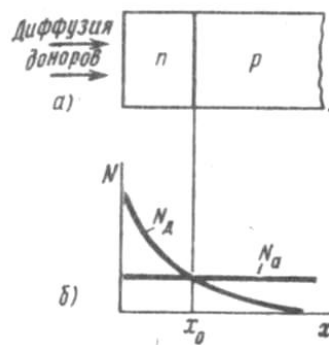


Рис. 2 Диффузионный р-п-переход (а) и распределение примесей в полупроводнике после диффузии в него доноров (б): N_a — исходная концентрация акцепторов, N_d — концентрация доноров после диффузии, x_0 — глубина залегания сформированного р-п-перехода

При создании диффузионного р-п-перехода используют диффузию в полупроводник примеси, находящейся в газообразной, жидкой или твердой фазе (рис. 2). Диффузионные р-п-переходы, в свою очередь, могут быть нескольких разновидностей.

Так, диффузионный р-п-переход, образованный в результате диффузии примеси сквозь отверстие в защитном слое, нанесенном на поверхность полупроводника, называют планарным р-п-переходом. В качестве защитного слоя на кремнии обычно используют диоксид того же самого кремния.

На рис. 3. показаны этапы технологического процесса формирования планарного р-п-перехода. Основой такой технологии является фотолитография. На исходную окисленную пластину монокристалла кремния наносят слой фоточувствительного вещества — фоторезиста ФР (рис. 3, а). Пленку фоторезиста освещают через маску ультрафиолетовым светом (рис. 3, б). Экспонированные места фоторезиста полимеризуются и становятся нерастворимыми. После этого незаполимеризованные части фоторезиста смывают, так что он остается только на облученных местах (рис. 3, в). Затем производят травление пленки диоксида, которая остается только в тех местах, где она была защищена слоем фоторезиста (рис. 3, г). В дальнейшем проводят диффузию необходимой примеси в пластину исходного кремния. Диффузия примеси происходит селективно — только через отверстия или окна в слое диоксида кремния (рис. 3, д).

Для создания более сложных структур, например транзисторных с близко расположенными двумя р-п-переходами, необходимо еще раз повторить все рассмотренные этапы технологического процесса, т. е. заново окислить пластину кремния, нанести слой фоторезиста, засветить его определенные части поверхности, провести травление и диффузию примеси через вновь образованные окошки в слое диоксида кремния.

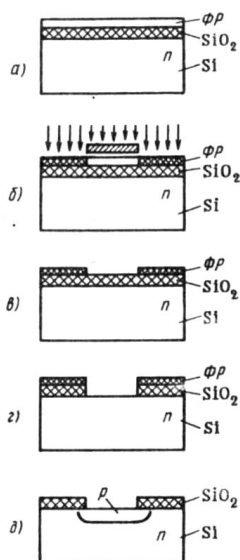


Рис. 3 Схема технологического процесса формирования планарного р-п-перехода: а — окисленная пластинка полупроводника с нанесенным фоторезистом, б — экспонирование фоторезиста через маску или фотошаблон, в — пластинка после растворения незаполимеризованного фоторезиста, г — пластинка после вытравливания незащищенного слоя оксида, д — пластинка после снятия фоторезиста и проведения диффузии акцептора

Электронно-дырочный переход, образованный в результате конверсии полупроводника, вызванной обратной диффузией примеси в соседнюю область, или активацией атомов примеси, называют конверсионным р-п-переходом. Так, для создания конверсионного р-п-перехода в германиевом монокристалле применяют германий, содержащий два типа примесей: донорную и акцепторную (медь). Концентрация меди в германии должна быть больше концентрации доноров, т. е. исходный германий имеет электропроводность р-типа. В такой германий проводят вплавление навески металла или сплава. Медь, отличаясь высоким коэффициентом диффузии в германии, при сплавлении

диффундирует из германия в навеску. В результате из слоя германия, примыкающего к навеске, удаляется акцепторная примесь меди, изменяется тип электропроводности этого слоя, т. е. происходит так называемая конверсия полупроводника.

При производстве полупроводниковых приборов широко используют эпитаксиальное наращивание — наращивание монокристаллических слоев полупроводника на поверхности монокристаллической подложки того же полупроводника, а иногда и другого по химическому составу полупроводника. При эпитаксиальном наращивании в зависимости от использованной примеси можно получить эпитаксиальный слой с тем же типом электропроводности, что и исходный полупроводник, но с другим удельным сопротивлением, а можно получить эпитаксиальный слой с другим типом электропроводности, т. е. создать эпитаксиальный р-п-переход.

Перспективным методом формирования р-п-переходов является метод ионного внедрения или ионной имплантации. Суть этого метода состоит в бомбардировке полупроводника ионами примеси с энергией в несколько десятков килоэлектрон-вольт. Необходимую энергию ионы получают при ускорении в электрическом поле ионно-лучевого ускорителя. Перспективность метода ионного внедрения заключается в возможности проводить управляемое легирование поверхностных и подповерхностных слоев полупроводника точно дозированными количествами почти любых химических элементов при относительно низкой температуре полупроводника.

По характеру распределения концентрации примеси различают резкие и плавные р-п-переходы. Переход, в котором толщина области изменения концентрации примеси значительно меньше толщины р-п-перехода, называют резким р-п-переходом. Резкий р-п-переход получается обычно при методе сплавления примеси. Переход, в котором толщина области изменения концентрации примеси сравнима или больше толщины р-п-перехода, называют плавным р-п-переходом. Плавный переход получают обычно при изготовлении методом диффузии примеси.

По соотношению концентраций основных носителей заряда или соответствующих примесей в р- и п-областях различают симметричные и несимметричные р-п-переходы. У симметричных р-п-переходов концентрации основных носителей заряда в прилегающих к переходу р и л-областях приблизительно равны ($p_{p0} \approx n_{n0}$). Для несимметричных р-п-переходов справедливо неравенство $p_{p0} \gg n_{n0}$ ($n_{n0} \gg p_{p0}$). В полупроводниковых приборах обычно существуют несимметричные р-п-переходы. Для обозначения несимметричных р-п-переходов пользуются следующими символами: р+ -п (или п+ -р).

2.2 Практическое занятие №2 (2 часа).

Тема: «Аналитический расчет плавного электронно-дырочного перехода»

2.2.1 Задание для работы: понять принцип расчета плавного электронно-дырочного перехода

2.2.2 Краткое описание проводимого занятия:

Линейный закон распределения примесей

$$N(x) = ax,$$

здесь a — градиент концентрации примесей, который можно считать постоянным при очень малой толщине р-п-перехода по сравнению с толщиной области, где концентрация примесей переменна.

Распределение напряженности

Решение уравнения дает зависимость градиента потенциала в плавном р-п-переходе с линейным распределением концентрации примесей:

$$\frac{d\varphi}{dx} = -\frac{q}{2\epsilon\epsilon_0} ax^2 \Big|_{-\delta_p}^x = -\frac{qa}{2\epsilon\epsilon_0} (x^2 - \delta_p^2)$$

В данном случае градиент потенциала изменяется с изменением координаты по квадратичной параболе (рис. 1).

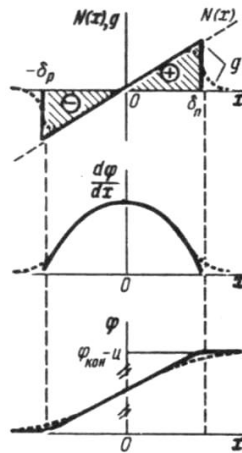


Рис. 1 Распределение концентрации примесей $N(x)$, плотности объемного заряда g , градиента потенциала $d\varphi/dx$ и потенциала φ в плавном р-п-переходе без учета носителей заряда (—) и с учетом носителей заряда (...)

Распределение потенциала

Для определения потенциала надо проинтегрировать градиент потенциала:

$$\varphi = -\frac{qa}{2\epsilon\epsilon_0} \int_{-\delta_p}^x (x^2 - \delta_p^2) dx = -\frac{qa}{\epsilon\epsilon_0} \left(\frac{x^3}{6} - \frac{\delta_p^2 x}{2} - \frac{\delta_p^3}{3} \right).$$

Таким образом, потенциал в плавном р-п-переходе с линейным распределением примесей изменяется с изменением координаты по кубической параболе (рис. 1).

Определение границ и толщины р-п-перехода

Решение уравнения электрической нейтральности в данном случае приводит к соотношению

$$\delta_p = \delta_n = \delta/2,$$

т. е. рассматриваемый переход является симметричным.

Получаем полное падение потенциала на р-п-переходе:

$$\varphi_{\text{кон}} - u = \varphi(\delta_n) - \varphi(\delta_p) = \frac{2qa}{3\epsilon\epsilon_0} \delta_p^3 = \frac{qa}{12\epsilon\epsilon_0} \delta^3.$$

Отсюда толщина плавного р-п-перехода с линейным распределением примесей

$$\delta = \sqrt[3]{\frac{12\epsilon\epsilon_0(\varphi_{\text{кон}} - u)}{qa}}.$$

Влияние носителей заряда

В плавном р-п-переходе с линейным распределением концентрации примесей из-за симметрии перехода инверсный слой не образуется, если нет существенной несимметрии плотности энергетических состояний в разрешенных энергетических зонах, т. е. если нет резкого отличия эффективных масс носителей заряда разных знаков.

У границ плавного р-п-перехода влияние носителей заряда аналогично влиянию носителей у резкого р-п-перехода.

2.3 Практическое занятие №3 (2 часа).

Тема: «Расчет распределения неосновных носителей заряда в базе диода»

2.3.1 Задание для работы: рассчитать распределение неосновных носителей заряда в базе диода

2.3.2 Краткое описание проводимого занятия:

В качестве примера проведем расчет для диода с несимметричным электронно-дырочным переходом p^+-n (рис. 1) при приложении к нему напряжения, имеющего постоянную и малую переменную составляющие:

$$u = U + \dot{U}_m \exp j\omega t.$$

Здесь переменная составляющая записана в виде комплексной величины в показательной форме. Так как складываются постоянная и переменная составляющие, то физический смысл имеет только проекция вектора переменного напряжения на действительную ось.

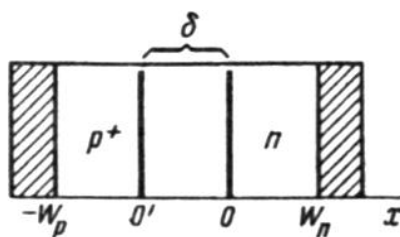


Рис. 1 Одномерная модель диода, принятая для расчета

Условием малости переменной составляющей напряжения для удобства математических преобразований выберем следующее:

$$U_m \ll kT/q,$$

т. е. амплитуда переменной составляющей напряжения не должна превосходить ~ 10 мВ.

Допущения при расчете

Для облегчения расчетов обычно выбирают упрощенную модель структуры того или иного прибора. В данном случае допустим, что:

- 1) p - n -переход диода плоский, т. е. будем рассматривать одномерную модель диода (рис. 1);
- 2) токи малы и не вызывают существенного падения напряжения на сопротивлении базы диода; таким образом, электрическое поле сосредоточено только в p - n -переходе;
- 3) омические переходы идеальны, т. е. около них в полупроводнике существует всегда только равновесная концентрация носителей заряда;
- 4) поверхностные явления несущественны;
- 5) в p - n -переходе не происходят процессы генерации или рекомбинации неравновесных носителей заряда;
- 6) рекомбинация неосновных носителей в объеме базы линейная, т. е. количество носителей, рекомбинирующих в единице объема за единицу времени, прямо пропорционально избыточной концентрации:

$$R_p = \frac{\Delta p_n}{\tau_p} = \frac{p_n - p_{n0}}{\tau_p}.$$

Дифференциальные уравнения

Основным для решения поставленной задачи является уравнение непрерывности, например, для дырок в базе диода с электропроводностью p -типа

$$\frac{\partial p_n}{\partial t} = -\frac{1}{q} \operatorname{div} \mathbf{J}_p - R_p + G_p.$$

Это уравнение показывает, как и по каким причинам изменяется концентрация дырок со временем. Во-первых, концентрация дырок может изменяться из-за существования дивергенции тока дырок, что учитывает первое слагаемое. Во-вторых, концентрация дырок может изменяться из-за их рекомбинации, что учитывает второе слагаемое (R_p — скорость рекомбинации). Это же слагаемое в зависимости от знака может учитывать изменение концентрации дырок из-за тепловой генерации. В-третьих, концентрация дырок может изменяться из-за нетепловой генерации (ударная ионизация, ионизация под действием света и т. д.). В данном случае $Gr=0$.

С учетом принятых в начале параграфа допущений уравнение непрерывности перепишем следующим образом:

$$\frac{\partial p_n}{\partial t} = -\frac{1}{q} \frac{\partial J_p}{\partial x} - \frac{p_n - p_{n0}}{\tau_p}.$$

Воспользуемся уравнением для плотности тока дырок, также упростив его с учетом принятых допущений:

$$J_p = -qD_p \frac{\partial p_n}{\partial x}$$

$$\frac{\partial p_n}{\partial t} = D_p \frac{\partial^2 p_n}{\partial x^2} - \frac{p_n - p_{n0}}{\tau_p},$$

т. е. получено дифференциальное уравнение второго порядка в частных производных. Для его решения необходимы граничные и начальные условия.

Граничные условия

При малых токах концентрация неосновных носителей заряда в базе около р-п-перехода определяется соотношением:

$$p_n(0) = p_{n0} \exp \frac{qu}{kT}.$$

Подставив сюда значение напряжения, получим при $x=0$

$$p_n(0) = p_{n0} \exp \frac{q}{kT} (U + \dot{U}_m \exp j\omega t) =$$

$$= p_{n0} \left(\exp \frac{qU}{kT} \right) \exp \left(\frac{q\dot{U}_m}{kT} \exp j\omega t \right).$$

Аргумент второй экспоненты мал. Поэтому ее можно разложить в ряд, ограничившись двумя первыми его членами:

$$\exp y \approx 1 + y + \dots$$

Тогда с учетом разложения в ряд примет вид

$$p_n(0) = p_{n0} \exp \frac{qU}{kT} + p_{n0} \left(\exp \frac{qU}{kT} \right) \frac{q\dot{U}_m}{kT} \exp j\omega t.$$

Таким образом, концентрация неосновных носителей заряда в базе около р-п-перехода имеет постоянную и переменную составляющие. Частота изменения переменной составляющей та же, что и частота приложенного переменного напряжения. Если бы переменное напряжение не было мало, то у переменной составляющей концентрации носителей появились бы гармоники высшего порядка с частотой, кратной со.

Второе граничное условие следует из идеальности омического перехода, т. е. при $x = W_n$

$$p_n(W_n) = p_{n0}.$$

Форма решения

Для преобразования дифференциального уравнения выберем форму решения в виде суммы постоянной и переменной составляющих концентрации, т. е. форму,

аналогичную форму граничного условия. Это обусловлено линейностью уравнения для концентрации носителей заряда, так что новые гармоники появиться не могут. Тогда решение дифференциального уравнения должно иметь вид

$$p_n(x, t) = p_{n0} + \Delta p_n(x) + \dot{p}_n(x) \exp j\omega t,$$

где $p_n(x, t)$ — полная концентрация неосновных носителей заряда в базе; $\Delta p_n(x)$ — постоянная составляющая избыточной концентрации неосновных носителей, зависящая только от координаты; $\dot{p}_n(x) \exp j\omega t$ — переменная составляющая избыточной концентрации неосновных носителей заряда, зависящая как от координаты, так и от времени.

Таким образом, постоянная составляющая представлена в виде суммы равновесной и избыточной концентраций.

Преобразование общего дифференциального уравнения

$$\dot{p}_n(x) j\omega \exp j\omega t = D_p \frac{\partial^2 [\Delta p_n(x)]}{\partial x^2} + D_p \frac{\partial^2 \dot{p}_n(x)}{\partial x^2} \exp j\omega t - \frac{\Delta p_n(x)}{\tau_p} - \frac{\dot{p}_n(x)}{\tau_p} \exp j\omega t.$$

В этом уравнении есть слагаемые, зависящие и не зависящие от времени. Уравнение справедливо только в том случае, если алгебраические суммы не зависящих и зависящих от времени составляющих отдельно равны нулю. Поэтому для постоянной составляющей избыточной концентрации получим:

$$\frac{d^2 [\Delta p_n(x)]}{dx^2} = \frac{\Delta p_n(x)}{L_p^2},$$

где $L_p = \sqrt{D_p \tau_p}.$

Граничные условия для постоянной составляющей избыточной концентрации:

$$\begin{aligned} \text{при } x = 0 \quad \Delta p_n(0) &= p_{n0} \left(\exp \frac{qU}{kT} - 1 \right), \\ \text{при } x = W_n \quad \Delta p_n(W_n) &= 0. \end{aligned}$$

Для переменной составляющей избыточной концентрации

$$\frac{d^2 \dot{p}_n(x)}{dx^2} = \frac{\dot{p}_n(x)}{\Lambda_p^2},$$

где $\Lambda_p = \frac{L_p}{\sqrt{1 + j\omega \tau_p}}.$

Граничные условия для переменной составляющей избыточной концентрации запишем, исходя из общих граничных условий:

$$\begin{aligned} \dot{p}_n(0) \exp j\omega t &= p_{n0} \left(\exp \frac{qU}{kT} \right) \frac{q \dot{U}_m}{kT} \exp j\omega t, \\ \text{при } x = 0 \\ \text{или окончательно} \end{aligned}$$

$$\dot{p}_n(0) = p_{n0} \left(\exp \frac{qU}{kT} \right) \frac{q \dot{U}_m}{kT};$$

$$\text{при } x = W_n \quad \dot{p}_n(W_n) = 0.$$

Полученные уравнения для постоянной и переменной составляющих аналогичны, так что решать можно только одно из них.

Решение для постоянной составляющей избыточной концентрации неосновных носителей в базе

Такой вид решения упрощает поиск произвольных постоянных, если заданы условия на границах и при этом на одной границе — нуль.

Подставив $x = 0$ и учтя граничное условие, получим

$$\Delta p_n(0) = p_{n0} \left(\exp \frac{qU}{kT} - 1 \right) = A_1.$$

С учетом граничного условия и значения постоянной интегрирования A_1 при $x = W_n$

$$\Delta p_n(W_n) = 0 = p_{n0} \left(\exp \frac{qU}{kT} - 1 \right) \operatorname{ch} \frac{W_n}{L_p} + A_2 \operatorname{sh} \frac{W_n}{L_p}.$$

Следовательно,

$$A_2 = - p_{n0} \left(\exp \frac{qU}{kT} - 1 \right) \operatorname{cth} \frac{W_n}{L_p}.$$

Подставив в значения постоянных интегрирования, окончательно получим

$$\Delta p_n(x) = p_{n0} \left(\exp \frac{qU}{kT} - 1 \right) \left(\operatorname{ch} \frac{x}{L_p} - \operatorname{cth} \frac{W_n}{L_p} \operatorname{sh} \frac{x}{L_p} \right).$$

Таково распределение постоянной составляющей избыточной концентрации неосновных носителей заряда в базе диода при разных напряжениях.

2.4 Практическое занятие №4 (2 часа).

Тема: «Расчет переменных токов и полной проводимости диода»

2.4.1 Задание для работы: ознакомиться с расчетом переменных токов и полной проводимости диода

2.4.2 Краткое описание проводимого занятия:

В связи с аналогией дифференциальных уравнений для распределения постоянной и переменной составляющих концентрации неосновных носителей, а также в связи с аналогией граничных условий можно сразу записать выражение для переменной составляющей плотности тока через диод. Для этого достаточно сделать следующие замены: вместо L подставить

$$\Lambda = \frac{L}{\sqrt{1 + j\omega\tau}};$$

вместо $\left(\exp \frac{qU}{kT} - 1 \right)$ подставить $\left(\exp \frac{qU}{kT} \right) \frac{q\dot{U}_m}{kT}$.

В результате получим выражение для переменной составляющей плотности тока, аналогичное выражению:

$$j_m = \frac{q^2 \dot{U}_m}{kT} \left(\frac{p_{n0} D_p}{\Lambda_p} \operatorname{cth} \frac{W_n}{\Lambda_p} + \frac{n_{p0} D_n}{\Lambda_n} \operatorname{cth} \frac{W_p}{\Lambda_n} \right) \exp \frac{qU}{kT}.$$

Видно, что переменная составляющая плотности тока через диод линейно связана с переменным напряжением, если это напряжение мало. Отсюда следует, что для описания свойств диода целесообразно воспользоваться обычным приемом электротехники — ввести полную проводимость (либо полное сопротивление) диода для переменного тока:

$$\dot{Y} = j_m / \dot{U}_m = S j_m / \dot{U}_m.$$

Тогда для диода можем записать

$$\dot{Y} = \frac{q^2 S}{kT} \left(\frac{p_{n0} D_p}{\Lambda_p} \operatorname{cth} \frac{W_n}{\Lambda_p} + \frac{n_{p0} D_n}{\Lambda_n} \operatorname{cth} \frac{W_p}{\Lambda_n} \right) \exp \frac{qU}{kT}.$$

Полученное выражение позволяет выполнить расчет проводимости полупроводникового диода на любой частоте и при любых соотношениях размеров диода и диффузионной длины.

Проводимость диода для переменного тока оказывается комплексной. Запишем проводимость диода в виде

$$\dot{Y} = \frac{1}{r} + j\omega C_{\text{диф}},$$

что соответствует параллельной схеме замещения.

Значения диффузионной емкости $C_{\text{диф}}$ и дифференциального сопротивления r могут быть вычислены для любого случая из общего выражения полной проводимости диода путем соответствующих преобразований (извлечения корней из комплексных чисел, взятия гиперболического котангенса сумм и т. д.). Однако получающиеся выражения оказываются довольно сложными, поэтому целесообразно ограничиться частными случаями. Таких частных случаев можно выделить четыре — два соотношения размеров ($W \gg L$ и $W \ll L$) для двух диапазонов частот (высоких и низких).

1) $W \gg L$, низкие частоты. Условие $W \gg L$ означает, что аргументы гиперболических котангенсов являются большими. Следовательно,

$$\text{cth}\left(\frac{W}{L} \sqrt{1 + j\omega\tau}\right) \approx 1.$$

Преобразование этого соотношения оказывается простым, если $\omega\tau \ll 1$. Такое условие и будем считать критерием низкой частоты. Тогда, раскладывая в биномиальный ряд $\sqrt{1 + j\omega\tau}$, получим

$$\frac{1}{\Lambda} \approx \frac{1}{L} \left(1 + j\frac{\omega\tau}{2} \right) = \frac{1}{L} + j\omega \frac{\tau}{2L}.$$

Подставив это выражение в формулу для полной проводимости, после группирования слагаемых получим

$$\dot{Y} = \frac{q^2 S}{kT} \left[\left(\frac{p_{n0} D_p}{L_p} + \frac{n_{p0} D_n}{L_n} \right) + \frac{j\omega}{2} (p_{n0} L_p + n_{p0} L_n) \right] \exp \frac{qU}{kT}. \quad (3.35)$$

Следовательно,

$$\frac{1}{r} = \frac{q^2 S}{kT} \left(\frac{p_{n0} D_p}{L_p} + \frac{n_{p0} D_n}{L_n} \right) \exp \frac{qU}{kT},$$

или с учетом

$$\frac{1}{r} = \frac{qS}{kT} J_{\text{нас}} \exp \frac{qU}{kT}.$$

$$I = I_{\text{нас}} \left(\exp \frac{qU}{kT} - 1 \right) \quad \text{или} \quad I_{\text{нас}} \exp \frac{qU}{kT} = I + I_{\text{нас}},$$

окончательно получим

$$\frac{1}{r} = \frac{q}{kT} (I + I_{\text{нас}}).$$

Диффузионная емкость:

$$C_{\text{диф}} = \frac{q^2 S}{2kT} (p_{n0} L_p + n_{p0} L_n) \exp \frac{qU}{kT}.$$

Если $p_{n0} \gg n_{p0}$, либо $n_{p0} \gg p_{n0}$, либо $\tau_p = \tau_n = \tau$, то выражение для диффузионной емкости приводим к виду

$$C_{\text{диф}} = \frac{qS}{2kT} J_{\text{нас}} \left(\exp \frac{qU}{kT} \right) \tau,$$

или

$$C_{\text{диф}} = \frac{q}{2kT}(I + I_{\text{нас}})\tau.$$

Для диодов с несимметричным р-n-переходом τ в этой формуле — время жизни неосновных носителей в слаболегированной области, т. е. в базе диода.

Для такого значения диффузионной емкости можно легко найти постоянную времени:

$$rC_{\text{диф}} = \tau/2.$$

2) $\omega \gg 1/\tau$ высокие частоты. Критерий высокой частоты $\omega\tau \gg 1$, т. е. нарушение условия низкой частоты. При этом, как и ранее,

$$\text{cth}\left(\frac{W}{L} \sqrt{1 + j\omega\tau}\right) \approx 1.$$

Чтобы извлечь корень, удобно воспользоваться условием $\omega\tau \gg 1$. Тогда, применяя формулу Муавра, получим

$$\begin{aligned} \sqrt{1 + j\omega\tau} &\approx \sqrt{j\omega\tau} = \sqrt{\cos 90^\circ + j\omega\tau \sin 90^\circ} = \\ &= \sqrt{\omega\tau}(\cos 45^\circ + j \sin 45^\circ) = \sqrt{\omega\tau} \left(\frac{1}{\sqrt{2}} + j \frac{1}{\sqrt{2}} \right), \end{aligned}$$

$$\frac{1}{\Lambda} \approx \frac{1}{L} \sqrt{\frac{\omega\tau}{2}} + j \frac{1}{L} \sqrt{\frac{\omega\tau}{2}}.$$

т. е.

2.5 Практическое занятие №5 (2 часа).

Тема: «Расчет вольт-амперной характеристики диода»

2.5.1 Задание для работы: провести расчет вольт-амперной характеристики полупроводникового диода

2.5.2 Краткое описание проводимого занятия:

Выбор модели диода

Большое количество факторов, которые следует принимать во внимание при расчете ВАХ диода при больших прямых токах, приводит к тому, что в общем виде решить эту задачу не удастся. В связи с этим для выполнения аналитического расчета целесообразно выбрать такую структуру модели полупроводникового диода, которая позволила бы выполнить расчет и в то же время по возможности больше соответствовала бы реальной структуре диода.

Одной из таких структур является полупроводниковый диод с несимметричным электронно-дырочным р⁺-n-переходом, с тонкой базой и с идеальным невыпрямляющим контактом к базе. В базе такого диода можно выделить слои с высоким уровнем инжекции (у электронно-дырочного перехода), средним (там, где концентрация неосновных носителей сравнима с концентрацией основных носителей в равновесном состоянии) и с низким уровнем инжекции (вблизи омического перехода).

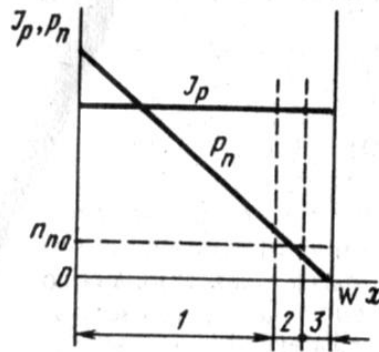


Рис. 1 Распределение концентрации неосновных носителей заряда в базе диода с тонкой базой: 1 — слой с высоким уровнем инжекции, 2 — слой со средним уровнем инжекции, 3 - слой с низким уровнем инжекции.

Очевидно, что с увеличением тока через диод будет увеличиваться та часть базы, где существует высокий уровень инжекции. При достаточно больших токах почти во всей базе будет высокий уровень инжекции. Поэтому весь расчёт можно выполнять только для высокого уровня инжекции. Это первое преимущество выбранной модели для расчёта.

Второе преимущество диода с тонкой базой как модели для расчета состоит в том, что ток одного вида носителей (неосновных) во всей базе такого диода остается постоянным. Это следует из того, что во всей тонкой базе практически отсутствует рекомбинация носителей. Она происходит только на омическом переходе.

Третье преимущество рассматриваемой модели следует из несимметрии ее перехода. Если концентрация инжектированных неосновных носителей у границы р-п-перехода еще не равна полной концентрации основных носителей, что может быть только при очень больших прямых токах, то через несимметричный переход происходит инжекция только одного вида носителей — из сильнолегированной области в слаболегированную. В этом случае весь ток связан с движением носителей одного вида — дырок. Значит, можно рассматривать движение только одного вида носителей во всей базе диода.

Четвертое преимущество рассматриваемой модели заключается в том, что она соответствует реальной структуре большинства полупроводниковых диодов.

Расчет вольт-амперной характеристики диода с тонкой базой при больших прямых токах

Исходя из перечисленных допущений можно считать, что в базе рассматриваемого диода электронный ток равен нулю. Тогда напряженность электрического поля в базе диода может быть найдена из уравнения для плотности электронного тока:

$$J_n = 0 = qn\mu_n E + qD_n \frac{dn_n}{dx}.$$

С учетом соотношения Эйнштейна:

$$E = -\frac{kT}{q} \frac{1}{n_n} \frac{dn_n}{dx}.$$

Такой способ определения напряженности электрического поля в базе диода несколько отличается от способа, и в данном случае он более удобен.

Используя условие электрической нейтральности базы, получим

$$E = -\frac{kT}{q} \frac{1}{p_n + N_{an}} \frac{dp_n}{dx}$$

Соотношение представляет собой полное значение напряженности электрического поля, включающее поле, связанное с падением напряжения на объемном сопротивлении базы, и поле, обусловленное ЭДС Дембера.

Тогда получим дырочную составляющую плотности тока в базе диода, а следовательно, и ток через диод:

$$J_p = -qD_p \frac{p_n}{p_n + N_{an}} \frac{dp_n}{dx} - qD_p \frac{dp_n}{dx},$$

$$J_p = -qD_p \left(1 + \frac{p_n}{p_n + N_{an}} \right) \frac{dp_n}{dx}.$$

Выражение напоминает формулу для расчета диффузионной составляющей плотности тока, так как плотность тока получилась пропорциональной градиенту концентрации носителей. Однако такое сходство формально, так как на самом деле в расчете была принята во внимание и напряженностью электрического поля в базе диода.

Особенно простой вид принимает выражение для плотности дырочного тока через диод при высоком уровне инжекции, т. е. когда $p_n \gg N_{an}$:

$$J_p = -q2D_p \frac{dp_n}{dx}$$

Таким образом, дырочный ток через диод прямо пропорционален градиенту концентрации носителей заряда в базе, причем коэффициент пропорциональности не зависит от концентрации носителей. Коэффициент диффузии удвоен, что отражает влияние электрического поля в базе диода.

Формальное сходство выражения для плотности тока при высоком уровне инжекции с выражением для чисто диффузионного тока дает возможность упростить расчет ВАХ диода при высоком уровне инжекции, так как все отличие от рассмотренного ранее расчета при низком уровне инжекции заключается только в удвоении коэффициента диффузии, т.е.

$$J = J_p = \frac{q2D_p p_{n0}}{W_n} \left(\exp \frac{qU_{pn}}{kT} - 1 \right)$$

В уравнении для ВАХ диода при низком уровне инжекции напряжение U имело смысл напряжения на p-n-переходе. Оно же считалось равным напряжению на диоде, так как падением напряжения на базе диода при низком уровне инжекции можно было пренебречь. При высоком уровне инжекции следует учесть разницу в падениях напряжения на переходе и на диоде, пометив индексом p-n напряжение. Теперь понятен физический смысл полученной формулы, но необходимо еще найти распределение падений напряжения на диоде.

Расчет падения напряжения на базе в диоде с тонкой базой

Полное падение напряжения на диоде складывается из падения напряжения на p-n-переходе и на базе диода. Падение напряжения на базе диода может быть найдено с помощью соотношения для напряженности электрического поля в базе и преобразованием интеграла по координате в интеграл по концентрации носителей заряда:

$$\begin{aligned} U_B &= \int_0^{U_B} dU_B = - \int_{n_n}^0 E dx = \frac{kT}{q} \int_{n_n}^0 \frac{1}{n_n} \frac{dn_n}{dx} dx = \\ &= \frac{kT}{q} \int_{n_n}^{n_{nsp}} \frac{dn_n}{n_n} = \frac{kT}{q} \ln \frac{n_{nsp}}{n_{n0}} \end{aligned}$$

Нижний предел у последнего интеграла соответствует концентрации основных носителей в базе в состоянии равновесия. Это можно считать справедливым даже при токах, близких к предельно допустимым для полупроводниковых диодов, при хорошем невыпрямляющем контакте с базой. В этом случае концентрация основных носителей у

омического перехода изменяется с изменением тока относительно мало, или, другими словами, мало падение напряжения на омическом переходе.

Концентрацию основных носителей около р-п-перехода можно определить из условия электрической нейтральности ($p_{npr} \approx n_{npr}$) и выражения для граничной концентрации неосновных носителей заряда, т.е. при $x=0$

$$n_{npr} = p_{npr} = p_{n0} \exp \frac{qU_{pn}}{kT}$$

После подстановки получаем

$$U_B = \frac{kT}{q} \ln \left(\frac{p_{n0}}{n_{n0}} \exp \frac{qU_{pn}}{kT} \right),$$

или с учетом

$$U_B = \frac{kT}{q} \ln \left(\frac{n_i}{n_{n0}} \right)^2 + U_{pn}.$$

Тогда полное падение напряжения на диоде

$$U = U_B + U_{pn} = 2 \frac{kT}{q} \ln \frac{n_i}{n_{n0}} + 2U_{pn},$$

отсюда

$$U_{pn} = \frac{U}{2} - \frac{kT}{q} \ln \frac{n_i}{n_{n0}} = \frac{U}{2} + \frac{kT}{q} \ln \frac{n_{n0}}{n_i}.$$

Подставив последнее выражение в уравнение ВАХ, получим

$$J = \frac{q^2 D_p p_{n0}}{W_n} \left[\left(\exp \frac{qU}{2kT} \right) \frac{n_{n0}}{n_i} - 1 \right].$$

Единицей в квадратных скобках можно пренебречь, так как $n_{n0} \gg n_i$ и $\exp \frac{qU}{2kT} \gg 1$.

Тогда

$$J = \frac{q^2 D_p n_i}{W} \exp \frac{qU}{2kT}.$$

Здесь, как и ранее, опущены индексы у параметров материала базы диода (все входящие в формулу величины относятся к слаболегированной области, т.е. к базе диода).

Полученное выражение напоминает уравнение ВАХ диода с тонкой базой при низком уровне инжекции с учетом, но есть и некоторые отличия:

1) вместо обычного коэффициента диффузии стоит его удвоенное значение, что отражает влияние электрического поля в базе

2) в показателе экспоненты стоит уменьшенное вдвое напряжение, что связано с распределением приложенного к диоду напряжения приблизительно пополам между р-п-переходом и базой диода;

3) вместо концентрации неосновных носителей в последней формуле стоит собственная концентрация. Значит, вид ВАХ при высоком уровне инжекции перестает зависеть от концентрации примесей в слаболегированной области (в базе диода). Объясняется это тем, что при высоком уровне инжекции свойства полупроводника базы определяются в основном концентрацией инжектированных носителей. Полупроводник базы ведет себя при этом аналогично собственному полупроводнику.

Диапазон применимости полученного соотношения для вольт-амперной характеристики диода при больших токах

Диапазон применимости соотношения ограничен снизу тем, что при малых токах через диод не выполняется условие высокого уровня инжекции; сверху — тем, что при очень больших токах становятся несправедливыми принятые условия на границах р-п- и омического переходов с базой.

Нижняя граница диапазона применимости. Строго нижнюю границу диапазона применимости соотношения следовало бы определить по концентрации носителей заряда в соответствии с определением уровня инжекции. ВАХ, рассчитанная по приближенным формулам для низкого и высокого уровней инжекции, должна быть непрерывной. Тогда в

качестве предельного тока, являющегося границей диапазонов применимости приближений, можно взять такой, при котором вычисленные токи в том и другом приближении окажутся одинаковыми, т. е.

$$\frac{qD_p p_{n0}}{W_n} \left(\exp \frac{qU}{kT} - 1 \right) = \frac{q^2 D_p n_i}{W_n} \exp \frac{qU}{2kT}.$$

Если пренебречь единицей в формуле тока при низком уровне инжекции, то

$$\exp \frac{qU}{2kT} = \frac{2n_i}{p_{n0}}.$$

Подставив этот результат получим для граничной плотности тока

$$J_n = \frac{q^2 D_p n_i 2n_i}{W_n p_{n0}},$$

или после преобразований с помощью соотношения

$$J_n = \frac{4qDN}{W}.$$

Здесь опять опущены индексы, которые должны соответствовать слаболегированной области диода, т. е. его базе.

Оценка граничной плотности тока показывает, что $J_n \approx 0,1 \text{ А/см}^2$. Это примерно на три порядка меньше, чем предельно допустимая плотность тока диода. Следовательно, практически на всей прямой ветви ВАХ полупроводниковый диод работает в условиях больших токов.

Верхняя граница диапазона применимости. Верхняя граница диапазона применимости определяется неравенством $U_{pn} < \phi_{\text{кон}}$

Подставив в это неравенство выражения, получим

$$\frac{U}{2} - \frac{kT}{q} \ln \frac{n_i}{n_{n0}} < \frac{kT}{q} \ln \frac{p_{p0} n_{n0}}{n_i^2},$$

или

$$\frac{U}{2} < \frac{kT}{q} \ln \frac{p_{p0}}{n_i}$$

Следовательно,

$$J < \frac{2qD_p n_i}{W_n} \frac{p_{p0}}{n_i},$$

или

$$J_n = \frac{2qDN^+}{W},$$

где N^+ — концентрация примесей в сильнолегированной области, а остальные величины следует брать для слаболегированной области диода.

Порядок плотности тока, соответствующий верхней границе диапазона применимости, около 100 А/см^2 , что совпадает с предельно допустимой плотностью тока полупроводниковых диодов.

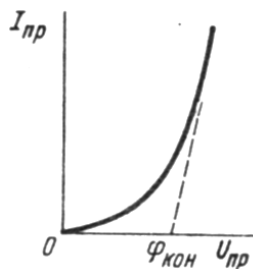
Вольт-амперная характеристика диода с толстой базой при больших токах

В диодах с толстой базой, когда толщина базы во много раз превышает диффузионную длину неосновных носителей заряда (например, в диодах на основе материала с большой шириной запрещенной зоны), сопротивление базы можно считать не зависящим от тока, т. е. можно пренебречь модуляцией сопротивления базы. Тогда при условии экспоненциальной зависимости граничной концентрации неосновных носителей около перехода от напряжения на нем уравнение ВАХ диода с толстой базой может быть представлено в виде «

$$I = I_{\text{нас}} \left[\exp \frac{q(U - IR_B)}{kT} - 1 \right],$$

где R_B — сопротивление базы диода.

Если сопротивление базы известно, то эта формула позволяет рассчитать ВАХ, принимая в качестве независимой переменной значение тока.



При больших токах, когда напряжение на р-п-переходе приближается к контактной разности потенциалов, это напряжение как бы стабилизируется. Тогда ВАХ диода с толстой базой принимает вид

$$U = \varphi_{\text{кон}} + IR_{\text{б}}.$$

Таким образом, при больших токах на ВАХ диода с толстой базой может наблюдаться прямолинейный участок. Это дает возможность оценить контактную разность потенциалов на р-п-переходе диода.

Однако в большинстве случаев сопротивление базы не является постоянным при изменении тока и расчет ВАХ сильно усложняется. Но заранее можно сказать, что при напряжениях на переходе, близких к контактной разности потенциалов, ВАХ вернее всего, не будет экспоненциальной, так как экспоненциальный ее вид прежде всего связан с экспоненциальной зависимостью концентрации инжектированных носителей заряда от напряжения.

2.6 Практическое занятие №6 (2 часа).

Тема: «Принцип выбора полупроводникового диода»

2.6.1 Задание для работы: рассмотреть основные параметры и диода и принцип его выбора

2.6.2 Краткое описание проводимого занятия:

Полупроводниковый диод – это обычно полупроводниковый нелинейный компонент с двумя выводами, обладающий свойством односторонней проводимости, и имеющий электронно-дырочный переход. В этом определении важно слово «обычно», так как некоторые разновидности диодов не обладают свойством односторонней проводимости (туннельные диоды) и не имеют электронно-дырочного перехода (диоды Ганна). Такие диоды, кстати, нами уже были рассмотрены.

Идеальный полупроводниковый диод допускает протекание бесконечно большого прямого тока и выдерживает бесконечно большое обратное напряжение. Это отражено на вольтамперной характеристике, изображённой на рис. 1.

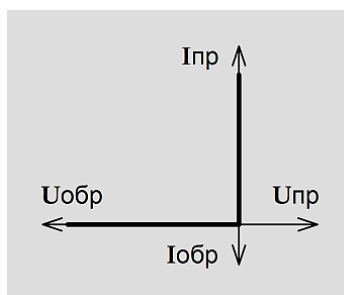


Рис. 1 Вольтамперная характеристика идеального диода

Идеальных диодов на практике не бывает. Реальный диод всегда имеет конечную величину обратного напряжения, после чего наступит электрический пробой, и вполне определённый максимальный прямой ток, превышение которого вызовет тепловой пробой. Вольтамперная характеристика реального диода дана на рис. 2.

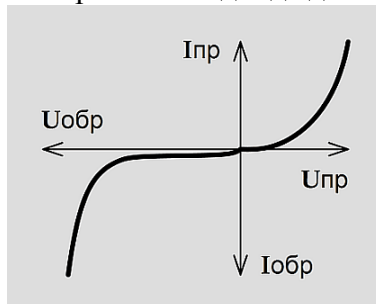


Рис. 2 Вольтамперная характеристика реального диода

Диоды, выполненные на основе кремния, имеют меньшую величину обратного тока и более высокую максимально допустимую температуру кристалла, чем германиевые диоды. Однако падение напряжения на кремниевых диодах в прямом включении примерно в два раза выше, чем на германиевых диодах.

Анодом диода называют вывод от той области электронно-дырочного перехода диода в прямом включении, к которому подсоединяют положительный полюс источника питания. А вывод от области, к которой подключают отрицательный полюс источника питания, именуют катодом.

КПД диодов может в отдельных случаях достигать 99%, т.е. обычно он весьма велик.

Выпрямительные диоды.

Предназначены для преобразования переменного тока в постоянный.



Рис. 3 Вольтамперная характеристика (ВАХ) диода

На ВАХ реального Si-диода обозначена область электрического пробоя, когда при небольшом увеличении обратного напряжения ток резко возрастает. Этот пробой является обратимым явлением (если ток не превысит предельного значения и не произойдет вторичный тепловой пробой).

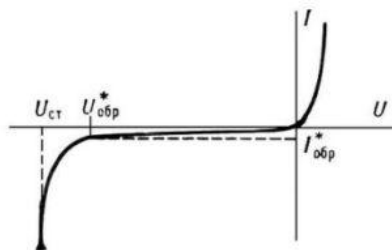


Рис. 4 Вольтамперная характеристика (ВАХ) диода

В режиме обратимого электрического пробоя работают стабилитроны. (Заметим, что такой пробой не характерен для Ge-диодов, у которых обратный ток возрастает не резко.)

Реальные ВАХ диодов зависят от температуры, с ростом температуры прямое падение напряжения уменьшается (у Si-диодов линейно в интервале от 0 до 100°C с коэф. 2мВ/С или 2.3мВ/С по другим данным, что используется для создания термодатчиков). Обратный ток при комн. тем-ре у Ge-диодов на 2-3 порядка больше, чем у Si-диодов и возрастает примерно в 1.5-2 раза с повышением температуры на 10° С для Ge-диодов, и в 2.5 раза для Si-диодов. Из графиков видно, что для Ge-диодов гораздо вероятнее тепловой пробой из-за резкого роста обратного тока при повышении температуры.

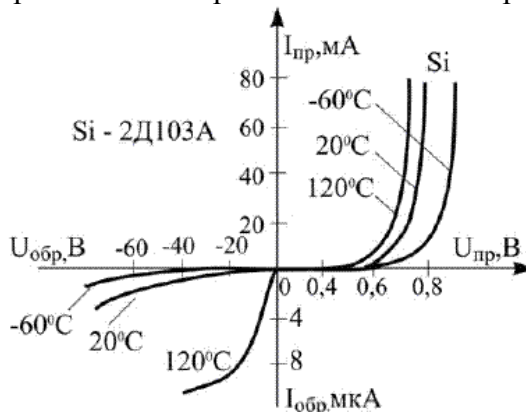


Рис. 5 Реальные ВАХ Si-диода

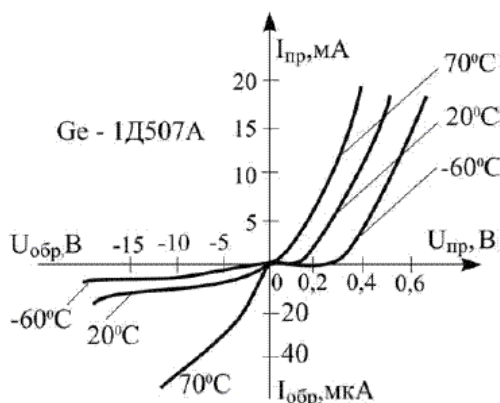


Рис. 6 Реальные ВАХ Ge-диода

Напряжение пробоя незначительно растет с повышением температуры у Si-диодов, и резко уменьшается у Ge-диодов (такая зависимость связана с особенностями движения носителей заряда в этих полупроводниках)

Основными параметрами выпрямительных диодов являются:

- максимально допустимый прямой ток $I_{пр.мах}$;
- максимально допустимое обратное напряжение $U_{обр.мах}$;
- максимально допустимая частота $f_{мах}$;
- обратный ток диода $I_{обр}$. (измеряется при максимальном обратном напряжении);
- прямое падение напряжения (измеряется при максимальном токе);
- максимальная температура корпуса.

2.7 Практическое занятие №7 (2 часа).

Тема: «Статические параметры и характеристики биполярных транзисторов»

2.7.1 Задание для работы: рассмотреть основные параметры и характеристики биполярных транзисторов

2.7.2 Краткое описание проводимого занятия:

Статическими параметрами транзистора называют значения токов или напряжений, измеренных в определенных условиях, а также некоторые соотношения между этими величинами.

Параметры режима отсечки.

В качестве статических параметров, характеризующих режим отсечки, обычно выбирают значения токов эмиттера и коллектора. В связи с тем, что в режиме отсечки наблюдается некоторое влияние одного перехода транзистора на другой, эти токи находят при определенных условиях включения транзистора.

Начальными токами переходов называют значения токов при обратном напряжении на каком-либо переходе транзистора при условии, что напряжение на другом переходе равно нулю. Практически начальные токи находят, применяя короткое замыкание вывода соответствующей области с базой. Так, начальный ток коллектора $I_{КБК}$ определяют при коротком замыкании выводов эмиттера и базы, а начальный ток эмиттера $I_{ЭБК}$ — при коротком замыкании выводов коллектора и базы. Поскольку начальные токи переходов транзистора обычно довольно малы, короткому замыканию выводов соответствует напряжение на переходе, практически равное нулю. Согласно определению начальных токов, их находят на границе перехода транзистора из активного режима в режим отсечки.

Рассмотрим для примера происхождение тока $I_{КБК}$. При напряжении на эмиттере, равном нулю, обращаются в нуль только составляющие эмиттерного тока $I_{Эл}$ и $I_{Эрек}$:

$$I_{Эр} = \frac{S_s q n_i^2}{\int_0^w \frac{N}{D_p} dx} \neq 0.$$

Это объясняется тем, что при подаче напряжения на коллекторный переход в базе перераспределяются неосновные носители заряда, возникают градиент их концентрации и соответствующий ток. Начальный ток коллектора складывается из тока $I_{Кр}$, также не равного нулю, и обратных токов коллекторного перехода. При не очень больших напряжениях ($W=1$)

$$I_{КБК} = \frac{S_s q n_i^2}{\int_0^w \frac{N}{D_p} dx} - I_{рек\ v} - I_{рек\ s} - I_{рек\ кон} + I_{Бген} + I_{Кген} + I_{ген}.$$

Аналогично образуется и начальный ток эмиттера $I_{ЭБК}$.

Под обратными токами переходов транзистора понимают значения токов через какой-либо из переходов при обратном напряжении, в то время как ток в одном из двух оставшихся свободными выводов равен нулю. Так, обратный ток коллектора транзистора в схеме с общей базой $I_{КБО}$ определяется при токе эмиттера, равном нулю, а обратный ток эмиттера для той же схемы $I_{ЭБО}$ — при токе коллектора, равном нулю. Аналогично можно определить и обратный ток коллектора для схемы с общим эмиттером $I_{КЭО}$ (при токе базы, равном нулю).

Значение тока $I_{КБО}$ можно найти с учетом того, что при этом ток эмиттера отсутствует, а значит, и $I_{Кр} = 0$. Тогда

$$I_{КБО} = (I_{Бген} + I_{Кген} + I_{ген})M.$$

$$I_{К} = MI_{Кр} + I_{КБО}.$$

Следовательно, ток $I_{КБО}$ представляет собой суммарную не I управляемую со стороны эмиттера составляющую тока коллектора.

Ток базы

$$I_{Б} = I_{рек\ v} + I_{рек\ s} + I_{рек\ кон} + I_{Эл} + I_{Эрек} - I_{Кр}(M - 1)$$

Здесь тоже $I_{КБО}$ представляет собой составляющую, которая не зависит от тока эмиттера. Аналогично определяется и обратный ток эмиттера $I_{ЭБО}$.

Параметры активного режима.

Статические параметры активного режима в основном характеризуют степень влияния входной цепи транзистора (эмиттерной, базовой) на выходную. К этим параметрам относится статический коэффициент передачи тока базы

$$h_{21Э} = \frac{I_K - I_{КБО}}{I_B + I_{КБО}}$$

Подставив полученные выражения для токов коллектора и базы, получим

$$\begin{aligned} \frac{1}{h_{21Э}} \approx & \frac{1}{\bar{\alpha}^* M} \left[\frac{1}{\tau_p} \int_0^w \left(\frac{1}{N} \int_0^w \frac{N}{D_p} dx \right) dx + \right. \\ & + \frac{s S_{рек}}{S_3 N(0)} \int_0^w \frac{N}{D_p} dx + \frac{D_n}{N(0) L_n} \int_0^w \frac{N}{D_p} dx + \\ & \left. + \frac{\delta_s}{n_i \tau} \frac{kT}{q(\varphi_{кон} - U_{ЭБ})} \int_0^w \frac{N}{D_p} dx \exp \left(-\frac{qU_{ЭБ}}{2kT} \right) - \bar{\alpha}^* M + 1 \right]. \end{aligned}$$

Значение статического коэффициента передачи тока базы определяется несколькими процессами, отражено соответствующими сомножителями и слагаемыми.

Множитель $\bar{\alpha}^*$, учитывающий изменение обратного тока коллектора при изменении тока эмиттера, обычно примерно равен единице. Коэффициент лавинного размножения M учитывает влияние этого процесса на общий ток коллектора.

Слагаемое

$$\frac{1}{\tau_p} \int_0^w \left(\frac{1}{N} \int_0^w \frac{N}{D_p} dx \right) dx = \frac{t_{прол}}{\tau_p}$$

учитывает потери носителей заряда в базе при объемной рекомбинации. Слагаемое

$$\frac{s S_{рек}}{S_3 N(0)} \int_0^w \frac{N}{D_p} dx$$

учитывает потери носителей в базе из-за поверхностной рекомбинации.

Слагаемое

$$\frac{D_n}{N(0) L_n} \int_0^w \frac{N}{D_p} dx$$

учитывает влияние тока носителей заряда, инжектированных из базы в эмиттер.

Слагаемое

$$\frac{\delta_s}{n_i \tau} \frac{kT}{q(\varphi_{кон} - U_{ЭБ})} \int_0^w \frac{N}{D_p} dx \exp \left(-\frac{qU_{ЭБ}}{2kT} \right)$$

учитывает потери носителей из-за рекомбинации в эмиттерном переходе.

Из перечисленных процессов только лавинное умножение изменение обратного тока коллектора под действием тока эмиттера приводят к росту значения $h_{21Э}$, остальные процессы обуславливают его снижение.

Для бездрейфового транзистора:

$$\begin{aligned} \frac{1}{h_{21Э}} = & \frac{1}{\bar{\alpha}^* M} \left[\frac{w^2}{2L_p^2} + \frac{s S_{рек} w}{S_3 D_p} + \frac{D_n N w}{D_p N(0) L_n} + \right. \\ & \left. + \frac{\delta_s N w}{n_i \tau D_p} \frac{kT}{q(\varphi_{кон} - U_{ЭБ})} \exp \left(-\frac{qU_{ЭБ}}{2kT} \right) - M \left(1 + \frac{n_{p0} \mu_n}{p_{p0} \mu_p} \right) \right] \end{aligned}$$

Коэффициент передачи тока базы — один из важнейших параметров транзистора, поэтому целесообразно рассмотреть влияние на него значений постоянной составляющей тока.

При малых напряжениях, как известно, в образовании тока через р-п-переход большую роль играет рекомбинация в р-п-переходе. Так как рекомбинационный ток не связан с инжекцией в базу, он приводит к снижению $h_{21Э}$. Это отражено в том, что слагаемое, учитывающее рекомбинацию в р-п-переходе, растет с уменьшением $U_{ЭБ}$.

По мере роста напряжения на эмиттере и тока эмиттера роль рекомбинации в р-п-переходе уменьшается. К тому же с увеличением тока повышается уровень инжекции, а возникающее при этом поле способствует движению инжектированных носителей заряда через базу. Действие такого поля эквивалентно росту D_p .

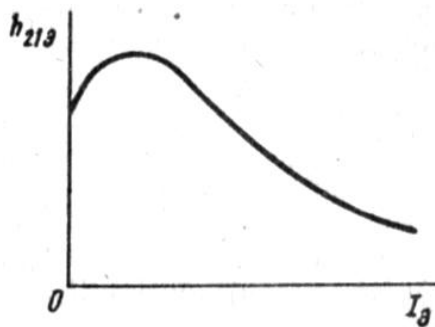


Рис. 1 Зависимость коэффициента передачи постоянного тока базы от постоянного тока эмиттера

Одновременно при повышении уровня инжекции начинает расти концентрация носителей в базе, что ведет к росту тока носителей, инжектированных из базы в эмиттер. Вместо N в третьем слагаемом следовало бы взять $N + p_n$. Соответственно уменьшится $h_{21Э}$.

К снижению $h_{21Э}$ при больших токах приводит и вытеснение носителей к краю эмиттера, в связи с чем возрастает роль поверхностной рекомбинации.

В некоторых транзисторах уменьшение $h_{21Э}$ при больших токах может быть связано с увеличением толщины базы. На зависимость от тока влияет также изменение времени жизни носителей в объеме и скорости поверхностной рекомбинации. Результирующая зависимость $h_{21Э}$ от $I_Э$ чаще всего имеет вид кривой с максимумом (рис. 1). Обычно значение $h_{21Э}$ составляет несколько десятков.

Иногда вводят статический коэффициент передачи тока эмиттера

$$h_{21Б} = \frac{I_1 - I_{КБ0}}{I_Э}$$

при этом

$$h_{21Э} \approx \frac{|h_{21Б}|}{1 - |h_{21Б}|}$$

Абсолютное значение $h_{21Э}$, как правило, лишь немного меньше единицы.

Помимо этого иногда используют значение крутизны передаточной характеристики

$$S = \frac{I_К - I_{КБ0}}{U_{ЭБ}}$$

Формулы для расчета этих параметров можно вывести примерно так же, как для $h_{21Э}$

Используя статические параметры и выражение для тока $I_{КБ0}$, перепишем выражение для тока $I_{КБ0}$

$$I_{КБ0} = h_{21Б} \frac{qn_i^2 S_s}{\int_0^N \frac{N}{D_p} dx} + I_{КБ0}$$

Параметры режима насыщения.

В качестве параметров режима насыщения обычно принимают измеренные при определенных токах значения падения напряжения между выводами транзистора. Например, $U_{КБнас}$ — падение напряжения между выводами коллектора и базы в режиме

насыщения (для схемы с общей базой) или $U_{КЭнас}$ — падение напряжения между выводами колл лектора и эмиттера в режиме насыщения (для схемы с общим эмиттером).

Если эти падения напряжения отнести к току, проходящему через коллектор, то полученный параметр называют сопротивлением насыщения.

2.8 Практическое занятие №8 (2 часа).

Тема: «Эквивалентные схемы биполярных транзисторов»

2.8.1 Задание для работы: рассмотреть основные типы эквивалентных схем биполярных транзисторов

2.8.2 Краткое описание проводимого занятия:

Рассмотрение транзистора как активного линейного четырехполюсника удобно для расчета электрических схем. Однако оно имеет и ряд недостатков, которые связаны прежде всего с тем, что параметры четырехполюсника вводят в известной степени формально и каждый из них может отражать влияние сразу нескольких физических процессов. Поэтому получаются Сложные зависимости параметров четырехполюсника от режима работы транзистора (постоянных напряжений и токов), от частоты и температуры. Чтобы упростить эти зависимости, свойства транзистора при малом переменном сигнале описывают с помощью эквивалентных схем. Под эквивалентной понимают электрическую схему, составленную из линейных элементов электрических цепей (сопротивлений, емкостей, индуктивностей, генераторов тока или напряжения), которая по своим свойствам при ванном сигнале (например, при малом переменном) не отличается от реального объекта (транзистора). Графическое изображение эквивалентных схем позволяет более экономно зафиксировать основные соотношения. При расчетах с помощью эквивалентных схем сначала определяют токи и напряжения в самой схеме и затем переходят к каким-то другим параметрам, например параметрам четырехполюсника.

Никакая эквивалентная схема из конечного числа элементов не может быть полностью эквивалентной реальному транзистору, В. е. все эквивалентные схемы оказываются приближенными. Чем проще эквивалентная схема, чем меньше она содержит элементов, тем легче ею пользоваться, но обычно тем менее точно она отражает свойства реального транзистора.

По способу построения различают формальные и физические эквивалентные схемы.

Формальные эквивалентные схемы строят на основе описания транзистора с помощью уравнений четырехполюсника. Как видно из рисунка, каждая схема содержит по четыре элемента: два сопротивления (комплексных) и два генератора тока, или напряжения. Такие эквивалентные схемы не имеют никаких преимуществ по сравнению с описанием транзистора как четырехполюсника путем задания его параметров (или соответствующих уравнений).

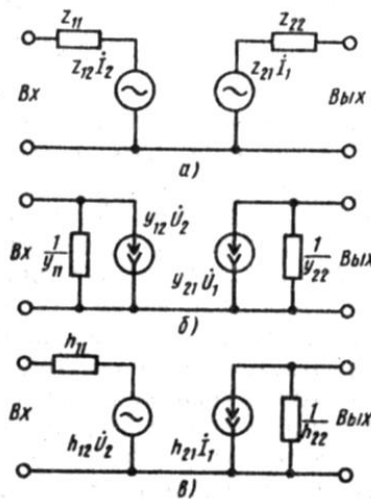


Рис. 1 – Формальные эквивалентные схемы транзистора

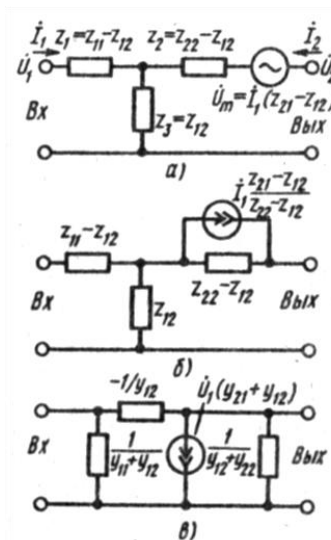


Рис. 2 – Одногенераторные формальные эквивалентные схемы

Формальные эквивалентные схемы можно представить в разной форме: например, построить так, чтобы в схеме был только один активный элемент. Обычно эти схемы по способу начертания подразделяют на Т- и П-образные. Чтобы установить связь элементов одногенераторных формальных схем с параметрами четырехполюсника, можно записать выражения для токов и напряжений в них, а затем сопоставить со значениями токов и напряжений четырехполюсника. Например, для Т-образной эквивалентной схемы с генератором ЭДС в режиме холостого хода на выходе

$$\left. \begin{aligned} \dot{U}_1 &= I_1(z_1 + z_3), \\ \dot{U}_2 &= \dot{U}_m + I_1 z_3. \end{aligned} \right\}$$

в режиме холостого хода на входе

$$\left. \begin{aligned} \dot{U}_1 &= I_2 z_3, \\ \dot{U}_2 &= I_2(z_2 + z_3). \end{aligned} \right\}$$

Отсюда

$$\left. \begin{aligned} \frac{\dot{U}_2}{I_1} \Big|_{I_2=0} &= z_3 + \frac{\dot{U}_m}{I_1} = z_{21}; \quad \frac{\dot{U}_1}{I_1} \Big|_{I_2=0} = z_1 + z_2 = z_{11}; \\ \frac{\dot{U}_1}{I_2} \Big|_{I_1=0} &= z_3 = z_{12}; \quad \frac{\dot{U}}{I_2} \Big|_{I_1=0} = z_2 + z_3 = z_{22}. \end{aligned} \right\}$$

После преобразования получим значения, указанные на рисунке. Аналогично получают параметры и других одноконтурных схем.

Физические эквивалентные схемы составляют на основании физических соображений для определенных типов конструкций транзистора, для определенного частотного диапазона, ориентируясь на определенную схему включения транзистора (с общим эмиттером, общей базой, общим коллектором). Каждый вывод физической эквивалентной схемы соответствует электроду транзистора. Заметим, что в формальных эквивалентных схемах различают только входные и выходные зажимы независимо от того, какими электродами транзистора они являются.

Физическую эквивалентную схему строят, выделяя мысленно некоторые части в транзисторе и рассматривая отдельно процессы в этих частях.

За основу построения обычно берут формальную эквивалентную схему идеализированного транзистора, называемого одномерной теоретической моделью. При изучении одномерной теоретической модели транзистора считают, что носители заряда в нем движутся по параллельным путям, а поверхностная рекомбинация только изменяет время жизни носителей. Кроме того, в одномерной теоретической модели не учитывают влияние объемных сопротивлений и токов, проходящих через барьерные емкости переходов. При таких предположениях получается, что параметры формальной эквивалентной схемы довольно просто выразить через конструктивные параметры идеализированного транзистора (толщину базы), режим его работы, свойства материала.

К одномерной теоретической модели транзистора добавляют элементы, учитывающие другие процессы, например падения напряжений на объемных сопротивлениях, токи через емкости и т. д.

2.9 Практическое занятие №9 (2 часа).

Тема: «Диодный и триодный тиристоры»

2.9.1 Задание для работы: рассмотреть основные принципы устройства диодного и триодного тиристора

2.9.2 Краткое описание проводимого занятия:

Диодные тиристоры

Диодный тиристор (динистор) — это тиристор, имеющий два вывода, через которые проходит как основной ток, так и ток управления.

Структура и принцип действия

Структура диодного тиристора состоит из четырех областей полупроводника с чередующимся типом электропроводности (рис. 1) Кроме трех выпрямляющих переходов диодный тиристор имеет два омических перехода. Один из омических переходов расположен между крайней л-областью и металлическим электродом, который называют катодом. Другой омический переход расположен между крайней р-областью и металлическим электродом, который называют анодом.

Вначале рассмотрим процессы, происходящие в тиристоре при подаче на него прямого напряжения, т. е. при положительном потенциале на аноде. В этом случае крайние р-п-переходы смещены в прямом направлении, поэтому их называют эмиттерными; средний р-п-переход смещен в обратном направлении, поэтому его

называют коллекторным. Соответственно в таком приборе существуют две эмиттерные области (n- и p-эмиттеры) и две базовые области (p- и n-базы).

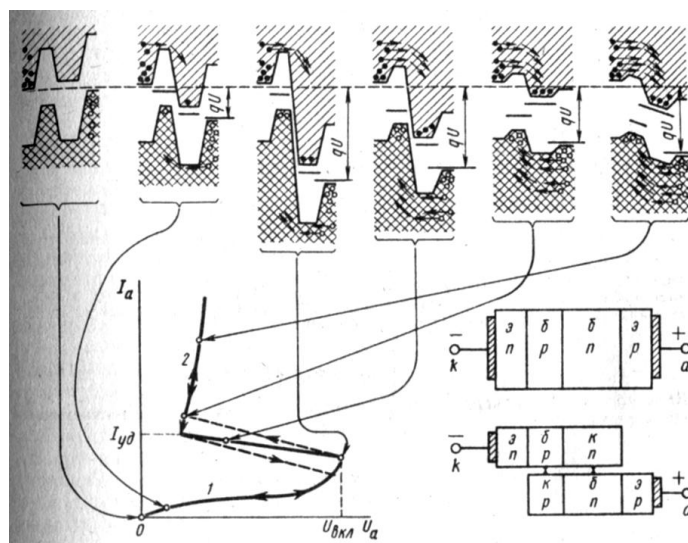


Рис. 1 – Структура, ВАХ и энергетические диаграммы диодного тиристора

Большая часть внешнего прямого напряжения падает на коллекторном переходе, так как он смещен в обратном направлении, поэтому первый участок прямой ветви ВАХ тиристора похож на обратную ветвь ВАХ выпрямительного диода. С увеличением анодного напряжения, приложенного между анодом и катодом, увеличивается прямое напряжение и на эмиттерных переходах. Электроны, инжектированные из л-эмиттера в р-базу, диффундируют к коллекторному переходу, втягиваются полем коллекторного перехода и попадают в n-базу. Дальнейшему продвижению электронов по структуре тиристора препятствует небольшой потенциальный барьер правого эмиттерного перехода (рис. 1). Поэтому часть электронов, оказавшись в потенциальной яме л-базы, образует избыточный отрицательный заряд, который, понижая высоту потенциального барьера правого эмиттерного перехода, вызывает Увеличение инжекции дырок из р-эмиттера в n-базу. Инжектированные дырки диффундируют к коллекторному переходу, втягиваются полем коллекторного перехода и попадают в р-базу. Дальнейшему их продвижению по структуре тиристора препятствует Небольшой потенциальный барьер левого эмиттерного перехода. Следовательно, в р-базе происходит накопление избыточного положительного заряда, что обуславливает увеличение инжекции Электронов из n-эмиттера. Таким образом, в структуре тиристора существует положительная обратная связь по току— увеличение тока через один эмиттерный переход приводит к увеличению тока через другой эмиттерный переход.

Накопление неравновесных носителей в базовых областях равносильно дополнительной разности потенциалов на коллекторном переходе, которая в отличие от внешней разности потенциалов стремится сместить коллекторный переход в прямом направлении. Поэтому с увеличением тока через тиристор и, следовательно с увеличением избыточных зарядов основных носителей заряда в базовых областях абсолютное значение суммарного напряжения на коллекторном переходе начнет уменьшаться. Ток через тиристор при этом будет ограничен только сопротивлением нагрузки и ДДС источника питания. Высота потенциального барьера коллекторного перехода уменьшается до значения, соответствующего включению этого перехода в прямом направлении.

Таким образом, тиристор при подаче на него прямого напряжения может находиться в двух устойчивых состояниях: закрытом и открытом.

Закрытое состояние тиристора соответствует участку прямой ветви ВАХ между нулевой точкой и точкой переключения. Под точкой переключения понимают точку на

ВАХ, в которой дифференциальное сопротивление равно нулю, а напряжение на тиристоре достигает максимального значения. В закрытом состоянии (участок 1 ВАХ на рис. 1) к тиристору может быть приложено большое напряжение, а ток при этом будет мал.

Открытое состояние тиристора соответствует низковольтному и низкоомному участку прямой ветви ВАХ. На рис. 1 открытому состоянию тиристора соответствует участок 2 ВАХ. Между первым и вторым участками ВАХ находится переходный участок, соответствующий неустойчивому состоянию тиристора. Особенно проявляется неустойчивость при относительно малом сопротивлении во внешней цепи тиристора. Тогда переключение тиристора из скрытого состояния в открытое и обратно происходит по штриховым линиям (рис. 1), наклон которых определяется обычно относительно малым сопротивлением нагрузки.

В открытом состоянии тиристор будет находиться до тех пор, пока за счет проходящего тока будет поддерживаться избыточный заряд в базах, необходимый для смещения коллекторного перехода в прямом направлении. Если же ток через тиристор уменьшить до некоторого значения, меньшего удерживающего тока $I_{уд}$ то в результате рекомбинации и рассасывания уменьшится количество неравновесных носителей заряда в базовых областях тиристора, коллекторный переход окажется смещенным в обратном направлении, произойдет перераспределение падений напряжения на выпрямляющих переходах тиристорной структуры, уменьшатся инжекции из эмиттерных областей и тиристор перейдет в закрытое состояние (см. рис. 1). Таким образом, удерживающий ток тиристора — это минимальный ток, который необходим для поддержания тиристора в открытом состоянии.

Закрытое состояние

Структуру тиристора можно представить в виде двух транзисторов, соединенных между собой, как показано на рис. 1. Постоянный ток коллектора этих транзисторов можно выразить через эмиттерные токи, пользуясь параметрами одномерной теоретической модели транзистора

$$I_{n2} = \bar{\alpha}_1 I_{n1} + \bar{\alpha}_2 I_{n3} + I_{кбо},$$

где I_{n1} , I_{n2} и I_{n3} — токи через первый, второй и третий р-п-переходы; α_1 и α_2 — статические коэффициенты передачи токов эмиттера одномерных теоретических моделей первого и второго транзисторов; $I_{кбо}$ — обратный ток коллектора, который является общим для обоих транзисторов, составляющих структуру тиристора.

Распределение потоков электронов и дырок в тиристорной структуре, находящейся в закрытом состоянии, схематично показано на рис. 2, а. На этом рисунке кроме основных потоков носителей заряда из эмиттерных областей в прилегающие базовые области учтена инжекция носителей из базовых областей в эмиттерные и рекомбинация носителей в эмиттерных переходах. В закрытом состоянии тиристора из всего потока инжектированных в каждую базу неосновных носителей заряда только меньшая часть доходит до коллекторного перехода. Основным механизмом образования обратного тока коллектора — генерация носителей заряда в коллекторном переходе. На рисунке показана полярность напряжений, падающих на каждом из трех р-п-переходов от внешнего источника питания.

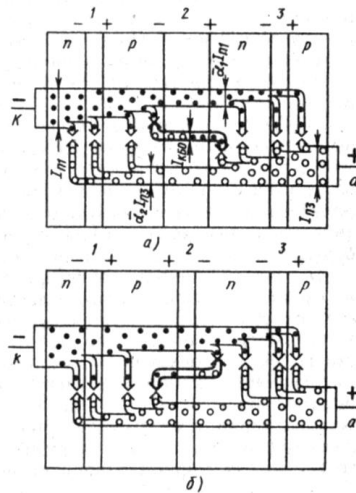


Рис. 2 Схематическое изображение потоков носителей заряда через структуру диодного тиристора в закрытом (а) и открытом (б) состояниях

Для двухэлектродной структуры диодного тиристора из-за необходимости выполнения баланса токов полные токи через все переходы должны быть равны между собой:

$$I_{n1} = I_{n2} = I_{n3} = I_a.$$

Тогда анодный ток тиристора

$$I_a = I_{КБО} / (1 - \bar{\alpha}),$$

где $\alpha = \alpha_1 + \alpha_2$ — суммарный статический коэффициент передачи тока тиристорной структуры.

Выражение представляет собой уравнение ВАХ диодного тиристора в закрытом состоянии. Напомним, что статический коэффициент передачи тока эмиттера транзистора растет с увеличением тока эмиттера в результате уменьшения влияния рекомбинации в эмиттерном переходе и появления электрического поля в базе из-за увеличения градиента концентрации носителей заряда. Коэффициент передачи тока эмиттера растет также с увеличением напряжения на коллекторном переходе в результате уменьшения толщины базы и увеличения коэффициента лавинного размножения в коллекторном переходе. Эти четыре физических фактора вызывают рост суммарного статического коэффициента передачи тока тиристорной структуры при увеличении напряжения и соответственно тока в закрытом состоянии тиристора.

Из соотношения следует, что при значении суммарного статического коэффициента передачи тока, равного единице, ток через тиристор должен быть бесконечно большим. Это значит, что произошло переключение тиристора из закрытого в открытое состояние. В практических схемах ток через тиристор при этом, конечно, должен быть ограничен достаточным сопротивлением нагрузки.

Условие переключения тиристора

В точке переключения тиристора дифференциальное сопротивление равно нулю. Выясним условие, при котором дифференциальное сопротивление тиристора может стать равным нулю. До переключения тиристора в открытое состояние практически все напряжение, приложенное к тиристору, падает на коллекторном переходе.

$$\frac{d\bar{\alpha}(I, U)}{dU} = \frac{\partial \bar{\alpha}}{\partial I} \frac{\partial I}{\partial U} + \frac{\partial \bar{\alpha}}{\partial U},$$

получим

$$r = \frac{dU_a}{dI_a} = \frac{1 - \left(\bar{\alpha}_1 + I_a \frac{\partial \bar{\alpha}_1}{\partial I_a} \right) - \left(\bar{\alpha}_2 + I_a \frac{\partial \bar{\alpha}_2}{\partial I_a} \right)}{\frac{\partial I_{КБ0}}{\partial U_a} + I_a \left(\frac{\partial \bar{\alpha}_1}{\partial U_a} + \frac{\partial \bar{\alpha}_2}{\partial U_a} \right)}$$

В скобках числителя (5.4) стоят выражения для дифференциального коэффициента передачи тока эмиттера одномерных теоретических моделей транзисторов. Действительно, $I_K = \alpha I_E + I_{КБ0}$. Отсюда дифференциальный коэффициент передачи тока эмиттера одномерной теоретической модели транзистора $\alpha = dI_K/dI_E = \bar{\alpha} + I_E(d\bar{\alpha}/dI_E)$. Таким образом, следует что переключение тиристора из закрытого состояния в открытое должно произойти при условии равенства единице суммарного дифференциального коэффициента передачи тока тиристорной структуры, т. е.

$$\alpha = \alpha_1 + \alpha_2 = 1.$$

Обычно это условие удовлетворяется раньше, чем условие равенства единице статических коэффициентов передачи тока первого и второго транзисторов, составляющих тиристорную структуру, так как дифференциальные коэффициенты передачи несколько больше статических.

Ничтожное превышение дифференциального коэффициента передачи тока над единицей означает, что приращение тока коллектора больше, чем приращение тока эмиттера. Именно при таком условии р-база заряжается положительно, а н-база — отрицательно (об этом шла речь в начале этого параграфа). Избыточные заряды в базовых областях уменьшают напряжение на коллекторном переходе, а следовательно, и на всей тиристорной структуре, что соответствует переходному участку ВАХ тиристора — участку отрицательного дифференциального сопротивления.

При переключении диодного тиристора из закрытого состояния в открытое из-за роста проходящего тока суммарный дифференциальный коэффициент передачи тока увеличивается. Одновременно уменьшение напряжения на коллекторном переходе вызывает уменьшение того же коэффициента. В действительности сумма дифференциальных коэффициентов передачи тока транзисторных структур, составляющих тиристорную структуру, во время переключения несколько превышает единицу.

Открытое состояние

В открытом состоянии значение суммарного коэффициента передачи тока тиристорной структуры превышает единицу, т. е. большая часть носителей заряда, инжектированных из эмиттерных областей, доходит до коллекторного перехода. Для открытого состояния при установившемся токе через диодный тиристор также должен сохраниться баланс токов. Поэтому необходимо предположить инжекцию дырок через коллекторный переход из р-базы в н-базу и инжекцию электронов в другом направлении. Это предположение, соответствующее смещению коллекторного перехода в прямом направлении, позволяет понять существование равенства полных потоков носителей заряда разных знаков во всех сечениях тиристорной структуры при установившемся режиме в открытом состоянии.

На рис. 2, б показана полярность напряжений на всех трех р-н-переходах тиристора в открытом состоянии. Коллекторный переход смещен в прямом направлении из-за избыточных зарядов основных носителей в базовых областях, накопленных там в процессе переключения тиристора.

Падение напряжения на диодном тиристоре в открытом состоянии представляет собой сумму напряжений на всех р-н-переходах (с учетом инверсии полярности напряжения на коллекторном переходе), на объемном сопротивлении различных областей (в основном слаболегированной базы) и на омических переходах.

Обратное напряжение на диодном тиристоре

При обратном напряжении на тиристоре, т. е. при отрицательном потенциале на аноде, эмиттерные переходы смещены в обратном направлении, а коллекторный переход — в прямом. В этом случае нет условий для переключения тиристора, а обратное напряжение может быть ограничено либо лавинным пробоем эмиттерных переходов, либо эффектом смыкания переходов в результате расширения одного из эмиттерных переходов, смещенных в обратном направлении, на всю толщину слаболегированной базы.

На рис. 3 показаны расчетные значения пробивного напряжения при лавинном пробое и при эффекте смыкания в зависимости от концентрации доноров в слаболегированной л-базе для разных толщин этой базы. Для каждой толщины базы обратное напряжение на тиристоре ограничено лавинным пробоем при больших концентрациях примеси в базе, так как в этом случае будет мала толщина эмиттерного перехода. В тонком переходе напряженность электрического поля, необходимая для ударной ионизации, возникнет при меньших напряжениях. При малых концентрациях примеси в базе обратное напряжение на тиристоре будет ограничено эффектом смыкания переходов, так как толщина р-п-перехода тем больше, чем меньше концентрация примеси в базе.

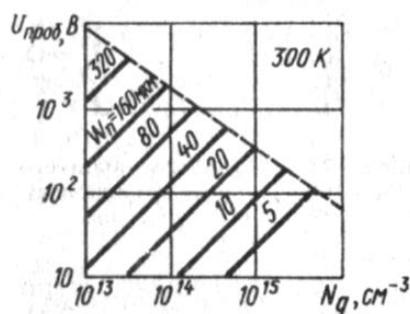


Рис. 3 – Зависимость пробивного напряжения при лавинном пробое кремниевого несимметричного резкого р-п-перехода (штриховая линия) и при эффекте смыкания переходов тиристора (сплошные линии) от концентрации доноров в слаболегированной п-базе для разных толщин этой базы

Отметим, что рассмотренные физические явления ограничивают не только обратные напряжения, но и напряжения включения тиристорov. Только при прямом напряжении на тиристоре ударная ионизация может происходить в коллекторном переходе, который смещен в обратном направлении при закрытом состоянии тиристора, а эффект смыкания может происходить из-за расширения коллекторного перехода.

Триодные тиристоры

Триодный тиристор (тринистор) — это тиристор, имеющий два основных и один управляющий вывод.

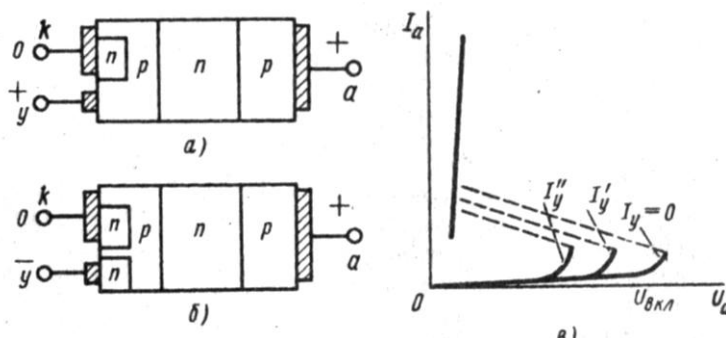


Рис. 3 Схематическое изображение структур триодных тиристорov с омическим переходом между управляющим электродом и базой (а), с дополнительным р-п-переходом под управляющим электродом (б) и ВАХ триодного тиристора при различных токах ($I_y'' > I_y' > I_y$) через управляющий электрод (в)

Для переключения триодного тиристора из закрытого состояния в открытое также необходимо накопление неравновесных носителей заряда в базовых областях. В диодном тиристоре при увеличении напряжения на нем до напряжения включения это накопление неравновесных носителей заряда происходит обычно либо из-за увеличения уровня инжекции через эмиттерные переходы, либо из-за ударной ионизации в коллекторном переходе. В триодном тиристоре, имеющем управляющий вывод от одной из базовых областей с омическим переходом между управляющим электродом и базой (рис. 3, а), уровень инжекции через прилегающий к этой базе эмиттерный переход можно увеличить путем подачи положительного по отношению к катоду напряжения на управляющий электрод. Поэтому триодный тиристор можно переключить из закрытого состояния в открытое в необходимый момент времени даже при небольшом анодном напряжении (рис. 3, в).

Переключение триодного тиристора с помощью подачи прямого напряжения на управляющий электрод или тока через этот электрод можно представить с другой точки зрения как перевод транзисторной n-p-n-структуры в режим насыщения при большом токе базы. При этом коллекторный переход транзисторной структуры (он же и коллекторный переход тиристора) смещается в прямом направлении.

Баланс токов в триодном тиристоре можно записать по аналогии, но с учетом того, что через левый эмиттерный переход проходит сумма токов основного и управляющего:

$$I_a = \bar{\alpha}_1(I_a + I_y) + \bar{\alpha}_2 I_a + I_{КБО}$$

или

$$I_a(1 - \bar{\alpha}_1 - \bar{\alpha}_2) = I_{КБО} + \bar{\alpha}_1 I_y$$

Таким образом, уравнение ВАХ триодного тиристора в закрытом состоянии:

$$I_a = \frac{I_{КБО}}{1 - \alpha_1 - \alpha_2} + \frac{\alpha_1}{1 - \alpha_1 - \alpha_2} I_y,$$

где $\alpha_1 + \alpha_2 < 1$, а анодный ток I_a зависит от управляющего тока I_y .

Условие переключения триодного тиристора из закрытого состояния в открытое можно получить аналогично условию переключения диодного тиристора, т. е. после дифференцирования и преобразований получим

$$\alpha_1 + \alpha_2 + I_y \frac{\partial \alpha_1}{\partial I_a} = 1.$$

В условии переключения триодного тиристора дифференциальный коэффициент передачи тока эмиттера одномерной теоретической модели первой транзисторной структуры α_1 зависит от напряжения на коллекторном переходе, а также от основного и управляющего токов. Аналогичный коэффициент второй транзисторной структуры α_2 зависит только от напряжения на коллекторе и от основного тока.

Напряжение включения триодного тиристора зависит от управляющего тока. Формула может быть справедлива при меньших напряжениях на аноде тиристора, если через управляющий электрод будут проходить большие значения управляющего тока в прямом направлении. Кроме того, можно сделать вывод о целесообразности осуществления управляющего вывода от тонкой базы триодного тиристора, так как управлять коэффициентом передачи тока эмиттера транзисторной структуры с тонкой базой значительно легче, чем с толстой базой.

В открытом состоянии через тиристор проходит большой анодный ток, поэтому управляющий ток практически не оказывает влияния на участок ВАХ, соответствующий открытому состоянию триодного тиристора.

Управляющий электрод может быть сделан не только с омическим переходом между электродом и базовой областью, но и с дополнительным p-n-переходом (рис. 3, б). При определенной полярности напряжения на управляющем электроде относительно катода дополнительный переход окажется смещенным в прямом направлении, через него будет

происходить инжекция неосновных носителей заряда (для прилегающей базы) с последующим накоплением в другой базовой области. Такой процесс может привести к переключению триодного тиристора в открытое состояние.

Тиристор, у которого управляющий электрод соединен с n-областью, ближайшей к катоду, и который переводится в открытое состояние при подаче на управляющий электрод отрицательного по отношению к катоду сигнала, называют тиристором с инжектирующим управляющим электродом n-типа.

Триодный тиристор, структура которого представлена на рис. 3, б, можно рассматривать также как два диодных тиристора, имеющих общие анод, одну эмиттерную и обе базовые области. Структура основного тиристора выполнена с зашунтированным эмиттерным переходом. Поэтому напряжение включения основного тиристора больше, чем управляющего. При подаче отрицательного потенциала на управляющий электрод, т. е. на катод управляющего тиристора, можно переключить его из закрытого состояния в открытое. А так как обе структуры имеют общие области, то при переключении управляющего тиристора основной тиристор также окажется в открытом состоянии.

2.10 Практическое занятие №10 (2 часа).

Тема: «Симметричные тиристоры»

2.10.1 Задание для работы: ознакомиться с устройством и принципом работы симметричного тиристора

2.10.2 Краткое описание проводимого занятия:

Симметричный диодный тиристор (диак) — это диодный тиристор, способный переключаться как в прямом, так и в обратном направлениях.

Симметричный триодный тиристор (триак) — это триодный тиристор, который при подаче сигнала на его управляющий электрод включается как в прямом, так и в обратном направлениях.

Структура симметричного диодного тиристора состоит из пяти областей с чередующимся типом электропроводности которые образуют четыре p-n-перехода (рис. 1, а). Крайние переходы зашунтированы объемными сопротивлениями прилегающих областей с электропроводностью p-типа.

Если на такой тиристор подать напряжение положительным потенциалом на область n_1 и отрицательным потенциалом на область n_3 , то p-n-переход окажется смещенным в обратном направлении и ток, проходящий через него, будет пренебрежимо мал. Весь ток через тиристор при такой полярности приложенного напряжения будет проходить по шунтирующему сопротивлению области p_1 . Четвертый p-n-переход будет смещен в прямом направлении, и через него будет происходить инжекция электронов. При выбранной полярности внешнего напряжения рабочая часть тиристора представляет собой структуру p-n-p-n, в которой могут происходить те же процессы, что и в обычном диодном тиристоре, приводящие к переключению его из закрытого состояния в открытое и обратно.

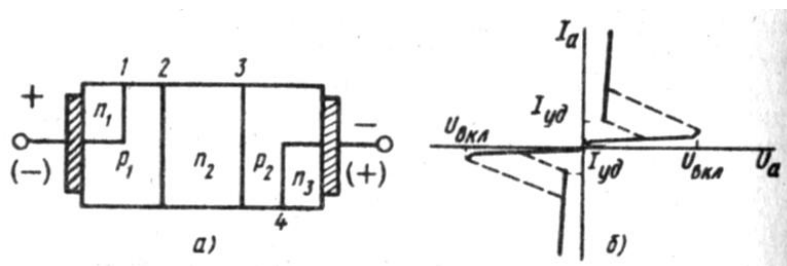


Рис. 1 – Структура симметричного тиристора (а) и его ВАХ (б)

При перемене полярности внешнего напряжения четвертый р-п-переход окажется смещенным в обратном направлении и, обладая поэтому большим сопротивлением, будет зашунтирован относительно малым сопротивлением области p_2 . Следовательно, при такой полярности внешнего напряжения рабочая часть тиристора представляет собой структуру n - p - n - p , способную переключаться из закрытого состояния в открытое и обратно.

Таким образом, симметричный диодный тиристор можно представить в виде двух диодных тиристоров, включенных встречно и шунтирующих друг друга при разных полярностях приложенного напряжения. Вольт-амперная характеристика такого тиристора получается одинаковой при разных полярностях приложенного напряжения (рис. 1, б).

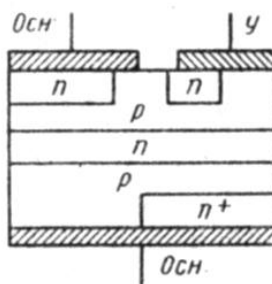


Рис. 2 - Структура симметричного тиристора переключаемого из закрытого состояния в открытое током управляющего электрода любого направления

Симметричные триодные тиристоры могут иметь структуру, способную переключаться из закрытого в открытое состояние либо при токе управляющего электрода определенного направления, либо при токе управляющего электрода любого направления (рис. 2). В последнем случае не только основные электроды должны обеспечить шунтирование прилегающих к ним крайних p - n -переходов, но и управляющий электрод должен иметь омический переход как с p -областью, так и с дополнительной n -областью. При этих условиях подача различных по знаку потенциалов на управляющий электрод по отношению к расположенному вблизи основному электроду будет либо изменять потенциал p -области, либо обеспечивать инжекцию электронов из дополнительной n -области.

2.11 Практическое занятие №11 (2 часа).

Тема: «Способы управления тиристорами»

2.11.1 Задание для работы: рассмотреть варианты и способы управления тиристорами

2.11.2 Краткое описание проводимого занятия:

Включение тиристора

Включение тиристора путем медленного увеличения напряжения между основными электродами до напряжения включения $U_{вкл}$. Включение тиристора — это его переключение из закрытого состояния в открытое. Медленное увеличение напряжения между основными электродами тиристора до напряжения включения предполагалось при рассмотрении физических причин и условий включения различных диодных тиристоров в предыдущих параграфах. Таким способом можно, конечно, включить и триодный тиристор.

Включение тиристора с помощью тока управления. Увеличение тока через один из эмиттерных переходов из-за подачи соответствующего напряжения на управляющий электрод приводит к накоплению неравновесных носителей заряда в базовых областях

тиристора и к включению его при напряжении между основными, электродами, значительно меньшем, чем напряжение включения при разомкнутой цепи управляющего электрода. Процесс накопления неравновесных носителей заряда в базовых областях происходит не мгновенно, поэтому для включения тиристора необходимо, чтобы Импульс управляющего тока имел определенную длительность и амплитуду.

Время включения по управляющему электроду тиристора $t_{y\text{ вкл}}$ — это интервал времени между моментом в начале отпирающего импульса управляющего электрода, соответствующим 0,1 его амплитуды, и моментом, когда основное напряжение падает до 0,1 значения разности напряжений в закрытом и открытом состояниях тиристора или когда основной ток увеличится до 0,9 значения тока в открытом состоянии (рис. 1).

Время включения по управляющему электроду тиристора можно представить в виде суммы времени задержки по управляющему электроду и времени нарастания для тиристора.

Время задержки по управляющему электроду тиристора $t_{y\text{ зд}}$ — это интервал времени между моментом в начале отпирающего импульса управляющего электрода, соответствующим 0,1 его амплитуды, и моментом, когда основное напряжение падает до 0,9 значения разности напряжений в закрытом и открытом состояниях тиристора или когда основной ток увеличивается до 0,1 его значения в открытом состоянии. Время нарастания для тиристора $t_{нр}$ — это интервал времени, в течение которого основной ток увеличивается от 0,1 до 0,9 значения тока в открытом состоянии или основное напряжение падает от 0,9 до 0,1 значения разности напряжений в закрытом и открытом состояниях тиристора (рис. 1).

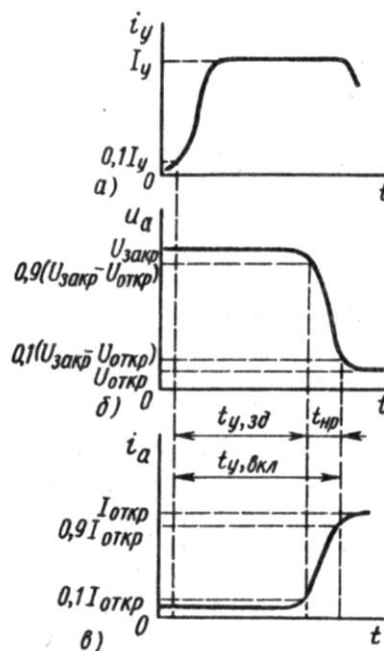


Рис. 1 Временные зависимости тока управляющего электрода (а), основного напряжения на тиристоре (б) и основного тока через тиристор (в), характеризующие процесс его включения

Несмотря на условность определения всех перечисленных параметров переходного процесса включения тиристора, можно считать, что время задержки по управляющему электроду тиристора определяется временем перезаряда барьерной емкости эмиттерного перехода, а также временем прохождения инжектированных носителей заряда через базовую область и коллекторный переход. Время нарастания для тиристора определяется

инерционностью процесса накопления неравновесных носителей заряда в базовых областях и инерционностью перезаряда барьерной емкости коллекторного перехода.

Интервал времени, определяемый временем нарастания для тиристора, изменением основного тока, проходящего через тиристор, и напряжения между основными электродами, соответствует переходному участку ВАХ. Для него сумма дифференциальных коэффициентов передачи тока эмиттера транзисторных структур, составляющих тиристор, должна быть равна единице. Обычно тиристор включен в цепь, имеющую сопротивление, меньшее абсолютного значения отрицательного дифференциального сопротивления тиристора на переходном участке его ВАХ. Поэтому в период времени нарастания при тех же напряжениях токи, проходящие через тиристор в реальной схеме, превышают значения токов переходного участка ВАХ тиристора. При этом суммарный дифференциальный коэффициент передачи тока тиристорной структуры превышает единицу, что соответствует активному этапу включения тиристора. Если в это время отключить управляющий электрод, то тиристор «самостоятельно» перейдет в открытое состояние. Значит, длительность импульса тока управляющего электрода, необходимая для включения тиристора, должна быть больше времени задержки.

Завершением процесса включения тиристора считают момент изменения полярности напряжения на коллекторном переходе.

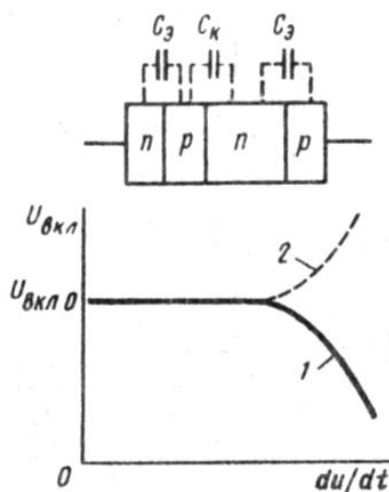


Рис. 2 Зависимости напряжения включения тиристора от скорости увеличения подаваемого на него напряжения с учетом только барьерной емкости коллекторного перехода (кривая 1) и только барьерных емкостей эмиттерных переходов (кривая 2)

Необходимо отметить, что во время переходных процессов через тиристор проходят большие токи при больших напряжениях на нем, что приводит к большим значениям выделяющейся в тиристоре так называемой мощности коммутационных потерь. Средняя мощность коммутационных потерь может привести к недопустимому перегреву тиристора при большой частоте переключения.

Включение тиристора путем быстрого увеличения напряжения между основными электродами. При быстром нарастании основного напряжения на тиристоре через него будет проходить емкостный ток, обусловленный наличием барьерных емкостей коллекторного и эмиттерных переходов.

Рассмотрим сначала влияние барьерной емкости коллекторного перехода. Емкостный ток через коллекторный переход $i_c = C_K(du/dt)$. Чем больше скорость изменения основного напряжения на тиристоре, тем больше значение емкостного тока через коллекторный переход. Этот ток, проходя через эмиттерные переходы, вызывает увеличение коэффициентов передачи токов эмиттера транзисторных структур, что

приводит к включению тиристора при основном напряжении, меньшем напряжении включения на постоянном токе $U_{\text{вкл}0}$ (рис. 2).

Барьерные емкости эмиттерных переходов являются причиной появления емкостных токов через эти переходы при быстром изменении основного напряжения на тиристоре. Емкостные токи не связаны с инжекцией носителей заряда, поэтому с увеличением скорости изменения основного напряжения включение тиристора должно происходить при напряжениях, больших $U_{\text{вкл}0}$ (рис. 2), если учитывать только барьерные емкости эмиттерных переходов.

Практически барьерная емкость коллекторного перехода сказывается сильнее, так как она шунтирует большое активное сопротивление коллекторного перехода, смещенного в обратном направлении при закрытом состоянии тиристора. Барьерные емкости эмиттерных переходов сами оказываются зашунтированными малыми активными сопротивлениями эмиттерных переходов, смещенных при закрытом состоянии тиристора в прямом направлении. Поэтому напряжение включения тиристора с увеличением скорости нарастания основного напряжения уменьшается.

Однако эффект включения тиристорov при большой скорости нарастания основного напряжения часто оказывается не положительным, а отрицательным свойством, так как может приводить к самопроизвольному включению тиристора, например при подключении источника питания. Эффективным способом ослабления этого эффекта является шунтирование эмиттерного перехода.

Кроме рассмотренных трех основных способов включения тиристорov можно еще отметить возможность включения тиристора путем освещения кристалла с тиристорной структурой.

Выключение тиристорov

Выключение тиристора путем уменьшения тока в цепи основных электродов до значения, меньшего удерживающего тока, или путем разрыва цепи основных электродов. Тиристор будет выключен, т. е. переведен из открытого состояния в закрытое, только после рассасывания неравновесных носителей заряда в базовых областях. Если до окончания процесса выключения вновь подать напряжение между основными электродами тиристора, то он окажется во включенном состоянии. Таким образом, для выключения тиристора необходимо некоторое время.

При выключении тиристора путем разрыва цепи основных электродов рассасывание неравновесных носителей заряда происходит только в результате рекомбинации. Такой способ выключения применяется, когда время выключения тиристора не влияет на работу той или иной схемы.

Выключение тиристора путем изменения полярности анодного напряжения. Для ускорения процесса рассасывания неравновесных носителей заряда, накопленных в базовых областях при прохождении прямого тока через открытый тиристор, необходимо понизить потенциальный барьер коллекторного перехода. Однако коллекторный переход при открытом состоянии тиристора уже был смещен в прямом направлении из-за накопленных неравновесных носителей заряда в базовых областях и, следовательно, имел малое сопротивление. Поэтому на долю коллекторного перехода при переключении тиристора на обратное напряжение приходится очень малая часть всего внешнего напряжения. Из-за малого сопротивления тиристора, находящегося еще в открытом состоянии, обратный ток на первом этапе процесса выключения ограничен сопротивлением внешней цепи.

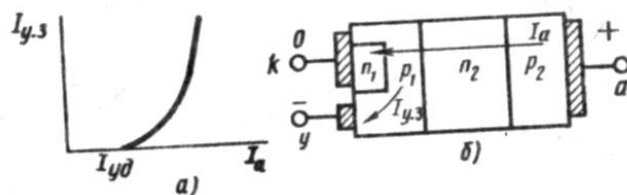


Рис. 3 Зависимость тока управления, необходимого для выключения (для запираения) тиристора, от основного тока (а) и структура триодного тиристора с направлениями токов при его выключении (б)

Существенное уменьшение времени выключения даже при небольших обратных напряжениях удается получить для тиристорov, проводящих в обратном направлении. У этих тиристорov оба эмиттерные перехода зашунтированы объемными сопротивлениями прилегающих базовых областей. Поэтому даже небольшое обратное напряжение способствует быстрому рассасыванию накопленных в базовых областях неравновесных носителей заряда.

Выключение тиристора с помощью тока управляющего электрода. Для выключения тиристора необходимо отвести неравновесные основные носители заряда из базы, у которой имеется управляющий электрод. В то же время основной ток, проходящий через еще открытый тиристор, непрерывно восполняет количество неравновесных носителей заряда в базовых областях. Таким образом, значение тока управления, необходимого для выключения тиристора, зависит от основного тока через тиристор (рис. 3, а).

Некоторые тиристоры с большой площадью р-п-переходов невозможно выключить с помощью тока управляющего электрода при больших токах между основными электродами. Объясняется это тем, что при движении носителей заряда к управляющему электроду (дырок в тиристоре, структура которого показана на рис. 3,б) база тиристора под эмиттерным переходом становится неэквипотенциальной и дальние от управляющего электрода части эмиттерного перехода остаются смещенными в прямом направлении. Инжекция электронов из этих частей эмиттерного перехода поддерживает соответствующую часть тиристорной структуры в открытом состоянии. Стремление же еще больше увеличить ток управляющего электрода путем увеличения напряжения на этом электроде может привести к лавинному пробоему эмиттерного перехода (в нижней его части по рис. 3), так как этот переход имеет обычно малое пробивное напряжение из-за большой концентрации примесей с обеих сторон перехода.

Таким образом, существуют тиристоры, запираемые и незапираемые по управляющему электроду. Запираемый тиристор — это тиристор, который может переключаться из закрытого состояния в открытое, и наоборот при подаче на управляющий электрод сигналов соответствующей полярности. Но и для запираемого тиристора существует максимально допустимый постоянный запираемый ток $I_{з\text{ max}}$ — наибольшее значение основного тока, до которого допускается запираение тиристора по управляющему электроду. При использовании в мощных устройствах запираемые тиристоры обладают преимуществами перед транзисторами, поскольку тиристоры способны выдерживать значительно большие напряжения в закрытом состоянии.

2.12 Практическое занятие №12 (2 часа).

Тема: «Расчет выходных статических характеристик полевого транзистора»

2.12.1 Задание для работы: рассчитать выходные статические характеристики полевого транзистора

2.12.2 Краткое описание проводимого занятия:

Пренебрегая объемными сопротивлениями кристалла полупроводника на участках между концами канала и контактами истока и стока, рабочую часть полевого транзистора можно представить в упрощенном виде (рис. 1). Плотность тока в канале

$$J = \gamma E = -\gamma \frac{d\varphi}{dx}$$

где γ — удельная проводимость канала.

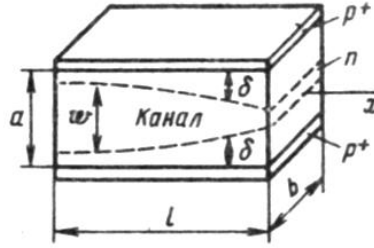


Рис. 1 – Структура рабочей части полевого транзистора с управляющим p-n-переходами

В первом приближении будем считать удельную проводимость материала канала не зависящей от напряженности электрического поля, т. е. не будем учитывать изменение подвижности. Плотность тока в канале изменяется по его длине в связи с изменением сечения канала и соответствующим изменением напряженности. Ток в канале транзистора, неизменный по всему каналу,

$$I_C = -\gamma b w \frac{d\varphi}{dx},$$

где b — ширина канала.

Толщина канала w зависит от толщины p-n-переходов:

$$w = a - 2\delta$$

Толщина p-n-перехода зависит от напряжения на нем. Для толщины резкого p-n-перехода можно пренебречь контактной разностью потенциала на p-n-переходе по сравнению с относительно большим обратным напряжением, поданным на затвор полевого транзистора. Однако необходимо учесть неэквипотенциальность канала, возникающую из-за прохождения тока по каналу от истока к стоку. Тогда

$$\delta = \sqrt{\frac{2\epsilon\epsilon_0}{qN}(\varphi - U_{3и})}$$

Для более компактной записи найдем напряжение отсечки $U_{3иотс}$. Из определения напряжения отсечки следует, что толщина канала около стока при этом напряжении равна нулю, а толщина p-n-перехода

$$\delta = \frac{a}{2} = \sqrt{\frac{2\epsilon\epsilon_0}{qN} U_{3иотс}^{1/2}}$$

Используя (6.4), (6.5) и (6.6), получим

$$w = a \left(1 - \sqrt{\frac{\varphi + U_{3и}}{U_{3иотс}}} \right).$$

После подстановки абсолютное значение тока стока

$$|I_C| = \gamma b a \left(1 - \sqrt{\frac{\varphi + U_{3и}}{U_{3иотс}}} \right) \frac{d\varphi}{dx}.$$

Решая это дифференциальное уравнение с разделяющимися переменными при граничных условиях:

$$1) \ x=0, \ \varphi=0 \quad \text{и} \quad 2) \ x=l, \ \varphi=U_{си},$$

получим искомую функцию

$$I_C = \frac{1}{R_{сиотс}} \left[U_{си} + \frac{2}{3} \frac{U_{3и}^{3/2} - (U_{си} + U_{3и})^{3/2}}{U_{3иотс}^{1/2}} \right]$$

где $R_{сиотс} = l/(\gamma ab)$ — сопротивление сток-исток в открытом состоянии, т. е. при $U_{3и}=0$ при малом напряжении на стоке (меньшем напряжения насыщения).

Как отмечалось, перекрытие канала происходит при напряжении отсечки $U_{\text{зиотс}}$. Режим насыщения наступит при условии

$$U_{\text{зи}} + U_{\text{си}} = U_{\text{зиотс}},$$

т. е. при напряжении на стоке

$$U_{\text{синас}} = U_{\text{зиотс}} - U_{\text{зи}}$$

Если в выражении заменить напряжение на затворе $U_{\text{зи}}$ напряжением на стоке, при котором происходит насыщение, и напряжением отсечки $U_{\text{зиотс}}$, то получим связь между током и напряжением насыщения:

$$I_{\text{снас}} = \frac{1}{R_{\text{сиотк}}} \left[U_{\text{синас}} + \frac{2}{3} (U_{\text{зиотс}} - U_{\text{синас}}) \times \right. \\ \left. \times \sqrt{\frac{U_{\text{зиотс}} - U_{\text{синас}}}{U_{\text{зиотс}}}} - \frac{2}{3} U_{\text{зиотс}} \right].$$

Важно знать также зависимость тока насыщения от напряжения на затворе полевого транзистора, т. е. характеристику передачи. Эту зависимость можно найти, из условия насыщения напряжения на стоке $U_{\text{синас}}$:

$$I_{\text{снас}} = \frac{1}{R_{\text{сиотк}}} \left[\frac{1}{3} U_{\text{зиотс}} - U_{\text{зи}} \left(1 - \frac{2}{3} \sqrt{\frac{U_{\text{зи}}}{U_{\text{зиотс}}}} \right) \right]$$

Поскольку пологий участок выходных статических характеристик полевых транзисторов является, как и в вакуумных пентодах, основным рабочим участком, определим крутизну характеристики S именно в этой области.

$$S = \left| \frac{dI_{\text{снас}}}{dU_{\text{зи}}} \right| = \frac{1}{R_{\text{сиотк}}} \left(1 - \sqrt{\frac{U_{\text{зи}}}{U_{\text{зиотс}}}} \right)$$

Из выражения следует, что для получения больших значений этого параметра необходимо иметь меньшее значение сопротивления сток—исток в открытом состоянии транзистора $R_{\text{сиотк}}$ или большую удельную проводимость исходного материала. В то же время концентрация примесей и соответственно I носителей заряда в канале должна быть небольшой, чтобы при I увеличении напряжения на р-п-переходе он расширялся в сторону канала. Таким образом, для получения больших значений крутизны характеристики желательно при изготовлении полевого транзистора выбирать материал с большей подвижностью носителей заряда.

Значение крутизны характеристики полевого транзистора в значительной мере определяется отношением ширины канала b к его длине l . Увеличение отношения b/l позволяет повысить крутизну характеристики S и ток насыщения полевого транзистора.

Согласно выражению, для повышения крутизны характеристики S необходимо увеличивать толщину канала a . Однако с увеличением толщины канала недопустимо растет напряжение отсечки и напряжение насыщения, соответствующее входу полевого транзистора в режим насыщения. Так как режим насыщения является основным рабочим режимом полевого транзистора, напряжение отсечки должно быть малым. Поэтому толщину канала стараются сделать небольшой, несмотря на некоторое I уменьшение крутизны характеристики.

2.13 Практическое занятие №13 (2 часа).

Тема: «Эквивалентные схемы полевого транзистора»

2.13.1 Задание для работы: рассмотреть основные эквивалентные схемы полевого транзистора

2.13.2 Краткое описание проводимого занятия:

Исходя из принципа действия и структуры полевого транзистора, можно составить его эквивалентную схему для низких частот.

Сопротивления r_c и r_n представляют собой объемные сопротивления кристалла полупроводника на участках между концами канала и контактами стока и истока соответственно. Эти сопротивления зависят от конструкции транзистора и технологии его изготовления. На низких частотах влиянием сопротивления r_c можно пренебречь по сравнению с обычно большим сопротивлением нагрузки в цепи стока и большим дифференциальным сопротивлением канала r_1 . Общее для входной и выходной цепей сопротивление r_n является сопротивлением внутренней обратной связи в полевом транзисторе, включенном по схеме с общим истоком. Падение напряжения на этом сопротивлении при прохождении тока стока оказывается обратным для р-п-перехода. В свою очередь, увеличение обратного напряжения на р-п-переходе затвора транзистора приводит к уменьшению тока стока.

Емкости $C_{зи}$ и $C_{зс}$, сопротивления $r_{зи}$ и $r_{зс}$ замещают в этой эквивалентной схеме р-п-переход с его барьерной емкостью и большим активным дифференциальным сопротивлением при обратном смещении.

Генератор тока, включенный параллельно сопротивлению канала, отражает усилительные свойства транзистора. Ток этого генератора пропорционален входному напряжению $U_{зи}$; коэффициентом пропорциональности является крутизна характеристики S .

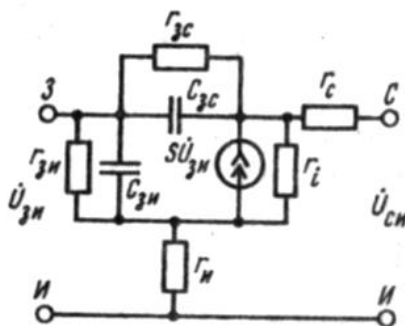


Рис. 1 – Физическая эквивалентная схема полевого транзистора

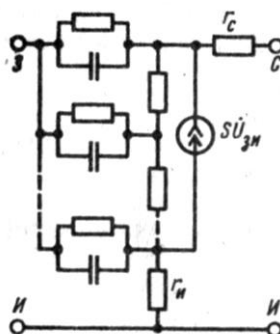


Рис. 2 – Физическая эквивалентная схема с распределенными параметрами полевого транзистора

Нужно учитывать, что емкость и сопротивление затвора распределены по всей его площади и что сопротивление канала также является распределенным. В этом случае эквивалентная схема полевого транзистора должна быть представлена в виде схемы с распределенными параметрами (рис. 6.6). Однако такая схема значительно сложнее для выяснения свойств и характеристик полевых транзисторов.

Кроме физических эквивалентных схем полевого транзистора можно представить и формальные эквивалентные схемы с y -, z - или h -параметрами. Так как входные и выходные сопротивления полевых транзисторов велики, то удобнее измерять и задавать комплексные параметры проводимостей его формальной эквивалентной схемы (рис. 1). Токи и напряжения на выводах полевого транзистора в режиме малого сигнала для схемы

с общим истоком соответствуют следующим характеристическим уравнениям четырехполюсника:

$$\left. \begin{aligned} I_z &= y_{11n} \dot{U}_{zn} + y_{12n} \dot{U}_{cn} ; \\ I_c &= y_{21n} \dot{U}_{zn} + y_{22n} \dot{U}_{cn} . \end{aligned} \right\}$$

Определяются у-параметры при режимах короткого замыкания по переменному току на выходе и входе транзистора:

$$\left. \begin{aligned} y_{11n} &= \frac{I_z}{\dot{U}_{zn}} \Big|_{\dot{U}_{cn}=0} ; y_{12n} = \frac{I_z}{\dot{U}_{cn}} \Big|_{\dot{U}_{zn}=0} ; \\ y_{21n} &= \frac{I_c}{\dot{U}_{zn}} \Big|_{\dot{U}_{cn}=0} ; y_{22n} = \frac{I_c}{\dot{U}_{cn}} \Big|_{\dot{U}_{zn}=0} . \end{aligned} \right\}$$

Если эти режимы воспроизвести на эквивалентной схеме рис. 1, то можно найти формулы перехода от параметров сосредоточенных элементов физической эквивалентной схемы к у-параметрам. Пренебрегая малыми проводимостями р-п-перехода затвора и объемными сопротивлениями полупроводника около истока и стока, получим

$$\left. \begin{aligned} y_{11n} &= j\omega(C_{зс} + C_{zn}) ; y_{12n} = -j\omega C_{зс} ; \\ y_{21n} &= S - j\omega C_{zn} ; y_{22n} = \frac{1}{r_i} + j\omega C_{зс} . \end{aligned} \right\}$$

Все эти параметры зависят от значений постоянных смещений на электродах полевого транзистора.

2.14 Практическое занятие №14 (2 часа).

Тема: «Полевые транзисторы с изолированным затвором»

2.14.1 Задание для работы: рассмотреть основные принципы устройства и работы полевых транзисторов с изолированным затвором

2.14.2 Краткое описание проводимого занятия:

Полевой транзистор с изолированным затвором — это полевой транзистор, имеющий один или несколько затворов, электрически изолированных от проводящего канала.

Структуры полевых транзисторов с изолированным затвором показаны на рис. 1. В кристалле полупроводника с относительно высоким удельным сопротивлением, который называют подложкой, созданы две сильнолегированные области с противоположным типом электропроводности. На эти области нанесены металлические электроды — исток и сток. Расстояние между сильнолегированными областями истока и стока может составлять всего несколько микрометров. Поверхность кристалла полупроводника между истоком и стоком покрыта тонким (порядка 0,1 мкм) слоем диэлектрика. На слой диэлектрика нанесен металлический электрод — затвор. Получается структура, состоящая из слоя металла, диэлектрика и полупроводника, т. е. МДП-структура.

Полевой транзистор с изолированным затвором, в котором в качестве изоляционного слоя между металлическим затвором и проводящим каналом использован диэлектрик, называют полевым транзистором типа металл—диэлектрик—полупроводник или МДП-транзистором.

Выпрямляющие электрические переходы под истоком и стоком могут быть выполнены не только в виде р-п-переходов, но и в виде выпрямляющих переходов Шотки, т. е. путем нанесения металлических электродов истока и стока непосредственно на подложку. Использование выпрямляющих переходов Шотки под истоком и стоком может обеспечить ряд преимуществ в технологии изготовления таких транзисторов, а также улучшить их характеристики. Так, переходы Шотки имеют сравнительно малую толщину, что облегчает создание полевых транзисторов с очень коротким проводящим каналом. Формирование переходов Шотки происходит при относительно низкой температуре, а

исключение высокотемпературных операций способствует повышению качества диэлектрического слоя, а также минимизации размеров транзисторной структуры. Кроме того, МДП-транзисторы с переходами Шотки под стоком и стоком могут быть изготовлены на полупроводниках, в которых не удастся получить достаточно качественных р-п-переходов.

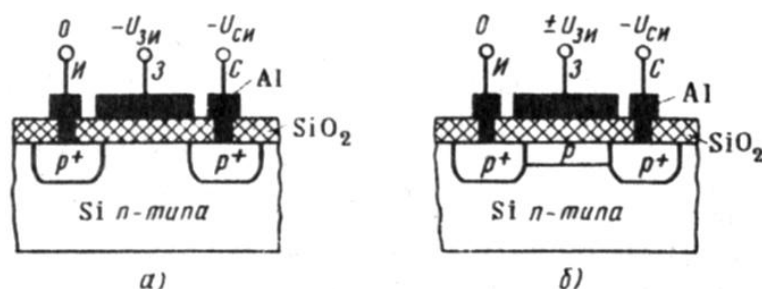


Рис. 1 – Структуры полевых транзисторов с изолированным затвором (с р-каналом)

Пока исходным полупроводником для полевых транзисторов с изолированным затвором в основном является кремний. Поэтому в качестве диэлектрика под затвором используется обычно слой диоксида кремния SiO_2 , выращенный на поверхности кристалла кремния путем высокотемпературного окисления.

Полевой транзистор с изолированным затвором, в котором в качестве изоляционного слоя между каждым металлическим затвором и проводящим каналом использован оксид полупроводника, называют полевым транзистором типа металл—оксид—полупроводник или МОП-транзистором.

Однако для этих транзисторов чаще используют более общий термин — МДП-транзисторы.

Существуют две разновидности МДП-транзисторов: с индуцированным каналом и со встроенным каналом.

В МДП-транзисторах с индуцированным каналом (рис. 1, а) проводящий канал между сильнолегированными областями истока и стока и, следовательно, заметный ток стока появляются только при определенной полярности и при определенном значении напряжения на затворе относительно истока, которое называют пороговым напряжением ($U_{зи\text{ пор}}$).

В МДП-транзисторах со встроенным каналом (рис. 1, б) у поверхности полупроводника под затвором при нулевом напряжении на затворе относительно истока существует инверсный слой — канал, который соединяет исток со стоком.

Изображенные на рис. 1 структуры полевых транзисторов с изолированным затвором имеют подложку с электропроводностью n-типа. Поэтому сильнолегированные области под истоком и стоком, а также индуцированный и встроенный канал имеют электропроводность р-типа. Если же аналогичные транзисторы созданы на подложке с электропроводностью р-типа, то канал у них будет иметь электропроводность n-типа.

МДП-транзисторы с индуцированным каналом

Принцип действия. При напряжении на затворе относительно истока, равном нулю, и при наличии напряжения на стоке ток стока оказывается ничтожно малым. Он представляет собой обратный ток р-п-перехода между подложкой и сильнолегированной областью стока. При отрицательном потенциале на затворе (для структуры, показанной на рис. 1, а) в результате проникновения электрического поля через диэлектрический слой в полупроводник при малых напряжениях на затворе (меньших $U_{зи\text{ пор}}$) у поверхности полупроводника под затвором возникают обедненный основными носителями заряда слой и область объемного заряда, состоящая из ионизированных некомпенсированных примесных атомов. При напряжениях на затворе, больших порогового $U_{зи\text{ пор}}$, у поверхности полупроводника под затвором возникает инверсный слой, который и является проводящим каналом между истоком и стоком. С изменением напряжения на

затворе изменяется концентрация носителей заряда в проводящем канале, а также толщина или поперечное сечение проводящего канала, т. е. происходит модуляция сопротивления проводящего канала. Основной причиной модуляции сопротивления проводящего канала в МДП-транзисторах с индуцированным каналом является изменение концентрации носителей заряда в проводящем канале; в полевых транзисторах с управляющим переходом — изменение толщины или поперечного сечения канала.

При изменении сопротивления проводящего канала изменяется и ток стока (схема включения МДП-транзистора аналогична схеме включения полевого транзистора с управляющим переходом, показанной на рис 1, в, где полярности источников питания зависят от типа электропроводности проводящего канала). Так происходит управление током стока в МДП-транзисторе с индуцированным каналом.

В связи с тем, что затвор отделен от подложки диэлектрическим слоем, ток в цепи затвора ничтожно мал, мала и мощность, потребляемая от источника сигнала в цепи затвора и необходимая для управления относительно большим током стока. Таким образом, МДП-транзистор с индуцированным каналом может производить усиление электрических сигналов по напряжению и по мощности.

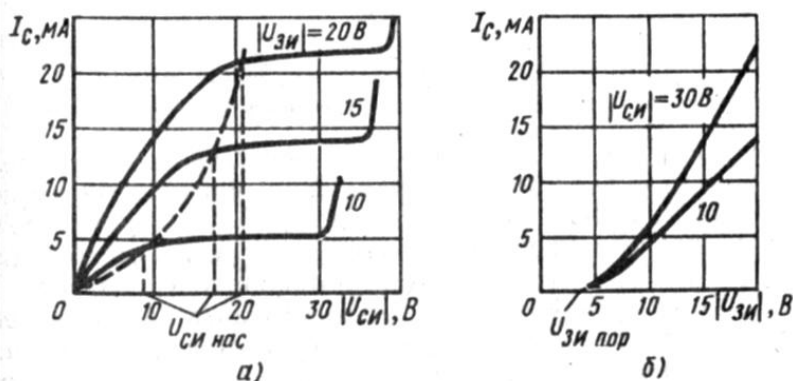


Рис. 2 – Выходные статические характеристики (а) и статические характеристики передачи (б) МДП-транзистора с индуцированным каналом

Принцип усиления мощности в МДП-транзисторах можно рассматривать с точки зрения передачи носителями заряда энергии постоянного электрического поля (энергии источника питания в выходной цепи) переменному электрическому полю. Этот общий для различных приборов принцип усиления мощности был рассмотрен для объяснения усиления по мощности биполярных транзисторов. В МДП-транзисторе до возникновения канала почти все напряжение источника питания в цепи стока падало на полупроводнике между истоком и стоком, создавая относительно большую постоянную составляющую напряженности электрического поля. Под действием напряжения на затворе в полупроводнике под затвором возникает канал, по которому от истока к стоку движутся носители заряда — дырки. Дырки, двигаясь по направлению постоянной составляющей электрического поля, разгоняются этим полем, и их энергия увеличивается за счет энергии источника питания в цепи стока. Одновременно с возникновением канала и появлением в нем подвижных носителей заряда уменьшается напряжение на стоке, т. е. мгновенное значение переменной составляющей электрического поля в канале направлено противоположно постоянной составляющей. Поэтому дырки тормозятся переменным электрическим полем, отдавая ему часть своей энергии.

Выходные статические характеристики. Характер зависимостей $I_c = f(U_{си})$ при $U_{зи} = \text{const}$ для МДП-транзистора с индуцированным каналом аналогичен характеру таких же зависимостей для полевого транзистора с управляющим переходом. Сублинейность крутых частей характеристик (рис. 2, а) объясняется уменьшением толщины канала около стока при увеличении напряжения на стоке и неизменном напряжении на затворе, так как на сток и на затвор подаются потенциалы одного знака относительно истока.

Следовательно, разность потенциалов между стоком и затвором или между затвором и прилегающей к стоку частью канала уменьшается. Другими словами, из-за прохождения по каналу тока стока получается неэквипотенциальность канала по его длине. Поэтому при увеличении тока стока происходит уменьшение поперечного сечения канала около стока.

При напряжении насыщения $U_{СИ\text{ нас}}$ происходит перекрытие канала около стока и дальнейшее увеличение напряжения на стоке вызывает очень малое увеличение тока стока. Распределение напряженности электрического поля у поверхности полупроводника при напряжении на стоке, превышающем напряжение насыщения, т. е. для пологой части выходных статических характеристик, показано на рис. 3. На расстоянии l_1 от сильнолегированной области истока преобладает нормальная составляющая напряженности электрического поля, созданная напряжением на затворе. На этом участке существует инверсный слой у поверхности полупроводника. На расстоянии l_2 от сильнолегированной области стока преобладает касательная составляющая электрического поля, созданная напряжением на стоке относительно истока. Несмотря на то, что на участке канала протяженностью l_2 нормальная составляющая напряженности имеет другое направление и отталкивает дырки от поверхности полупроводника, через этот перекрытый участок канала идет ток, связанный с движением дырок под действием сильного тянущего поля (касательной составляющей).

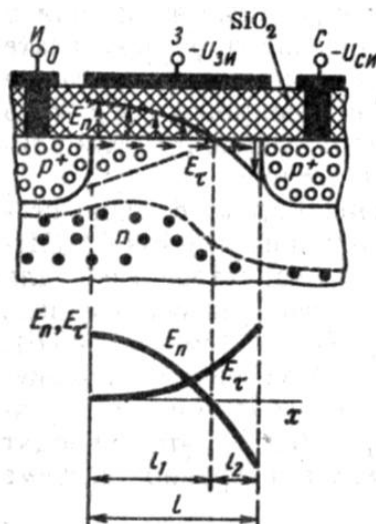


Рис. 3 Распределение напряженности электрического поля у поверхности полупроводника под затвором при напряжении на стоке, превышающем напряжение насыщения

Сублинейный характер зависимостей $I_c=f(U_{СИ})$ вызван также эффектом насыщения дрейфовой скорости носителей заряда или уменьшением их подвижности в сильных полях, как и в полевых транзисторах с управляющим р-п-переходом.

При увеличении напряжения на затворе (по абсолютному значению) выходные статические характеристики смещаются в область больших токов стока (см. рис. 6.9, а), что легко понять на основе принципа действия МДП-транзистора с индуцированным каналом.

При больших напряжениях на стоке может произойти пробой МДП-транзистора, при этом может быть два вида пробоя: пробой р-п-перехода под стоком и пробой диэлектрика под затвором.

Пробой р-п-перехода обычно имеет лавинный характер, так как МДП-транзисторы изготавливают обычно на кремнии. При этом на пробивное напряжение $U_{СИ\text{ проб}}$ может влиять напряжение на затворе: так как на сток и на затвор МДП-транзистора с

индуцированным каналом подаются потенциалы одной полярности, то с увеличением напряжения на затворе будет увеличиваться $U_{СИ\ проб}$ (см. рис. 2, а).

Пробой диэлектрика под затвором может происходить при напряжении на затворе всего в несколько десятков вольт, так как толщина слоя диоксида кремния около 0,1 мкм. Пробой обычно имеет тепловой характер, происходит при шнуровании тока, и поэтому даже при небольших энергиях импульсов напряжения могут произойти необратимые изменения в диэлектрике. Этот вид пробоя может возникать в результате накопления статических зарядов, так как входное сопротивление МДП-транзисторов велико. Для исключения возможности такого вида пробоя вход МДП-транзистора часто защищают стабилитроном, ограничивающим напряжение на затворе.

Статические характеристики передачи. Характер зависимостей $I_C = f(U_{ЗИ})$ при $U_{СИ} = \text{const}$ ясен из принципа действия МДП-транзистора с индуцированным каналом. Характеристики для разных напряжений на стоке выходят из точки на оси абсцисс, соответствующей пороговому напряжению $U_{ЗИ\ пор}$ (см. рис. 2,б). С увеличением напряжения на стоке при неизменном напряжении на затворе ток стока возрастает даже в пологой части статистических выходных характеристик (см. рис. 2,а), что приводит к смещению характеристик передачи вверх в выбранной системе координат.

Интересным и важным с точки зрения применения МДП-транзисторов является температурное изменение статических характеристик передачи. Эти изменения вызваны в основном двумя физическими процессами. Во-первых, с увеличением температуры в рабочем диапазоне температур уменьшается подвижность носителей заряда, что приводит к уменьшению тока стока. Во-вторых, происходит перераспределение носителей по энергиям и смещение уровня Ферми к середине запрещенной зоны. В связи с таким смещением уровня Ферми инверсный слой образуется у поверхности полупроводника при меньших напряженностях электрического поля. Поэтому с увеличением температуры пороговое напряжение $U_{ЗИ\ пор}$ уменьшается. В результате статические характеристики передачи для неизменного напряжения на стоке, но для разных температур пересекаются (рис. 4).

Таким образом, температурные изменения тока стока при неизменных напряжениях на МДП-транзисторе могут быть как отрицательными, так и положительными, а также нулевыми в определенной рабочей точке статических характеристик. Обычно эффект температурной компенсации получается при напряжениях на затворе, незначительно превышающих пороговое напряжение $U_{ЗИ\ пор}$. Кроме того, еще надо учитывать, что крутизна характеристики S , определяющая усилительные свойства МДП-транзистора, изменяется с температурой даже при неизменном постоянном токе стока.

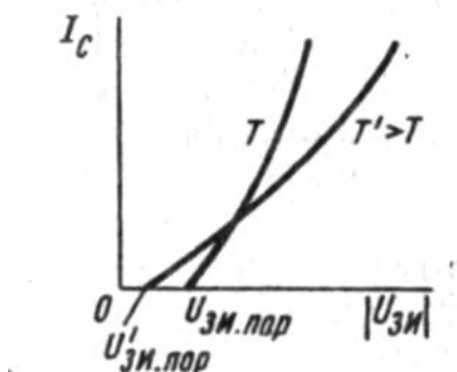


Рис. 4 Изменение статических характеристик передачи и порогового напряжения $U_{ЗИ\ пор}$ МДП-транзистора с изменением температуры.

МДП-транзисторы со встроенным каналом

Проводящий канал под затвором МДП-транзистора может быть создан в результате локальной диффузии или ионной имплантации соответствующих примесей в приповерхностные слои подложки. Он может возникнуть из-за перераспределения примесей вблизи поверхности полупроводниковой подложки в процессе термического окисления ее поверхности. Наконец, проводящий канал может появиться под затвором из-за фиксированного заряда в подзатворном слое диоксида кремния, на поверхностных энергетических уровнях, а также из-за контактной разности потенциалов между металлом затвора и полупроводником подложки.

Модуляция сопротивления проводящего канала МДП-транзистора может происходить при изменении напряжения на затворе как положительной, так и отрицательной полярности. Таким образом, МДП-транзистор со встроенным каналом может работать в двух режимах: в режиме обогащения и в режиме обеднения канала носителями заряда. Эта особенность МДП-транзисторов со встроенным каналом отражается и на смещении выходных статических характеристик при изменении напряжения на затворе и его полярности (рис. 5, а).

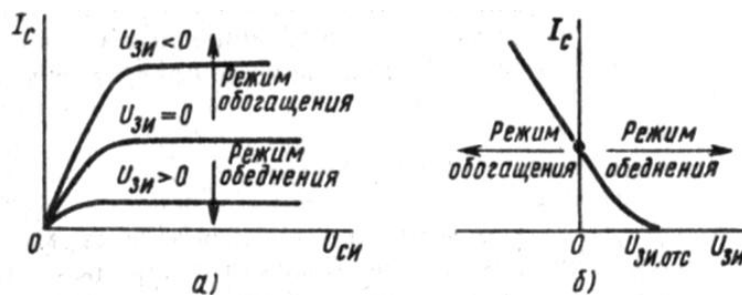


Рис. 5 – Выходные статические характеристики (а) и статическая характеристика передачи (б) МДП-транзистора со встроенным р-каналом

Статические характеристики передачи (рис. 5,б) выходят из точки на оси абсцисс, соответствующей напряжению отсечки $U_{зи\text{отс}}$, т.е. напряжению между затвором и истоком МДП-транзистора со встроенным каналом, работающего в режиме обеднения, при котором ток стока достигает заданного низкого значения.

2.15 Практическое занятие №15 (2 часа).

Тема: «Светодиоды и принцип их выбора»

2.15.1 Задание для работы: рассмотреть структуру и принцип работы светоизлучающего диода и уяснить принцип его выбора

2.15.2 Краткое описание проводимого занятия:

Полупроводниковый прибор отображения информации — это полупроводниковый излучатель энергии видимой области спектра, предназначенный для отображения визуальной информации.

Инфракрасный излучающий диод (ИК-диод) - это полупроводниковый излучатель, представляющий собой диод, способный излучать энергию инфракрасной области спектра.

Принцип действия

Рассмотрим полупроводниковые приборы отображения информации, структура которых имеет выпрямляющий электрический переход (р-п-переход или гетеропереход), а также инфракрасные светодиоды, так как принцип действия этих приборов один и

тот же. Электролюминесцентные порошковые и пленочные излучатели хотя и относятся к полупроводниковым приборам отображения информации (см. рис. 1), но отличаются по структуре и принципу действия. Поэтому они будут рассмотрены в последующих параграфах.

Излучение полупроводниковых приборов отображения информации и инфракрасных излучающих диодов вызвано самопроизвольной рекомбинацией носителей заряда при прохождении прямого тока через выпрямляющий электрический переход. Рекомбинация носителей заряда может происходить как в самом выпрямляющем электрическом переходе, так и в прилегающих к этому переходу областях структуры. Чтобы кванты энергии — фотоны, освободившиеся при рекомбинации, соответствовали квантам видимого света, ширина запрещенной зоны исходного Полупроводника должна быть относительно большой ($\Delta E > 1,7$ эВ). При меньшей ширине запрещенной зоны исходного полупроводника кванты энергии, освобождающиеся при рекомбинации носителей заряда, соответствуют инфракрасной области излучения. Таким образом, разница между полупроводниковыми приборами отображения информации (визуального представления информации) и инфракрасными излучающими диодами заключается только в отличии исходного полупроводникового материала.

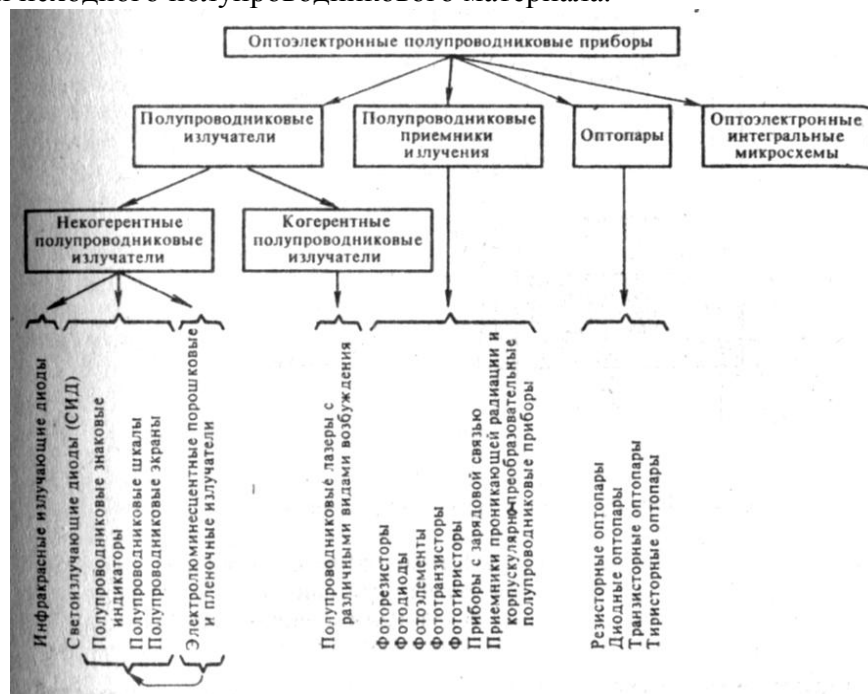


Рис. 1 Классификация оптоэлектронных полупроводниковых приборов

Если бы рекомбинация неравновесных электронов и дырок, вводимых в выпрямляющий электрический переход или в прилегающие к нему области при прохождении прямого тока, происходила только с излучением фотонов, то внутренний квантовый выход (отношение излученных фотонов к числу рекомбинировавших пар носителей) был бы равен 100%. Однако значительная часть актов рекомбинации может заканчиваться выделением энергии в виде элементарных квантов тепловых колебаний — фотонов. Такие переходы электронов между энергетическими уровнями называют безызлучательными. Соотношение между излучательными и безызлучательными переходами зависит от ряда причин, в частности от структуры энергетических зон полупроводника, наличия примесей, которые могут увеличивать или уменьшать вероятность излучательных переходов. Из освоенных в настоящее время полупроводниковых материалов наилучшими с точки зрения внутреннего квантового выхода являются соединения $GaAs_{1-x}P_x$, при $x=0,45$. Ширина запрещенной зоны этих соединений увеличивается от 1,424 при $x=0$ до 1,977 эВ при $x=0,45$.

В полупроводниковых излучателях из арсенида галлия, т. е. при $x=0$ в указанной системе соединений, внутренний квантовый выход достигает значений, близких к 100%. При использовании других полупроводниковых материалов внутренний квантовый выход составляет иногда только единицы процентов, но и при таких значениях излучение оказывается достаточным для практического использования.

Конструкция и технология изготовления

Даже при высоком внутреннем квантовом выходе внешний квантовый выход полупроводниковых излучателей оказывается значительно меньшим из-за поглощения фотонов в полупроводнике до выхода их в окружающее пространство и из-за потерь при полном внутреннем отражении фотонов, падающих на границу раздела полупроводника и окружающей атмосферы под углом, превышающим критический угол полного внутреннего отражения $\varphi_{кр} = \arcsin(1/n_r)$, где n_r — коэффициент преломления полупроводника. Обычно $\varphi_{кр} \leq 17^\circ$.

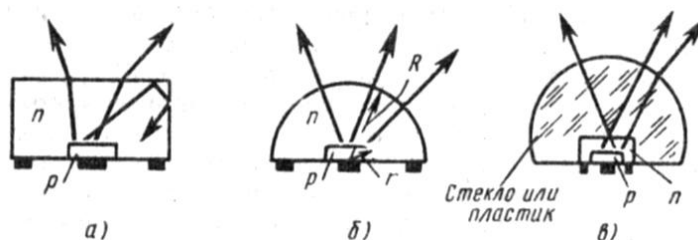


Рис. 2 – Структуры некогерентных полупроводниковых излучателей

Таким образом, из полупроводникового излучателя, имеющего простейшую плоскую структуру (рис. 2, а), в окружающее пространство выходит только часть фотонов, возникших в выпрямляющем электрическом переходе или вблизи него. Внешний квантовый выход удастся увеличить при использовании более сложных конструкций полупроводниковых излучателей со структурой в виде полусферического кристалла полупроводника (рис. 2, б) или плоской структуры с прозрачным полусферическим покрытием (рис. 3, в). В полупроводниковых излучателях с полусферической структурой для всей поверхности угол падения фотонов оказывается меньше критического угла полного внутреннего отражения при большом отношении радиусов R и r (рис. 3, б), т. е. при

$$R/r > n_r/n_{гср},$$

где n_r и $n_{гср}$ — коэффициенты преломления электромагнитного излучения в полупроводнике и среде, окружающей полупроводниковый излучатель ($n_{гср} = 1$ для воздуха).

Однако в полупроводниковых излучателях с полусферической структурой несколько возрастают потери фотонов в результате поглощения, так как увеличивается длина их пути от места возникновения до поверхности кристалла. Все полупроводниковые излучатели с полусферической структурой имеют внешний квантовый выход на порядок выше, чем у излучателей с плоской конструкцией.

Значительно проще технология изготовления полупроводниковых излучателей с прозрачным полусферическим (или параболическим) покрытием из различных пластических материалов с высоким коэффициентом преломления для увеличения критического угла полного внутреннего отражения в полупроводнике.

Основным методом формирования р-п-переходов и гетеропереходов при создании полупроводниковых излучателей на основе арсенида галлия GaAs, фосфида галлия GaP, твердых растворов этих соединений $GaAs_{1-x}P_x$ и других соединений типа $A^{III}B^V$ является метод эпитаксиального наращивания. Обычно это жидкофазная эпитаксия, иногда — эпитаксия из газовой фазы.

Для формирования p-n-переходов в карбиде кремния SiC используют метод диффузии примесей, а иногда и метод эпитаксиального наращивания. Одной из интересных особенностей карбида кремния является его политипизм, т. е. существование I нескольких кристаллических модификаций, отличающихся, в частности, шириной запрещенной зоны. Высокая физико-химическая стабильность карбида кремния и относительно малые коэффициенты диффузии примесей в нем создают предпосылки для изготовления высокостабильных полупроводниковых излучателей на основе этого материала. Однако технология изготовления монокристаллов карбида кремния и технология формирования выпрямляющих электрических переходов в этих монокристаллах отличаются сложностью. Кроме того, в полупроводниковых излучателях из карбида кремния не удастся получить высокий квантовый выход.

Большой интерес для изготовления полупроводниковых излучателей представляет нитрид галлия GaN, имеющий наибольшую ширину запрещенной зоны ($\Delta E = 3,5$ эВ) среди соединений типа $A^{III}B^V$, освоенных в технологическом отношении. Энергии фотонов, которые могут быть возбуждены в этом материале, перекрывают всю видимую область спектра. Однако независимо от метода получения и легирования нитрид галлия обладает только электропроводностью n-типа. Поэтому для получения излучения при рекомбинации неравновесных носителей заряда в данном случае надо создать выпрямляющий электрический переход в виде перехода Шоттки на контакте металла с нитридом галлия.

Сопоставление эффективности люминесценции различных материалов показывает, что квантовый выход растет с увеличением длины волны. Поэтому, если зрительное восприятие информации не является обязательным, предпочтение следует отдать инфракрасным излучательным диодам на основе арсенида галлия. Полупроводниковые приборы отображения информации в зависимости от структуры, конструкции и, конечно, назначения могут быть разделены на светоизлучающие диоды, полупроводниковые знаковые индикаторы, шкалы и экраны (см. рис. 1).

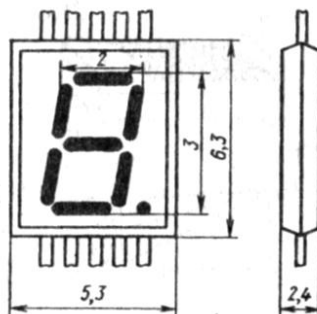


Рис. 3 – Конструкция одноразрядного знакового индикатора

Светоизлучающий диод (СИД) — это полупроводниковый прибор отображения информации, представляющий собой диод.

Таким образом, в структуре светоизлучающего диода есть только один выпрямляющий электрический переход (рис. 2) или один полупроводниковый излучающий элемент.

Полупроводниковый излучающий элемент — часть полупроводникового прибора отображения информации, состоящая из излучающей поверхности и контактов для подключения к электрической схеме.

Полупроводниковый знаковый индикатор — это полупроводниковый прибор отображения информации, состоящий из полупроводниковых излучающих элементов, предназначенный для представления информации в виде знаков и организованный в один или несколько разрядов.

Пример конструкции одноразрядного знакового индикатора показан на рис. 9.4. Структура этого знакового индикатора состоит из семи излучающих элементов и

децимальной точки, т. е. восьми р-п-переходов в одном монокристалле полупроводника, излучающих свет при прохождении тока в прямом направлении. Различные комбинации излучающих элементов, обеспечиваемые внешней коммутацией, позволяют воспроизвести цифры от 0 до 9 К децимальную точку.

Полупроводниковая шкала — это полупроводниковый прибор отображения информации, состоящий из полупроводниковых излучающих элементов, предназначенный для представления аналоговой информации.

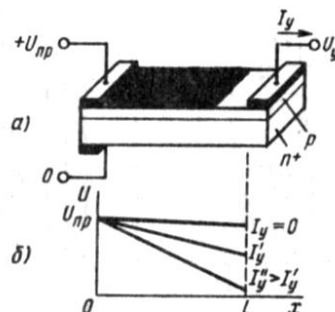


Рис. 4 - Структура полупроводниковой шкалы с управляемой геометрией светящегося поля (а) и распределение потенциала вдоль слаболегированной р-области при разных токах через управляющий электрод (б)

Структура полупроводниковой шкалы может представлять собой либо несколько светоизлучающих диодов, расположенных вдоль одной линии, либо несколько р-п-переходов, также расположенных по одной линии на общей подложке. Еще одной разновидностью структуры полупроводниковой шкалы является структура с управляемой геометрией светящегося поля (рис. 4). Область с электропроводностью n-типа низкоомна и поэтому является практически эквипотенциальной. Область с электропроводностью р-типа сравнительно высокоомна и поэтому при приложении внешних напряжений к электродам не будет эквипотенциальной. Распределение потенциала в р-области зависит от напряжения, поданного на управляющий электрод (рис. 4, б). Соответственно от поданного на управляющий электрод напряжения зависит и размер светящегося поля полупроводниковой шкалы. Такие полупроводниковые шкалы могут быть использованы в качестве индикаторов настройки транзисторных приемников, для записи аналоговой информации на фотопленку, в качестве шкалы различных измерительных приборов и для других целей.

Полупроводниковый экран — это полупроводниковый прибор отображения информации, состоящий из излучающих элементов, расположенных вдоль одной линии, и содержащий n строк излучающих элементов, предназначенный для использования в устройствах отображения аналоговой и цифровой информации.

Примером полупроводникового экрана могут служить полупроводниковые приборы отображения информации АЛ306А...АЛ306И, выпускаемые, однако, как знаковые индикаторы. Они состоят из 36 дискретных светоизлучающих диодов, соединенных в матрицу (семь строк по пять диодов и один диод отдельно) с перекрестной коммутацией и позволяющих воспроизводить цифры и буквы.

Основные характеристики и параметры

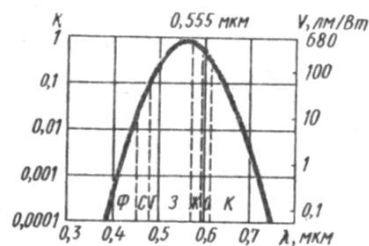


Рис. 5 Относительная K и абсолютная V видимости стандартного фотометрического наблюдателя в зависимости от длины волны излучения

Яркость излучения. Яркость излучения является параметром полупроводниковых приборов отображения информации. Единицей яркости в системе СИ служит кандела на квадратный метр ($\text{кд}/\text{м}^2$) — яркость источника излучения, каждый квадратный метр излучающей поверхности которого имеет в данном направлении силу света, равную одной канделе. Следует отметить, что световые измерения, строго говоря, не вполне объективны. Основным «прибором», с помощью которого можно измерять светотехнические величины, в конечном счете является глаз человека. Эффективность воздействия света на глаз человека определяется специальной величиной, которая получила название видности. Видность V — это отношение светового потока Φ (т.е. оцениваемой нашим глазом мощности) к соответствующей истинной, полной мощности лучистой энергии $\Phi_{\text{э}}$: $V = \Phi / \Phi_{\text{э}}$. На рис. 9.6 приведена зависимость видности от длины волны, определенная Международной комиссией по освещению (МКО). Чувствительность глаза максимальна на длине волны 0,555 мкм. Для стандартного фотометрического наблюдателя 1 Вт лучистой энергии в максимуме чувствительности глаза соответствует 680 лм. Отношение видности света данной длины волны V_{λ} к максимальной видности V_{max} называют относительной видностью: $K = V_{\lambda} / V_{\text{max}}$.

Таким образом, излучатель, который всю свою энергию отдает только в виде излучения с длиной волны 0,555 мкм, обладает наибольшей яркостью и экономичностью с точки зрения глаза человека. Однако полупроводниковые излучатели часто используют для передачи информации в виде импульсов излучения, которые поступают на приемники излучения со спектральными характеристиками, существенно отличающимися от спектральной характеристики видности глаза человека. В этом случае яркость излучения может оказаться совершенно бесполезным параметром. Так, для инфракрасных излучательных диодов основным параметром является полная мощность излучения в ваттах или милливаттах при определенном прямом токе.

Яркостная характеристика. Полупроводниковые излучатели с выпрямляющим электрическим переходом обладают относительно малым сопротивлением при включении этого перехода в прямом направлении. Поэтому такие излучатели следует считать токовыми приборами, питаемыми от источников или генераторов тока. Неответственно яркостной характеристикой полупроводниковых приборов отображения информации является зависимость яркости от проходящего через прибор тока. Желательно иметь прямую пропорциональность яркости излучения от проходящего тока, что будет соответствовать неизменности квантового выхода или неизменности отношения излучательных и безызлучательных актов рекомбинации при изменении тока. Аналогом яркостной характеристики для инфракрасных излучающих диодов является зависимость мощности излучения от проходящего тока.

Спектральная характеристика — зависимость мощности излучения от длины волны излучаемых электромагнитных колебаний (рис. 6). В первом приближении спектральный состав излучения можно характеризовать цветом свечения полупроводниковых приборов отображения информации, а инфракрасных излучательных диодов — длиной волны излучения в максимуме спектральной характеристики. Но более подробные сведения дает, конечно, спектральная характеристика.

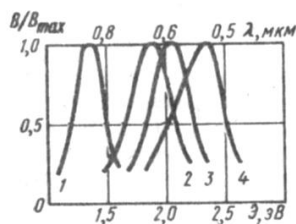


Рис. 6 - Спектральные характеристики полупроводниковых излучателей на основе арсенида галлия (1), твердого раствора арсенида и фосфида галлия (2), фосфида галлия (3) и карбида кремния (4)

Параметры полупроводниковых излучателей как элементов электрической схемы определяются вольт-амперной характеристикой. Различия прямых ветвей ВАХ полупроводниковых излучателей из разных материалов вызваны прежде всего различием в ширине запрещенной зоны и соответственно в высоте потенциального барьера на р-п-переходе (рис. 7). Обратные ветви ВАХ не представляют практического интереса, так как полупроводниковые излучатели с выпрямляющим электрическим переходом должны работать только при включении в прямом направлении. Следует, однако, иметь в виду, что пробивные напряжения полупроводниковых излучателей с выпрямляющим электрическим переходом не превышают нескольких вольт.

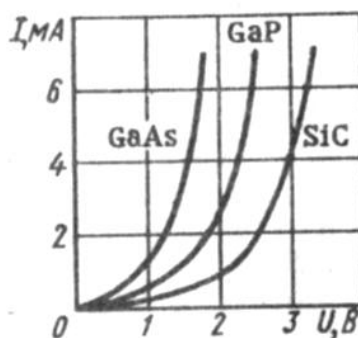


Рис. 7 - ВАХ полупроводниковых излучателей, изготовленных на основе различных полупроводниковых материалов

Инерционность полупроводниковых излучателей характеризуют временем нарастания импульса излучения и временем спада импульса излучения, которые принято измерять между уровнями излучения 0,1 и 0,9 от амплитуды импульса излучения. Эти времена составляют обычно единицы или десятые доли микросекунды. Таким образом, времена нарастания и спада импульса излучения оказываются несущественными параметрами для полупроводниковых приборов отображения информации, предназначенных для визуальной индикации, так как инерционность глаза человека достаточно велика (около 50 мс). Наоборот, для инфракрасных излучающих диодов, которые предназначены для обработки информации без визуализации, времена нарастания и спада импульса излучения могут быть одними из основных параметров.

2.16 Практическое занятие №16 (2 часа).

Тема: «Оптопары и оптоэлектронные микросхемы»

2.16.1 Задание для работы: рассмотреть основные виды оптоэлектронных приборов и их характеристики

2.16.2 Краткое описание проводимого занятия:

Оптопара — это оптоэлектронный полупроводниковый прибор, состоящий из излучающего и фотоприемного элементов, между которыми имеется оптическая связь и обеспечена электрическая изоляции.

В качестве одного элемента оптопары — излучателя — могут быть использованы инфракрасный излучающий диод, светоизлучающий диод, электролюминесцентный порошковый или пленочный излучатель, а также полупроводниковый лазер. Обычно применяют инфракрасный излучающий диод, который отличается от светоизлучающего диода и от электролюминесцентных порошковых и пленочных излучателей большим КПД (превышающим 10%), а также простотой структуры и управления.

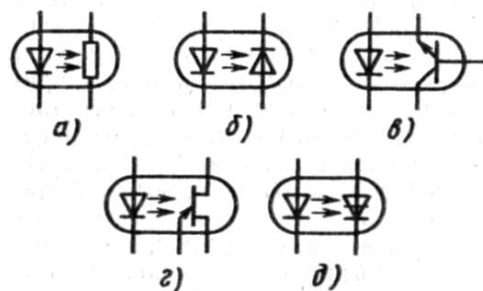


Рис. 1 – Оптопары: а – резисторная; б – диодная; в – транзисторная с биполярным фототранзистором; г – транзисторная с однопереходным фототранзистором; д – тиристорная

В качестве второго элемента оптопары — фотоприемного элемента — могут быть использованы фоторезистор, фотодиод, биполярный фототранзистор, однопереходный фототранзистор или фототиристор. В зависимости от вида фотоприемного элемента различают резисторные, диодные, транзисторные и тиристорные оптопары. Излучающий и фотоприемный элементы оптопары помещают в общий корпус. Примеры схемного обозначения различных оптопар приведены на рис. 1.

Усиление или преобразование входного электрического сигнала в оптопарах происходит следующим образом. Изменение входного тока — тока через полупроводниковый излучатель — сопровождается изменением мощности его излучения и изменением потока фотонов, падающих на фотоприемный элемент оптопары. При изменении облучения фотоприемного элемента происходит либо изменение сопротивления фоторезистора, либо изменение обратного тока фотодиода, либо появление фото-ЭДС при работе фотодиода в режиме фотоэлемента, либо усиление фототока в фототранзисторе, либо переключение из закрытого состояния в открытое фототиристора или однопереходного фототранзистора. Следует отметить универсальность однопереходного фототранзистора в качестве фотоприемного элемента оптопар. Он может быть использован на выходе оптопары как фоторезистор, фотодиод, фотоэлемент и, конечно, как переключающийся прибор — однопереходный фототранзистор.

Для существования хорошей оптической связи между элементами оптопары кроме их соответствующего расположения необходимо по возможности более близкое совпадение спектральных характеристик этих элементов.

Оптоэлектронные интегральные микросхемы

Обязательной частью любой оптоэлектронной интегральной микросхемы является та или иная оптопара. В зависимости от необходимого быстродействия обработки аналоговых или логических сигналов, от необходимой мощности на выходе и от других требований в качестве фотоприемного элемента оптопары применяют тот или иной из перечисленных в этом параграфе элементов. Каждый из них имеет свои преимущества и свои недостатки. Так, фотодиод может обладать большим быстродействием, но его коэффициент усиления фототока не превышает единицы. Поэтому всегда между выходом оптопары и исполняющим устройством есть согласующая электронная схема. При

современном уровне интегральной технологии введение такой согласующей схемы в интегральном исполнении, объединенной с оптопарой в едином корпусе, не представляет принципиальной сложности. Но благодаря наличию оптической связи оптоэлектронные интегральные микросхемы, как и простые оптопары, обладают рядом существенных достоинств.

1. Почти идеальная гальваническая развязка управляющих цепей от исполнительных при сохранении сильной функциональной связи (оптической) между ними. В отличие от электрической оптическая связь может быть легко реализована между низкоомными и высокоомными, низковольтными и высоковольтными, низкочастотными и высокочастотными цепями. Развязка электрических цепей с помощью оптопар достигает 10^{16} Ом и 10^5 В, а емкость между цепями может составлять всего 10^{-4} пФ, причем эти параметры могут быть улучшены. Здесь же можно отметить однонаправленность оптической связи и отсутствие обратной реакции приемника излучения на излучатель.

Помехозащищенность оптических каналов связи, что является следствием зарядовой нейтральности фотонов. Поток фотонов в тракте передачи сигнала не вызывает появления индуцированных электрических и магнитных полей, что ограничивает плотность электронного потока и является причиной различных паразитных связей в электронных цепях. Высокая помехозащищенность оптического канала связи и отсутствие взаимных наводок позволяют выполнять многоканальные сложные связи.

Для передачи информации по оптическому каналу связи могут быть использованы изменения направления, интенсивности, спектрального состава, поляризации или фазы колебаний. Это открывает возможности для параллельной обработки информации.

Возможность выдачи выходной информации, а также информации о состоянии отдельных звеньев оптоэлектронного устройства в виде световых сигналов или зрительно воспринимаемого образа, что позволяет осуществлять непосредственный, визуальный контроль и считывание.

2.17 Практическое занятие №17 (2 часа).

Тема: «Задачи и принципы микроэлектроники»

2.17.1 Задание для работы: рассмотреть основные положения в микроэлектронике

2.17.2 Краткое описание проводимого занятия:

Микроэлектроника — это научно-техническое направление электроники, охватывающее проблемы исследования, конструирования и изготовления высоконадежных и экономичных микроминиатюрных электронных схем и устройств с помощью комплекса физических, химических, схемотехнических и других методов.

Первой задачей микроэлектроники является создание максимально надежных электронных схем и устройств. Эта задача решается в основном путем использования качественно новых принципов изготовления электронной аппаратуры, т. е. путем отказа от использования дискретных элементов электронной аппаратуры и создания интегральных микросхем, в которых формирование активных элементов (транзисторов, диодов), пассивных элементов (резисторов, конденсаторов) и соединительных элементов электронной схемы происходит на поверхности или в объеме полупроводникового кристалла или на поверхности диэлектрической подложки в едином технологическом цикле. Минимальное количество внутрисхемных соединений дает возможность резко повысить надежность микроэлектронной аппаратуры. Именно этим преодолеваются сложные противоречия между возросшими требованиями к надежности электронной аппаратуры и ее стремительным усложнением.

Второй задачей микроэлектроники является снижение стоимости электронных схем и устройств. Эта задача решается путем формирования за единый технологический цикл структур различных элементов, межэлементных соединений и контактных площадок

для многих интегральных микросхем на относительно большой полупроводниковой пластине или на диэлектрической подложке с последующим разделением соответственно на кристаллы или на платы интегральных микросхем. При этом удастся исключить много нерациональных технологических операций, сократить число внутрисхемных соединений, исключить раздельную герметизацию отдельных элементов и существенно сократить число сборочных операций, которые необходимы при изготовлении дискретных элементов и при их сборке в схему. Эти преимущества интегральных микросхем становятся более значительными по мере их усложнения и возрастания в них числа элементов.

Наряду с решением этих двух важнейших задач микроэлектроники создание и использование интегральных микросхем приводит к резкому уменьшению массы и объема электронной аппаратуры по сравнению с массой и объемом аппаратуры на дискретных элементах, а также к уменьшению потребляемой мощности. Дальнейшее уменьшение массы и объема интегральных микросхем рассматривается как задача второстепенной важности.

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

Плотность упаковки интегральной микросхемы — это отношение числа элементов интегральной микросхемы к объему интегральной микросхемы без учета объема выводов. Другим параметром, характеризующим степень сложности интегральной микросхемы или число содержащихся в ней элементов, является степень интеграции. Если интегральная микросхема содержит до 10 элементов включительно, то ее называют интегральной микросхемой первой степени интеграции; свыше 10 до 100 элементов — второй степени интеграции; свыше 100 до 1000 элементов — третьей степени интеграции и т. д. Интегральную микросхему, содержащую 500 элементов и более, изготовленных по биполярной технологии, или 1000 элементов и более, изготовленных по МДП-технологии, называют большой интегральной микросхемой (БИС).