

Лекция 1. История развития твердотельной электроники. Достоинства и недостатки полупроводниковых приборов.

Цель: изучить историю развития электроники.

Задачи:

1. Провести классификацию твердотельных приборов.
2. Рассмотреть этапы развития твердотельной электроники
3. Изучить особенности интегральной схемы (ИС) как нового типа электронных приборов.
4. Рассмотреть достоинства и недостатки полупроводниковых приборов.

1. Определение и классификация твердотельных приборов.

Современная научно-техническая революция и переход от индустриального к информационному обществу в значительной степени обусловлены повышением производительности интеллектуального труда за счет информационных технологий. Спрос на них стимулирует развитие не только программного, но и аппаратного обеспечения, материальную основу которого составляют твердотельные полупроводниковые приборы и устройства на их основе. Твердотельные приборы образуют элементную базу современной вычислительной техники, автоматики, радиоэлектроники, силовой полупроводниковой преобразовательной техники.

ТВЕРДОТЕЛЬНЫЕ ПРИБОРЫ (ТТП) - приборы, основанные на законах движения и взаимодействия электронов с электромагнитными полями (ЭМП) в твердых телах (металлах, полупроводниках и диэлектриках).

Часть электроники, охватывающей исследование и разработку твердотельных приборов, называется **ТВЕРДОТЕЛЬНОЙ** электроникой. Твердотельные приборы разделяются на полупроводниковые и функциональные.

ПОЛУПРОВОДНИКОВЫЕ ПРИБОРЫ (ППП)- приборы, основанные на законах движения и взаимодействия электронов с ЭМП в полупроводниках.

Примеры ППП: полупроводниковые диоды (варакторы, смесительные, генераторные (ЛПД, диоды Ганна) и т.п.), транзисторы (биполярные, полевые).

Часть электроники, охватывающей исследование и разработку полупроводниковых приборов, называется **ПОЛУПРОВОДНИКОВОЙ** электроникой.

ФУНКЦИОНАЛЬНЫЕ ПРИБОРЫ - приборы, основанные на законах движения и взаимодействия электронов в ферромагнетиках, пьезодиэлектриках, высокотемпературных сверхпроводниках и других диэлектрических материалах. Примеры функциональных приборов: оптоэлектронные, ионные, тепловые, акустические и т.п.



МИНОБРНАУКИ РОССИИ
Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение
высшего образования
"Московский технологический университет"

МИРЭА

Филиал МИРЭА в г. Фрязино

Кафедра №137 «Электроника и микроэлектроника»

ПРИНЯТО
на заседании кафедры ОНД
(протокол № 8
от «27» мая 2016 г.)

УТВЕРЖДАЮ
Заведующий кафедрой
_____ (_____)
«__» _____ 2016 г.

Д.А. КОВТУНОВ.

ТВЕРДОТЕЛЬНАЯ ЭЛЕКТРОНИКА

Курс лекций для студентов по направлению подготовки 11.03.04 «Электроника и наноэлектроника»

Часть электроники, охватывающей исследование и разработку функциональных приборов, называется ФУНКЦИОНАЛЬНОЙ электроникой.

Таким образом, ТВЕРДОТЕЛЬНАЯ электроника – это наука об электронных процессах в твердых телах и их применения в твердотельных устройствах для преобразования энергетических потоков и обработки информации.

Твердотельная электроника – современная физическая наука, поскольку в ее основе лежит квантовая механика и представляет собой обширную область науки и техники, включающую в себя:

- получение и исследование полупроводниковых материалов;
- проектирование и производство полупроводниковых приборов и интегральных микросхем;
- построение устройств и систем на основе полупроводниковых приборов.

2. История развития твердотельной электроники.

Представление о полупроводниках, как особом классе веществ возникло в начале 30-х годов прошлого века в связи с появлением квантовой теории твердого тела. Однако уникальные физические свойства этих материалов использовались в приборах еще в конце 19 века. Так А.С. Поповым были обнаружены выпрямительные свойства контактов между металлами и некоторыми сернистыми соединениями, которые были в дальнейшем использованы при изобретении радио для создания порошкового когерера, в котором использовались нелинейные свойства зернистых систем.

Однако в этот период успешно развивается техника электровакуумных приборов и твердотельные приборы не получили существенного развития и применения.

Бурное развитие радиоэлектроники, и особенно радиолокационной техники, в период второй мировой войны, дало новый толчок к исследованиям в области полупроводниковых приборов и материалов. В приемниках радиолокаторов для детектирования сигналов широко использовать нелинейные свойства контакта металл-полупроводник. Были разработаны точечные высокочастотные и сверхвысокочастотные германиевые и кремниевые диоды.

Однако официальной датой рождения твердотельной электронике принято считать 1948 год, когда американские физики Дж. Бардин, У. Браттейн и У. Шокли предложили, а затем и изготовили точечно-контактный биполярный транзистор.

Изобретение транзистора считается самым значительным изобретением XX века, и его авторы в 1956 году были удостоены Нобелевской премии. В 1952 году создаются первые промышленные образцы плоскостных транзисторов, получившие в дальнейшем очень широкое распространение. Тогда же У. Шокли предложил полевой транзистор с управляющим р-п переходом.

Так как электронно-дырочный переход является основным элементом почти каждого твердотельного прибора, важное значение приобрела теория p-n перехода, впервые разработанная У. Шокли в 1949 году.

Одновременно с разработкой новых типов твердотельных приборов велись работы по совершенствованию технологических методов их изготовления. В первой половине 50-х годов был разработан процесс диффузии примесей в полупроводниковые материалы, и в 1956 году началось производство транзисторов с базой, полученной методом диффузии. Важным достижением стало появление в начале 60-х годов планарного процесса. Выращивание изолирующего слоя диоксида кремния на поверхности кремниевой подложки и получение на нем топологического рисунка заданной конфигурации с применением процесса фотолитографии позволили осуществлять прецизионный контроль за размерами элементов полупроводниковой структуры. Планарная технология на многие годы определила прогресс в производстве твердотельных приборов и интегральных микросхем. Наряду с этим в 1960 году был разработан еще один важнейший технологический процесс – эпитаксиальное наращивание слоев полупроводников требуемой толщины и электрических свойств на монокристаллической подложке.

По мере совершенствования технологии твердотельных приборов и с появлением планарной технологии началось быстрое освоение твердотельными приборами диапазона СВЧ. В 60-е годы появились смесительные диоды с барьером Шоттки, туннельные диоды, варикапы, СВЧ генераторные диоды и транзисторы. Эффект генерации когерентных СВЧ колебаний в p-n переходе при ударной ионизации, открытый в 1959 году А.С. Тагером и его сотрудниками, лег в основу нового типа приборов - лавинно-пролетных диодов.

3. Интегральная схема (ИС) - новый тип твердотельных приборов.

Успехи технологии твердотельных приборов в начале 60-х годов способствовали созданию интегральных микросхем, объединяющих в одном полупроводниковом кристалле большое количество элементарных полупроводниковых приборов.

ИНТЕГРАЛЬНАЯ СХЕМА (микросхема) - миниатюрное устройство, в котором большинство (или все) твердотельные приборы и пассивные элементы изготавливаются в едином технологическом цикле (т.е. одновременно) на одной и той же несущей конструкции - подложке.

Интегральная схема рассматривается как качественно новый тип электронного прибора, поэтому этот раздел твердотельной электроники был выделен в отдельный – микроэлектроника. Микроэлектроника - это раздел электроники охватывающий исследования и разработку микросхем и принципов их применения. В

настоящее время микроэлектроника считается основным направлением в развитии твердотельной электроники.

Особенности ИС как нового типа электронных приборов следующие.

1. ИС самостоятельно выполняет законченную, часто довольно сложную, функцию, тогда как традиционные электронные приборы выполняют аналогичную функцию лишь в совокупности с другими элементами.

2. Повышение сложности ИС не приводит к ухудшению основных показателей (надежности, стоимости и т.д.).

3. Предпочтительность полупроводниковых элементов перед пассивными, поскольку увеличение ППП не приводит к существенному удорожанию ИС.

4. Снижение разброса параметров ИС вследствие близкого расположения друг к другу смежных элементов.

Типичная ИС состоит из множества соединенных между собой микроэлектронных компонентов: диодов, резисторов, конденсаторов, биполярных и полевых транзисторов, изготовленных в поверхностном слое кристалла. Размеры кремниевых кристаллов лежат в пределах от примерно 1,3

тенденцией развития микроэлектроники является повышение степени интеграции, оцениваемой логарифмом числа элементов и компонентов на кристалле. Если первые интегральные микросхемы содержали несколько десятков элементов на кристалле при размере элементов около 100 мкм, в конце 70-х годов были созданы сверхбольших интегральных микросхемах (СБИС), содержащие от 10^4 до 10^6 элементов на кристалле (степень интеграции достигает 7) при размере элементов от 1 до 3 мкм. Прогресс в области интегральных схем привел к разработке технологий интегральных схем ультрабольшой степени интеграции (УБИС), в которых степень интеграции более 7, при субмикронных размерах элементов. Исследования показали, что пределом размеров элементов является значение 0.2 мкм. Достижение таких размеров связано с преодолением значительны технологических трудностей. Таким образом, существуют физические пределы развития интегральной микроэлектроники.

Большим достижением микроэлектроники явилось создание в начале 70-х годов микропроцессоров на базе больших интегральных микросхем (БИС) Благодаря интегральным схемам стало возможным создание миникомпьютеров – малых ЭВМ, где все функции выполняются на одной или нескольких больших интегральных схемах. Такая впечатляющая миниатюризация привела к резкому снижению стоимости вычислений. Выпускаемые в настоящее время мини-ЭВМ ценой менее 1000 долл. по своей производительности не уступают первым очень большим вычислительным машинам, стоимость которых в начале 1960-х годов доходила до 20 млн. долл. Микропроцессоры находят применение в оборудовании для связи, карманных калькуляторах, наручных часах, селекторах телевизионных каналов, элект-

тронных играх, автоматизированном кухонном и банковском оборудовании, средствах автоматического регулирования подачи топлива и нейтрализации отработавших газов в легковых автомобилях, а также во многих других устройствах. Большая часть мировой электронной индустрии, оборот которой превышает 15 млрд. долл., так или иначе, зависит от интегральных схем. В масштабах всего мира интегральные схемы находят применение в оборудовании, суммарная стоимость которого составляет многие десятки миллиардов долларов.

4. Достоинства и недостатки полупроводниковых приборов.

Процесс совершенствования устройств радиоэлектронной аппаратуры, и в первую очередь СВЧ диапазона, идет по пути улучшения параметров и характеристик мощных электровакуумных приборов и создания новых типов твердотельных приборов.

Почти всегда возникает вопрос, каким приборам следует отдать предпочтение. Отметим следующие преимущества твердотельных приборов по сравнению с электровакуумными:

- существенно большая долговечность твердотельных приборов;
- на порядок меньшее значение постоянных напряжений питания;

Твердотельные приборы требуют для питания напряжения не более десятков вольт, в то время как электровакуумные – не менее единиц киловольт.

- существенно меньшие габариты и масса, особенно при использовании методов микроэлектроники при изготовлении различных радиоэлектронных устройств и их элементов;

- малое время готовности;

Недостатками твердотельных приборов являются:

- чувствительность к отклонениям, даже кратковременным, от допустимого эксплуатационного режима работы, что может привести к пробоем р-п перехода и полному отказу прибора. Поэтому необходимо использовать устройства автоматической защиты твердотельных приборов от воздействия различных, случайно возникающих неблагоприятных факторов;

- мощность полупроводниковых приборов ограничена, причем для большинства из них с повышением частоты она уменьшается. Для преодоления этого недостатка в твердотельных устройствах широко используют разнообразные методы суммирования мощностей сигналов большого числа полупроводниковых активных элементов, в том числе с помощью активных фазированных антенных решеток (ФАР). Последние позволяют во много раз повысить суммарную мощность сигнала, излучаемую радиопередатчиком, при сравнительно небольшой мощности отдельных полупроводниковых активных элементов.

Лекция №2

ОСНОВЫ ЗОННОЙ ТЕОРИИ ТВЕРДЫХ ТЕЛ.

Цель: изучить основы зонной теории твердых тел.

Задачи:

1. Рассмотреть основные элементы зонной теории полупроводника.
2. Провести классификацию твердых тел по электрофизическим свойствам

Элементы зонной теории полупроводников

Наиболее распространенной моделью для описания свойств твердых тел является модель энергетических зон, т.е. зонная модель. Зонная теория твердых тел является сложной квантово-механической теорией и в полном объеме не может быть изложена в данной лекции.

Рассмотрим два фрагмента зонной теории, необходимых для понимания работы твердотельных приборов.

1. Если взять отдельный атом, например, кремния, то его строение можно представить как ядро, где сосредоточен положительный заряд и расположенные вокруг ядра дискретные энергетические уровни, на которых располагаются электроны, Их энергия определяется 4 квантовыми числами: излучение и поглощение энергии электроном происходит только при переходе с одной орбиты на другую. Полная энергия электронов называется энергетическим состоянием атомов. Каждой разрешенной орбите соответствует свое энергетическое состояние, которое на диаграмме представляется в виде энергетического уровня.

При образовании твердого тела атомы сближаются друг с другом на очень малые расстояния (менее 0.5 нм), располагаясь определенным образом и составляют в целом кристаллическую решетку. При этом плотность атомов в твердом теле достигает $10^{22} - 10^{23} \text{ см}^{-3}$. В результате из-за близкого расположения атомов и большой их плотности дискретные энергетические уровни расщепляются в зону разрешенных энергий. Теоретически и экспериментально показано, что зоны разрешенных энергий разделены запрещенной зоной.

Таким образом, первый фрагмент зонной теории сводится к тому, что твердое тело можно представить в виде модели энергетических зон. т.е. зонной диаграммы, представленной на рис. 2.1.

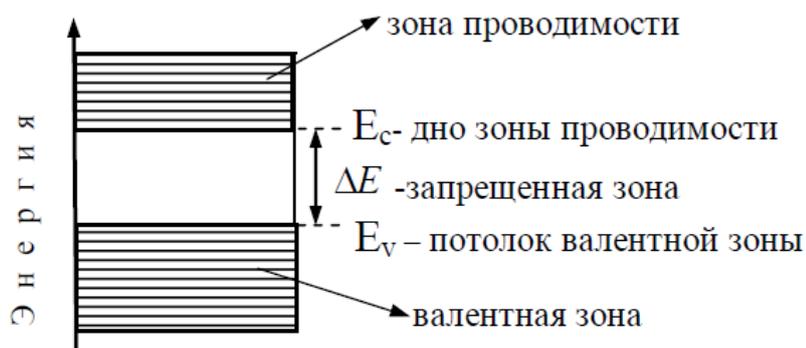


Рисунок 2.1. Зонная диаграмма твердого тела.

На диаграмме по вертикальной оси отложены значения энергии, которую может иметь электрон, по горизонтальной оси - координата. Верхняя часть энергетической диаграммы представляет собой зону проводимости, а нижний уровень этой зоны E_c называется дном зоны проводимости. Нижняя часть диаграммы - валентная зона, верхний уровень E_v которой называется потолком валентной зоны.

Запрещенная зона характеризуется шириной запрещенной зоны $\Delta E = E_c - E_v$. Для удобства зонная диаграмма твердого тела изображается в упрощенном варианте (рис.2.2). не обозначая осей координат и не штрихуя энергетические уровни в валентной зоне и зоне проводимости.

Количество энергетических уровней в валентной зоне и зоне проводимости одного порядка. Однако степень заполнения уровней электронами различна.

Так при $T = 0$ К все уровни валентной зоны заполнены, а уровни зоны проводимости не заняты.

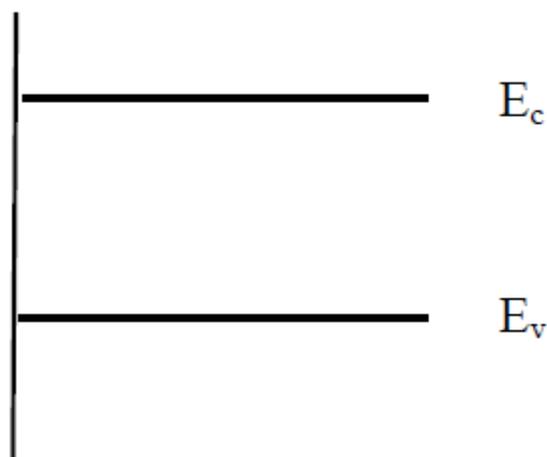


Рисунок 2.2. Изображение зонной диаграммы твердого тела в упрощенном варианте.

При этом электроны, находящиеся в валентной зоне, ток переносить не могут, т.к. для их перемещения нет свободных уровней. При $T > 0$ К часть носителей может перейти из валентной зоны в зону проводимости. Поскольку количество электронов в зоне проводимости меньше числа уровней, то они являются свободными и могут перемещаться, создавая ток. Одновременно при переходе электрона из валентной зоны в зону проводимости в валентной зоне образуется не занятый энергетический уровень. Этот незанятый уровень называют дыркой, которая имеет положительный заряд и может также перемещаться и переносить ток.

2. Второй фрагмент зонной теории заключается в том, чтобы получить соотношения, определяющие количество электронов и дырок находящихся в разрешенных зонах в свободном состоянии, так как количество этих носителей определяет ток в приборах.

Концентрацию свободных электронов в зоне проводимости можно определить, зная количество уровней, расположенных в зоне проводимости, и вероятность их заполнения:

$$n_0 = \int_{E_c}^{\infty} 2N_c(E) f(E, T) dE, \quad (2.1)$$

где $f(E, T)$ - функция вероятности заполнения электроном уровня с энергией E при температуре T ;

N_c - эффективная плотность энергетических состояний в зоне проводимости (количество уровней, отнесенных к единице объема).

Цифра 2 в выражении (2.1) отражает тот факт, что на каждом уровне в соответствии с принципом Паули может находиться два электрона.

Интегрирование необходимо провести от дна зоны проводимости E_c до ее потолка. Учитывая резкую зависимость $f(E, T)$ от энергии, верхний предел можно положить равным бесконечности.

Величина N_c определяется соотношением

$$2N_c = 2 \left(\frac{2\pi m_n^* kT}{h^2} \right)^{3/2} = 2,510^{19} \left(\frac{m_n^*}{m} \right)^{3/2} \left(\frac{T}{300} \right)^{3/2} \quad (2.2)$$

где m_n^* - эффективная масса электрона; m - масса электрона ($m = 9 \cdot 10^{-31}$ кг); k , h - постоянные Больцмана и Планка соответственно; T - температура.

Вероятность заполнения уровня с энергией E определяется соотношением Ферми-Дирака

$$f(E, T) = \frac{1}{e^{\frac{E-F}{kT}} + 1}, \quad (2.3)$$

где $f(E, T)$ - функция вероятности заполнения электроном уровня с энергией E при температуре T ;

T – температура системы (в градусах К), k – постоянная Больцмана,

F – энергия уровня Ферми (это характеристическая энергия системы, ниже которой при $T = 0\text{К}$ все состояния заполнены, выше пустые);

На рис. 2.3 показан вид функции Ферми-Дирака при различных значениях температуры. Как видно из (2.3) и рис. 2.3 вероятность нахождения частицы на уровне с энергией F всегда равна $\frac{1}{2}$ при всех температурах. В то же время по мере роста температуры вероятность появления частиц выше уровня Ферми возрастает. При температурах отличных от нуля, если $E - F > kT$, то функция Ферми-Дирака хорошо представляется экспоненциальной зависимостью (область в квадрате на рис. 2.3).

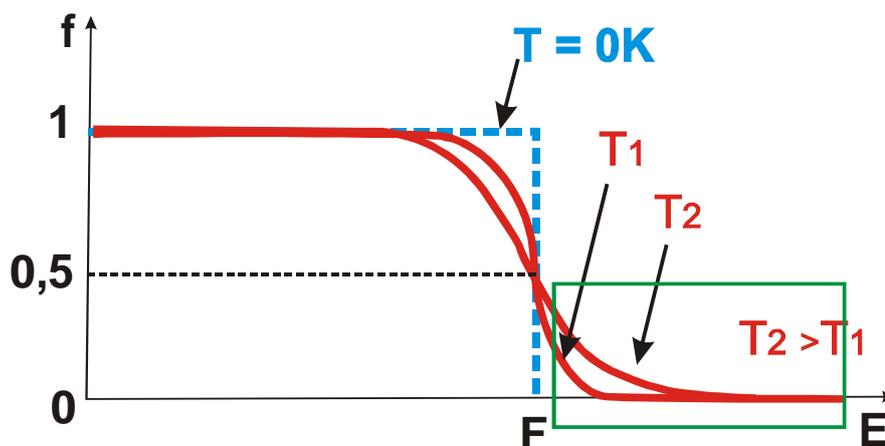


Рисунок 2.3. Вид функции Ферми-Дирака (вероятности распределения по состояниям) для различных температур.

Для невырожденных полупроводников уровень Ферми всегда расположен так, что $E_c - E_p \gg kT$. Под невырожденным полупроводником будем понимать полупроводник, у которого уровень Ферми лежит в пределах запрещенной зоны. Причем большинство полупроводниковых приборов изготавливаются на основе невырожденных полупроводников.

Пренебрегая единицей в знаменателе выражения (2.3), получим функцию вероятности в виде (2.4), что говорит о том, что носители в

невырожденных полупроводниках подчиняются статистике Максвелла-Больцмана

$$f(E, T) = \exp\left(-\frac{E - F}{kT}\right), \quad (2.4).$$

Тогда интегрирование выражения (2.1) дает формулу для расчета концентрации свободных электронов в зоне проводимости полупроводника

$$n_0 = N_c \exp\left(-\frac{E_c - F}{kT}\right) \quad (2.5).$$

Видно, что число свободных электронов (n_0) определяется, кроме величины N_c , температурой и положением уровня Ферми F относительно E_c : С ростом T величина n_0 увеличивается по экспоненте, а при увеличении $E_c - F$ – по экспоненте уменьшается.

По аналогии с выражением (2.5) для электронов можно записать выражения для расчета концентрации свободных дырок в валентной зоне

$$p_0 = N_v \exp\left(-\frac{F - E_v}{kT}\right) \quad (2.6).$$

где N_v - эффективная плотность энергетических состояний в валентной зоне, определяемая как

$$2N_v = 2\left(\frac{2\pi m_p^* kT}{h^2}\right)^{3/2} = 0,510^{16} \left(\frac{m_p^*}{m}\right)^{3/2} \left(\frac{T}{300}\right)^{3/2}$$

где m_p^* - эффективная масса дырки.

2 Классификация твердых тел по электрофизическим свойствам.

1). Металлы. Для металлов характерны два типа зонных диаграмм, показанных на рис. 2.4.



Рисунок 2.4. Зонная диаграмма металлов: а) валентная зона частично заполнена электронами; б) валентная зона и зона проводимости взаимно перекрываются

Для зонной диаграммы $\epsilon_a \gg kT$ на рис. 2.4.a валентная зона частично заполнена электронами.(K, Na, H).

Для зонной диаграммы на рис. 2.4.b валентная зона и зона проводимости взаимно перекрываются, т. е. при воздействии внешнего поля электроны переходят из валентной зоны в зону проводимости (Fe).

Вещества, способные проводить электрический ток, называются металлами.

2). Диэлектрики. Валентная зона полностью заполнена электронами. Электрон не может покинуть валентную зону и перейти в зону проводимости. Диэлектрики (изоляторы) – вещества, не проводящие ток.

3). Полупроводники. Для полупроводников характерна зонная диаграмма, в которой ширина запрещенной зоны сравнима со средней тепловой энергией электрона.

Кристалл полупроводника занимает промежуточное положение между металлами и диэлектриками. Как и у диэлектриков, у полупроводников заняты все подуровни валентной зоны. Однако свободная зона кристалла полупроводника отделена от валентной зоны очень узкой запрещенной зоной. Поэтому даже при незначительном повышении температура полупроводника его электроны без труда преодолевают запрещенную зону и попадают на свободные подуровни свободной энергетической зоны. В результате кристалл становится способным проводить электрический ток. Чем выше температура полупроводника, тем меньше его сопротивление.

Вопросы для самопроверки

1. Опишите структуру спектра атома водорода
2. Сформулируйте принцип Паули
3. Что такое кристаллическая решетка?
4. Поясните зонные диаграммы металлов
5. Что такое диэлектрики?
6. В чем особенность полупроводников? Поясните на основе зонной диаграммы.

Лекция №3

ПОЛУПРОВОДНИКИ С СОБСТВЕННОЙ, ЭЛЕКТРОННОЙ И ДЫРОЧНОЙ ЭЛЕКТРОПРОВОДНОСТЬЮ

Цель: изучить особенности полупроводников с собственной, электронной и дырочной электропроводностью.

Задачи:

1. Рассмотреть понятие собственных полупроводников и их отличительные черты.
2. Изучить особенности полупроводников с электронной электропроводностью
3. Выявить отличия полупроводников с дырочной электропроводностью

1 Собственные полупроводники.

Полупроводники - это широкий класс веществ, удельное сопротивление которых изменяется в широком интервале от 10^{-5} до 10^8 Ом·м, лежащее между удельным сопротивлением металлов и электриков и очень быстро уменьшается с повышением температуры.

Отличительной особенностью полупроводников является очень сильная зависимость их электропроводности от концентрации примесей и от внешних воздействий (температуры, освещения, магнитных и электрических полей, ионизирующих излучений). Полупроводниковыми свойствами обладают 12 элементов периодической системы Менделеева (Si, Ge, Sn и др.). Их называют элементарными полупроводниками. Практическое применение из элементарных полупроводников нашли кремний и германий. Кроме элементарных полупроводников существуют полупроводниковые двойные, тройные и более сложные соединения. Среди них наибольшее применение получили двойные соединения арсенида и фосфида галлия (GaAs, GaP).

Как показано в Лекции 2, в процессе образования кристаллической решетки между атомами возникает сильное взаимодействие, приводящее к расщеплению энергетических уровней, занимаемых электронами атомов. Совокупность этих уровней называют энергетической зоной. Разрешенные энергетические зоны отделены друг от друга запрещенной зоной. Верхняя разрешенная зона, в которой при абсолютном нуле температуры все энергетические уровни заняты, называется заполненной или валентной зоной. Раз-

решенная зона, в которой при $T = 0^\circ \text{ К}$ электроны отсутствуют, называется зоной проводимости.

В полупроводниковой электронике широкое применение получили германий ($\Delta E_g = 0,67 \text{ эВ}$) и кремний ($\Delta E_g = 1,12 \text{ эВ}$) - элементы 4-й группы периодической системы.

Особенностью германия и кремния является то, что их кристаллическая решетка имеет регулярную структуру и называется тетраэдрической или решеткой типа алмаза (рис.3.1).

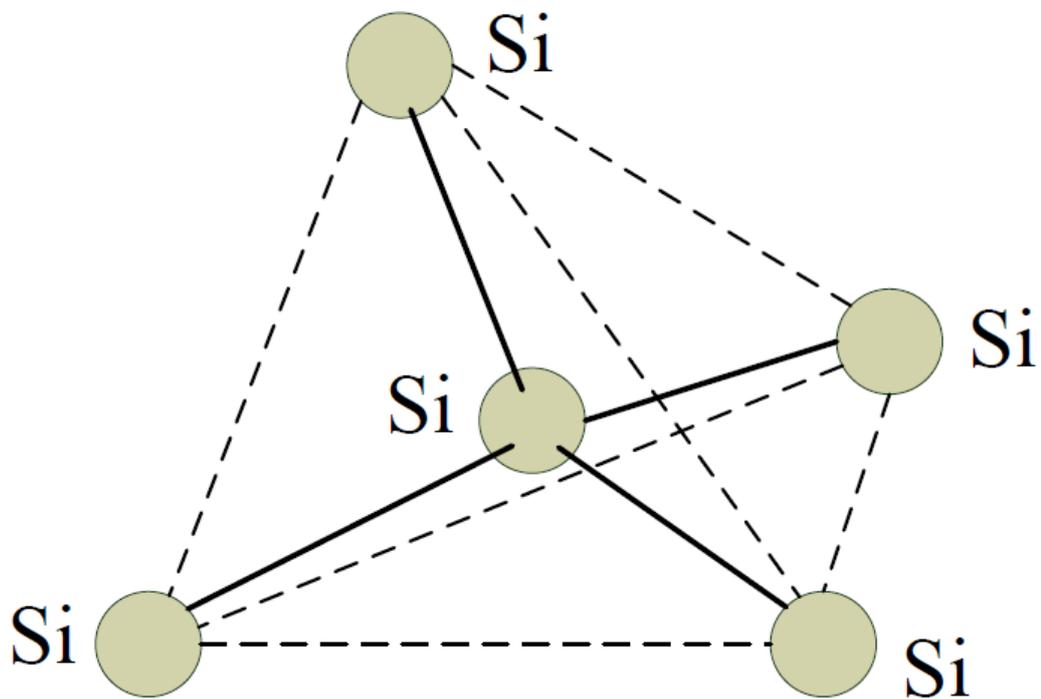


Рис. 3.1 Тетраэдрическая структура кристаллической решетки кремния

Характерная особенность тетраэдрической системы заключается в одинаковом расстоянии центрального атома от четырех угловых. Каждый угловой атом служит центральным для других четырех ближайших атомов, которые также образуют тетраэдр.

Плоский эквивалент тетраэдрической структуры кристаллической решетки этих элементов изображают так, как показано на рисунке 3.2, а. При температуре абсолютного нуля (0° К) все электроны находятся на орбитах, энергия электронов на которых не превышает энергетических уровней валентной зоны. Свободных электронов нет, и полупроводник ведет себя, как диэлектрик. При комнатной температуре часть электронов приобретает энергию, достаточную для разрыва ковалентной связи. При разрыве ковалентной

связи в валентной зоне появляется свободный энергетический уровень (рис.3.2, б). Уход электрона из ковалентной связи сопровождается появлением в системе двух электрически связанных атомов единичного положительного заряда, получившего название дырки, и свободного электрона.

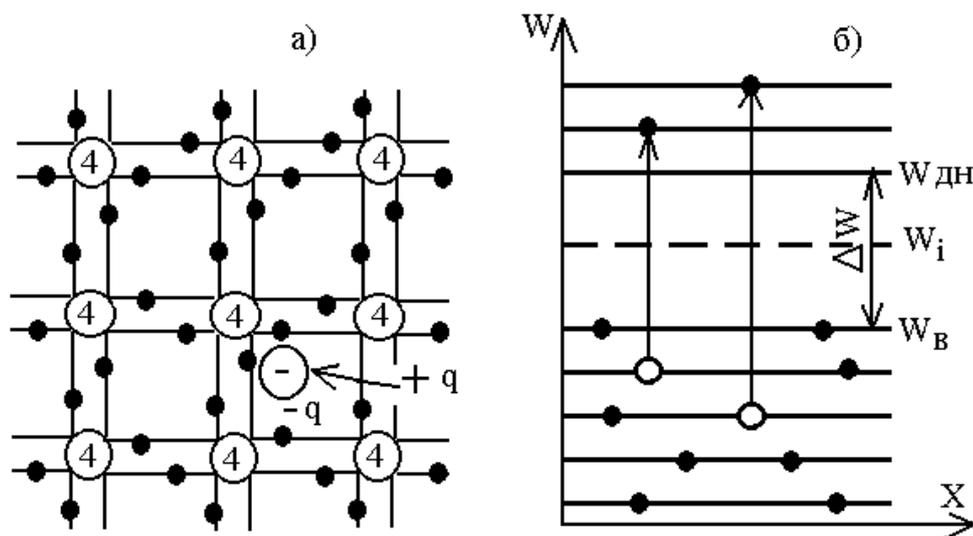


Рисунок 3.2. Условное обозначение кристаллической решетки (а) и энергетическая диаграмма (б) полупроводника с собственной электропроводностью.

Заполнение дырки электроном из соседней ковалентной связи можно представить как перемещение дырки. Процесс образования пар электрон-дырка называют **генерацией** свободных носителей заряда. Одновременно с процессом генерации протекает процесс **рекомбинации** носителей, при котором электрон восстанавливает ковалентную связь.

2 Полупроводники с электронной электропроводностью

При введении в 4-валентный полупроводник примесных 5-валентных атомов (фосфора P, сурьмы Sb) атомы примесей замещают основные атомы в узлах кристаллической решетки. Четыре электрона атома примеси вступают в связь с четырьмя валентными электронами соседних атомов основного полупроводника. Пятый валентный электрон слабо связан со своим атомом и при сообщении ему незначительной энергии, называемой энергией активации, отрывается от атома и становится свободным. Примеси, увеличивающие число свободных электронов, называют донорными или просто донорами.

Полупроводники, в которых концентрация свободных электронов в зоне проводимости превышает концентрацию дырок в валентной зоне, назы-

ваются полупроводниками, с **электронной** электропроводностью или полупроводниками n-типа.

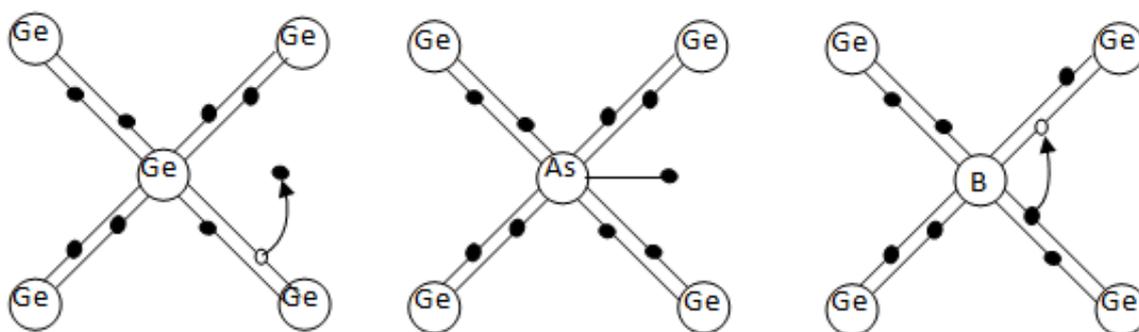


Рисунок 3.3. Упрощенная плоская схема расположения атомов в кристалле германия, где каждая черточка означает связь, осуществляемую одним электроном.

Подвижные носители заряда, преобладающие в полупроводнике, называют основными. Соответственно те носители заряда, которые находятся в меньшем количестве, называются **неосновными** для данного типа полупроводника. В полупроводнике n-типа основными носителями заряда являются электроны, а неосновными - дырки.

3 Полупроводники с дырочной электропроводностью

Если в кристалле 4-валентного элемента часть атомов замещена атомами 3-валентного элемента (галлия, индия), то для образования четырех ковалентных связей у примесного атома не хватает одного электрона. Этот электрон может быть получен от атома основного элемента полупроводника за счет разрыва ковалентной связи. Разрыв связи приводит к появлению дырки, так как сопровождается образованием свободного уровня в валентной зоне. Примеси, захватывающие электроны из валентной зоны, называют акцепторными или акцепторами. Энергетические уровни примесных атомов располагаются вблизи валентной зоны.

Уже при комнатной температуре электроны из валентной зоны переходят на уровни акцепторов. За счет ионизации атомов исходного материала из валентной зоны часть электронов попадает в зону проводимости. Однако электронов в зоне проводимости значительно меньше, чем дырок в валентной зоне. Поэтому дырки в таких полупроводниках являются основными, а электроны - неосновными

Такие полупроводники носят название полупроводников с дырочной электропроводностью или полупроводников р-типа.

Вопросы для самопроверки

1. Какие вещества относятся к полупроводникам?
2. Что является отличительным признаком полупроводников?
3. Какая примесь называется донорной?
4. Что такое генерация и рекомбинация носителей зарядов?
5. Охарактеризуйте полупроводники р- типа.
6. В полупроводниках какого типа основными носителями заряда являются электроны?

Лекция №4

ПОЛУПРОВОДНИКОВЫЙ ДИОД

Цель: изучить понятие полупроводникового диода, его физическую модель, виды, его параметры и обозначение.

Задачи:

1. Изучить типы электронно-дырочных переходов.
2. Проанализировать физическую модель p-n перехода
3. Рассмотреть процессы при прямом и обратном включении p-n перехода.
4. Изучить сущность полупроводникового диода
5. Провести классификацию полупроводниковых диодов
6. Изучить свойства выпрямительных диодов
7. Рассмотреть эксплуатационные и предельные параметры диодов.

Основным элементом большинства полупроводниковых приборов являются неоднородные структуры – электрические переходы – переходный (тонкий) слой в полупроводниковом материале на границе между двумя областями с различными типами электропроводности или разными значениями удельной электропроводности, причем одна из областей может быть металлом.

Важнейшие варианты неоднородных структур: электронно-дырочный или p-n переход, барьер Шоттки, возникающий на границе полупроводника и металла, гетеропереход.

1 Типы электронно-дырочного перехода

Электронно-дырочным (p-n) переходом называют область вблизи контакта (металлургической границы) полупроводников с электронной (n-типа) и дырочной (p-типа) электропроводностью, в которой существует собственное (диффузионное) электрическое поле.

Электронно-дырочный переход создается в одном кристалле полупроводника. Обычно его создают изменением типа проводимости кристалла вдоль одного выбранного направления, например, введением примесей акцепторного типа в полупроводник n-типа. Для этих целей используются сложные и разнообразные технологических операций.

По методу получения электронно-дырочные переходы можно классифицировать следующим образом: диффузионный, планарный, сплавной, микросплавной, эпитаксиальный.

Диффузионный переход - электрический переход, полученный в результате диффузии атомов примеси в полупроводник. Диффузионные переходы, образованные в результате диффузии примеси сквозь отверстие в защитном слое, созданном на поверхности полупроводника, называют планарными.

Сплавной переход — электрический переход, образованный в результате сплавления на малую глубину металла или сплава, содержащего донорные либо акцепторные примеси. Разновидностью сплавного перехода является микросплавной переход, образованный в результате сплавления на малую глубину металла или сплава, предварительно нанесенного на поверхность полупроводника в виде тонкой пленки.

Эпитаксиальный переход - электрический переход, образуемый эпитаксиальным наращиванием — созданием на монокристаллической подложке (полупроводниковой пластине) слоя полупроводника, повторяющего кристаллическую структуру подложки.

По резкости металлургической границы электронно-дырочные переходы классифицируются на плавный, ступенчатый (резкий) и сверхрезкий переходы, а в зависимости от распределения примеси в р- и n - областях - на симметричные, несимметричные и односторонние. Несимметричные переходы обозначают $p^+—n$ или $n^+—p$.

2. Физическая модель р-n перехода.

В р-области основными носителями тока являются дырки, образовавшиеся в результате захвата электронов атомами примеси; акцепторы при этом становятся отрицательными ионами. Кроме того, р-области имеется небольшое число неосновных носителей заряда – электронов, возникающих вследствие перевода тепловым движением электронов из валентной зоны непосредственно в зону проводимости (этот процесс также немного увеличивает и число дырок).

В n – области основные носители тока – электроны, отданные донорами в зону проводимости (доноры при этом превращаются в положительные ионы), неосновные носители – дырки, образующиеся при переходе электронов из валентной зоны в зону проводимости за счет теплового движения.

Равновесная концентрация дырок в р-области (p_{p_0}) значительно превышает их концентрацию в n-области (p_{n_0}). Аналогично для электронов выполняется условие $n_{n_0} > n_{p_0}$.

Поскольку концентрация электронов в n-области значительно больше, чем в р-области, то часть электронов диффундирует из n-области в р-область. При этом в р-области вблизи металлургической границы окажутся избыточные электроны. Эти электроны будут рекомбинировать с дырками до тех пор, пока не будет выполнено условие равновесия $n_{p_0} \times p_{p_0} = n_i^2$

Приконтактная область оказывается сильно обедненной носителями тока и приобретает большое сопротивление.

В результате диффузии носителей заряда нарушается электрическая нейтральность примыкающих к металлургической границе частей монокристалла полупроводника. В приконтактной области дырочного полупроводника после диффузии из нее дырок остаются не скомпенсированные ионизированные акцепторы (отрицательные неподвижные заряды), а в электронном полупроводнике не скомпенсированные ионизированные доноры (положительные неподвижные заряды) (рис. 1.6, в). Образуется область объемного заряда, состоящая из двух разноименно заряженных слоев и возникает собственное (диффузионное) электрическое поле напряженностью $E_{\text{соб}}$ (рис. 1.7, а).

Этому полю соответствует разность потенциалов U_k между n- и р-областями, называемая контактной (рис. 1.7, г). Потенциал n-областями положителен по отношению к потенциалу р-области. Собственное электрическое поле является тормозящим для основных носителей заряда и препятствует дальнейшей диффузии основных носителей через контакт.

В статистической физике доказывается, что условием равновесия между соприкасающимися полупроводниками или металлом и полупроводником является равенство полных энергий, соответствующих уровням Ферми. Поэтому равновесное состояние устанавливается при такой высоте потенциального барьера, при которой уровни Ферми обеих областей располагаются на одинаковой высоте.

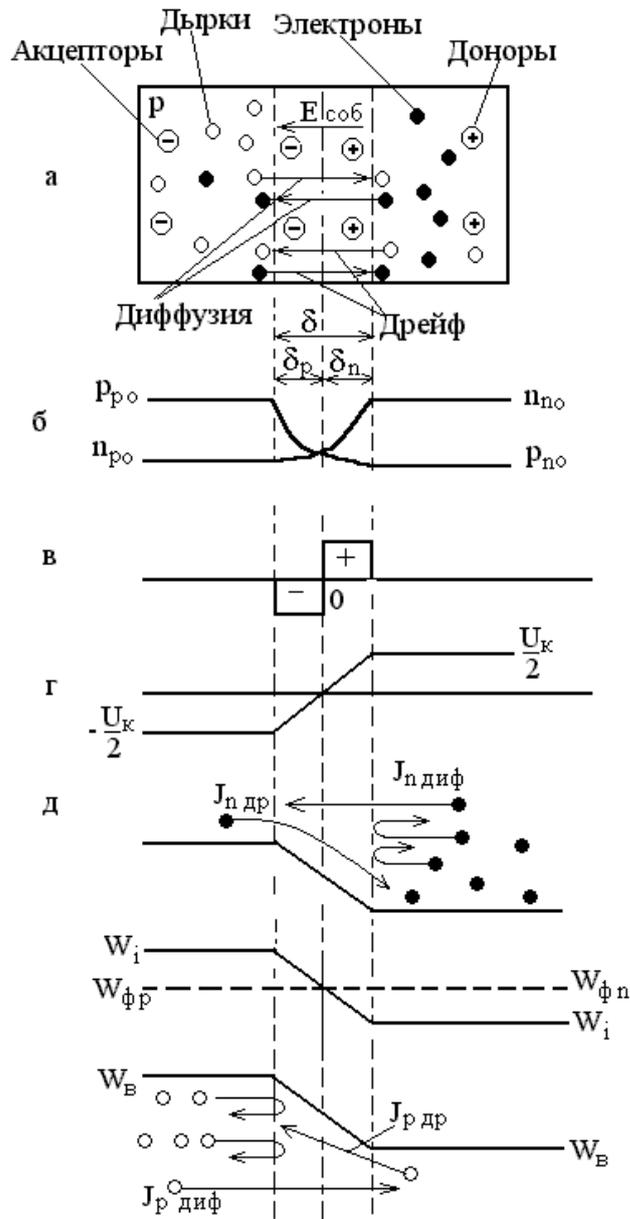
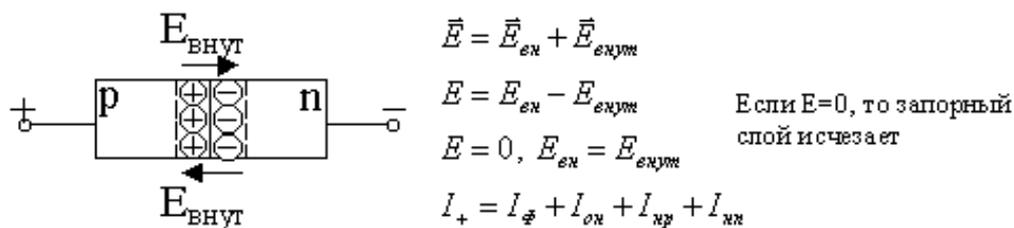


Рисунок 4.1. Равновесное состояние p-n перехода.

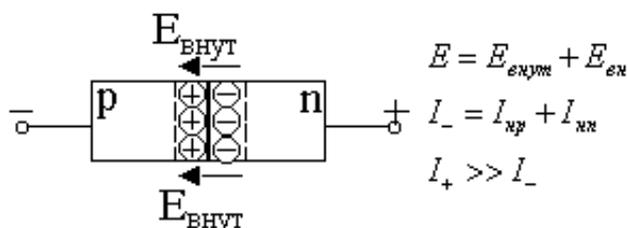
При использовании p-n перехода в полупроводниковых приборах к нему подключается внешнее напряжение. Величина и полярность этого внешнего напряжения определяют электрический ток, проходящий через p-n переход.

Если положительный полюс источника питания подключается к p-области, а отрицательный полюс - к n-области, то включение p-n перехода называют прямым. При изменении указанной полярности источника питания включение p-n перехода называют обратным.

Прямое включение p-n перехода



Обратное включение p-n перехода



2. Понятие полупроводникового диода и технологии его изготовления

.Полупроводниковым диодом называют двухэлектродный полупроводниковый прибор обладающий односторонней проводимостью.

В качестве выпрямляющего перехода применяют $p-n$ -переход, гетеропереход, выпрямляющий контактом металл – полупроводник (диоды Шотки), структура типа $p-i-n$.

В большинстве случаев полупроводниковые диоды с $p-n$ переходом делают несимметричными

Область $p-n$ перехода с большей концентрацией основных носителей называют эмиттером, а область с малой концентрацией – базой. Следовательно, количество неосновных носителей, инжектируемых из эмиттера в базу, значительно больше, чем в противоположную сторону.

Наибольшее применение получили германиевые и кремневые полупроводниковые диоды, а также диоды выполненные на основе арсенида галлия.

Электронно-дырочные переходы современных диодов создают методами диффузии, эпитаксии, ионного легирования или микросплавления.

3 Классификация полупроводниковых диодов.

К полупроводниковым диодам относят обширную группу приборов с $p-n$ -переходом, контактом металл —полупроводник, гетеропереходом и др.

Диоды можно классифицировать по ряду признаков, важнейшими из которых являются:

физические эффекты и явления, определяющие механизм работы приборов;

используемые материалы: германиевые, кремневые, из арсенида галлия. Реже применяются другие полупроводниковые материалы: селен, карбид кремния;

конструктивное исполнение: одноэлементные, многодиодные;

технологическое исполнение: плоскостные и точечные;

по параметрам;

По назначению и области применения диоды можно разделить на следующие типы: выпрямительные, СВЧ диоды, импульсные диоды.

Классификация и условные графические обозначения полупроводниковых диодов приведено на рисунке 4.2.

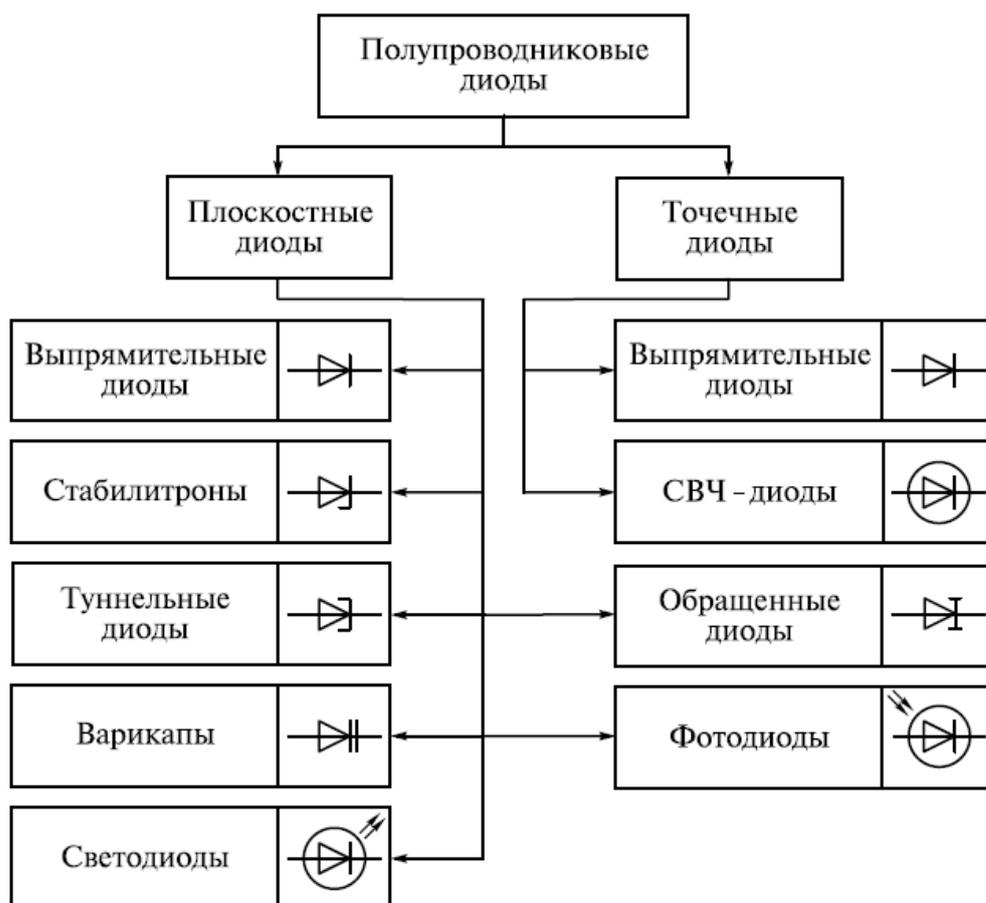


Рисунок 4.2. Классификация и условные графические обозначения полупроводниковых диодов

4 Выпрямительные диоды.

Выпрямительные полупроводниковые диоды применяются для преобразования переменного тока в пульсирующий, то есть его выпрямление. Основной характеристикой выпрямительных диодов является вольтамперная, приведенная на рисунке 4.3.

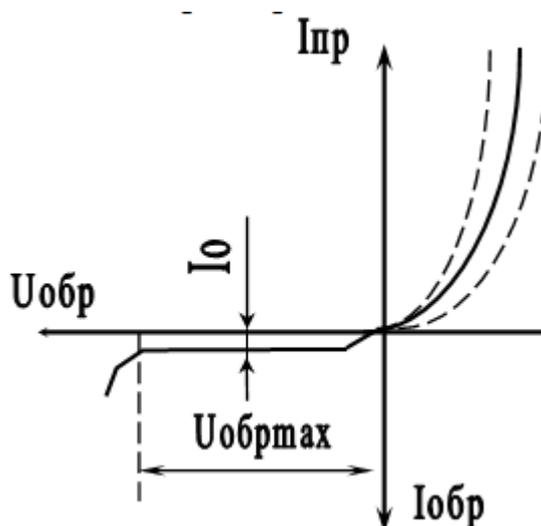


Рисунок 4.3. Вольтамперная характеристика выпрямительных диодов

5 Параметры и характеристики выпрямительных диодов:

Электрические свойства выпрямительных полупроводниковых диодов характеризуют следующие параметры:

- крутизна вольт-амперной характеристики для прямого включения $S = \Delta I / \Delta U$. С увеличением напряжения крутизна возрастает;

прямое падение напряжения $U_{пр}$, определяемое при заданном прямом токе $I_{пр}$;

обратный ток $I_{обр}$, определяемый при заданном обратном напряжении, близком к напряжению пробоя $U_{проб}$;

прямое и обратное сопротивления постоянному току

$$R_{пр} = U_{пр} / I_{пр};$$

$$R_{обр} = U_{обр} / I_{обр};$$

прямое и обратное дифференциальные сопротивления, или сопротивления диода переменному току,

$$R_{i пр} = \Delta U_{пр} / \Delta I_{пр};$$

$$R_{i обр} = \Delta U_{обр} / \Delta I_{обр};$$

граничная частота $f_{гр}$, характеризующая частотные свойства полупроводникового диода;

максимально допустимое амплитудное значение обратного напряжения $U_{обр\ max}$, которое диод выдерживает без повреждения (выбирается на 10... 15 % меньше $U_{проб}$);
максимально допустимый выпрямленный ток $I_{вып\ max}$;
максимально допустимое амплитудное значение прямого тока (в импульсе) $I_{пр\ max}$, которое диод выдерживает без повреждения;
допустимый интервал рабочих температур окружающей среды.

6 . Предельные параметры диода

1. Предельная рабочая температура:

Германиевых диодов – 85°C ;

Кремниевых диодов – 150°C ;

2. $U_{обр.\ max}$ – наибольшая амплитуда обратного напряжения

3. $I_{пр.\ max}$ – допустимое значение выпрямленного тока до 1000А.

4. $P_{рас.\ max}$ – максимальная рассеиваемая мощность (достигает сотни кВт).

Вопросы для самопроверки

1. Охарактеризуйте физическую модель р-п перехода при прямом и обратном включении
2. Что такое полупроводниковый диод?
3. Перечислите технологии изготовления п/п диода
4. Какие существуют виды диодов?
5. Какие параметры диодов относятся к эксплуатационным, а какие к предельным?
6. Изобразите и поясните ВАХ диода

Лекция № 5

РАЗНОВИДНОСТИ ДИОДОВ. ОДНО- И ДВУХПОЛУПЕРИОД- НАЯ СХЕМЫ ВЫПРЯМЛЕНИЯ

Цель: изучить разновидности диодов, такие как стабилитрон, фотодиод и светодиод, а также одно- и двухполупериодную схемы выпрямления .

Задачи:

1. Рассмотреть характеристики стабилитрона, его назначение и ВАХ
2. Рассмотреть характеристики специальных полупроводниковых приборов.
3. Изучить работу одно- и двухполупериодной схемы выпрямления.

1. Характеристики стабилитрона

Стабилитрон – это полупроводниковый диод, работающий в области управляемого лавинного пробоя обратным напряжением и служит для стабилизации напряжения.

Стабилитроны представляют собой кремниевые полупроводниковые диоды, вольт-амперные характеристики которых (рис. 5.1) имеют участки малой зависимости обратного напряжения от обратного тока и прямого напряжения от прямого тока. Указанные участки называются участками стабилизации. Стабилитроны используются в стабилизаторах тока и напряжения.

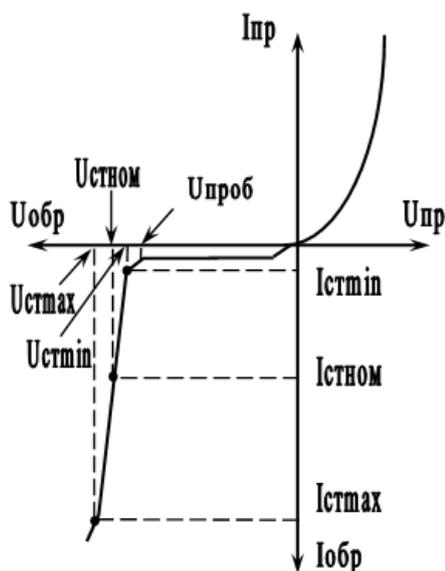


Рис.5.1. Вольт-амперная характеристика стабилитрона (стабистора)

2 Основные параметры стабилитрона.

Основные параметры стабилитронов:

номинальное напряжение стабилизации $U_{\text{ст ном}}$ — среднее напряжение стабилизации, измеренное при определенном токе стабилизации $I_{\text{ст}}$;

разброс напряжения стабилизации $\Delta U_{\text{ст}}$ — интервал напряжений, в пределах которого находится напряжение стабилизации $\Delta U_{\text{ст}} = (U_{\text{ст.max}} - U_{\text{ст.min}})$;

средний температурный коэффициент напряжения стабилизации $\alpha_{U_{\text{ст}}}$, показывающий, на сколько процентов изменится $U_{\text{ст}}$ при изменении температуры окружающей среды на 1 К;

дифференциальное сопротивление $R_{\text{ст}}$, определяющее стабилизационные свойства прибора и показывающее, в какой степени $U_{\text{ст}}$ зависит от тока

$$R_{\text{диф}} = dU_{\text{ст}}/dI_{\text{ст}} = \Delta U_{\text{ст}} / (I_{\text{ст max}} - I_{\text{ст min}});$$

минимально допустимый ток стабилизации $I_{\text{ст min}}$;

максимально допустимый ток стабилизации $I_{\text{ст max}}$.

3. Электрическая схема параметрического стабилизатора напряжения

В простейшем параметрическом стабилизаторе стабилитрон VD, нагрузочный резистор $R_{\text{н}}$ и балластный резистор $R_{\text{б}}$ включаются по схеме, показанной на рис. 5.2. При этом $U_{\text{н}} = U_{\text{вх}} - (I_{\text{ст}} + I_{\text{н}}) R_{\text{б}}$.

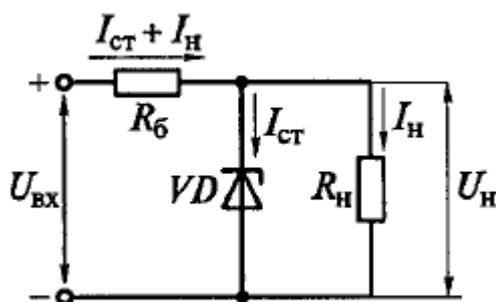


Рисунок 5.2. Электрическая схема параметрического стабилизатора напряжения

Напряжение $U_{\text{н}}$ можно считать постоянным и равным напряжению стабилизации $U_{\text{ст}}$, если ток стабилитрона изменяется в пределах $I_{\text{ст min}} < I_{\text{ст}} < I_{\text{ст max}}$.

1.2. Специальные полупроводниковые приборы

К специальным полупроводниковым приборам относят варикапы, туннельные диоды, свето- и фотодиоды, фототранзисторы, оптроны и др.

Варикапы представляют собой полупроводниковые диоды, в которых используется свойство р—п-перехода изменять свою емкость в зависимости от приложенного к нему напряжения (рис. 5.3).

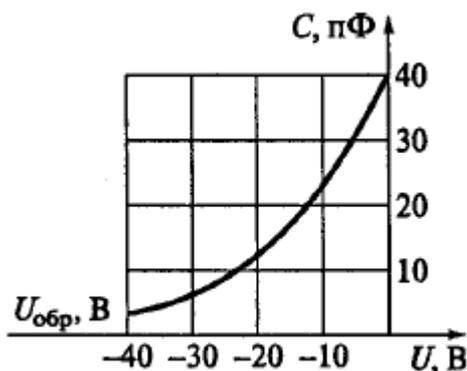


Рисунок 5.3. Зависимость барьерной емкости р—п-перехода от обратного напряжения

Основные параметры варикапов:

емкость C_v измеряемая при $U_{обр}$;

коэффициент перекрытия по емкости $K_c = C_{v\max}/C_{v\min} = 2... 18$.

Варикапы используются главным образом для управления колебательными контурами в системах автоподстройки частоты радио- и телевизионных приемников, а также в возбудителях передатчиков с частотной модуляцией и параметрических усилителях, работающих в диапазоне СВЧ.

Туннельные диоды — это полупроводниковые диоды, действие которых основано на туннельном эффекте, т. е. просачивании электронов через потенциальный барьер. Такие диоды используют для усиления и генерирования электрических колебаний в диапазоне СВЧ. Участок 1—2 вольт-амперной характеристики туннельного диода (рис. 5.4) обладает отрицательным дифференциальным сопротивлением.

Основные параметры туннельных диодов:

токи I_p, I_v и напряжения U_p, U_v пика и впадины вольт-амперной характеристики;

напряжение раствора U_p — прямое напряжение на второй восходящей ветви характеристики (точка 3 на рис. 1.10), при котором $I_{пр} = I_p$;

отношение тока пика к току впадины I_p/I_v .

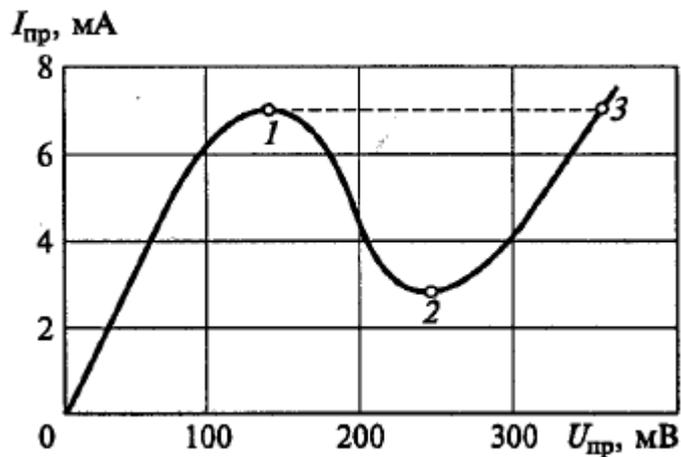


Рисунок 5.4. Вольт-амперная характеристика туннельного диода

Разновидностью туннельных диодов являются обращенные диоды, которые используются как выпрямительные для обработки сигналов малой амплитуды (до 0,3...0,6 В) (рис. 5.5).

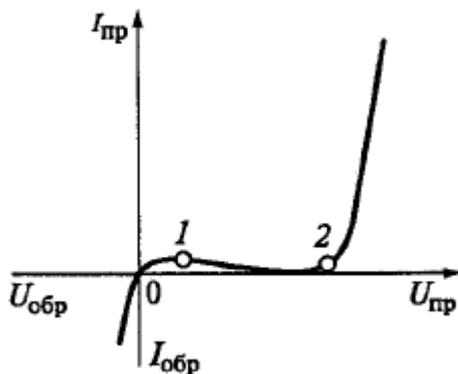


Рисунок 5.5. Вольт-амперная характеристика обращенного диода

5 Светодиоды

Светодиоды - полупроводниковые приборы, генерирующие при прохождении через них электрического тока оптическое излучение, которое в видимой области воспринимается как одноцветное. Их применяют в устройствах визуального отображения информации. Основными характеристиками светодиодов:

- яркостная характеристика;
- прямой ток;
- прямое и обратное напряжение.

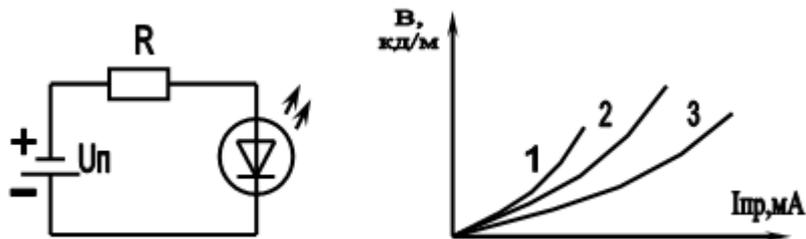


Рисунок 5.6. Схема включения светодиода и яркостная характеристика. Вольт-амперная характеристика светодиода показана на рис. 5.7.

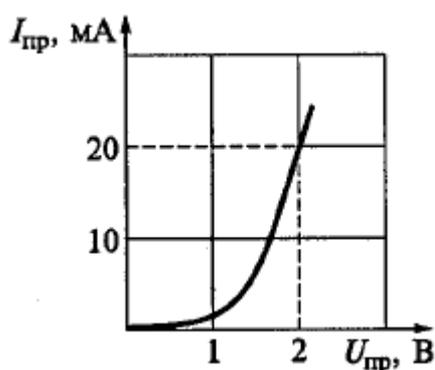


Рисунок 5.7. Вольт-амперная характеристика светодиода

4. Фотодиоды

Фотодиоды — это полупроводниковые приборы р – n типа, принцип действия которых основан на внутреннем фотоэффекте.

При освещении в р – n переходе возникает фотоэлектрический эффект и в результате неравновесной концентрации носителей зарядов в р– и n–областях появляются электроны и дырки. Электроны и дырки пары движутся к р – n переходу, где разделяются и под действием контактной разности потенциалов не основные носители зарядов проходят через переход, образуя фототок.

Фотодиоды, работающие в фотогальваническом режиме, используются в преобразователях солнечной энергии в электрическую для питания различных устройств, длительное время работающих автономно. Семейство вольт-амперных характеристик фотодиода для разных значений светового потока Φ приведено на рис. 5.9.

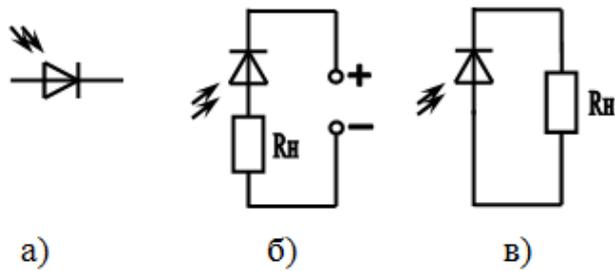


Рисунок 5.8. Обозначения фотодиода (а), фотодиодный (б) и вентильный (в) режимы работы.

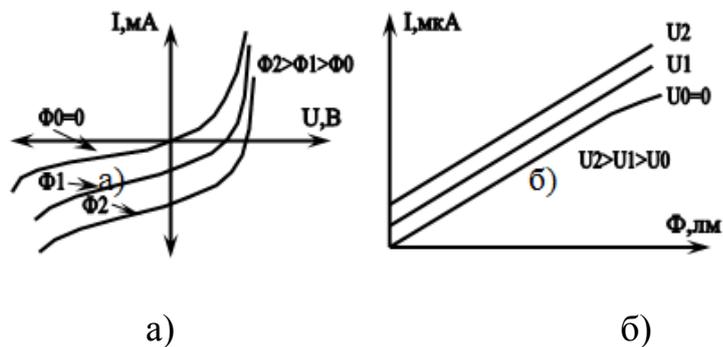


Рисунок 5.9. Вольт-амперная и световая характеристика фотодиодов

Характеристики фотодиодов: а – вольтамперная, б – световая; Φ_0 Φ_1 Φ_2 и U_0 U_1 U_2 световые потоки и напряжения на светодиоде.

Фототранзисторы представляют собой транзисторы, в которых управление коллекторным током осуществляется на основе внутреннего фотоэффекта. В отличие от фотодиодов, которые обладают недостаточной чувствительностью, фототранзисторы являются активными элементами электрической цепи, поскольку не только образуют фототок, зависящий от освещенности, но и усиливают его. Семейство вольт-амперных характеристик и условные графические обозначения фототранзисторов показаны на рис. 5.10.

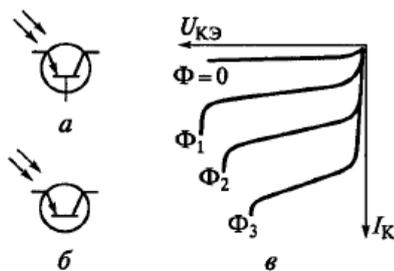


Рисунок 5.10. Условные графические обозначения фототранзисторов с выводами от базы (а) и без выводов (б) и семейство вольт-амперных характеристик фототранзистора (е)

Оптроны {оптопары) — это полупроводниковые приборы, состоящие из заключенных в общий корпус светоизлучающего диода и фотодиода, фототранзистора (рис. 1.15, а) или фототиристора (рис. 1.15, б). Основное назначение оптронов — гальваническая развязка электрических цепей, между которыми существует оптическая связь для передачи информации.

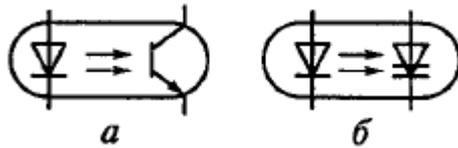


Рис. 5.11. Условные графические обозначения транзисторного (а) и тиристорного (б) оптронов.

6 Однофазные схемы выпрямления

Различают два способа (схемы) выпрямления:

1. Однополупериодное – ток в нагрузке протекает только при положительной полуволне питающего напряжения.

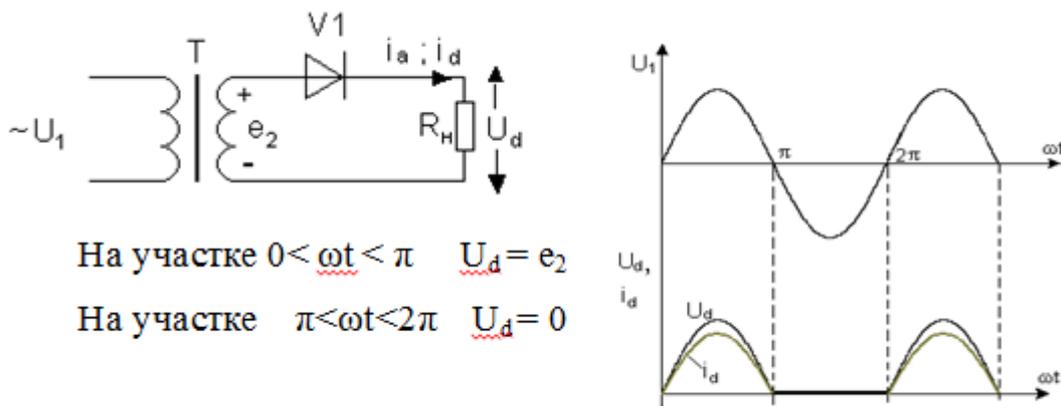


Рисунок 5.12. Однополупериодная схема выпрямления

Достоинство однополупериодной схемы выпрямления: простота и дешевизна.

Недостатки: токи и напряжения прерывисты, низкое среднее значение токов и напряжений. В схеме велик уровень напряжения пульсаций.

2. Двухполупериодное – ток в нагрузках протекает при обеих полуволнах.

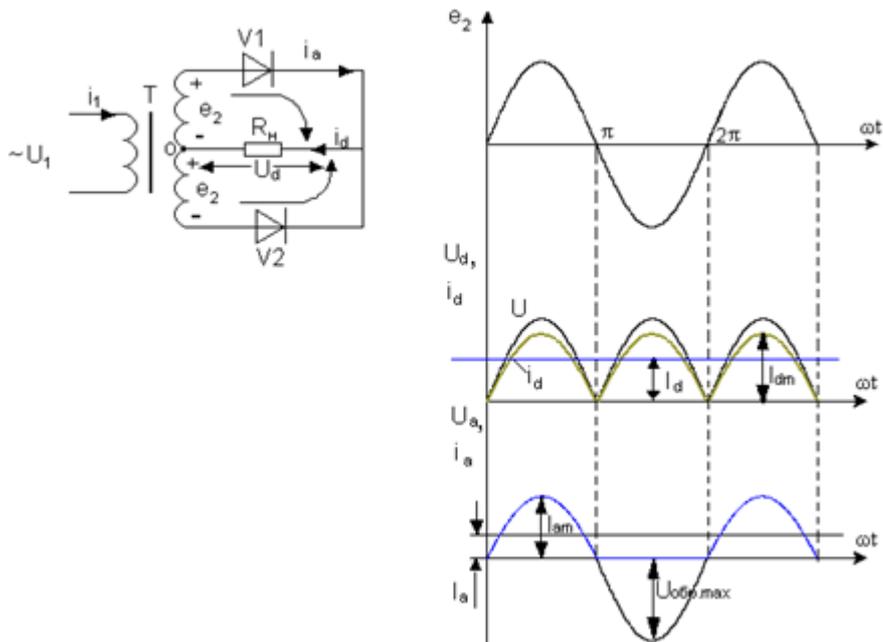


Рисунок 5.13. Однофазная двухполупериодная схема выпрямления с нулевой точкой.

Токи и напряжения имеют одинаковую полярность, но в каждый момент времени изменяют свою величину. Напряжение включает в себя как постоянную, так и переменную составляющую.

Вопросы для самопроверки

1. Что такое стабилитрон?
2. Поясните ВАХ стабилитрона
3. На чем основан принцип действия фотодиодов?
4. Что такое светодиод?
5. Какие способы выпрямления вам известны?
6. Какой участок вольт-амперной характеристики обращенного диода (см. рис. 1.11), является рабочим?
7. Используя вольт-амперную характеристику светодиода (см. рис. 1.12), определите его U_{np} и R_{np} при $I_{np} = 10$ мА.
8. Начертите схему включения светодиода.
9. Какое физическое явление в светодиодах позволяет преобразовывать энергию электрического тока в энергию видимого или инфракрасного излучения?
10. Какими параметрами оценивается эффективность работы светодиодов?

11. Начертите схему включения фотодиодов для случаев применения их в качестве фотогенераторов и фотопреобразователей.
12. Начертите схему включения фототранзистора в электрическую цепь.
13. Перечислите основные недостатки оптронов, ограничивающих их применение.

Лекция №6

БИПОЛЯРНЫЕ ТРАНЗИСТОРЫ

Цель: изучить классификацию транзисторов, сущность биполярного транзистора.

Задачи:

1. Провести классификацию транзисторов
2. Рассмотреть понятие биполярного транзистора.
3. Изучить принцип работы биполярного транзистора
4. Рассмотреть входные и выходные характеристики транзистора
5. Проанализировать предельные параметры транзистора

1 Классификация транзисторов

1. По исходному материалу: германиевые; кремниевые;
2. По рассеиваемой мощности: малой; средней; большой.
3. По частоте сигнала: низкочастотные; средней частоты; высокочастотные; СВЧ;
4. По типу различают биполярные и полевые транзисторы.

2 Понятие биполярного транзистора.

Биполярный транзистор - это полупроводниковый прибор с двумя взаимодействующими выпрямляющими электрическими переходами и тремя (или более) выводами, усилительные свойства которого обусловлены явлениями инжекции и экстракции неосновных носителей заряда.

Таким образом, в биполярном транзисторе используются одновременно два типа носителей зарядов: электроны и дырки (отсюда и название - биполярный).

Полевой транзистор - это полупроводниковый прибор, усилительные свойства которого обусловлены потоком основных носителей, протекающим через проводящий канал, и управляемым электрическим полем.

В последние годы выпускаются также транзисторы, сочетающие свойства биполярных и полевых транзисторов (IGBT, БТИЗ - биполярный транзистор с изолированным затвором).

Биполярный транзистор содержит два р-п-перехода, которые образованы тремя областями с чередующимися типами проводимости. В зависимости от порядка чередования этих областей различают транзисторы р-п-р- и п-р-п-типа (рис. 6.1). Транзисторы, у которых средняя область обладает электронной проводимостью, называются транзисторами типа р-п-р. Транзисторы, у которых средняя область обладает положительной проводимостью - транзисторами типа п-р-п. Физические процессы, протекающие в транзисторах обоих типов аналогичны.

Работа биполярного транзистора основана на взаимодействии двух р-п-переходов. Это взаимодействие обеспечивается тем, что толщину b средней области транзистора (базы), разделяющей переходы, выбирают меньше длины свободного пробега (диффузионной длины) L носителей заряда в этой области (обычно $b \ll L$).

В зависимости от технологии изготовления транзистора концентрация примесей в базе может быть распределена равномерно или неравномерно.

При равномерном распределении внутреннее электрическое поле отсутствует, и неосновные носители заряда, попавшие в базу, движутся в ней вследствие процесса диффузии. Такие транзисторы называют диффузионными или бездрейфовыми.

При неравномерном распределении концентрации примесей в базе имеется внутреннее электрическое поле (при сохранении в целом электронейтральности базы), и неосновные носители заряда движутся в ней в результате дрейфа и диффузии, причем дрейф играет доминирующую роль. Такие транзисторы называют дрейфовыми.

В зависимости от того, какой из трех выводов транзистора является общим для входа и выхода четырехполюсника, различают схему включения транзистора с общей базой (ОБ), общим эмиттером (ОЭ) и общим коллектором (ОК).

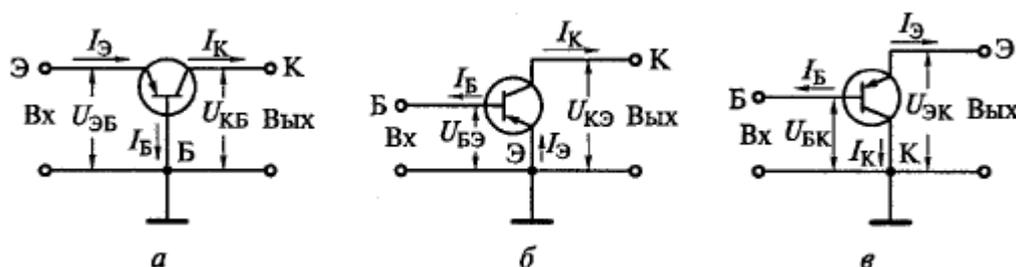


Рисунок 6.1. Схемы включения биполярного транзистора: а — с общей базой (ОБ); б — с общим эмиттером (ОЭ); в — с общим коллектором (ОК)

3. Принцип работы биполярного транзистора.

Усилительные свойства биполярного транзистора обусловлены явлениями инжекции носителей заряда (неосновных для базы носителей заряда из эмиттера в базу) и их экстракции (из базы в коллектор).

В результате снижения потенциального барьера р-п-перехода эмиттер-база дырки из области эмиттера диффундируют через р-п-переход в базу (инжекция дырок), а электроны из области базы в эмиттер (схема с общей базой). Так как удельное сопротивление базы высокое (т.е. концентрация примесей не высока), то дырочный поток больше электронного.

Во всех реальных транзисторах ширина базы w во много раз меньше диффузионной длины дырок L_p : $w \ll 0.2L_p$. И поэтому большинство дырок, инжектированных в базу, не успевают рекомбинировать в ней и втягиваются в коллектор (экстракция дырок).

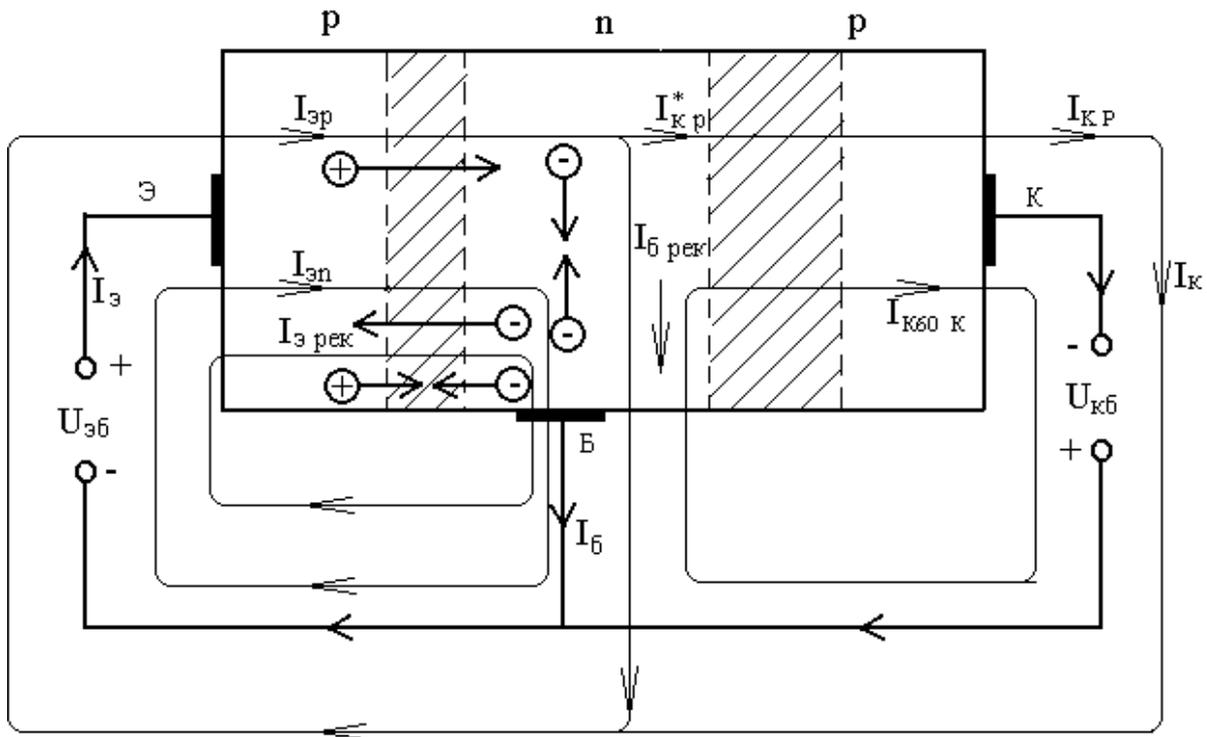


Рисунок 6.2 Физические процессы в БТ.

Если при обратном напряжении в коллекторном переходе нет лавинного размножения проходящих через него носителей, то ток за коллекторным переходом $I_{Кр}$ равен

$$I_{Kp} = I_{Kp}^* = I_{Эp} - I_{Bрек} = \chi_B I_{Эp} = \gamma_{Э} \chi_B I_{Э} = \alpha I_{Э}$$

где

$$\gamma_{Э} = \frac{I_{Эp}}{I_{Э}} = \frac{I_{Эp}}{I_{Эp} + I_{Эn}} = \frac{I_{Э} - I_{Эn}}{I_{Э}} = 1 - \frac{I_{Эn}}{I_{Э}} \quad \text{- коэффициент инжекции}$$

$I_{Эp}$ - дырочная составляющая тока р-п-перехода;

$I_{Эn}$ - электронная составляющая тока р-п-перехода;

$I_{Э}$ - полный ток;

$$\chi_B = \frac{I_{Kp}^*}{I_{Эp}} = \frac{I_{Эp} - I_{Bрек}}{I_{Эp}} = \frac{I_{Эp} - 0,01I_{Эp}}{I_{Эp}} \quad \text{- коэффициент переноса}$$

I_{Kp} , $I_{Эp}$ - токи коллекторного и эмиттерного переходов, созданные дырками.

$$\alpha = \gamma_{Э} \chi_B = I_{Kp} / I_{Э} \quad \text{- статический коэффициент передачи тока.}$$

Ток коллектора I_K в активном режиме работы транзистора представляет собой сумму двух составляющих:

$$I_K = I_{Kp} + I_{KB0} = \alpha I_{Э} + I_{KB0},$$

где $I_{Kp} = \alpha I_{Э}$ - части эмиттерного тока, который определяется потоком носителей заряда, инжестированных в базу и дошедших (за вычетом рекомбинировавших в базе) до коллекторного перехода.

I_{KB0} - обратный ток коллекторного перехода, создаваемый неосновными носителями областей базы и коллектора, как в обычном р-п переходе (диоде).

Составляющая I_{KB0} протекает в цепи коллектор - база при $I_{Э} = 0$ (холостой ход, "обрыв" цепи эмиттера), и не зависит от тока эмиттера

Величина

$$\alpha = \frac{I_K - I_{KB0}}{I_{Э}} \cong \frac{I_{Kp}}{I_{Э}}$$

называемая статическим (интегральным) коэффициентом передачи эмиттерного тока, составляет 0,95—0,999.

В транзисторе, включенном по схеме ОЭ, ток коллектора

$$I_K = \frac{\alpha}{1 - \alpha} I_B + \frac{I_{KB0}}{1 - \alpha} = \beta I_B + I_{KЭ0}, \quad (6.1)$$

где $\beta = \frac{\alpha}{1-\alpha}$ — статический (интегральный) коэффициент передачи базового тока;

$I_{KЭ0} = \frac{I_{KB0}}{1-\alpha} = (1+\beta)I_{KB0}$ - обратный ток коллекторного перехода в схеме ОЭ при $I_B = 0$, т. е. при разомкнутом выводе базы.

Коэффициент усиления напряжения транзистора $K_U = \frac{U_{вых}}{U_{вх}}$

Коэффициент усиления тока транзистора $K_I = \frac{I_{вых}}{I_{вх}}$

Коэффициент усиления мощности транзистора $K_P = \frac{P_{вых}}{P_{вх}}$

Коэффициент усиления тока транзистора, включенного по схеме с ОБ, $\alpha = \Delta I_K / \Delta I_{Э}$ при $U_{KB} = \text{const}$.

Коэффициент усиления тока транзистора, включенного по схеме с ОЭ, $\beta = \Delta I_K / \Delta I_B$ при $U_{KЭ} = \text{const}$.

Поскольку $\Delta I_K = \Delta I_{Э} - \Delta I_B$, между α и β существует следующая зависимость: $\beta = \frac{\alpha}{1-\alpha}$

4 Включение транзистора по схеме с ОЭ

В зависимости от выполняемых в схеме функций транзисторы могут работать в следующих трех режимах:

активный режим — это режим, при котором эмиттерный переход включен в прямом направлении, а коллекторный - в обратном. В данном режиме транзисторы используются для усиления электрических сигналов с минимальными искажениями;

режим отсечки — на оба перехода транзистора (эмиттерный и коллекторный) поданы обратные напряжения, транзистор закрыт и обладает высоким сопротивлением, т.е. эквивалентен разомкнутому контакту реле;

режим насыщения — на оба перехода транзистора поданы прямые напряжения, сопротивление транзистора близко к нулю, т.е. он эквивалентен замкнутому контакту реле.

При работе с транзисторными схемами используют два семейства вольт-амперных характеристик — входные и выходные (рис. 6.3 и 6.4).

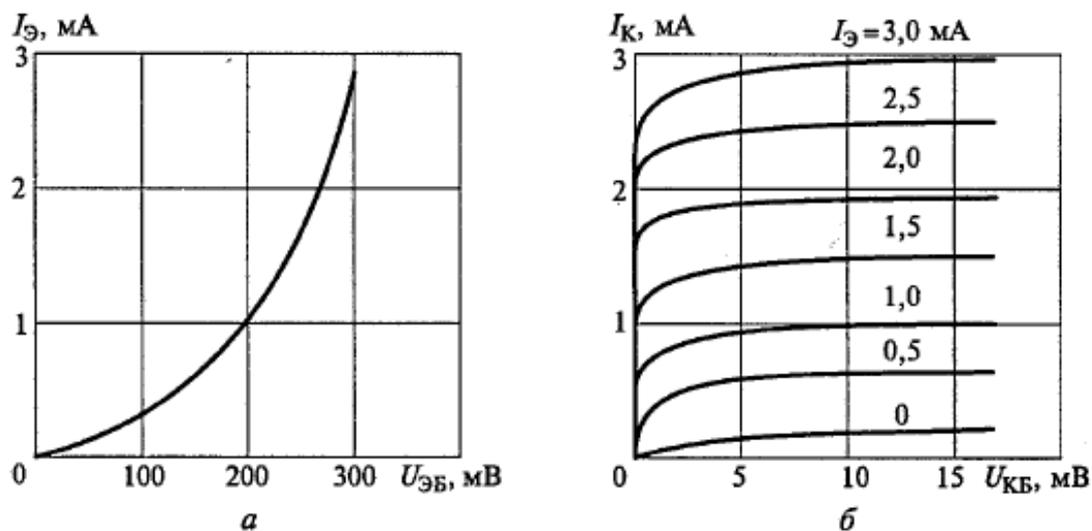


Рис. 6.3. Входная (а), и выходные (б) вольт-амперные характеристики биполярного транзистора в схеме с ОБ

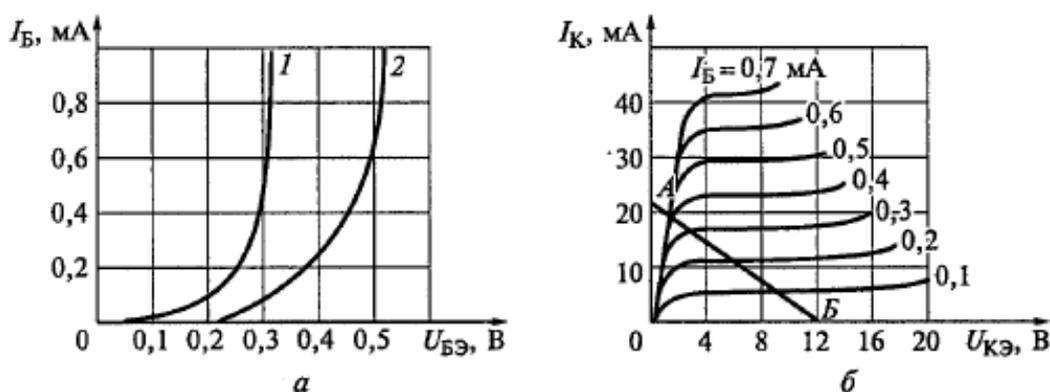


Рис. 6.4 Вольт-амперные характеристики биполярного транзистора в схеме с ОЭ: а – входные (1, 2) б– выходные и нагрузочные (А – Б).

Рассмотрим цепь, которая содержит транзистор, включенный по схеме с ОЭ, и резистор в цепи коллектора (рис. 6.5). При прохождении тока I_K через резистор R_K : $U_{КЭ} = E_K - I_K R_K$ откуда $I_K = (E_K - U_{КЭ}) / R_K$.

Графическая зависимость между током I_K и напряжением $U_{КЭ}$ представляет собой прямую линию, называемую нагрузочной характеристикой.

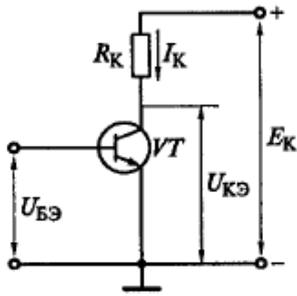


Рис. 6.5. Схема включения биполярного транзистора с ОЭ

Определим точки, через которые проходит нагрузочная характеристика. При $U_{КЭ} = 0$ $I_K = I_{Kmax} = E_K/R_K$. При $I_K = 0$ $U_{КЭ} = E_K$. Таким образом, нагрузочная характеристика проходит через точки, положение которых определяется следующими значениями:

$I_{Kmax} = E_K/R_K$ (абсцисса первой точки), $U_{КЭ} = 0$ (ордината первой точки) и $I_K = 0$ (абсцисса второй точки) и $U_{КЭ} = E_K$ (ордината второй точки).

В режиме усиления малых сигналов, когда нелинейностью вольт-амперной характеристики можно пренебречь, транзистор эквивалентен линейному четырехполюснику (рис. 6.6).

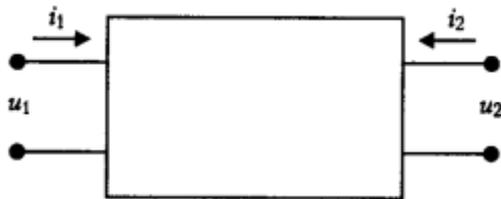


Рисунок 6.6. Представление транзистора в виде четырехполюсника.

Связь между входными и выходными параметрами линейного четырехполюсника определяется следующей системой уравнений:

$$\Delta I_1 = h_{11} \Delta I_1 + h_{12} \Delta U_2$$

$$\Delta I_2 = h_{21} \Delta I_1 + h_{22} \Delta U_2$$

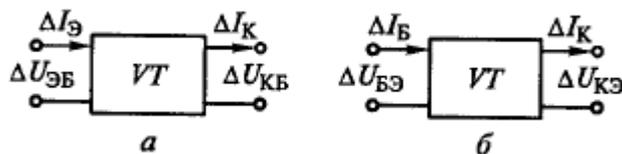


Рисунок 6.7. Линейные четырехполюсники, эквивалентные транзисторам с ОБ (а) и ОЭ (б).

Для схем с ОБ и ОЭ системы уравнений принимают соответственно следующий вид:

$$\Delta U_{ЭБ} = h_{11Б} \Delta I_{Э} + h_{12Б} \Delta U_{КБ}$$

$$\Delta I_{К} = h_{21Б} \Delta I_{Э} + h_{22Б} \Delta U_{КБ}$$

$$\Delta U_{БЭ} = h_{11Э} \Delta I_{Б} + h_{12Э} \Delta U_{КЭ}$$

$$\Delta I_{К} = h_{21Э} \Delta I_{Б} + h_{22Э} \Delta U_{КЭ} \quad ,$$

где $h_{11Б}$, $h_{11Э}$ – входные сопротивления, определяемые в режиме короткого замыкания на выходе;

$h_{12Б}$, $h_{12Э}$ – коэффициенты внутренней обратной связи, определяемые в режиме холостого хода на входе;

$h_{21Б}$, $h_{21Э}$ – коэффициенты передачи тока, определяемые в режиме короткого замыкания на выходе;

$h_{22Б}$, $h_{22Э}$ – выходные полные проводимости, определяемые в режиме холостого хода на выходе.

Указанные величины называют h -параметрами транзистора.

На практике численные значения параметров определяют по статическим характеристикам транзистора. Покажем, как это делается, на примере схемы с ОЭ.

Параметры $h_{11Э}$, и $h_{12Э}$ определяют по входным характеристикам транзистора. Для того чтобы в точке А определить параметр $h_{11Э}$ строят характеристический прямоугольный треугольник, располагая точку А на середине гипотенузы. Тогда катетами треугольника будут приращения напряжения $\Delta U_{БЭ}$ и тока $\Delta I_{Б}$. При этом напряжение на коллекторе сохраняется **неизменным**, то есть выполняется условие $\Delta U_{КЭ} = 0$. Численное значение параметра $h_{11Э}$ определяется по формуле

$$h_{11Э} = \left. \frac{\Delta U_{БЭ}}{\Delta I_{Б}} \right|_{U_{КЭ} = const}$$

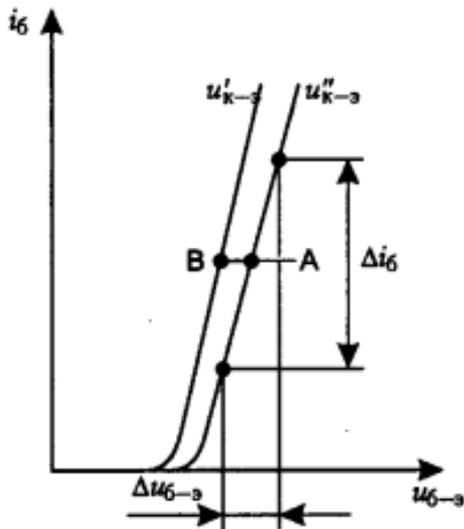


Рисунок 6.8. Входная характеристика транзистора

Для определения параметра $h_{12Э}$ надо располагать двумя входными характеристиками, снятыми при различных напряжениях $U_{КЭ}$. Через точку А проводят горизонтальную линию, которая пересекает две входных характеристики. Отрезок АВ пропорционален приращению напряжения $\Delta U'_{БЭ}$, а приращение напряжения на коллекторе равно разности напряжений, при которых сняты входные характеристики, то есть $\Delta U = U''_{КЭ} - U'_{КЭ}$. Следовательно,

$$h_{12Э} = \frac{\Delta U'_{БЭ}}{\Delta U_{КЭ}} \Big| I_B = const$$

Параметры $h_{22Э}$ и $h_{21Э}$ определяют по выходным характеристикам транзистора (рис. 6.9). Для того чтобы в точке А определить параметр $h_{22Э}$, строят характеристический треугольник, располагая точку А на середине гипотенузы. Тогда катетами треугольника будут приращения напряжения $\Delta U_{КЭ}$ и тока ΔI_K при выполнении условия $I_6 = const$. Численное значение параметра определяют по формуле:

$$h_{22Э} = \frac{\Delta I_K}{\Delta U_{КЭ}} \Big| I_B = const$$

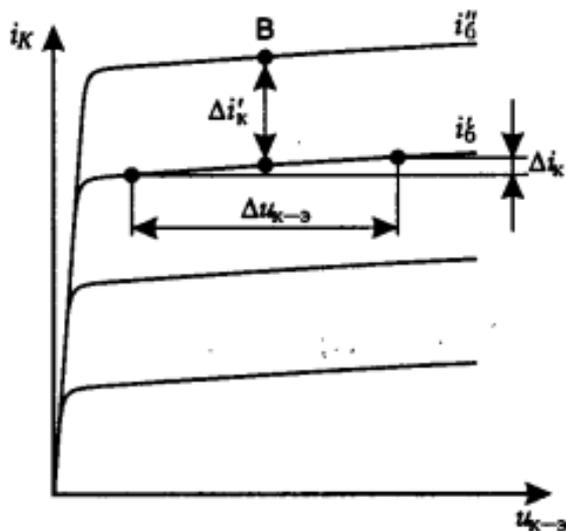


Рисунок 6.9. Выходная характеристика транзистора

Для определения параметра $h_{21Э}$ через точку А проводят вертикальную линию, которая пересекает две соседних выходных характеристики. Отрезок АВ пропорционален приращению тока ΔI_K , а приращение тока базы равно разности токов, при которых сняты выходные характеристики, то есть

$\Delta I_B = I'_B - I''_B$. Следовательно,

$$h_{21Э} = \frac{\Delta I'_K}{\Delta I_B} \Big| U_{КЭ} = const$$

Аналогичным образом определяют численные значения параметров для схемы с ОБ:

$$h_{11Б} = \frac{\Delta U_{ЭБ}}{\Delta I_Э} \Big| U_{КБ} = const$$

$$h_{12Б} = \frac{\Delta U_{ЭБ}}{\Delta U_{КБ}} \Big| I_Э = const$$

$$h_{22Б} = \frac{\Delta I_K}{\Delta U_{КБ}} \Big| I_Э = const$$

$$h_{21Б} = \frac{\Delta I_K}{\Delta I_Э} \Big| U_{КБ} = const$$

Основными параметрами, характеризующими транзистор как активный нелинейный четырехполюсник (при любой схеме включения), являются:

5 Предельные параметры.

1. $U_{кэ} < U_{кэ \max}$ – может произойти коллекторный пробой.
2. $I_{к} < I_{к \max}$ – аналогичное.
3. $P_{к} = I_{к} \cdot U_{кэ} < P_{к \max}$ – максимальная рассеиваемая мощность для предотвращения перегрева транзистора.
4. $f_{гр}$ – граничная частота коэффициента передачи тока, когда $h_{21э}$ становится равным единице.

Вопросы для самопроверки

1. По каким критериям можно проклассифицировать транзисторы?
2. Как подается напряжение на эмиттерный и коллекторный переход?
3. Объясните принцип работы биполярного транзистора
4. Что представляют собой входные и выходные характеристики транзистора
5. Что включают в себя предельные параметры?

Лекция №7

ПОЛЕВЫЕ ТРАНЗИСТОРЫ, ФОТОТРАНЗИСТОРЫ, ТИРИСТОРЫ.

Цель: изучить сущность полевых транзисторов и фототранзисторов.

Задачи:

1. Рассмотреть отличие полевого транзистора от биполярного
2. Проанализировать входные и выходные характеристики полевого транзистора
3. Рассмотреть основные параметры полевых транзисторов.
4. Дать краткую характеристику фототранзисторам и тиристорам.

1 Определение полевого транзистора

Полевым (униполярным) транзистором (ПТ) называют трехэлектродный полупроводниковый прибор, в котором протекание рабочего ток обусловлено движением носителей заряда только одного типа — или электронов или дырок (основных носителей) под действием продольного электрического поля в токопроводящем слое (канале), а управление током осуществляется изменением проводимости канала при воздействии электрического поля, поперечного к направлению тока и создаваемого напряжением, приложенным к управляющему электроду (затвору).

Токопроводящий канал соединяет две сильнолегированные области. Область, из которой в проводящий канал втекают носители заряда, называется **истоком**, область, в которую из проводящего канала вытекают носители заряда, - **стоком**.

Электрод, служащий для регулирования поперечного сечения канала, называют затвором. Полевые транзисторы подразделяют на транзисторы с р-каналом и n-каналом.

Условные графические обозначения полевых транзисторов приведены на рис. 7.1

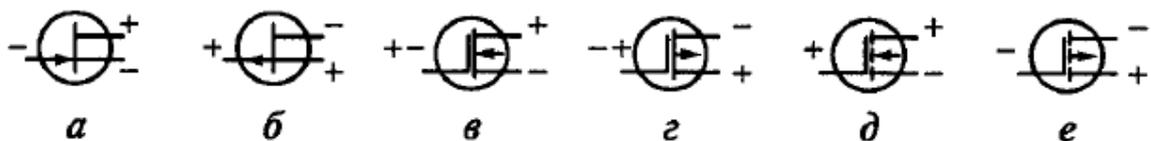


Рис.7.1 Условные графические обозначения полевых транзисторов:

а, б — с управляющим р—п-переходом; в, г — с изолированным затвором и встроенным каналом; д, е — с изолированным затвором и индуцированным каналом

Полевой транзистор с управляющим переходом – это полевой транзистор, у которого затвор электрически отделён от канала закрытым р-п переходом. В транзисторе с n-каналом – основные носители электроны, которые движутся вдоль канала от истока к стоку, образуя ток стока I_c . Между затвором и истоком приложено напряжение, запирающее р-п переход, образованный n-областью канала и р-областью затвора, таким образом $U_{си} > 0$ и $U_{зи} \leq 0$, т.е полярность должна быть противоположна.

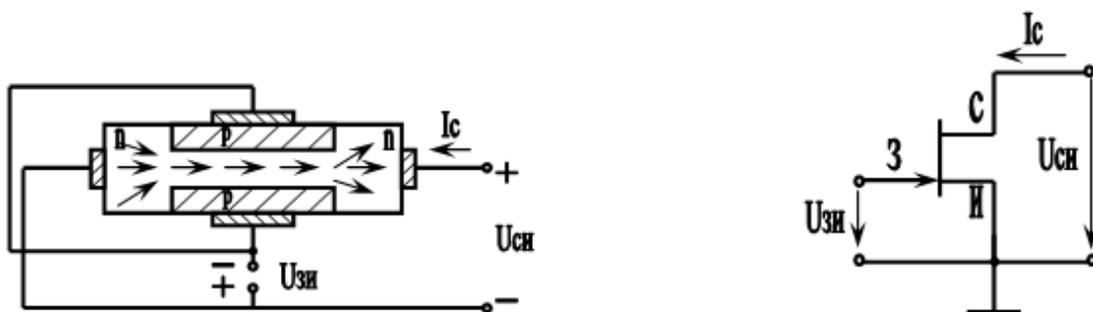


Рисунок 6.2. Полевой транзистор с управляющим переходом.

При $U_{зи} = 0$ – сопротивление канала минимальное, а ток стока максимальный. $I_{c.max}$, при $U_{си} = U_{ст max}$ называется **начальным током стока** и нормируется при $U_{си.max}$. При подаче запирающего напряжения на р-п переход между затвором и каналом на границах возникает равномерный слой, обеднённый носителями и обладающий высоким удельным сопротивлением, при этом канал обедняется носителями заряда и ток стока соответственно уменьшается. Напряжение $U_{зи}$, при котором I_c уменьшается до минимального нормированного уровня называют напряжением отсечки.

2 Входные и выходные характеристики полевых транзисторов

Полевые транзисторы описываются двумя ВАХ:

- стоковой (выходной) – $I_c = f(U_{си}) | U_{зи} = \text{const}$;
- стоко - затворной (входной) – $I_c = f_1(U_{зи}) | U_{си} = \text{const}$.

Полярность включения напряжения стока, стоковая и стокозатворная ВАХ полевого транзистора с управляющим р-п-переходом и каналом n-типа показаны на рис. 6.3,а,б,в соответственно. На рис. 6.4, а, б, в приведены полярность включения напряжения стокового источника питания, стоковая и стокозатворная ВАХ для МДП-транзистора со встроенным каналом. Полярность включения напряжения стока, стоковая и стокозатворная ВАХ для МДП-транзистора с индуцированным каналом n -типа изображены на рис. 6.5, а, б, в соответственно.

На характеристиках отчетливо видны две области работы полевых транзисторов:

область I — область нарастания тока стока при увеличении напряжения (омическая область);

область II — область активной работы транзистора на пологом участке стоковой ВАХ. При работе в этой области канал открыт и стоковое напряжение $U_{си}$ превышает по абсолютному значению напряжение перекрытия канала. Ток стока практически не зависит от напряжения $U_{си}$.

Отсечка тока стока наблюдается в том случае, когда напряжение на затворе по абсолютному значению превышает напряжение отсечки $U_{зиотс}$ (для транзисторов с управляющим р-п-переходом и со встроенным каналом) или пороговое напряжение $U_{зипор}$ (для транзисторов с индуцированным каналом).

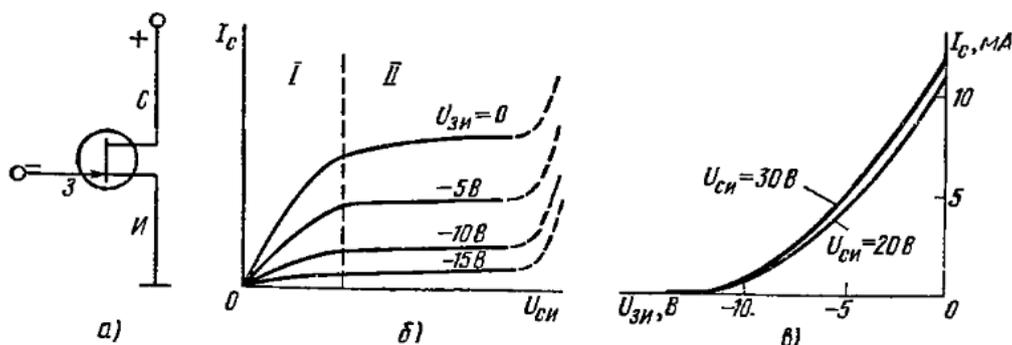


Рисунок 6.3. Полярность включения напряжения стока, стоковая и стокозатворная ВАХ полевого транзистора с управляющим р-п-переходом и каналом n-типа

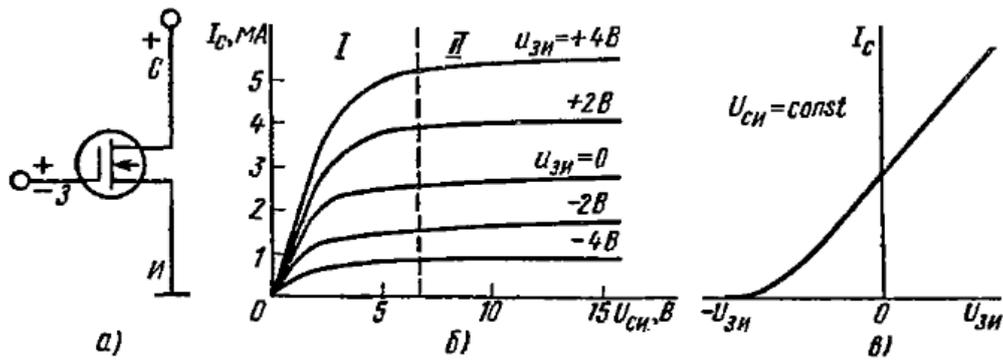


Рисунок 6.4. Полярность включения напряжения стока, стоковая и стокзатворная ВАХ МДП-транзистора с встроенным каналом п - типа

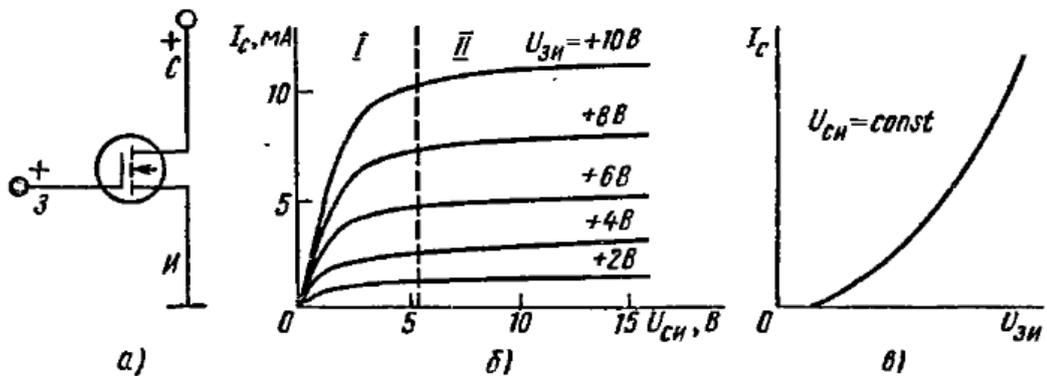


Рисунок 6.5. Полярность включения напряжения стока, стоковая и стокзатворная ВАХ МДП-транзистора с индуцированным каналом п - типа

Для полевого транзистора с управляющим р-п-переходом, работающего в омической области, т. е. при напряжении

$U_{СИ} < |U_{отс}| - |U_{ЗИ}|$, стоковая характеристика описывается уравнением

$$I_C = I_{Снас0} = \left[2 \frac{U_{СИ}}{U_{отс}} \left(1 - \frac{U_{ЗИ}}{U_{отс}} \right) - \left(\frac{U_{СИ}}{U_{отс}} \right)^2 \right], \quad (2.30)$$

где $I_{Снас0}$ — ток насыщения стока при $U_{ЗИ} = 0$. При напряжении

$|U_{СИ}| < |U_{отс}| - |U_{ЗИ}|$, ток стока I_C достигает максимального

значения. В пологой части характеристики, когда $|U_{СИ}| > |U_{отс}| - |U_{ЗИ}|$, ток стока определяется соотношением

$$I_C = I_{Снас0} \left(1 - \frac{U_{ЗИ}}{U_{отс}} \right)^2.$$

Стокзатворная характеристика на пологом участке также описывается последним уравнением.

Полевые транзисторы с изолированным затвором отличаются тем, что канал в них изолирован тонким слоем диэлектрика, обычно SiO_2 , а р – п переход в них отсутствует. Такие полевые транзисторы часто называют МДП – транзисторами (металл-диэлектрик – полупроводник) или МОП – транзисторами (металл – оксид – полупроводник). Вольтамперные характеристики этих транзисторов в основном аналогичны характеристикам транзисторов с управляющим р – п переходом, но в тоже время изолированный затвор позволяет работать в области положительных напряжений между затвором и истоком, т.е. при $U_{зи} > 0$. В этой области расширение канала и увеличение тока стока I_c .

3 Основными параметры полевых транзисторов

Для оценки свойств полевых транзисторов используют следующие параметры:

Одним из основных параметров полевого транзистора, характеризующего его усилительные свойства, является крутизна стокзатворной характеристики:

$$S = dI_c/dU_{зи} | U_{си} = \text{const}$$

, где dI_c — изменение тока стока; $dU_{зи}$ — изменение напряжения между затвором и истоком; $U_{си}$ — напряжение между стоком и истоком;

Данный параметр определяет влияние изменения напряжения на затворе на изменение тока стока. Числовое значение крутизны зависит от напряжения на затворе. С увеличением $U_{зи}$ ток стока и крутизна уменьшаются. Для пологой части стоковой характеристики крутизну определяют из соотношения

$$S = S_{\max} \left(1 - \frac{|U_{зи}|}{|U_{отс}|} \right), \quad (2.32)$$

где $S_{\max} = 1/R_{к0}$ максимальная крутизна при $U_{зи} = 0$; $R_{к0}$ — минимальное сопротивление канала при $U_{зи} = 0$.

К параметрам полевых транзисторов также относится внутреннее сопротивление транзистора, определяемое как отношение изменения напряжения стока к соответствующему изменению тока стока при постоянном напряжении на других электродах:

$$R_i = \left. \frac{dU_{СИ}}{dI_C} \right|_{U_{ЗИ} = \text{const}}$$

Коэффициент усиления транзистора μ определяется отношением приращений напряжения стока и затвора при холостом ходе на стоке:

$$\mu = \left. \frac{dU_{СИ}}{dU_{ЗИ}} \right|_{I_C = \text{const}}$$

Параметры S_{iy} , R_i и μ связаны между собой соотношением $\mu = S_{iy} R_i$.

Цепь затвора характеризуют входным сопротивлением транзистора

$$R_{вх} = \left. \frac{dU_{ЗИ}}{dI_3} \right|_{U_{СИ} = \text{const}}$$

В качестве предельно допустимых параметров нормируются:

$U_{си \max}$ и $U_{зи \max}$, $I_{с \max}$.

Подобно биполярным транзисторам, полевые транзисторы используют в трех основных схемах включения: с общим истоком (ОИ), общим стоком (ОС) и общим затвором (ОЗ). Усилительный каскад по схеме ОИ аналогичен схеме ОЭ.

Он дает большое усиление тока и мощности и инвертирует фазу входного напряжения. Коэффициент усиления каскада по напряжению приблизительно равен $K_U \approx S_{iy} R_i$.

Схема ОС подобна эмиттерному повторителю и называется истоковым повторителем. Коэффициент усиления каскада по напряжению близок к единице. Усилитель по схеме ОС имеет сравнительно небольшое выходное

сопротивление и большое входное сопротивление. Кроме того, здесь значительно уменьшена входная емкость, что способствует увеличению входного сопротивления на высоких частотах.

Схема ОЗ аналогична схеме ОБ. Схема не усиливает тока, поэтому коэффициент усиления по мощности во много раз меньше, чем в схеме ОИ. Эта схема имеет малое входное сопротивление, так как входным током является ток стока. Фаза напряжения при усилении не инвертируется.

4 Фототранзисторы.

Биполярный фототранзистор полупроводниковый прибор с двумя р – n переходами — предназначен для преобразования светового потока в электрический ток. Биполярный фототранзистор подобен обычному биполярному транзистору, между выводами коллектора и базы которого включен фотодиод. Таким образом, ток фотодиода оказывается током базы фототранзистора и создает усиленный в N раз ток в цепи коллектора. Если на фототранзистор подается только электрический сигнал, его параметры почти не отличаются от параметров обычного транзистора. Фототранзисторы можно включать по схемам со свободным коллектором, со свободной базой и со свободным эмиттером.

Полевые фототранзисторы аналогичны полевым транзисторам с р-n-затвором. Запирающее напряжение на р-n-переходе закрывает транзистор. Под действием освещения обратный ток затвора, как и в фотодиоде возрастает. При этом потенциал затвора возрастает и полевой фототранзистор открывается.

5 Тиристоры.

Тиристоры – двух или трёх электродные полупроводниковые приборы на основе трёх и более р-n переходов, вольтамперные характеристики которого имеют участок отрицательного динамического сопротивления.

Тиристоры бывают:

- 1) диодные, неуправляемые или динисторы;

2) триодные, управляемые или тринистроны, которые в свою очередь бывают управляемые по катоду и аноду.

3) Симметричные диодные и триодные тиристоры называемые симисторами, которые также бывают управляемые и неуправляемые.

Вопросы для самопроверки

1. Что такое полевой транзистор?
2. Постройте входные и выходные характеристики полевых транзисторов.
3. Какие знаете основными параметры полевых транзисторов?
4. Что такое фототранзистор?
5. Что такое тиристор?