

**А. В. КИРИЛЛОВ
А. В. КОСТЫЛЕВ
Н. Д. ЯСЕНЕВ**

ОСНОВЫ ЭЛЕКТРОНИКИ

Учебное пособие

Министерство науки и высшего образования
Российской Федерации
Уральский федеральный университет
имени первого Президента России Б. Н. Ельцина

А. В. Кириллов, А. В. Костылев, Н. Д. Ясенов

ОСНОВЫ ЭЛЕКТРОНИКИ

Учебное пособие

*Под общей редакцией кандидата технических наук,
доцента А. В. Кириллова*

Рекомендовано методическим советом
Уральского федерального университета
для студентов вуза, обучающихся по направлению подготовки
13.03.02 — Электроэнергетика и электротехника

Екатеринбург
Издательство Уральского университета
2022

УДК 655.5(075)

ББК 76.17я73

К43

Рецензенты:

начальник научно-инженерного центра ЗАО «Автоматизированные системы и комплексы» канд. техн. наук, доц. *С. И. Шилин*;

ООО «ПФ Тяжпромэлектропривод», генеральный директор канд. техн. наук, доц. *В. И. Зеленцов*

Кириллов, Андрей Владиславович.

К43 Основы электроники : учебное пособие / А. В. Кириллов, А. В. Костылев, Н. Д. Ясенев ; под общ. ред. канд. техн. наук, доц. А. В. Кириллова ; М-во науки и высшего образования РФ. — Екатеринбург : Изд-во Урал. ун-та, 2022. — 103, [1] с.

ISBN 978-5-7996-3531-2

В учебном пособии рассмотрены вопросы полупроводниковой электроники: физические основы, принцип действия и характеристики основных полупроводниковых приборов.

Материал изложен в соответствии с программой обучения дисциплины «Основы электроники» для студентов, обучающихся по направлению подготовки 13.03.02 — «Электроэнергетика и электротехника».

Библиогр.: 9 назв. Табл. Рис. 62. Прил. 1.

УДК 655.5(075)

ББК 76.17я73

ISBN 978-5-7996-3531-2

© Уральский федеральный
университет, 2022

Оглавление

Введение	5
1. Электропроводность полупроводников. Беспримесные и примесные полупроводники	7
1.1. Особенности электропроводности твердых тел.....	9
1.2. Носители заряда в беспримесных (чистых) полупроводниках	11
1.3. Носители заряда в примесных полупроводниках	14
1.4. Токи в полупроводниках.....	18
Тесты к главе 1	21
2. Полупроводниковые диоды	23
2.1. Электрические процессы в p - n переходе при отсутствии внешнего напряжения	24
2.2. Электрические процессы в p - n переходе при наличии внешнего напряжения	26
2.4. Емкости p - n перехода	33
2.3. Пробой p - n перехода	31
2.5. Стабилитроны	34
Тесты к главе 2	37
3. Биполярные транзисторы	38
3.1. Общие положения	38
3.2. Принцип действия транзистора и его основные параметры	39
3.3. Статические вольт-амперные характеристики транзистора	44
3.4. Параметры схем включения биполярного транзистора	51
3.5. Режим переключения биполярного транзистора в схеме с общим эмиттером	52
Тесты к главе 3	54

4. Униполярные (полевые) транзисторы.....	55
4.1. Полевой транзистор с p - n переходом	55
4.2. МДП-транзисторы	59
4.3. Работа полевых транзисторов в импульсном режиме.....	64
4.4. Сравнительная характеристика МДП- и биполярного транзистора	66
Тесты к главе 4	68
5. Биполярный транзистор с изолированным затвором (IGBT).....	69
Тесты к главе 5	74
6. Тиристоры	76
6.1. Типы тиристоров.....	76
6.2. Принцип действия однооперационного тиристора	77
Тесты к главе 6	84
7. Оптоэлектронные полупроводниковые приборы.....	86
7.1. Классификация оптоэлектронных приборов	86
7.2. Полупроводниковый излучатель	87
7.3. Полупроводниковый приемник излучения	88
7.4. Оптоэлектронные пары	94
Тесты к главе 7	97
Библиографический список	99
Приложение. Ответы к тестовым вопросам.....	101

Введение

Электроника представляет собой область науки и техники, включающую исследование явлений взаимодействия электронов с электромагнитными полями в вакууме, газовой среде или твердом теле, а также разработку и практическое применение приборов, в которых это взаимодействие используется для преобразования электромагнитной энергии (электронных приборов).

В составе электроники выделяют следующие области: вакуумную, твердотельную и квантовую электронику. Каждая из областей содержит ряд разделов и направлений.

Раздел объединяет комплексы однородных физико-химических явлений и процессов, которые имеют фундаментальное значение для разработки многих классов электронных приборов данной области. Совокупность разделов всех областей электроники составляет физическую электронику.

Направление охватывает методы конструирования и расчета электронных приборов, родственных по принципам действия или по выполняемым функциям, а также способы изготовления этих приборов. Совокупность направлений всех областей электроники образует техническую электронику. Одним из основных направлений технической электроники является промышленная электроника, обеспечивающая внедрение электронных устройств во все отрасли производства, науки, техники и быта.

Разделы и направления твердотельной электроники — полупроводниковая, диэлектрическая электроника, магнитоэлектроника, акустоэлектроника и пьезоэлектроника, криоэлектроника, разработка и изготовление резисторов. Наиболее значимой на современном этапе развития твердотельной электроники является полупроводниковая.

Электроника находится в стадии интенсивного развития, для нее характерно появление новых областей и создание новых направлений в уже существующих областях. Одна из основных проблем, стоящих перед электроникой, связана с требованием улучшения технических параметров электронных систем с одновременным уменьшением их габаритов и потребляемой энергии. Решение проблемы миниатюризации электронной аппаратуры связано с современным этапом развития электроники — микроэлектроникой.

Микроэлектроника — это область электроники, охватывающая исследование, конструирование, производство и применение электронных функциональных узлов, блоков и устройств в микроминиатюрном интегральном исполнении. В курсе «Основы электроники» рассмотрены вопросы полупроводниковой электроники: физические основы, принцип действия и характеристики основных полупроводниковых приборов.

Данное пособие может быть использовано для самостоятельного изучения теоретического материала по курсу «Основы электроники»; в конце каждой главы приведены контрольные тесты, ответы на которые даны в приложении.

Электропроводность полупроводников. Беспримесные и примесные полупроводники

Особенности электропроводности твердых тел ► Носители заряда в беспримесных (чистых) полупроводниках ► Носители заряда в примесных полупроводниках ► Токи в полупроводниках

Полупроводники занимают по электропроводности промежуточное положение между металлами (проводниками электрического тока) и диэлектриками. Особенность электропроводности полупроводников обусловливается спецификой распределения по энергиям электронов атомов, которое характеризуется энергетической диаграммой полупроводника.

В соответствии с принципами квантовой механики, электроны атома могут обладать определенными значениями энергии, т. е. находиться на определенных энергетических уровнях, которые называются разрешенными (рис. 1.1).

В изолированном атоме существует конечное число энергетических уровней, на каждом из них могут находиться одновременно не более двух электронов. Электроны низших уровней сильно связаны с атомом. По мере увеличения энергии уровня, занимаемого электроном, эта связь ослабевает.

В качестве внешних воздействий, способных увеличивать энергию электронов, могут быть:

- кванты тепла (фононы), иными словами — нагрев;

- кванты света (фотоны), иными словами — освещение;
- электрическое поле;
- магнитное поле.

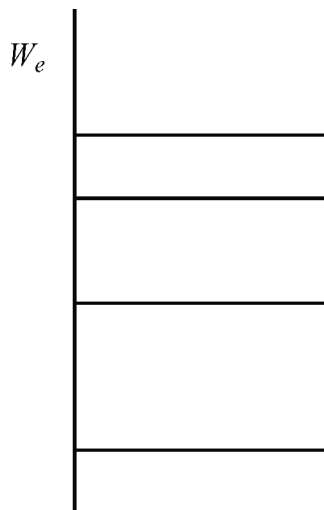


Рис. 1.1. Энергетическая диаграмма изолированного атома

В отсутствие внешних воздействий, атом находится в исходном (невозбужденном) состоянии, при котором все низшие энергетические уровни заняты электронами, а верхние — свободны.

При наличии внешних воздействий, электроны атома приобретают дополнительную энергию и переходят на более высокие энергетические уровни (возбуждение атома) или вовсе освобождаются от атома и становятся свободными, не связанными с атомом (ионизация атома). При этом внешнему воздействию подвержены электроны высоких энергетических уровней, слабее связанные с атомом.

Согласно квантовой теории, энергетическая диаграмма группы близко расположенных одноподобных атомов претерпевает изменения по сравнению с изолированным атомом (рис. 1.2).

В результате взаимодействия атомов друг с другом, разрешенные уровни энергии электронов соседних атомов смещаются, образуя близко расположенные смещенные уровни энергии — подуровни. Подуровни образуют так называемые зоны разрешенных уровней энергии, которые отделены друг от друга запрещенными зонами. Число подуровней в каждой из разрешенных зон равно количеству атомов в груп-

пе (например, на рис. 1.2 показана энергетическая диаграмма для четырех близко расположенных атомов).

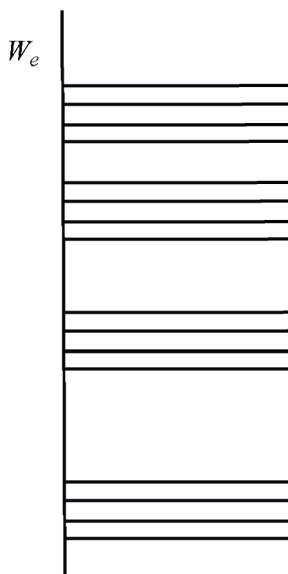


Рис. 1.2. Энергетическая диаграмма группы близко расположенных атомов

1.1. Особенности электропроводности твердых тел

На электропроводность твердого тела существенное влияние оказывает расположение двух соседних зон разрешенных уровней энергии в верхней части энергетической диаграммы (см. рис. 1.2). В зависимости от электронной структуры атома и строения кристаллической решетки, между соседними зонами разрешенных уровней энергии либо может сохраниться запрещенная зона, либо ее может и не быть. Эти две вероятности, а также ширина запрещенной зоны определяют три класса кристаллических тел: проводники, диэлектрики и полупроводники.

На энергетических диаграммах (рис. 1.3) можно выделить две характерные зоны разрешенных значений энергии: нижнюю (заполненную), она называется валентной зоной, и верхнюю (свободную), она называется зоной проводимости.

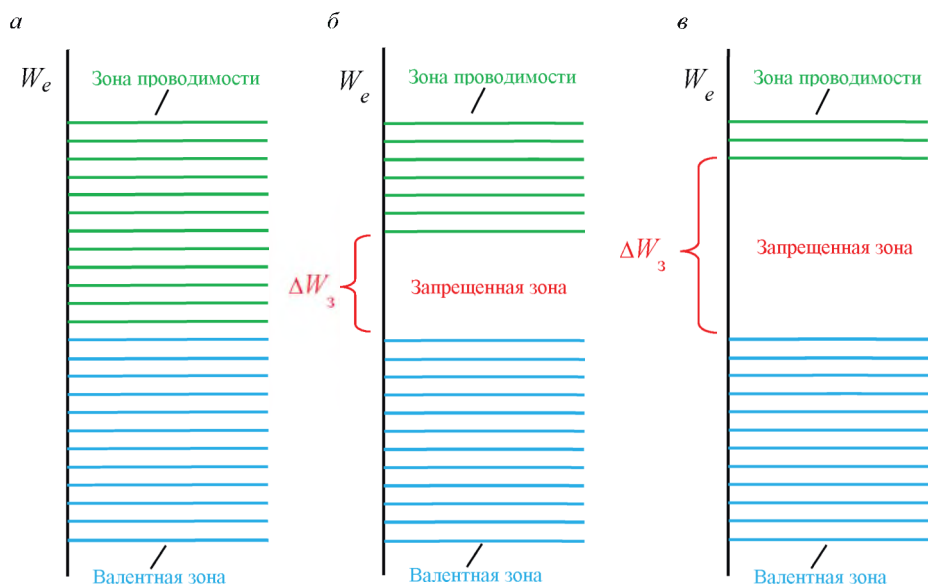


Рис. 1.3. Энергетические диаграммы:
a — металл; *б* — полупроводник; *в* — диэлектрик

В отсутствие внешних воздействий на электроны (электрического и магнитного полей, облучения квантами света, а также при $T = 0$ K), все уровни энергии нижней зоны заполнены электронами, в верхней зоне электронов нет.

Рассмотрим различие в электропроводности указанных трех классов кристаллических тел с точки зрения особенностей их энергетических диаграмм.

В металлах зона проводимости непосредственно примыкает к валентной зоне (см. рис. 1.3, *a*). Электронам валентной зоны достаточно сообщить весьма малую энергию, чтобы перевести их в зону свободных уровней. Поэтому уже при воздействии только электрического поля, в металле имеется большое число свободных (не связанных с атомами) электронов, которые и обеспечивают его высокую электрическую проводимость.

В полупроводниках (см. рис. 1.3, *б*) свободная зона отделена от валентной зоны запрещенной зоной энергии ΔW_z . Величина ΔW_z определяет энергию (в электронвольтах), которую нужно сообщить электрону, расположенному на верхнем энергетическом уровне в валентной зоне, чтобы перевести его на нижний энергетический уровень в зоне

свободных уровней. Необходимость сообщения достаточной энергии для преодоления запрещенной зоны затрудняет переход электронов из валентной зоны в зону проводимости, что приводит к уменьшению числа свободных электронов в полупроводнике по сравнению с металлом и, как следствие, к уменьшению его электрической проводимости.

Способность преодоления электронами запрещенной зоны зависит от внешних факторов. Особенно значительно влияние температуры кристалла: с повышением температуры проводимость чистых полупроводников возрастает.

Ширина запрещенной зоны кристаллических твердых тел, относящихся к полупроводникам, не превышает 3 эВ ($\Delta W_z < 3$ эВ). Их электрическая проводимость возникает при температуре выше 80...100 К.

Диэлектрики (см. рис. 1.3, в) отличаются от полупроводников более широкой запрещенной зоной. У них $\Delta W_z > 3$ эВ и может достигать 6...10 эВ. В связи с этим проводимость диэлектриков мала и становится заметной лишь при температуре не ниже 400...800 °С или сильных электрических полях (пробой).

1.2. Носители заряда в беспримесных (чистых) полупроводниках

Рассмотрим особенности образования носителей заряда в полупроводниках на примере германия и кремния, получивших наибольшее распространение при изготовлении полупроводниковых приборов.

Германий и кремний принадлежат к IV группе Периодической системы элементов. На внешней оболочке их атомов находятся четыре валентных электрона. Ширина запрещенной зоны германия равна 0,72 эВ, кремния — 1,12 эВ ($\Delta W_z(\text{Ge}) = 0,72$ эВ; $\Delta W_z(\text{Si}) = 1,12$ эВ).

В отсутствие структурных дефектов и при $T = 0$ К, четыре валентных электрона внешней электронной оболочки каждого атома участвуют в так называемых ковалентных связях с соседними атомами. Эти связи характеризуются перекрытиями внешней электронной оболочки каждого атома с внешними электронными оболочками рядом расположенных четырех атомов кристалла. При таком перекрытии все четыре электрона внешней оболочки атома участвуют в создании ковалентных связей с четырьмя соседними атомами.

Участие всех электронов атомов кристалла в создании ковалентных связей между атомами свидетельствует о нахождении электронов на уровнях энергии валентной зоны.

Повышение температуры кристалла вызывает увеличение энергии фононов. При некоторой температуре энергия фонона становится достаточной для освобождения электрона от связей с атомами кристаллической решетки. Валентный электрон освобождается от связей и становится свободным (рис. 1.4).

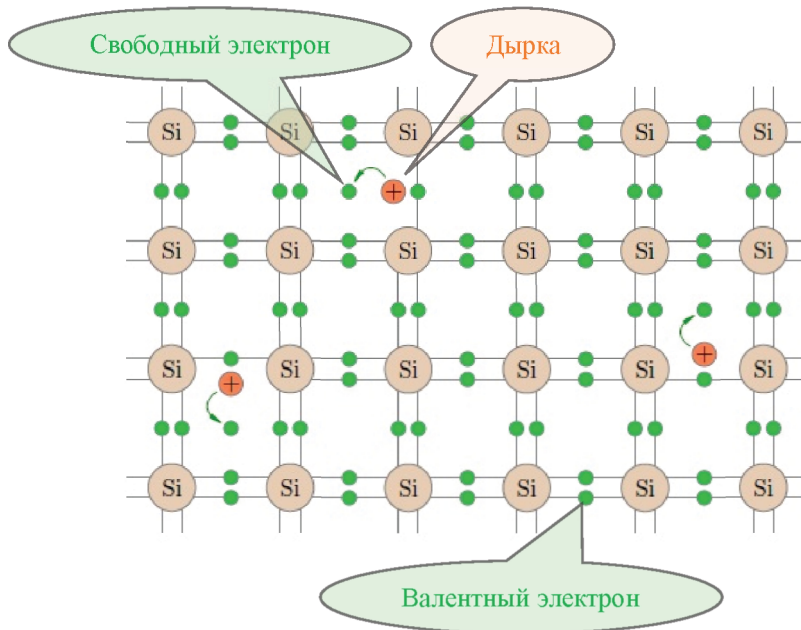


Рис. 1.4. Пример возникновения свободного электрона и дырки в кристалле полупроводника

Освобождение электрона от связей с атомами соответствует на энергетической диаграмме его переходу с уровня валентной зоны на уровень зоны проводимости.

Свободный электрон способен изменять свою энергию и перемещаться между узлами кристаллической решетки под воздействием электрического поля, т. е. участвовать в создании тока.

Образование свободного электрона сопровождается разрывом ковалентной связи между атомами и появлением в месте разрыва так называемой дырки (см. рис. 1.4). Отсутствие электрона в ковалентной

связи равносильно появлению в данном месте положительного заряда, который и приписывают дырке.

На энергетической диаграмме образование дырки после перехода электрона в зону проводимости отождествляют с появлением вакантного уровня энергии в валентной зоне, позволяющего электронам валентной зоны (находящимся в ковалентных связях с атомами) изменять энергию под воздействием электрического поля, т. е. перемещаться в кристалле от атома к атому и участвовать в создании тока.

Фактическое перемещение валентных электронов под воздействием внешнего электрического поля при их последовательном заполнении образовавшегося разрыва ковалентной связи формально может быть заменено движением дырки между узлами кристаллической решетки в противоположном направлении. Действительно, валентный электрон, получив необходимую энергию, заполняет (компенсирует) дырку с приближением к ней. Дырка исчезает, и восстанавливается ковалентная связь у данного атома, но возникает новая дырка в той ковалентной связи, откуда ушел электрон. Исчезновение дырки в одном месте кристалла и ее появление в другом учитывают (условно) как движение дырки (см. рис. 1.4).

Важность учета движения дырок как самостоятельных носителей заряда обуславливается различием в подвижностях свободных электронов и валентных электронов, перемещающихся по вакантным уровням энергии.

При температуре выше абсолютного нуля переход из валентной зоны в зону проводимости возможен у многих электронов. В результате этого процесса, получившего название *термогенерации* носителей заряда, в полупроводнике создается некоторая концентрация электронов n_i в свободной зоне и равная ей концентрация дырок p_i в валентной зоне (индекс « i » означает, что речь идет о чистых, беспримесных полупроводниках). При этом n_i , p_i называют *собственными концентрациями носителей заряда* в полупроводнике. Концентрация носителей заряда зависит от температуры кристалла, ширины запрещенной зоны и определяется по выражению

$$n_i = p_i = Ae^{-\frac{W_3}{2kT}}, \quad (1.1)$$

где A — коэффициент, значение которого зависит от рода кристалла;

k — постоянная Больцмана, $k = 1,37 \cdot 10^{-23}$ Дж/К;

T — абсолютная температура, К.

Таким образом, из выражения (1.1) можно сделать вывод, что концентрация носителей заряда в беспримесном полупроводнике и его электрическая проводимость увеличиваются с повышением температуры и уменьшаются с ростом ширины запрещенной зоны.

Электроны и дырки являются подвижными частицами. Постоянство их концентрации, определяемой из соотношения (1.1), при неизменной температуре обуславливается тем, что в любом элементе объема полупроводника одновременно действуют два процесса: термoгенерация носителей заряда, а также исчезновение электронов и дырок за счет возвращения электронов из зоны проводимости на вакантные уровни валентной зоны (рекомбинация носителей заряда). Соответствующая концентрация устанавливается из условия динамического равновесия, при котором число вновь возникающих носителей заряда равно количеству рекомбинирующих носителей.

1.3. Носители заряда в примесных полупроводниках

При производстве полупроводниковых приборов помимо чистых полупроводников, в частности чистых германия и кремния, являющихся исходными материалами, используют примесные полупроводники. Введение примеси связано с необходимостью создания в полупроводнике преимущественно электронной либо дырочной электропроводности и увеличения электрической проводимости в целом. В связи с этим различают соответственно электронные (*n*-типа) и дырочные (*p*-типа) полупроводники.

Полупроводник n-типа

Для получения полупроводника с электропроводностью *n*-типа, в чистый полупроводник вводят примесь, создающую в полупроводнике только свободные электроны. Вводимая примесь является «поставщиком» электронов, в связи с чем ее называют *донорной*. Для германия и кремния, относящихся к IV группе Периодической системы элементов, донорной примесью служат элементы V группы (сурьма

(Sb), фосфор (P), мышьяк (As)), атомы которых имеют пять валентных электронов. При внесении такой примеси, атомы исходного полупроводника в отдельных узлах кристаллической решетки замещаются атомами примеси (рис. 1.5).

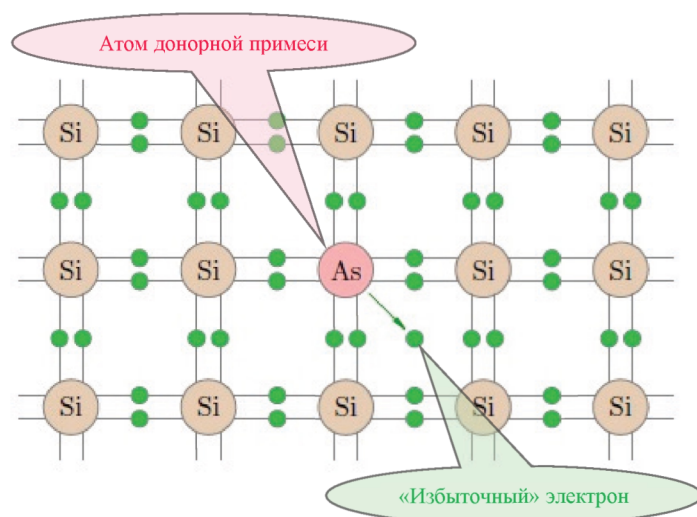


Рис. 1.5. Пример возникновения свободного электрона в кристалле полупроводника n -типа

Четыре электрона каждого атома донорной примеси участвуют в ковалентной связи с соседними атомами исходного материала, а пятый («избыточный») электрон, не участвующий в ковалентной связи, оказывается значительно слабее связанным со своим атомом. Для того чтобы оторвать его от атома и превратить в свободный носитель заряда, требуется значительно меньшее количество энергии, чем для освобождения электрона из ковалентной связи. В результате приобретения такой энергии (например, энергии фона при комнатной температуре кристалла) «избыточный» электрон покидает атом и становится свободным, а атом примеси превращается в положительный ион (ионизация атома примеси). Концентрация электронов в зоне проводимости (свободных электронов) при этом определяется преимущественно концентрацией введенной примеси N_d , а не собственными электронами валентной зоны, преодолевающими широкую запрещенную зону ΔW_3 . В соответствии с этим концентрация электронов n_n в полупроводнике n -типа существенно выше концентрации дырок p_n , образующей-

ся в результате перехода электронов из валентной зоны в зону проводимости. Можно считать, что в полупроводнике *n*-типа ток создается в основном электронами. Другими словами, электроны в этом случае являются основными носителями заряда, а дырки — неосновными.

Полупроводник *p*-типа

В полупроводниках *p*-типа введение примеси направлено на повышение концентрации дырок. Задача решается путем использования в качестве примеси элементов III группы Периодической системы (индий (In), галлий (Ga), алюминий (Al), бор (B)), атомы которых имеют по три валентных электрона (рис. 1.6).

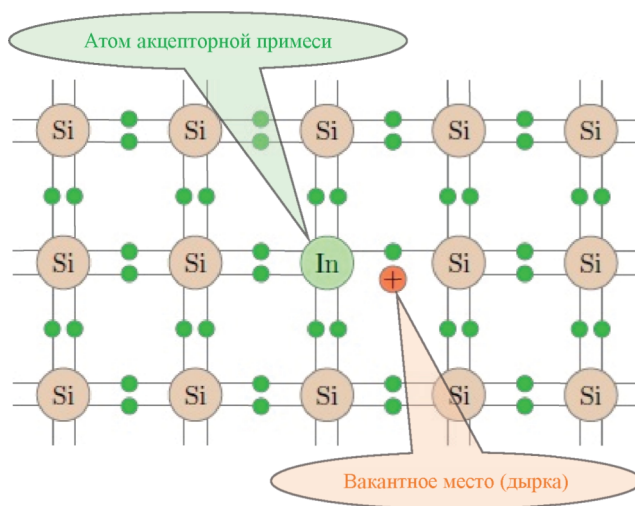


Рис. 1.6. Пример возникновения свободного электрона в кристалле полупроводника *p*-типа

При наличии такой примеси каждый ее атом образует только три заполненные ковалентные связи с соседними атомами исходного полупроводника в кристаллической решетке. Четвертая связь остается незаполненной. Недостающий валентный электрон, для заполнения связи, принимается от одного из соседних атомов кристаллической решетки, т. к. требуемая для такого перехода энергия невелика. Переход электрона приводит к образованию дырки в ковалентной связи соседнего атома, откуда ушел электрон, и превращению атома в неподвижный отрицательный ион. В результате этого, за счет примеси дости-

гается повышение концентрации дырок в полупроводнике. Атомы примеси, принимающие валентные электроны соседних атомов, называют акцепторными, а саму примесь — акцепторной.

Концентрация дырок в валентной зоне в таком случае определяется преимущественно концентрацией внесенной акцепторной примеси N_a , а не дырками, возникающими при термогенерации носителей заряда за счет преодоления валентными электронами широкой запрещенной зоны ΔW_3 . В соответствии с этим концентрация дырок p_p в полупроводнике p -типа существенно больше концентрации свободных электронов n_p . По данной причине ток в дырочном полупроводнике переносится в основном дырками. Дырки в этом случае являются основными носителями заряда, а электроны — неосновными.

Таким образом, в примесных полупроводниках концентрации основных носителей заряда (n_n — электронного полупроводника и p_p — дырочного полупроводника) создаются за счет внесения примеси, а концентрации неосновных носителей заряда (n_p, p_n — соответственно электронного и дырочного полупроводников) — за счет термогенерации носителей заряда, связанной с переходом электронов из валентной зоны в зону проводимости.

Необходимая примесь вносится в количестве, при котором концентрация основных носителей заряда существенно (на 2...3 порядка) превышает концентрацию неосновных носителей заряда. В зависимости от концентрации введенной примеси, удельная проводимость примесного полупроводника возрастает по сравнению с чистым полупроводником в десятки и сотни тысяч раз.

Характерной особенностью полупроводников рассматриваемых типов является то, что произведение концентраций основных и неосновных носителей заряда при данной температуре является постоянной величиной и определяется по соотношениям

$$n_n p_n = p_p n_p = n_i p_i = A^2 e^{-\frac{W_3}{kT}},$$

где n_i — собственные концентрации носителей заряда в чистом полупроводнике, $n_i = p_i$.

Зависимость концентрации носителей заряда от температуры накладывает ограничения на температурный диапазон применения полупроводниковых приборов. Рабочий диапазон температур характеризуется

существенным превышением в примесных полупроводниках концентрации основных носителей заряда над неосновными ($n_n \gg p_n; p_p \gg n_p$) при концентрации основных носителей заряда близкой к концентрации внесенной примеси ($n_n \approx N_d; p_p \approx N_a$). При температурах, превышающих верхний температурный предел, причиной нарушения условия $n_n \approx N_d; p_p \approx N_a$ является повышение роли концентрации носителей заряда, создаваемых в кристалле при термогенерации за счет преодоления валентными электронами запрещенной зоны ΔW_v . При этом может оказаться, что концентрация носителей заряда и электрическая проводимость в полупроводнике будут определяться не по концентрации внесенной примеси, а по концентрации собственных носителей заряда — электронов и дырок (вырождение примесного полупроводника в собственный полупроводник). Верхний температурный предел зависит от ширины запрещенной зоны полупроводника и составляет для германия 75...85 °С, а для кремния 150...170 °С. В этом проявляется существенное преимущество кремния как материала для полупроводниковых приборов.

При температуре ниже рабочего диапазона, концентрация неосновных носителей заряда, создаваемая термогенерацией, ничтожно мала. Основную роль здесь играет понижение концентрации основных носителей заряда (и уменьшение электрической проводимости) вследствие уменьшения количества ионизированных атомов примеси. Нижний температурный предел работы полупроводниковых приборов составляет –55...–60 °С.

1.4. Токи в полупроводниках

Факторами, создающими упорядоченное движение носителей заряда, т. е. обуславливающими электрический ток в кристалле полупроводника являются:

- электрическое поле;
- неравномерность распределения концентраций носителей заряда.

В отсутствие электрического поля в кристалле и одинаковой концентрации носителей заряда в объеме полупроводника, электроны и дырки находятся в непрерывном тепловом (хаотическом) движе-

нии, распределенном по всем направлениям, и ток в кристалле равен нулю.

Направленное движение носителей заряда под воздействием электрического поля называют *дрейфом* (дрейфовое движение), а под воздействием разности концентраций носителей заряда — *диффузией* (диффузионное движение). В зависимости от характера движения носителей заряда различают соответственно дрейфовый и диффузионный токи в полупроводниках, а в зависимости от типа носителей заряда — электронные и дырочные составляющие этих токов.

1.4.1. Дрейфовый ток

Под воздействием электрического поля носители заряда перемещаются в кристалле с некоторой средней скоростью $v_{\text{ср}}$, пропорциональной напряженности электрического поля E :

$$v_{\text{ср } n} = -\mu_n E; \quad (1.2)$$

$$v_{\text{ср } p} = \mu_p E.$$

Коэффициент пропорциональности называют *подвижностью* электронов μ_n и дырок μ_p . Электроны перемещаются в направлении, противоположном действию поля, а дырки — в направлении действия поля. Этим объясняется наличие знака минус в формуле (1.2). Так, для германия $\mu_n = 3800 \text{ см}^2/(\text{В} \cdot \text{с})$; $\mu_p = 1800 \text{ см}^2/(\text{В} \cdot \text{с})$, а для кремния $\mu_n = 1300 \text{ см}^2/(\text{В} \cdot \text{с})$; $\mu_p = 500 \text{ см}^2/(\text{В} \cdot \text{с})$.

Плотности дрейфовых составляющих тока в кристалле определяются по величине заряда, переносимого носителями через единичное сечение в единицу времени:

$$J_{\text{др } n} = -qn v_{\text{ср } n}; \quad (1.3)$$

$$J_{\text{др } p} = qp v_{\text{ср } p}, \quad (1.4)$$

где q — заряд электрона;

n, p — концентрации электронов и дырок в объеме полупроводника.

Знак минус в выражении (1.4) означает, что принятому направлению тока соответствует противоположное направление движения электронов.

С учетом выражений (1.3) и (1.4) соотношения для плотностей дрейфового электронного и дырочного токов можно записать в виде

$$J_{\text{др } n} = qn\mu_n E ; \quad (1.5)$$

$$J_{\text{др } p} = qp\mu_p E . \quad (1.6)$$

Суммарная плотность тока, протекающего через полупроводник под действием электрического поля,

$$J_{\text{др}} = J_{\text{др } n} + J_{\text{др } p} .$$

В чистых полупроводниках $n = p$, но μ_n примерно вдвое больше μ_p . По этой причине в чистых полупроводниках электронная составляющая плотности тока в то же число раз больше дырочной. В примесных же полупроводниках концентрации n и p различаются на несколько порядков, в связи с чем в электронном полупроводнике дрейфовый ток обуславливается преимущественно электронами, а в дырочном — дырками.

1.4.2. Влияние температуры на плотность дрейфового тока

Из формул (1.5) и (1.6) следует, что плотность тока (проводимость) полупроводников зависит от концентрации носителей заряда и их подвижности. Подвижность носителей заряда уменьшается с ростом температуры. Это объясняется повышением интенсивности тепловых колебаний атомов в кристаллической решетке и увеличением вероятности столкновений с ними электронов и дырок. В чистых полупроводниках, несмотря на снижение подвижности носителей, плотность тока и проводимость увеличиваются с ростом температуры вследствие повышения концентрации носителей заряда. В примесных полупроводниках в рабочем диапазоне температур концентрация носителей заряда мало изменяется, т. к. ее определяет главным образом концентрация основных носителей заряда, созданная примесью (все атомы примеси ионизированы). В связи с этим плотность тока и проводимость здесь с ростом температуры несколько уменьшаются вследствие уменьшения подвижности.

1.4.3. Диффузионный ток

Диффузионное движение носителей заряда возникает, когда имеется различие в концентрации электронов (дырок) в соседних слоях полупроводника. Носители заряда перемещаются из слоя с боль-

шей концентрацией в слой с меньшей концентрацией. Если в данном слое постоянно поддерживается более высокая концентрация носителей заряда, чем в соседнем с ним слое, то создается непрерывный диффузионный поток носителей заряда в направлении убывания концентрации.

Плотности потоков носителей заряда пропорциональны градиенту их концентрации. При одномерной диффузии (когда концентрация вдоль оси x падает: $dn/dx < 0$ или $dp/dx < 0$) их находят из соотношений:

$$J_{\text{диф } n} = qD_n \frac{dn}{dx};$$

$$J_{\text{диф } p} = qD_p \frac{dp}{dx},$$

где D_n , D_p — коэффициенты диффузии электронов и дырок, $\text{см}^2/\text{с}$.

Коэффициенты диффузии равны числу носителей заряда, диффундирующих за 1 с через площадку в 1 см^2 при единичном градиенте концентрации.

Тесты к главе I

1. Изменение какого параметра влияет на концентрацию собственных носителей заряда в полупроводнике?

Варианты ответов:

- а. Температура.
- б. Постоянная Больцмана.
- в. Длина полупроводниковой пластины.
- г. Ширина запрещенной зоны.

2. Насколько в примесном полупроводнике концентрация основных носителей заряда должна превышать концентрацию неосновных?

Варианты ответов:

- а. На 10–20.
- б. На два-три порядка.
- в. В сто — тысячу раз.
- г. На 500–1000.

3. Как называется направленное движение носителей заряда под воздействием электрического поля?

Варианты ответов:

а. Дрейф.

б. Диффузия.

в. Градиент.

г. Подвижность.

2

Полупроводниковые диоды

Электрические процессы в p - n переходе при отсутствии внешнего напряжения

► Электрические процессы в p - n переходе при наличии внешнего напряжения

► Пробой p - n перехода ► Емкости p - n перехода ► Стабилитроны

Диодами называют двухэлектродные элементы электрической цепи, обладающие односторонней проводимостью тока. В полупроводниковых диодах односторонняя проводимость обуславливается применением полупроводниковой структуры, сочетающей в себе два слоя, один из которых обладает дырочной (p), а другой — электронной (n) электропроводностью (рис. 2.1, *а*). Обозначение диода на электронных схемах и его упрощенная (идеальная) вольт-амперная характеристика (ВАХ) показаны на рис. 2.1 *б*, *в*.

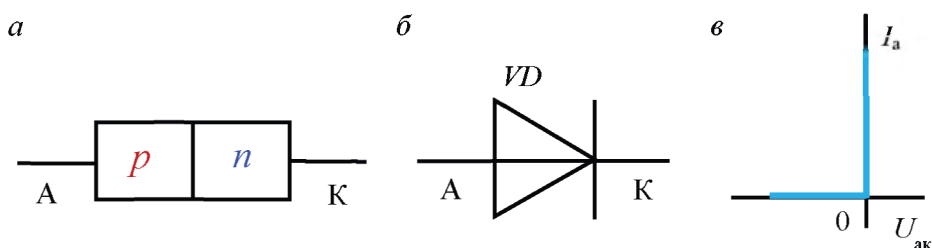


Рис. 2.1. Полупроводниковый диод:

а — структура; *б* — условное графическое обозначение;

в — идеальная вольт-амперная характеристика

Принцип действия полупроводникового диода основывается на специфике процессов, протекающих на границе раздела p - и n -слоев, в так называемом электронно-дырочном переходе (p - n переход).

2.1. Электрические процессы в p - n переходе при отсутствии внешнего напряжения

В германиевых и кремниевых диодах двухслойная p - n структура (рис. 2.2, a) создается путем введения в один из слоев монокристалла акцепторной примеси, а в другой — донорной.

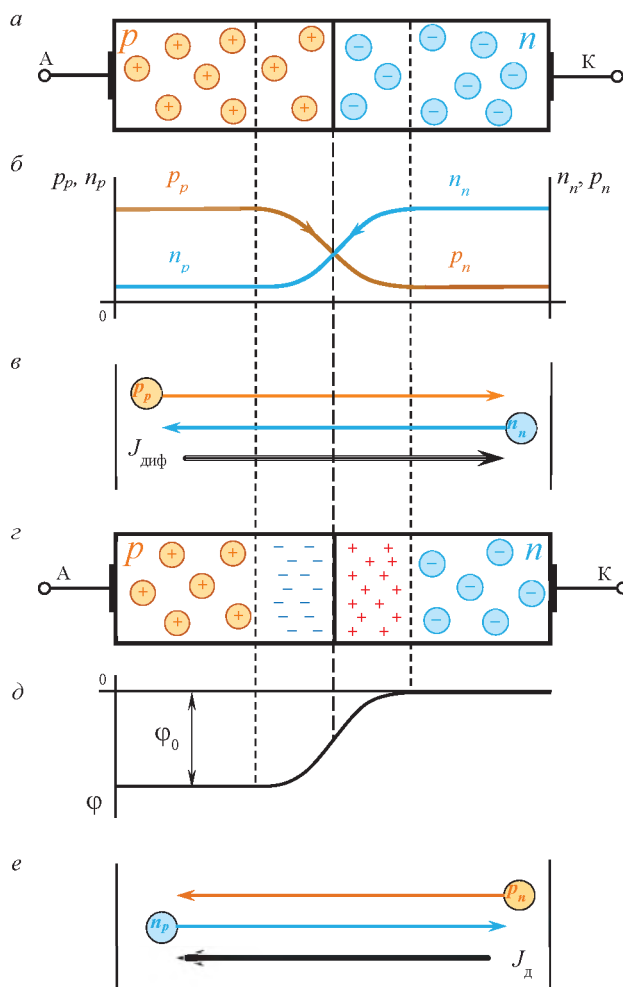


Рис. 2.2. Образование p - n перехода:

a — p - n структура полупроводника; b — распределение концентраций носителей заряда; $в$ — составляющие плотности диффузионного тока; $г$ — возникновение объемных зарядов; $д$ — внутреннее электрическое поле с потенциальным барьером Φ_0 ; $е$ — составляющие плотности дрейфового тока

Распределение концентраций носителей заряда для простейшего случая, когда $N_a = N_d$, показано на рис. 2.2, б. На практике наибольшее распространение получили p - n структуры с неодинаковой концентрацией внесенных акцепторной N_a и донорной N_d примесей, т. е. с неодинаковой концентрацией основных носителей заряда в слоях $n_n \approx N_d$; $p_p \approx N_a$. Типичными являются структуры с $N_a \gg N_d$ ($p_p \gg n_n$).

В p - n структуре, на границе раздела слоев, возникает разность концентраций одноименных носителей заряда: в одном слое они являются основными, в другом — неосновными (см. рис. 2.2, б). В приграничной области, под действием разности концентраций, возникает диффузионное движение основных носителей заряда во встречном направлении через границу раздела. Дырки из p -области диффундируют в n -область, электроны из n -области — в p -область (см. рис. 2.2, в).

Важнейшим следствием диффузионного движения носителей заряда через границу раздела слоев является появление в приграничных областях объемных зарядов, создаваемых ионами атомов примесей. Так, при уходе дырок из p -слоя, в нем создается нескомпенсированный отрицательный объемный заряд за счет оставшихся отрицательных ионов акцепторных атомов примеси. Электроны же, ушедшие из n -слоя, оставляют здесь нескомпенсированный положительный объемный заряд, создаваемый положительными ионами донорных атомов примеси (рис. 2.2, г).

Наличие объемного заряда является главной особенностью p - n перехода. Из-за наличия объемного заряда, в p - n переходе создается электрическое поле с потенциальным барьером ϕ_0 (см. рис. 2.2, д), которое создает тормозящее действие для основных и ускоряющее — для неосновных носителей заряда, т. е. внутреннее электрическое поле приводит к уменьшению плотности диффузионного тока $J_{\text{диф}}$ через переход и появлению встречного ему дрейфового тока плотностью $J_{\text{др}}$ (см. рис. 2.2, е). Дрейфовый ток имеет направление, противоположное направлению диффузионного тока. Вследствие этого обеспечивается равенство потоков носителей заряда через переход в обоих направлениях, т. е. равенство нулю суммарного тока в отсутствие внешнего электрического поля.

Величина потенциального барьера ϕ_0 (называемого также контактной разностью потенциалов) зависит от соотношения концентраций носителей заряда одного знака по обе стороны перехода

$$\varphi_0 = \varphi_T \ln \frac{p_p}{p_n} = \varphi_T \ln \frac{n_n}{n_p},$$

где φ_T — тепловой потенциал, В,

$$\varphi_T = \frac{kT}{q}.$$

Здесь k — постоянная Больцмана;

T — абсолютная температура, К;

q — заряд электрона, Кл.

При комнатной температуре для германия $\varphi_0(\text{Ge}) = 0,3...0,5$ В, а для кремния $\varphi_0(\text{Si}) = 0,6...0,8$ В.

В условиях динамического равновесия, уменьшение концентрации неосновных носителей заряда за счет их ухода через p - n переход будет постоянно восполняться носителями того же знака за счет их диффузии из противоположных слоев.

2.2. Электрические процессы в p - n переходе при наличии внешнего напряжения

Подключение к p - n структуре внешнего напряжения (напряжения смещения) приводит к изменению условий переноса заряда через p - n переход. Существенную роль при этом играет полярность внешнего напряжения, с которой оно прикладывается к p - n переходу.

2.2.1. Прямая ветвь вольт-амперной характеристики диода

Рассмотрим случай, когда внешнее напряжение подключено к p - n структуре в прямом направлении, т. е. плюсом источника к выводу p -области, а минусом источника к выводу n -области (рис. 2.3). При таком подключении источника создаваемое им электрическое поле направлено противоположно внутреннему полю в переходе, что приводит к уменьшению результирующего поля в p - n переходе. Объемный заряд обоих знаков, сосредоточенный в переходе по разные стороны

границы раздела, будет определяться не только по величине ϕ_0 , обусловливаемой, как было показано, диффузионным движением носителей заряда под действием разности их концентраций в приграничных слоях, но и по внешнему напряжению $U_{пр}$. Объемному заряду в переходе будет отвечать напряжение $(\phi_0 - U_{пр})$ меньшее, чем в отсутствие внешнего источника. Величина $(\phi_0 - U_{пр})$ определяет высоту потенциального барьера в p - n переходе при включении внешнего напряжения в прямом направлении. Уменьшение объемного заряда (потенциального барьера) проявляется в сужении p - n перехода.

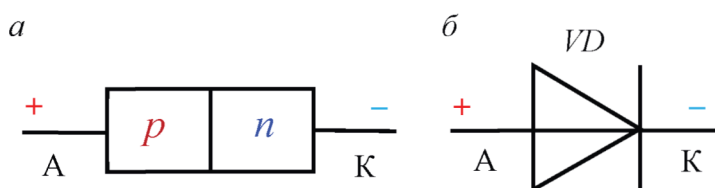


Рис. 2.3. Полярность подключения внешнего напряжения в прямом направлении:

a — структура p - n перехода; b — обозначение диода

Уменьшение потенциального барьера облегчает переход основных носителей заряда под действием диффузии через границу раздела в соседние области, что приводит к увеличению диффузионного тока через p - n переход. Указанное явление называют *инжекцией* носителей заряда через p - n переход.

Вместе с тем дрейфовый ток через p - n переход, создаваемый потоками неосновных носителей заряда, остается без изменения. Разность диффузионного и дрейфового токов определяет результирующий прямой ток через p - n переход (прямой ток диода). Плотность прямого тока будет

$$J_{пр} = J_{диф} - J_{др} . \quad (2.1)$$

С повышением приложенного внешнего напряжения, диффузионный ток увеличивается, в связи с чем возрастает прямой ток через p - n переход. Примерный вид прямой ветви вольт-амперной характеристики p - n перехода (диода) показан на рис. 2.4.

В кремниевых диодах значение ϕ_0 больше, чем в германиевых. Это является одной из причин большего падения напряжения $\Delta U_{пр}$ в крем-

ниевых диодах (0,8...1,2 В) по сравнению с германиевыми диодами (0,3...0,6 В) при протекании тока в прямом направлении.

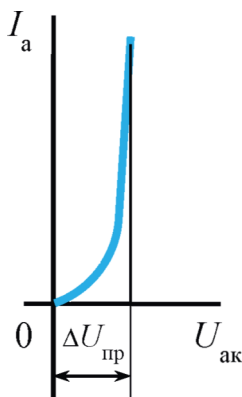


Рис. 2.4. Прямая ветвь вольт-амперной характеристики диода

2.2.2. Обратная ветвь вольт-амперной характеристики диода

Рассмотрим случай, когда внешнее напряжение подключено к p - n структуре в обратном направлении, т. е. плюсом источника к выводу n -области, а минусом источника к выводу p -области (рис. 2.5).

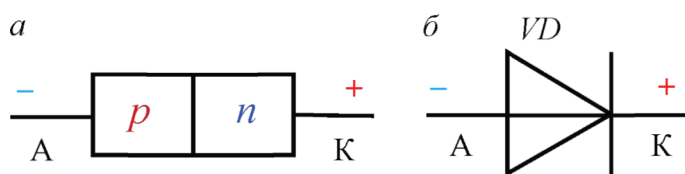


Рис. 2.5. Полярность подключения внешнего напряжения в обратном направлении:

a — структура p - n перехода; b — обозначение диода

При таком подключении источника внешнего напряжения, создаваемое им электрическое поле сонаправлено с внутренним полем перехода, что приводит к увеличению результирующего поля. Потенциальный барьер ϕ_0 возрастает на величину $U_{обр}$ и становится равным $(\phi_0 + U_{обр})$. При этом увеличивается объемный заряд в p - n переходе и его

ширина. Возросший потенциальный барьер затрудняет прохождение через p - n переход основных носителей заряда, вследствие чего диффузионный ток, создаваемый этими носителями, уменьшается. Дрейфовый же ток, обусловленный концентрациями неосновных носителей заряда по обе стороны перехода, можно считать неизменным. Однако теперь он будет превышать диффузионный ток. Через диод будет протекать ток в обратном направлении (рис. 2.6):

$$J_{\text{обр}} = J_{\text{др}} - J_{\text{диф}} \quad (2.2)$$

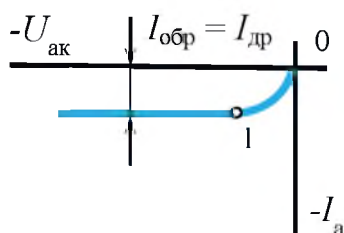


Рис. 2.6. Обратная ветвь вольт-амперной характеристики диода

При небольших обратных напряжениях (участок 0—1) увеличение обратного тока происходит за счет уменьшения диффузионной составляющей. При обратном напряжении, соответствующем т. 1 и большем, основные носители заряда неспособны преодолеть потенциальный барьер, в связи с чем диффузионный ток равен нулю. Этим объясняется отсутствие роста обратного тока при увеличении обратного напряжения (участок характеристики левее т. 1).

Обратный ток, создаваемый неосновными носителями заряда, зависит от их концентраций в p - и n -слоях, а также от рабочей поверхности p - n перехода. Этим объясняется тот факт, что в мощных диодах, имеющих большую площадь p - n перехода, обратный ток больше, чем в маломощных.

Поскольку концентрация неосновных носителей заряда согласно выражению (1.1) является функцией температуры кристалла, обратный ток диода также зависит от температуры. По данной причине обратный ток иногда называют тепловым. Увеличение обратного тока с ростом температуры происходит по примерно экспоненциальному закону.

Кроме того, согласно выражению (1.1) концентрация неосновных носителей заряда уменьшается с ростом ширины запрещенной зоны

на энергетической диаграмме полупроводника. Ширина запрещенной зоны в кремнии (1,12 эВ) больше, чем в германии (0,72 эВ). В силу этого обратный ток в кремниевых диодах на несколько порядков меньше, чем в германиевых, и кремниевые диоды допускают эксплуатацию при более высокой температуре полупроводниковой структуры (135...140 °С против 50...60 °С у германиевых диодов). Отметим также, что кремниевые диоды применимы при более высоких обратных напряжениях, чем германиевые (2500...3500 В против наибольших значений 500...600 В у германиевых диодов).

2.2.3. Полная вольт-амперная характеристика диода

Полная вольт-амперная характеристика полупроводникового диода приведена на рис. 2.6. От характеристики идеального диода (см. рис. 2.1, в) она отличается некоторым падением напряжения на приборе при пропускании прямого тока и наличием обратного тока в случае приложения обратного напряжения.

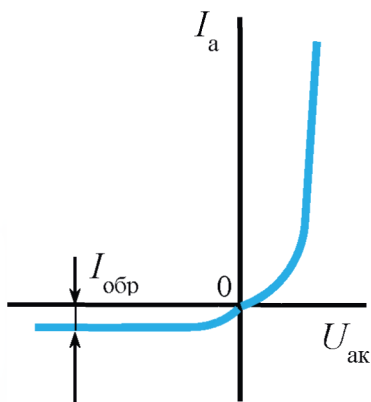


Рис. 2.6. Упрощенная вольт-амперная характеристика диода

Прямой ток диода создается основными, а обратный — неосновными носителями заряда. Концентрация основных носителей заряда на несколько порядков превышает концентрацию неосновных носителей. Этим и обуславливаются свойства односторонней проводимости *p-n* перехода, а следовательно, и диода.

2.3. Пробой p - n перехода

В проведенном анализе, позволяющем главным образом объяснить принцип действия полупроводникового диода, не учитывались некоторые факторы, отражающиеся на его реальной вольт-амперной характеристике.

На обратную ветвь вольт-амперной характеристики диода оказывают влияние два фактора:

- ток утечки через поверхность p - n перехода;
- генерация носителей заряда, которая является причиной возможного пробоя p - n перехода.

Оба фактора приводят к тому, что обратная ветвь вольт-амперной характеристики диода принимает вид, показанный на рис. 2.7.

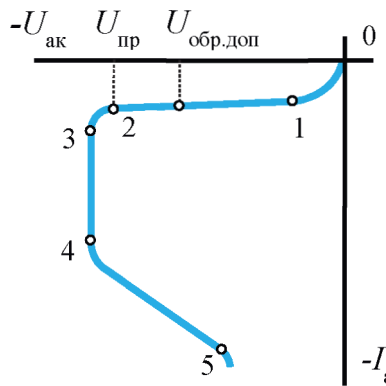


Рис. 2.7. Обратная ветвь вольт-амперной характеристики диода с учетом дополнительных факторов

Ток утечки связан линейной зависимостью с обратным напряжением $U_{ак}$. Он создается различными загрязнениями на внешней поверхности p - n структуры, что повышает поверхностную электрическую проводимость p - n перехода и обратный ток через диод. Эта составляющая обратного тока обуславливает появление наклонного участка 1–2 на характеристике диода (рис. 2.7).

Влияние генерации носителей заряда в p - n переходе обычно сказывается при повышенных обратных напряжениях. Оно проявляется сначала в нарушении линейной зависимости изменения обратного тока от напряжения $-U_{ак}$ (участок 2–3), а затем в резком возрастании

обратного тока (участок 3–5), характеризующем пробой p - n перехода.

В зависимости от причин, вызывающих появление дополнительных носителей заряда в p - n -переходе, различают:

- электрический пробой, который может быть лавинным или туннельным;
- тепловой пробой.

Рассмотрим эти виды пробоя.

2.3.1. Электрический пробой

Лавинный пробой обусловлен лавинным размножением носителей в p - n переходе в результате ударной ионизации атомов быстрыми носителями заряда. Он происходит следующим образом.

Неосновные носители заряда, поступающие в p - n переход при действии обратного напряжения, ускоряются полем и при движении в нем сталкиваются с атомами кристаллической решетки. При соответствующей напряженности электрического поля, носители заряда приобретают энергию, достаточную для отрыва валентных электронов. При этом образуются дополнительные пары носителей заряда — электроны и дырки, которые, ускоряясь полем, при столкновении с атомами также создают дополнительные носители заряда. Описанный процесс носит лавинный характер.

Лавинный пробой возникает в широких p - n переходах, где при движении под действием электрического поля носители заряда, встречаясь с большим количеством атомов кристалла, в промежутке между столкновениями приобретают достаточную энергию для их ионизации.

В основе туннельного пробоя лежит непосредственный отрыв валентных электронов от атомов кристаллической решетки под действием сильного электрического поля. Образующиеся при этом дополнительные носители заряда (электроны и дырки) увеличивают обратный ток через p - n переход. Туннельный пробой развивается в узких p - n переходах, где при сравнительно небольшом обратном напряжении имеется высокая напряженность поля.

Лавинный и туннельный пробой сопровождаются появлением почти вертикального участка 3–4 на обратной ветви вольт-амперной характеристики (см. рис. 2.7). Причина этого заключается в том, что небольшое повышение напряжения на p - n переходе вызывает более интенсивную генерацию в нем носителей заряда при лавинном или тун-

тельном пробое. Оба эти вида пробоя являются обратимыми процессами. Это означает, что они не приводят к повреждению диода и при своевременном снижении напряжения его свойства сохраняются.

2.3.2. Тепловой пробой

Тепловой пробой возникает в результате интенсивной термогенерации носителей в p - n переходе при недопустимом повышении температуры. Процесс развивается лавинообразно и, ввиду неоднородности p - n перехода, обычно носит локальный характер. Лавинообразное развитие теплового пробоя обуславливается тем, что увеличение числа носителей заряда за счет повышения температуры вызывает увеличение обратного тока и, следовательно, еще больший разогрев участка p - n перехода. Процесс является необратимым и заканчивается расплавлением этого участка и выходом прибора из строя.

Тепловой пробой также может произойти в результате перегрева отдельного участка p - n перехода вследствие протекания большого обратного тока при лавинном или туннельном пробое (участок 4–5 на рис. 2.7). В этом случае тепловой пробой оказывается следствием недопустимого повышения обратного напряжения (перенапряжения).

Велика вероятность наступления теплового пробоя при общем перегреве p - n перехода из-за ухудшения, например, условий теплоотвода. Вследствие этого он может произойти при меньшем напряжении — $U_{ак}$, минуя стадии лавинного или туннельного пробоя. В паспорте на прибор указывается допустимое обратное напряжение $U_{обр доп}$ (см. рис. 2.7) и температурный диапазон работы для того, чтобы учитывать возможность теплового пробоя p - n перехода. Величина допустимого обратного напряжения устанавливается с учетом исключения возможности электрического пробоя и составляет $(0,5...0,8)U_{пр}$.

2.4. Емкости p - n перехода

Емкость p - n перехода равна сумме барьерной и диффузионной емкостей.

Барьерная (или зарядная) емкость характеризуется сосредоточением по обе стороны границы раздела p - и n -слоев объемных зарядов, создаваемых ионами примесей. Физическим аналогом барьерной емкости приближенно может служить емкость плоского конденсатора.

Барьерная емкость зависима от протекания тока через p - n переход вследствие изменения объемных зарядов (а следовательно, ширины p - n перехода) при изменении напряжения на переходе. Зарядная емкость возрастает с уменьшением толщины p - n перехода, т. е. при снижении обратного напряжения. Она выше при прямых напряжениях, чем при обратных. Величина барьерной емкости зависит от площади p - n перехода и может составлять десятки и сотни пикофарад. Зависимость барьерной емкости p - n перехода от обратного напряжения используется в варикапах (параметрических диодах), применяемых в качестве конденсаторов переменной емкости, управляемых напряжением.

Диффузионная емкость обуславливается изменением суммарных зарядов неравновесных электронов и дырок соответственно слева и справа от p - n перехода в результате изменения напряжения на нем. Поскольку эти заряды создаются за счет диффузии (инжекции) носителей через p - n переход, диффузионную емкость следует учитывать при прямом напряжении смещения. В несимметричных p - n переходах, для которых $p_p \gg n_n$, диффузионная емкость определяется преимущественно по суммарному заряду неравновесных дырок в n -слое, величина которого изменяется при изменении прямого напряжения.

Величина диффузионной емкости зависит от протекающего через p - n переход прямого тока и может составлять сотни и тысячи пикофарад, т. е. она существенно больше барьерной емкости.

Таким образом, при прямых напряжениях смещения, емкость p - n перехода определяется в основном диффузионной емкостью, а при обратных напряжениях, когда диффузионная емкость равна нулю, — барьерной емкостью.

2.5. Стабилитроны

Стабилитроны — полупроводниковые диоды, напряжение на которых в области электрического пробоя слабо зависит от тока (в рабочем его диапазоне), предназначенные для стабилизации напряжения.

В полупроводниковых стабилитронах (рис. 2.8) используется свойство незначительного изменения обратного напряжения на p - n переходе при электрическом (лавинном или туннельном) пробое (рис. 2.9).

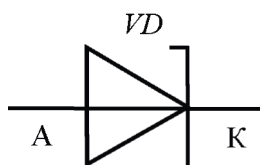


Рис. 2.8. Обозначение стабилитрона

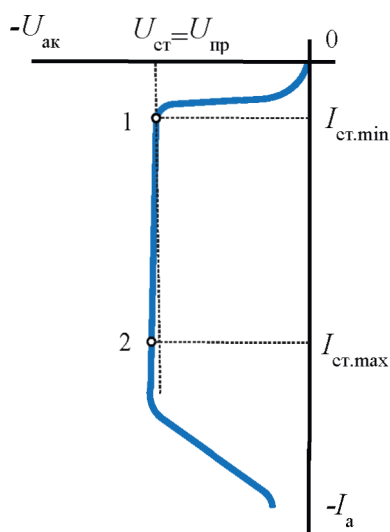


Рис. 2.9. Вольт-амперная характеристика полупроводникового стабилитрона

Участок 1–2 обратной ветви (рис. 2.9) является рабочим участком вольт-амперной характеристики полупроводникового стабилитрона.

Стабилитрон включается параллельно нагрузке R_H в обратном направлении (рис. 2.10).

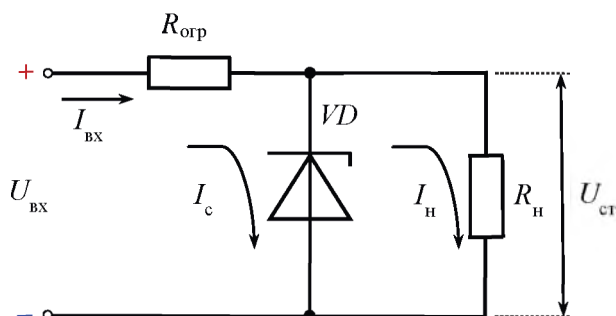


Рис. 2.10. Схема включения стабилитрона

Основными параметрами стабилитрона являются:

- напряжение стабилизации $U_{\text{ст}}$. Это главный параметр прибора. $U_{\text{ст}}$ равно напряжению пробоя $U_{\text{пр}}$;
- минимальный ток стабилитрона $I_{\text{ст.min}}$.

Т. 1 на характеристике соответствует минимальному току стабилитрона $I_{\text{ст.min}}$, при котором наступает пробой. Необходимость получения малого значения этого тока является одной из причин выполнения стабилитронов из кремния;

- максимальный ток стабилитрона $I_{\text{ст.max}}$. Это значение тока стабилизации, достижение которого еще не грозит тепловым пробоем p - n перехода;
- динамическое сопротивление $r_{\text{д}}$.

Динамическое сопротивление является параметром, определяющим наклон рабочего участка характеристики,

$$r_{\text{д}} = \frac{\Delta U_{\text{ст}}}{\Delta I_{\text{ст}}};$$

- температурный коэффициент нестабильности напряжения $\alpha_{\text{н}}$ (ТКН). Он является показателем зависимости напряжения $U_{\text{ст}}$ от температуры. Он определяет изменение в процентах напряжения $U_{\text{ст}}$ при изменении температуры окружающей среды на 1°C . Для кремниевых стабилитронов ТКН может быть положительным или отрицательным и составлять в зависимости от типа прибора $0,0005 \dots 0,2 \text{ \%}/^\circ\text{C}$.

Если единица измерения ТКН — процент на градус Цельсия ($\text{\%/}^\circ\text{C}$), то формула будет

$$\alpha_{\text{н}} = \frac{1}{U_{\text{ст}}} \frac{\Delta U_{\text{ст}}}{\Delta T_{\text{ст}}} \cdot 100\%;$$

если формула измерения ТКН — милливольт на градус Цельсия ($\text{мВ}/^\circ\text{C}$), то

$$\alpha_{\text{н}} = \frac{\Delta U_{\text{ст}}}{\Delta T_{\text{ст}}}.$$

Тесты к главе 2

1. Какое действие оказывает внутреннее электрическое поле p - n перехода на основные носители заряда?

Варианты ответов:

- а. Ускоряющее.
- б. Замедляющее.
- в. Не оказывает действия.

2. Какими носителями заряда создается прямой ток диода?

Варианты ответов:

- а. Основными.
- б. Неосновными.
- в. Электронами.
- г. Дырками.

3. Какой тип пробоя p - n перехода может стать следствием недопустимого повышения обратного напряжения на диоде?

Варианты ответов:

- а. Тоннельный.
- б. Лавинный.
- в. Тепловой.

4. Каким образом стабилитрон включается в схеме относительно нагрузки?

Варианты ответов:

- а. Параллельно нагрузке в любом направлении.
- б. Последовательно с нагрузкой.
- в. Параллельно нагрузке в прямом направлении.
- г. Параллельно нагрузке в обратном направлении.

Биполярные транзисторы

Общие положения ► Принцип действия транзистора и его основные параметры ► Статические вольт-амперные характеристики транзистора ► Параметры схем включения биполярного транзистора ► Режим переключения биполярного транзистора в схеме с общим эмиттером

3.1. Общие положения

Биполярный транзистор — полупроводниковый прибор с двумя или несколькими взаимодействующими p - n переходами и тремя (или более) выводами, усилительные свойства которого обусловлены явлениями инжекции и экстракции неосновных носителей заряда. Транзистор называется биполярным, поскольку в работе прибора участвуют одновременно два типа носителей заряда — электроны и дырки.

Биполярный транзистор представляет собой трехслойную полупроводниковую структуру с чередующимся типом электропроводности слоев и содержит два p - n перехода. В зависимости от чередования слоев существуют транзисторы типов p - n - p и n - p - n (рис. 3.1).

Трехслойная транзисторная структура типа p - n - p показана на рис. 3.1, а. Пластина полупроводника n -типа является основанием конструкции, отсюда и название слоя — база (Б). Два наружных p -слоя создаются в результате диффузии в них акцепторной примеси при сплавлении их с соответствующим материалом. Один из слоев называется эмиттером (Э), а другой — коллектором (К). Так же называются внешние выводы от этих слоев. Соответственно p - n переход между эмиттером и базой называется эмиттерным, а между коллектором и базой — коллекторным.

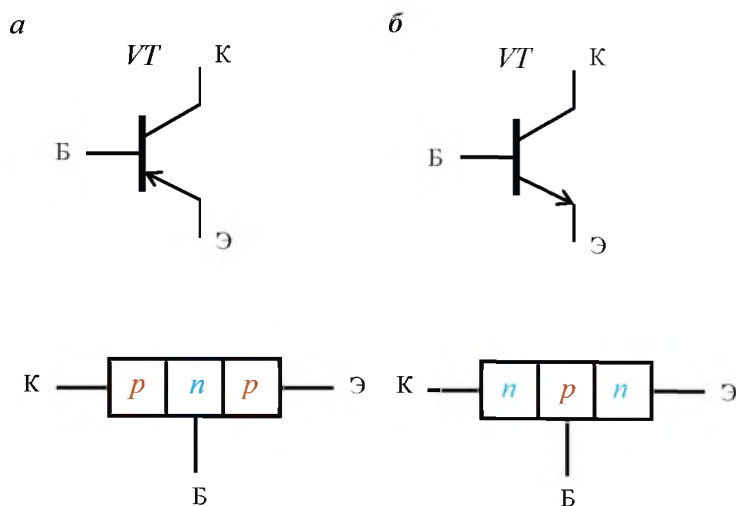


Рис. 3.1. Структура и обозначение биполярных транзисторов:

а — тип *p-n-p*; *б* — тип *n-p-n*

Функция эмиттерного перехода — инжектирование (эмиттирование) носителей заряда в базу, функция коллекторного перехода — сбор носителей заряда (экстракция), прошедших через базовый слой.

В транзисторах типа *n-p-n* (см. рис. 3.1, б) функции всех трех слоев и их названия аналогичны, изменяется лишь тип носителей заряда, проходящих через базу: в приборах типа *p-n-p* это дырки, в приборах типа *n-p-n* — электроны.

3.2. Принцип действия транзистора и его основные параметры

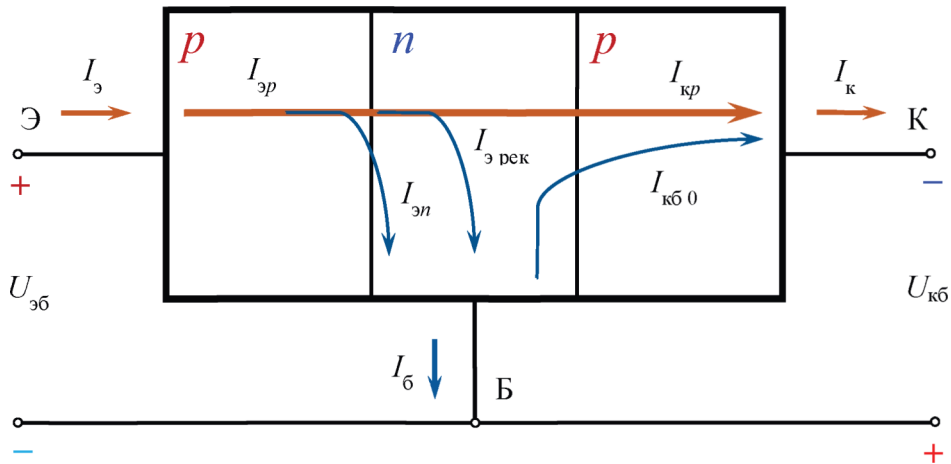
Каждый из *p-n* переходов транзистора может быть смещен либо в прямом, либо в обратном направлении. В зависимости от этого различают четыре режима работы транзистора (рис. 3.2).

Управление транзистором наиболее эффективно осуществляется в нормальном активном режиме. При этом транзистор выполняет функции активного элемента электрической цепи: усиление, генерирование, переключение и т. д. В режимах отсечки и насыщения управление транзистором практически отсутствует.



Рис. 3.2. Режимы работы биполярного транзистора

Принцип действия биполярного транзистора рассмотрим на примере структуры типа $p-n-p$ (рис. 3.3).

Рис. 3.3. Транзисторная структура типа $p-n-p$

В нормальном активном режиме внешние напряжения подключают к транзистору таким образом, чтобы обеспечивалось смещение эмиттерного перехода в прямом направлении, а коллекторного перехода — в обратном. Это достигается с помощью двух источников напряжения $U_{эб}$ и $U_{кб}$ (см. рис. 3.3). Напряжение $U_{эб}$ подключается положительным полюсом к эмиттеру относительно базы, напряжение

$U_{кб}$ — отрицательным полюсом к коллектору относительно базы (схема с общей базой — п. 3.3). Изучим процессы, протекающие в эмиттерном переходе, базовом слое и коллекторном переходе транзистора.

При подключении напряжения $U_{кб}$, коллекторный переход смещается в обратном направлении, что приводит к появлению неуправляемой составляющей тока коллектора $I_{кб0}$, обусловленной протеканием обратного тока коллекторного перехода, который создается дрейфом неосновных носителей заряда из близлежащих областей обратно включенного $p-n$ перехода. Появление $I_{кб0}$ объясняется тем, что внутреннее электрическое поле коллекторного перехода оказывает тормозящее действие на основные носители заряда и ускоряющее — на неосновные носители, т.е. «притягивает» дырки, находящиеся в базовом n -слое, и «перебрасывает» их через $p-n$ переход в коллектор (см. пп. 2.3.2).

Таким образом, функция коллекторного перехода и процессы в коллекторном переходе сводятся к экстракции неосновных носителей заряда базы (дырок) из базы в коллектор.

Поскольку в эмиттерном переходе внешнее напряжение $U_{эб}$ действует в прямом направлении, основные носители заряда (дырки области эмиттера) под действием диффузии будут переходить (инжектировать) из эмиттера в область базы. Также увеличится диффузионный поток электронов (основных носителей заряда области базы) в эмиттер. Ток эмиттерного перехода и цепи эмиттера можно записать в виде

$$I_{э} = I_{эp} + I_{эн},$$

где $I_{э}$ — ток эмиттера;

$I_{эp}$ — дырочная составляющая тока эмиттера;

$I_{эн}$ — электронная составляющая тока эмиттера.

Дырочная составляющая тока $I_{эp}$ создается потоком дырок, переходящих из эмиттера в базу. Большинство дырок в последующем достигает коллектора и создает коллекторный ток транзистора $I_{к}$. Электронная составляющая тока $I_{эн}$ обусловлена движением электронов из базы в эмиттер. Она замыкается по входной цепи через источник $U_{эб}$ и не участвует в создании тока коллектора.

Таким образом, функция эмиттерного перехода и процессы в эмиттерном переходе сводятся к инжекции носителей заряда (дырок) в базу.

Одним из важнейших показателей эффективности работы эмиттерного перехода является так называемый коэффициент инжекции γ , показывающий, какую часть от полного эмиттерного тока составляет его дырочная составляющая,

$$\gamma = \frac{I_{\text{эп}}}{I_{\text{э}}}.$$

Если говорить о качестве эмиттерного перехода, необходимо, чтобы электронная составляющая эмиттерного тока $I_{\text{эн}}$ была существенно меньше его дырочной составляющей $I_{\text{эп}}$. Это достигается в результате значительного (на два-три порядка) превышением концентрации основных носителей заряда (дырок) в эмиттере над концентрацией основных носителей заряда (электронов) в базе. Типовые значения коэффициента инжекции $\gamma = 0,97 \dots 0,995$.

Наличие дырок и электронов в базе приводит к тому, что в процессе диффузии некоторая часть дырок рекомбинирует с электронами. В результате актов рекомбинации количество дырок, дошедших до коллектора, не будет равно количеству дырок, поступивших из эмиттера, и, следовательно, дырочная составляющая коллекторного тока $I_{\text{кр}}$ (см. рис. 3.2) будет меньше дырочной составляющей эмиттерного тока $I_{\text{эп}}$. Вследствие рекомбинации некоторого числа дырок с электронами в процессе их движения через базу, концентрация дырок уменьшается. В соответствии с этим запишем соотношение для дырочной составляющей тока коллектора

$$I_{\text{кр}} = I_{\text{эп}} - I_{\text{эрек}},$$

где $I_{\text{кр}}$ — дырочная составляющая коллекторного тока;

$I_{\text{эрек}}$ — рекомбинационная составляющая тока эмиттера, вызванная потерей дырок в базе на рекомбинацию.

Для определения части дырок, прошедшей из эмиттера в коллектор, вводят коэффициент переноса δ , который равен отношению дырочной составляющей коллекторного тока к дырочной составляющей эмиттерного тока,

$$\delta = \frac{I_{\text{кр}}}{I_{\text{эп}}} = \frac{I_{\text{кр}}}{I_{\text{кр}} + I_{\text{эрек}}}.$$

Желательно, чтобы величина $I_{\text{эрек}}$ была как можно меньше, или, иными словами, чтобы значение коэффициента δ как можно мень-

ше отличалось от единицы. Способы приближения коэффициента δ к единице направлены на сокращение потерь дырок в базе за счет актов рекомбинации. Для сокращения времени нахождения дырок в базе и увеличения скорости их прохождения через нее, базу делают тонкой и бедной основными носителями заряда. Кроме всего перечисленного, площадь коллекторного перехода делают в разы больше площади эмиттерного перехода. Типовые значения коэффициента δ для транзисторов лежат в пределах 0,96...0,996.

Коллекторный ток транзистора I_k , обусловленный дырочной составляющей I_{kp} (см. рис. 3.3, а), связан с током эмиттера $I_э$ коэффициентом передачи тока эмиттера α

$$\alpha = \frac{I_{kp}}{I_э}. \quad (3.1)$$

Покажем связь всех трех коэффициентов γ , δ и α , для чего домножим числитель и знаменатель равенства (3.1) на $I_{эp}$, в результате получим

$$\alpha = \frac{I_{kp}}{I_э} \frac{I_{эp}}{I_{эp}} = \gamma \delta.$$

Следовательно, коэффициент α тем ближе к единице, чем меньше отличаются от единицы коэффициенты γ и δ .

Основное соотношение для токов транзистора составляется по первому закону Кирхгофа:

$$\begin{aligned} I_э &= I_k + I_{б0}; \\ I_э &= I_{эp} + I_{эн}; \\ I_{б0} &= I_{эн} + I_{эрек} - I_{кб0}; \\ I_k &= I_{kp} + I_{кб0}. \end{aligned} \quad (3.2)$$

С учетом выражений (3.1) и (3.2) токи I_k и $I_{б0}$ можно выразить через $I_э$:

$$\begin{aligned} I_k &= \alpha I_э + I_{кб0}; \\ I_{б0} &= (1 - \alpha) I_э - I_{кб0}. \end{aligned}$$

Управляющее свойство биполярного транзистора, характеризующее изменение выходного (коллекторного) тока I_k под действием подводимого входного тока $I_э$ (т. е. напряжения $U_{эб}$), обуславливается изменением дырочной составляющей коллекторного тока I_{kp} за счет изменения дырочной составляющей эмиттерного тока $I_{эp}$ (рис. 3.3).

Таким образом, принцип действия биполярного транзистора основан на создании транзитного (проходящего) потока носителей заряда из эмиттера в коллектор через базу и на управлении коллекторным (выходным) током за счет изменения эмиттерного (входного) тока. Следовательно, биполярный транзистор управляется током.

3.3. Статические вольт-амперные характеристики транзистора

Существует три способа включения транзистора:

- с общей базой (ОБ) (рис. 3.4, а, б);
- общим эмиттером (ОЭ) (рис. 3.4, в, г);
- общим коллектором (ОК) (рис. 3.4, д, е).

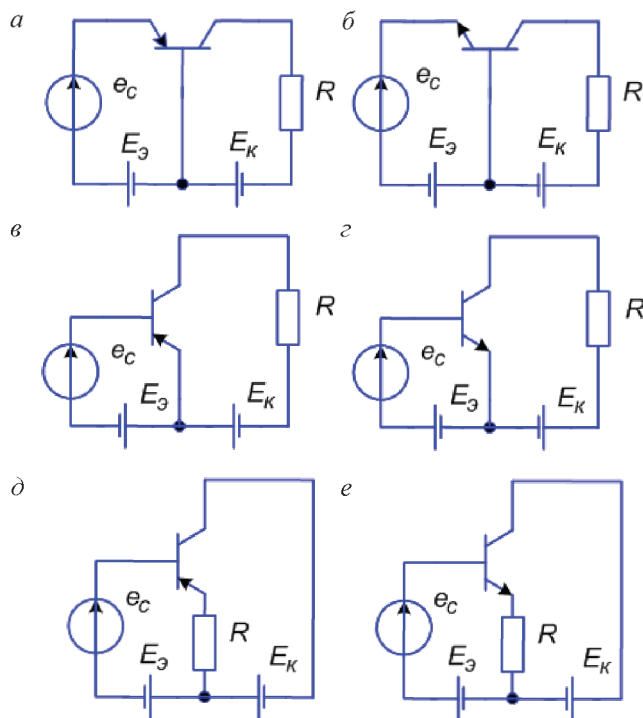


Рис. 3.4. Схема с общей базой (а, б), с общим эмиттером (в, г), с общим коллектором (д, е) (URL: <https://clck.ru/s4oKC>)

О способе включения с общей базой говорилось при рассмотрении принципа действия транзистора. Различие в способах включения зависит от того, какой из выводов транзистора является общим для входной и выходной цепей. В схеме ОБ общей точкой входной и выходной цепей является база, в схеме ОЭ — эмиттер, в схеме ОК — коллектор. В силу того что статические характеристики транзистора в схемах ОЭ или ОК примерно одинаковы, далее рассматриваются характеристики только для двух способов включения: ОБ и ОЭ.

Биполярный транзистор можно представить как нелинейный четырехполюсник с короткозамкнутой стороной, соответствующей общему электроду.

Электрическое состояние четырехполюсника характеризуется четырьмя величинами, связанными с входной и выходной сторонами: входным напряжением $U_{вх}$, входным током $I_{вх}$, выходным напряжением $U_{вых}$ и выходным током $I_{вых}$.

Статические вольт-амперные характеристики четырехполюсника представляют собой зависимости между постоянными входными и выходными токами и напряжениями при отсутствии нагрузки в выходной цепи.

Семейство входных характеристик связывает ток и напряжение на входе при постоянстве одной из выходных величин

$$I_{вх} = f(U_{вх}) \text{ при } U_{вых} = \text{const.}$$

Семейство выходных характеристик связывает ток и напряжение на выходе при постоянстве одной из входных величин

$$I_{вых} = f(U_{вых}) \text{ при } I_{вх} = \text{const.}$$

Зависимость выходной величины от входной устанавливает семейство характеристик передачи (передаточных характеристик)

$$I_{вых} = f(U_{вх}) \text{ при } U_{вых} = \text{const.}$$

Зависимость входной величины от выходной величины определяется семейством характеристик обратной связи.

3.3.1. Статические характеристики биполярного транзистора, включенного по схеме с общей базой

Определим входные и выходные величины при включении транзистора по схеме с общей базой (рис. 3.5):

$$I_{вх} = I_{э}; U_{вх} = U_{эб}; I_{вых} = I_{к}; U_{вых} = U_{кб}.$$

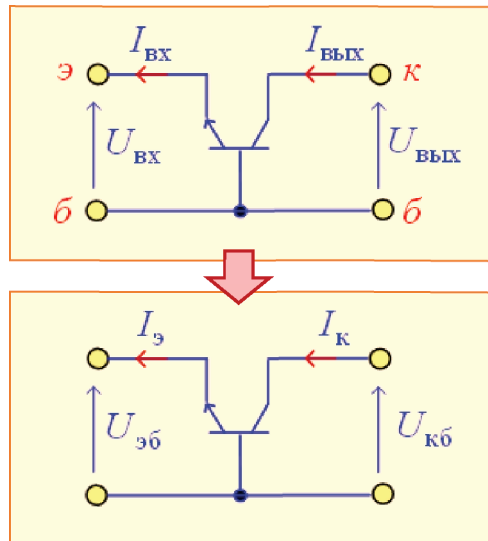


Рис. 3.5. Биполярный транзистор в схеме с общей базой
(URL: <https://clck.ru/s4oKC>)

Входные характеристики представляют собой зависимость

$$I_{\text{э}} = f(U_{\text{эб}}) \Big|_{U_{\text{кб}} = \text{const}}.$$

Входные характеристики определяются свойствами эмиттерного перехода, смещенного в прямом направлении, поэтому внешне входные характеристики похожи на прямые ветви вольт-амперной характеристики p - n перехода (рис. 3.6).

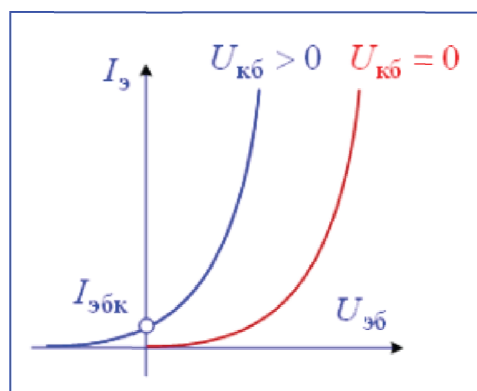


Рис. 3.6. Семейство входных характеристик биполярного транзистора при включении с общей базой (URL: <https://clck.ru/s4oKC>)

Особенностью этих характеристик является то, что при напряжении на эмиттерном переходе, равном нулю, входной ток отличается от нуля и приблизительно равен току $I_{эбк}$ — это ток эмиттера транзистора, когда эмиттерный переход находится под обратным напряжением, а коллекторный переход короткозамкнут.

Для того чтобы входной ток стал равен нулю, на эмиттерный переход должно быть подано отрицательное напряжение (работа в режиме отсечки).

Выходные характеристики представляют собой зависимости

$$I_k = f(U_{кб})|_{I_э = \text{const}}.$$

Общий вид выходных характеристик определяется обратно смещенным коллекторным переходом, поэтому аналогичен обратной ветви вольт-амперной характеристики $p-n$ перехода (рис. 3.7).

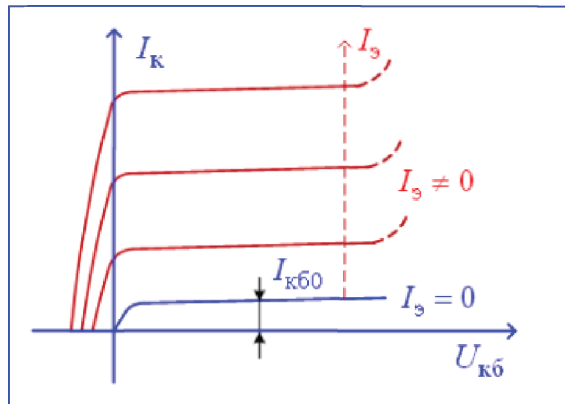


Рис. 3.7. Семейство выходных характеристик биполярного транзистора при включении с общей базой (URL: <https://clck.ru/s4oKC>)

С ростом тока эмиттера выходные характеристики смещаются вверх и пересекают ось ординат ($U_{кб} = 0$) в точках $I_k = \alpha I_э$.

$I_{кб0}$ — ток коллектора транзистора, включенного по схеме с общей базой, когда коллекторный переход находится под обратным напряжением, а ток эмиттера равен нулю.

Характеристики передачи представляют собой зависимости

$$I_k = f(I_э)|_{U_{кб} = \text{const}}.$$

Характеристики передачи в первом приближении можно считать прямыми линиями. В действительности коэффициент передачи тока эмиттера зависит от тока эмиттера, поэтому характеристики незначительно отличаются от линейных (рис. 3.8).

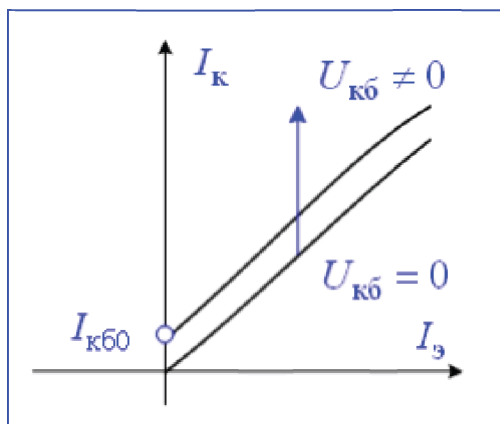


Рис. 3.8. Семейство характеристик передачи биполярного транзистора при включении с общей базой (URL: <https://clck.ru/s4oKC>)

При $U_{КБ} = 0$ характеристика передачи выходит из начала координат. При обратном напряжении, на коллекторном переходе характеристики смещаются вверх и выходят из точек на оси ординат, соответствующих обратному току коллектора $I_{КБ0}$.

3.3.2. Статические характеристики биполярного транзистора, включенного по схеме с общим эмиттером

Определим входные и выходные величины при включении транзистора по схеме с общим эмиттером (рис. 3.9):

$$I_{ВХ} = I_Б; U_{ВХ} = U_{БЭ}; I_{ВЫХ} = I_K; U_{ВЫХ} = U_{КЭ}.$$

Входные характеристики (рис. 3.10) представляют собой зависимости

$$I_Б = f(U_{БЭ}) \Big|_{U_{КЭ} = \text{const}}.$$

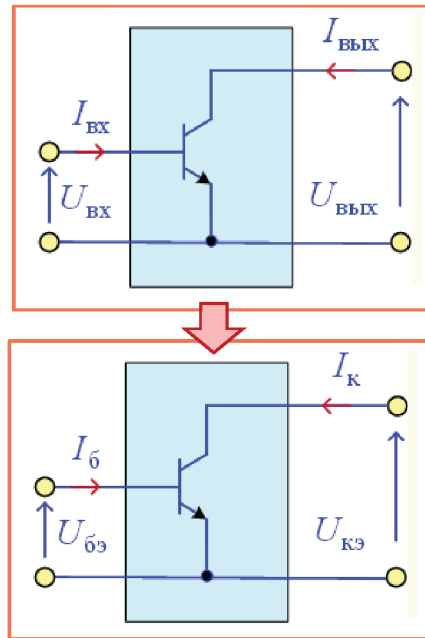


Рис. 3.9. Биполярный транзистор в схеме с общим эмиттером
(URL: <https://clck.ru/s4oKC>)

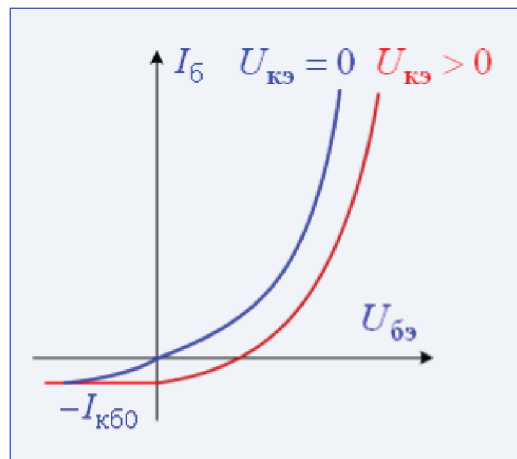


Рис. 3.10. Семейство входных характеристик биполярного транзистора при включении с общим эмиттером (URL: <https://clck.ru/s4oKC>)

При $U_{кэ} = 0$ входная характеристика (рис. 3.10) эквивалентна характеристике $p-n$ перехода. Если $U_{кэ} < 0$, ток базы уменьшается и входные характеристики смещаются вниз и не проходят через начало координат.

нат. Кроме того, при условии $(-U_{кэ}) \ll \phi_T$ входные характеристики расположены очень близко друг к другу.

При $U_{бэ} = 0$ и $U_{кэ} > 0$ ток базы равен $-I_{кб0}$ ($I_{кб0}$ — ток коллектора транзистора, включенного по схеме с общей базой, когда коллекторный переход находится под обратным напряжением, а ток эмиттера равен нулю).

Выходные характеристики (рис. 3.11) представляют собой зависимости

$$I_k = f(U_{кэ})|_{I_б = \text{const}}.$$

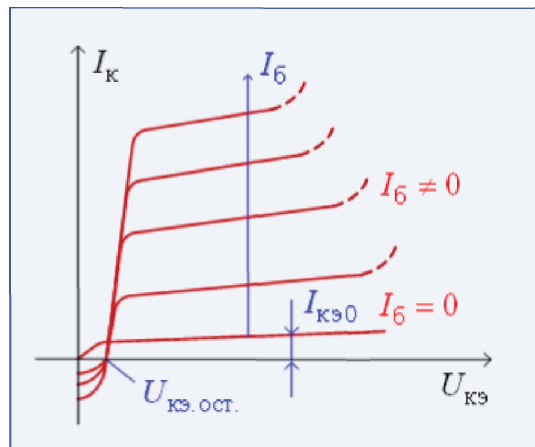


Рис. 3.11. Семейство выходных характеристик биполярного транзистора при включении с общим эмиттером (URL: <https://clck.ru/s4oKC>)

$I_{кэ0}$ — ток коллектора транзистора, включенного по схеме с общим эмиттером, когда коллекторный переход находится под обратным напряжением, а ток базы равен нулю.

Характеристики передачи (рис. 3.12) представляют собой зависимости

$$I_k = f(I_б)|_{U_{кэ} = \text{const}}.$$

При $U_{кэ} = 0$ характеристика передачи выходит из начала координат и расположена в четвертом квадранте.

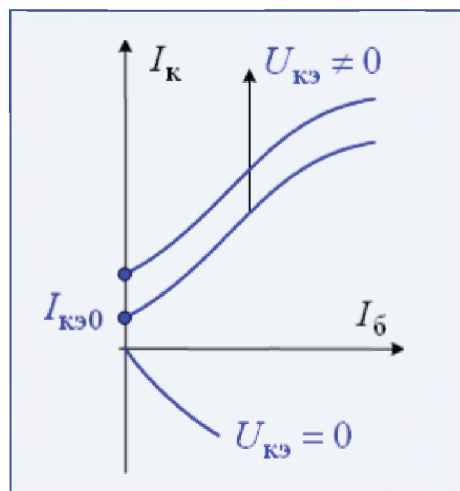


Рис. 3.12. Семейство характеристик передачи биполярного транзистора при включении с общим эмиттером (URL: <https://clck.ru/s4oKC>)

Если $(-U_{кэ}) \gg \varphi_T$, то характеристики передачи выходят из точек $I_{кэ0}$ на оси тока и являются монотонно возрастающими. Рост напряжения $U_{кэ}$ вызывает смещение характеристик передачи вверх из-за увеличения тока $I_{кэ0}$.

3.4. Параметры схем включения биполярного транзистора

По проведенному анализу работы биполярного транзистора для разных схем включения можно сделать следующие выводы:

- усилительные каскады с общей базой и общим эмиттером усиливают входной сигнал по напряжению ($k_{U_{OB}} > 1$, $|k_{U_{OЭ}}| > 1$), причем $k_{U_{OB}} \approx |k_{U_{OЭ}}|$, а усилительный каскад с общим коллектором не дает усиления по напряжению ($k_{U_{OK}} < 1$);
- усилительные каскады с общим эмиттером и общим коллектором усиливают входной сигнал по току ($|k_{I_{OK}}| > 1$, $k_{I_{OЭ}} > 1$), причем $k_{I_{OЭ}} \approx |k_{I_{OK}}|$, тогда как усилительный каскад с общей базой усиления по току не дает ($|k_{I_{OB}}| < 1$);

- усилительный каскад с общим эмиттером обеспечивает наибольшее усиление сигнала по мощности (за счет усиления и по напряжению, и по току);
- входное сопротивление каскада с общим эмиттером превосходит входное сопротивление каскада с общей базой, а усилительный каскад с общим коллектором обладает наибольшим входным сопротивлением;
- выходное сопротивление каскада с общим эмиттером меньше выходного сопротивления каскада с общей базой, а усилительный каскад с общим коллектором обладает наименьшим выходным сопротивлением.

Для большей наглядности сведем вышесказанное в таблицу:

Параметр	Схема ОЭ	Схема ОБ	Схема ОК
k_i	Десятки — сотни	$k_i < 1$	Десятки — сотни
k_u	Десятки — сотни	Десятки — сотни	$k_u < 1$
$r_{вх}$	Сотни омов — единицы килоомов	Единицы — десятки омов	Десятки — сотни килоомов
$r_{вых}$	Единицы — десятки килоомов	Сотни килоомов — единицы мегаомов	Сотни омов — единицы килоомов

3.5. Режим переключения биполярного транзистора в схеме с общим эмиттером

Работа биполярного транзистора, включенного с общим эмиттером, в режиме переключения используется в схемах электронных транзисторных ключей (рис. 3.13).

Режим переключения транзистора типа $n-p-n$ в схеме с общим эмиттером при подаче на вход разнополярного управляющего напряжения приведен на рис. 3.14.

При поступлении на вход схемы управляющего напряжения положительной полярности $+U_{вх}$ начинается процесс включения, который содержит три стадии: задержку включения, спад выходного потенциала, накопление избыточного заряда в базе.

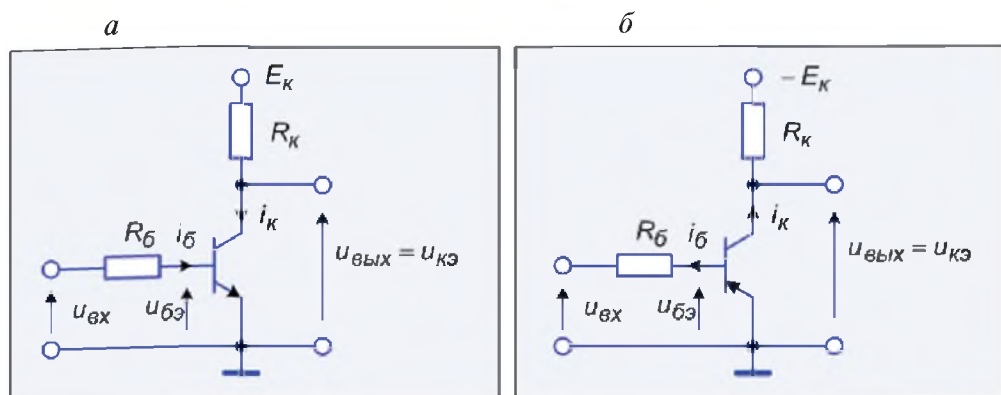


Рис. 3.13. Схема ключа с общим эмиттером:

a — на транзисторе типа *n-p-n*; *б* — на транзисторе типа *p-n-p*
(URL: <https://clck.ru/s4oKC>)

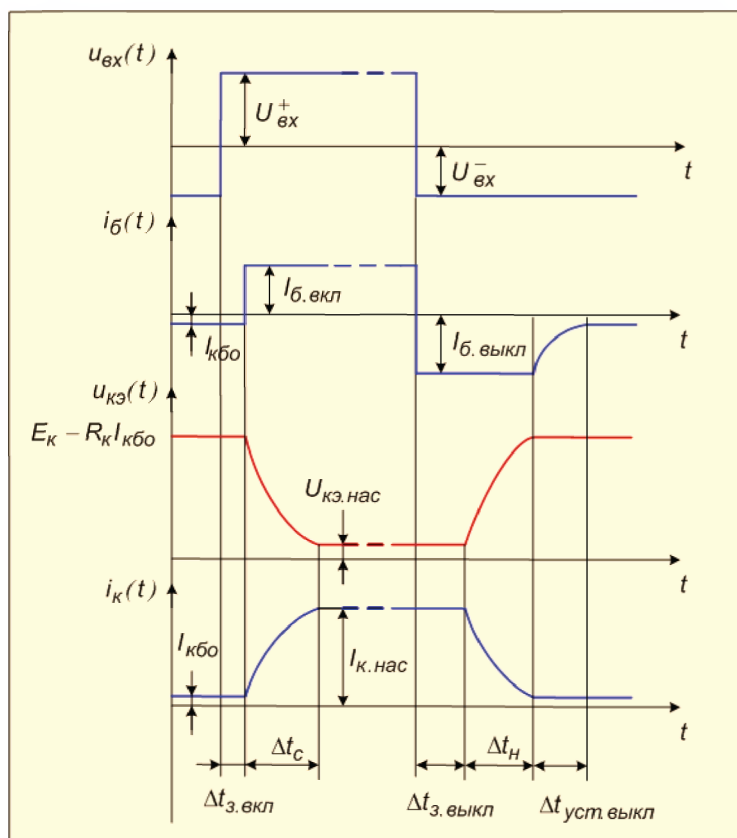


Рис. 3.14. Временные диаграммы работы биполярного транзистора в импульсном режиме в схеме с общим эмиттером (URL: <https://clck.ru/s4oKC>)

При поступлении на вход ключа управляющего напряжения отрицательной полярности $-U_{\text{вх}}$ начинается процесс выключения, который содержит две стадии: задержку выключения, нарастание выходного потенциала.

Тесты к главе 3

1. Какие носители заряда образуют ток от эмиттера через базу к коллектору в транзисторе типа $p-n-p$?

Варианты ответов:

- а. Дырки.
- б. Электроны.
- в. Участвуют оба типа носителей заряда.

2. Каким должно быть смещение эмиттерного и коллекторного переходов в транзисторе для работы в нормальном активном режиме?

Варианты ответов:

- а. Оба перехода в прямом направлении.
- б. Оба перехода в обратном направлении.
- в. Эмиттерный переход в прямом направлении, коллекторный — в обратном.
- г. Эмиттерный переход в обратном направлении, коллекторный — в прямом.

3. Зависимость каких величин представлено семейством характеристик передачи?

Варианты ответов:

- а. $I_{\text{вх}} = f(U_{\text{вх}})$ при $U_{\text{ввых}} = \text{const.}$
- б. $I_{\text{ввых}} = f(U_{\text{вх}})$ при $U_{\text{ввых}} = \text{const.}$
- в. $I_{\text{ввых}} = f(U_{\text{ввых}})$ при $I_{\text{вх}} = \text{const.}$

4

Униполярные (полевые) транзисторы

- Полевой транзистор с p - n переходом ► МДП-транзисторы
 - Работа полевых транзисторов в импульсном режиме
 - Сравнительная характеристика МДП- и биполярного транзистора
-

Классу униполярных относят транзисторы, принцип действия которых основан на использовании носителей заряда только одного знака (электронов или дырок), отсюда и название транзисторов. Управление током в униполярных транзисторах осуществляется путем изменения проводимости канала, через который протекает ток транзистора под воздействием электрического поля, поэтому униполярные транзисторы также называют полевыми.

По способу создания канала различают:

- полевые транзисторы с p - n переходом;
- МДП-транзисторы.

МДП-транзисторы в свою очередь разделяются:

- на со встроенным каналом;
- с индуцированным каналом.

4.1. Полевой транзистор с p - n переходом

Анализ работы полевого транзистора с p - n переходом проведем на его модели (рис. 4.1). В приведенной конструкции канал протекания тока транзистора представляет собой слой полупроводника n -типа,

заключенный между двумя p - n переходами. Канал имеет контакты с внешними электродами прибора. Электрод, от которого начинают движение носители заряда (в данном случае электроны), называют истоком (и) (*source* (S)), а электрод, к которому они движутся, — стоком (с) (*drain* (D)). Полупроводниковые слои p -типа, образующие с n -слоем два p - n перехода, созданы с более высокой концентрацией примеси, чем n -слой. Оба p -слоя электрически связаны между собой и имеют общий внешний электрод, называемый затвором (з) (*gate* (G)).

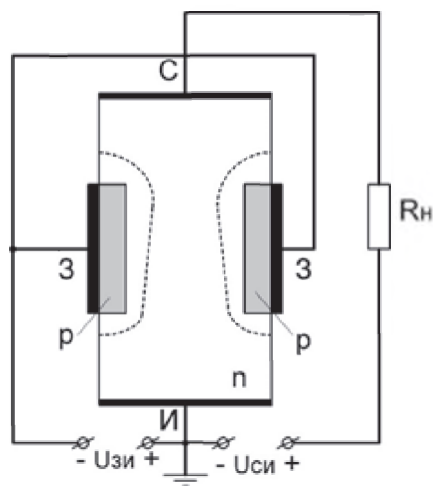


Рис. 4.1. Модель полевого транзистора с p - n переходом
(Support 17 : [сайт]. URL: <https://clck.ru/s52pF>)

Подобную конструкцию имеют и полевые транзисторы с каналом p -типа. Условные обозначения полевых транзисторов с каналами p - и n - типов приведены на рис. 4.2.

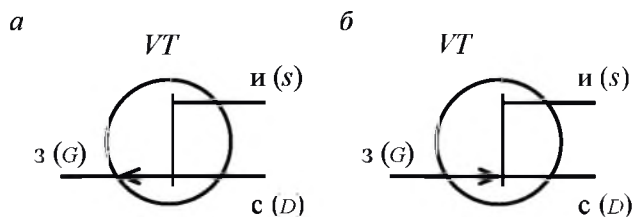


Рис. 4.2. Условное обозначение полевого транзистора с p - n переходом:
а — с каналом p -типа; б — с каналом n -типа

Управляющее (входное) напряжение подается между затвором и истоком. Напряжение $U_{зи}$ должно быть обратным для обоих p - n переходов.

В выходную цепь, в которую входит канал транзистора, включается напряжение $U_{си}$ положительным полюсом к стоку.

Управляющие свойства транзистора объясняются тем, что при изменении напряжения $U_{зи}$ изменяется ширина его p - n переходов, представляющих собой участки полупроводника, обедненные носителями заряда. Поскольку p -слой имеет бóльшую концентрацию примеси, чем n -слой, изменение ширины p - n переходов происходит в основном за счет более высокоомного n -слоя (эффект модуляции ширины базового слоя). Вследствие этого изменяется сечение токопроводящего канала и его проводимость, т. е. выходной ток прибора I_c .

Особенностью полевого транзистора является то, что на проводимость канала оказывает влияние как управляющее напряжение $U_{зи}$, так и напряжение $U_{си}$. При некотором напряжении $U_{си}$ происходит сужение канала, когда границы обоих p - n переходов смыкаются (рис. 4.1) и сопротивление канала становится высоким.

Рассмотрим вольт-амперные характеристики полевых транзисторов с p - n переходом. Для этих транзисторов представляют интерес два вида вольт-амперных характеристик: стоковые и стоко-затворные.

Стоковые (выходные) характеристики полевого транзистора с p - n переходом и каналом n -типа (рис. 4.3) отражают зависимость тока стока от напряжения сток — исток при фиксированном напряжении затвор — исток $I_c = f(U_{си})|_{U_{зи}=\text{const}}$; они представлены в виде семейства кривых.

Поскольку управление выходным током полевых транзисторов осуществляется путем изменения напряжения входной цепи, для них представляет интерес так называемая переходная, или стоко-затворная вольт-амперная характеристика. Стоко-затворная характеристика полевого транзистора показывает зависимость тока стока от напряжения затвор — исток при фиксированном напряжении сток — исток $I_c = f(U_{зи})|_{U_{си}=\text{const}}$. Примерный вид этой характеристики показан на рис. 4.4.

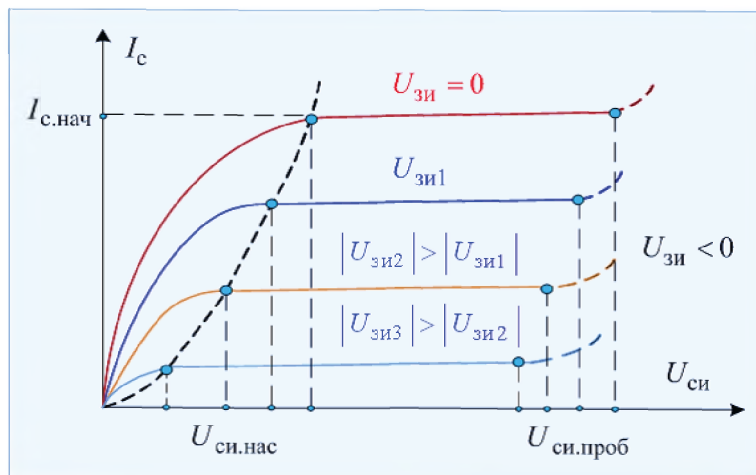


Рис. 4.3. Стоковые (выходные) характеристики полевого транзистора с p - n переходом и каналом n -типа (URL: <https://clck.ru/s4oKC>)

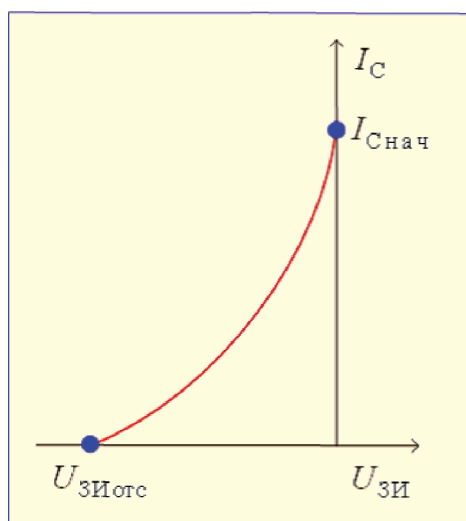


Рис. 4.4. Стоко-затворная характеристика полевого транзистора с p - n переходом и каналом n -типа (URL: <https://clck.ru/s4oKC>)

Основными параметрами полевого транзистора являются:

- максимальное значение тока стока $I_{с\max}$ (соответствует $U_{си.проб}$ на выходных характеристиках (при $U_{зи} = 0$);
- максимальное значение напряжения сток — исток $U_{си\max}$ выбирают в 1,2...1,5 раза меньше напряжения пробоя участка сток — затвор при $U_{зи} = 0$;

- напряжение отсечки $U_{зи0}$. Ему соответствует напряжение на затворе при токе стока близком нулю;
- внутреннее сопротивление транзистора $R_i = \left. \frac{dU_{си}}{dI_c} \right|_{U_{зи}=\text{const}}$ характеризует наклон выходной характеристики;
- крутизна стоко-затворной характеристики S отражает влияние напряжения затвора на выходной ток транзистора. Крутизну $S = \left. \frac{dI_c}{dU_{зи}} \right|_{U_{си}=\text{const}}$ находят по стоко-затворной характеристике при бора (см. рис. 4.4);
- входное сопротивление $R_{вх} = \frac{dU_{зи}}{dI_3}$ транзистора определяется по сопротивлению p - n переходов, смещенных в обратном направлении.

Входное сопротивление полевых транзисторов с p - n переходом довольно велико ($R_{вх} = 10^8 \dots 10^9$ Ом), что является их достоинством и выгодно отличает от биполярных транзисторов.

4.2. МДП-транзисторы

В отличие от полевых транзисторов с p - n переходом, в которых затвор имеет непосредственный электрический контакт с близлежащей областью токопроводящего канала, в МДП-транзисторах затвор изолирован от указанной области слоем диэлектрика. По этой причине МДП-транзисторы относят к классу полевых транзисторов с изолированным затвором.

МДП-транзисторы (структура металл — диэлектрик — полупроводник) выполняют из кремния. В качестве диэлектрика используют оксид кремния SiO_2 . Отсюда другое название этих транзисторов — МОП-транзисторы (структура металл — оксид — полупроводник). Наличие диэлектрика обеспечивает высокое входное сопротивление рассматриваемых транзисторов ($R_{вх} = 10^{12} \dots 10^{14}$ Ом).

МДП-транзисторы выполняют двух типов: со встроенным и с индуцированным каналом.

Принцип действия МДП-транзисторов основан на эффекте изменения проводимости приповерхностного слоя полупроводника на границе с диэлектриком под воздействием поперечного электрического поля. Приповерхностный слой полупроводника является токопроводящим каналом этих транзисторов.

МДП-транзисторы представляют собой в общем случае четырех-электродный прибор. Четвертым электродом (подложкой), выполняющим вспомогательную функцию, является вывод от подложки исходной полупроводниковой пластины. МДП-транзисторы могут быть с каналом n - или p -типа.

4.2.1. МДП-транзистор со встроенным каналом (рис. 4.5)

В исходной пластине кремния p -типа с помощью диффузионной технологии созданы области истока, стока и канала n -типа (рис. 4.6). Слой оксида SiO_2 выполняет функции защиты поверхности, прилегающей к истоку и стоку, а также изоляции затвора от канала. Вывод подложки (если он имеется) иногда присоединяют к истоку.

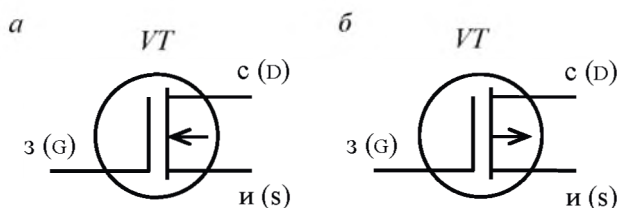


Рис. 4.5. Условное обозначение МДП-транзистора со встроенным каналом:

a — канал n -типа; b — канал p -типа

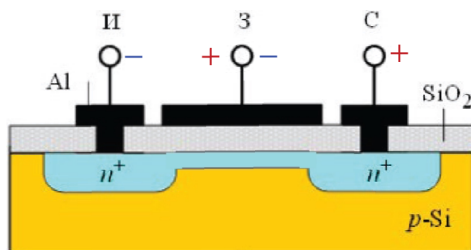


Рис. 4.6. Конструкция МДП-транзистора со встроенным каналом n -типа (URL: <https://clck.ru/s4oKC>)

Стоковые (выходные) характеристики полевого транзистора со встроенным каналом n -типа для случая соединения подложки с истоком (рис. 4.7) по виду близки к характеристикам полевого транзистора с p - n переходом.

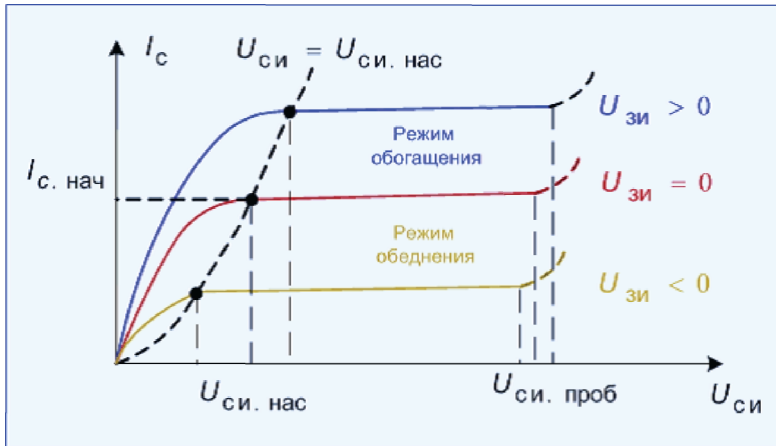


Рис. 4.7. Стоковые (выходные) характеристики полевого транзистора со встроенным каналом n -типа (URL: <https://clck.ru/s4oKC>)

Покажем влияние напряжения затвор — исток на ход стоковых характеристик.

В случае приложения к затвору напряжения ($U_{зи} < 0$), поле затвора оказывает отталкивающее действие на электроны — носители заряда в канале, что приводит к уменьшению их концентрации в канале и проводимости канала. Вследствие этого стоковые характеристики при $U_{зи} < 0$ располагаются ниже кривой, соответствующей $U_{зи} = 0$. Режим работы транзистора ($U_{зи} < 0$), при котором происходит уменьшение концентрации заряда в канале, называют режимом обеднения.

При подаче на затвор напряжения $U_{зи} > 0$, поле затвора притягивает электроны в канал из p -слоя полупроводниковой пластины. Концентрация носителей заряда в канале увеличивается, что соответствует режиму обогащения канала носителями. Проводимость канала возрастает, ток I_c увеличивается. Стоковые характеристики при $U_{зи} > 0$ располагаются выше исходной кривой ($U_{зи} = 0$).

Отличие стоко-затворной характеристики транзистора со встроенным каналом (рис. 4.8) от характеристики транзистора с p - n переходом (см. рис. 4.4) обусловлено возможностью работы прибора как при $U_{зи} < 0$ (режим обеднения), так и при $U_{зи} > 0$ (режим обогащения).

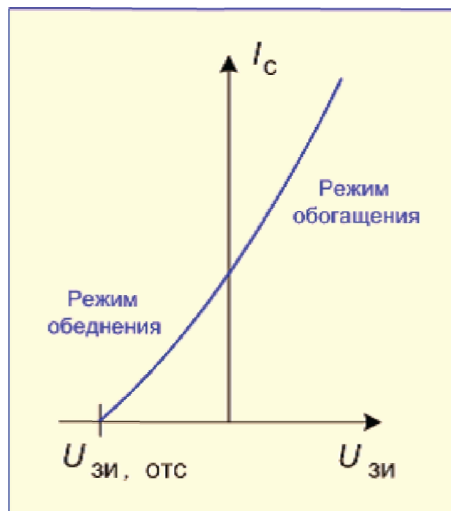


Рис. 4.8. Стоко-затворная характеристика полевого транзистора со встроенным каналом n -типа (URL: <https://clck.ru/s4oKC>)

4.2.2. МДП-транзистор с индуцированным каналом

Канал проводимости тока МДП-транзистора с индуцированным каналом n -типа (рис. 4.9, a и 4.10) специально не создается, а образуется (индуцируется) благодаря притоку электронов из полупроводниковой пластины в случае приложения к затвору напряжения положительной полярности относительно истока. За счет притока электронов, в приповерхностном слое происходит изменение электропроводности полупроводника, т. е. индуцируется токопроводящий канал n -типа, соединяющий области стока и истока. Проводимость канала возрастает с повышением приложенного к затвору напряжения положительной полярности. Таким образом, транзистор с индуцированным каналом работает только в режиме обогащения.

Стоковые (выходные) характеристики полевого транзистора с индуцированным каналом n -типа (рис. 4.11) близки по виду аналогичным характеристикам транзистора со встроенным каналом и имеют тот же характер зависимости $I_c = f(U_{зи})|_{U_{си}=\text{const}}$. Отличие их заключа-

ется в том, что управляет током транзистора напряжение одной полярности, совпадающей с полярностью напряжения $U_{си}$. Ток I_c равен нулю при $U_{зи} = 0$, в то время как в транзисторе со встроенным кана-

лом для этого необходимо изменить полярность напряжения на затворе относительно истока.

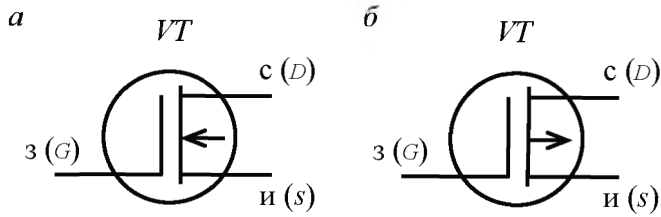


Рис. 4.9. Условное обозначение МДП-транзистора с индуцированным каналом:

а — канал *n*-типа; *б* — канал *p*-типа

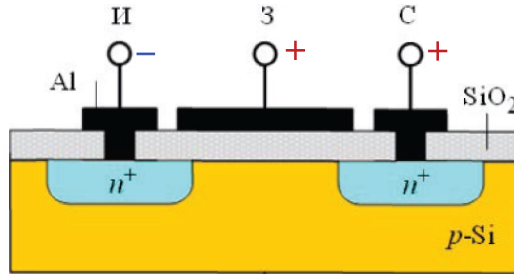


Рис. 4.10. Конструкция МДП-транзистора с индуцированным каналом *n*-типа (URL: <https://clck.ru/s4oKC>)

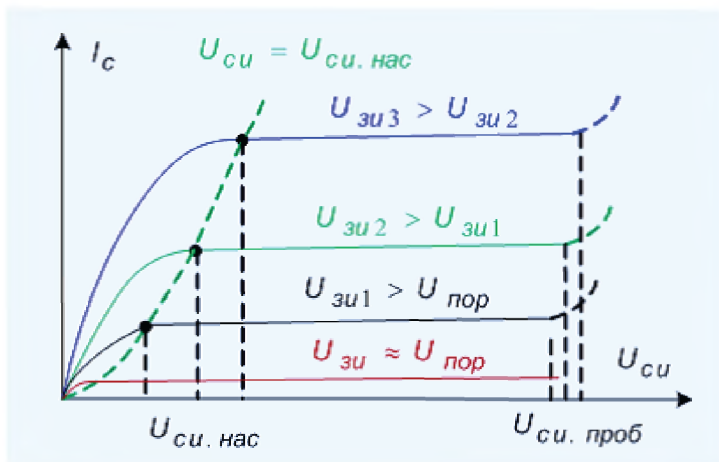


Рис. 4.11. Стоковые (выходные) характеристики полевого транзистора с индуцированным каналом *n*-типа (URL: <https://clck.ru/s4oKC>)

Вид стоко-затворной характеристики транзистора с индуцированным каналом показан на рис. 4.12.

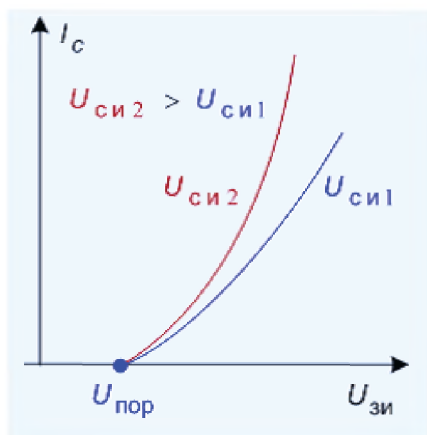


Рис. 4.12. Стоко-затворные характеристики полевого транзистора с индуцированным каналом n -типа (URL: <https://clck.ru/s4oKC>)

МДП-транзисторы обоих типов имеют тот же диапазон токов и напряжений, что и транзисторы с p - n переходом. Примерно такой же порядок величин имеет крутизна S и внутреннее сопротивление r_i . Что касается входного сопротивления $r_{вх}$, то МДП-транзисторы имеют лучшие показатели, чем транзисторы с p - n переходом: входное сопротивление у них составляет $10^{12} \dots 10^{14}$ Ом.

4.3. Работа полевых транзисторов в импульсном режиме

Импульсный режим предполагает работу транзистора под действием больших импульсных сигналов, когда существенно проявляются его нелинейные свойства, а транзистор выступает в качестве ключевого элемента. Такой режим работы наиболее характерен для МДП-транзисторов с индуцированным каналом, включенных по схеме с общим истоком (рис. 4.13).

В стационарном состоянии МДП-транзистор может находиться в выключенном либо во включенном состояниях, соответствующих низкому $U_{вх н}$ или высокому $U_{вх в}$ уровню входного управляющего напряжения (рис. 4.14).

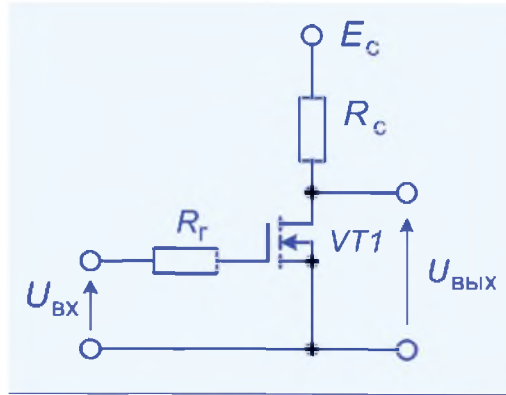


Рис. 4.13. Схема ключа с общим истоком на МДП-транзисторе с индуцированным каналом (URL: <https://clck.ru/s4oKC>)

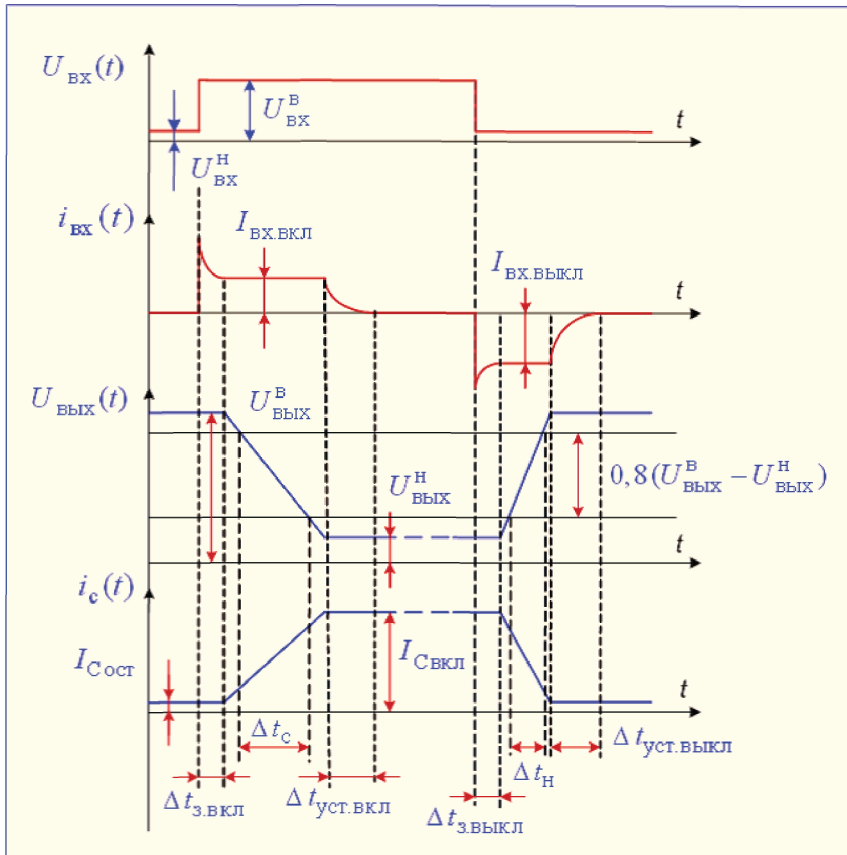


Рис. 4.14. Временные диаграммы работы МДП-транзистора в импульсном режиме (URL: <https://clck.ru/s4oKC>)

Рассмотрим динамические параметры полевых транзисторов при работе в импульсном режиме.

- Время задержки включения полевого транзистора $t_{зд\text{вкл}}$ — интервал времени между 10 %-м значением амплитуды фронта входного импульса, включающего полевой транзистор, и 10 %-м значением амплитуды фронта выходного импульса;
- время нарастания для полевого транзистора $t_{нр}$ — интервал времени между 10- и 90 %-м значениями амплитуды фронта импульса на выходе при включении полевого транзистора;
- время задержки выключения полевого транзистора $t_{зд\text{выкл}}$ — интервал времени между 90 %-м значением амплитуды среза входного импульса, вызвавшего включение полевого транзистора, и 90 %-м значением амплитуды среза выходного импульса;
- время спада для полевого транзистора $t_{сп}$ — интервал времени между 90- и 10 %-м значениями амплитуды среза выходного импульса при выключении транзистора;
- время включения полевого транзистора $t_{вкл} = t_{зд\text{вкл}} + t_{нр}$ — интервал времени, являющийся суммой времени задержки включения и времени нарастания для полевого транзистора.

4.4. Сравнительная характеристика МДП- и биполярного транзистора

МДП- и биполярные транзисторы выполняют одинаковые функции, поэтому представляет интерес провести их сравнение.

Биполярный транзистор	Полевой транзистор
Физическое свойство	
Управляемый физический процесс — инжекция неосновных носителей: изменяется ток управления — изменяется поток инжектированных носителей заряда, что приводит к изменению выходного тока. Выходной ток обеспечивается носителями обоих знаков (дырками и электронами)	Управляемый физический процесс — эффект поля, вызывающий изменение концентрации носителей заряда в канале: изменяется управляющее напряжение — изменяется проводимость канала, что приводит к изменению выходного тока. Выходной ток обеспечивается основными носителями одного знака (или дырками, или электронами)

Биполярный транзистор	Полевой транзистор
Особенности эксплуатации	
Прибор управляется током, т. к. на входе имеется прямо смещенный $p-n$ переход и входное сопротивление мало; относительно небольшой коэффициент усиления по току; низкая помехоустойчивость	Прибор управляется напряжением, входное сопротивление очень большое, т. к. входная цепь от выходной изолирована диэлектриком; очень большой коэффициент усиления по току; высокая помехоустойчивость
Физическое свойство	
Низкая теплостойкость: с увеличением тока растет температура структуры, что приводит к большему росту тока	Высокая теплостойкость: рост температуры структуры приводит к увеличению сопротивления канала, и ток уменьшается
Особенности эксплуатации	
Высокая вероятность саморазогрева и вторичного пробоя; высокая чувствительность к токовым перегрузкам	Низкая вероятность теплового саморазогрева и вторичного пробоя; низкая чувствительность к токовым перегрузкам

Исходя из приведенного сравнения, можно выделить следующие основные преимущества полевых транзисторов:

- в управляющей цепи полевых транзисторов практически не происходит потерь энергии;
- полевые транзисторы обладают более высоким собственным быстродействием, т. к. в них нет инерционных процессов накопления и рассасывания носителей заряда.
- параметры полевых транзисторов в меньшей степени зависят от температуры по сравнению с биполярными транзисторами, т. к. работают на основных носителях, но они более чувствительны к радиации.

Можно сделать вывод, что мощные МДП-транзисторы всё больше вытесняют биполярные транзисторы там, где требуется высокое быстродействие и повышенная надежность работы.

Тесты к главе 4

1. Какова должна быть полярность входного напряжения $U_{зи}$ в полевом транзисторе с $p-n$ переходом для управления проводимостью токопроводящего канала?

Варианты ответов:

- а. Оба $p-n$ перехода смещены в прямом направлении.
- б. Оба $p-n$ перехода смещены в обратном направлении.
- в. Отсутствие внешнего напряжения на переходах.

2. С какой целью в МОП-транзисторе выполняется изоляция затвора от токопроводящего канала слоем диэлектрика?

Варианты ответов:

- а. Для обеспечения лучшей проводимости.
- б. Для обеспечения большого входного сопротивления.
- в. Для обеспечения большого выходного сопротивления.
- г. Для обеспечения малого входного сопротивления.

3. Какой из полевых транзисторов работает только в режиме обогащения?

Варианты ответов:

- а. Полевой транзистор с $p-n$ переходом.
- б. МОП-транзистор с индуцированным каналом.
- в. МОП-транзистор со встроенным каналом.

5

Биполярный транзистор с изолированным затвором (IGBT)

Биполярный транзистор с изолированным затвором (IGBT) — полностью управляемый полупроводниковый прибор, в основе которого лежит трехслойная структура. Его включение и выключение осуществляется путем подачи и снятия положительного напряжения между затвором и истоком.

Коммерческое использование IGBT (Insulated Gate Bipolar Transistor) началось с 1980-х гг. и претерпело несколько стадий развития.

I Поколение (1985): предельное коммутируемое напряжение — 1000 В и ток — 200 А в модульном и 25 А в дискретном исполнении, прямое падение напряжения в открытом состоянии — 3,0...3,5 В, частота коммутации — до 5 кГц (время включения-выключения — около 1 мкс).

II Поколение (1991): коммутируемое напряжение — до 1600 В, ток — до 500 А в модульном и 50 А в дискретном исполнении; прямое падение напряжения — 2,5...3,0 В, частота коммутации — до 20 кГц (время включения-выключения — около 0,5 мкс).

III Поколение (1994): коммутируемое напряжение — до 3500 В, ток — 1200 А в модульном исполнении. Для приборов с напряжением до 1800 В и токов до 600 А прямое падение напряжения составляет 1,5...2,2 В, частота коммутации — до 50 кГц (время около 200 нс).

IV Поколение (1998): коммутируемое напряжение — до 4500 В, ток — до 1800 А в модульном исполнении; прямое падение напряжения — 1,0...1,5 В, частота коммутации — до 50 кГц (время около 200 нс).

IGBT являются продуктом развития технологии силовых транзисторов со структурой металл — оксид — полупроводник, управляемых электрическим полем (MOSFET — Metal Oxid Semiconductor Field Effect Transistor), и сочетают в себе два транзистора в одной полупроводниковой структуре: биполярный (образующий силовой канал) и полевой (образующий канал управления). Сочетание двух приборов в одной структуре позволило объединить достоинства полевых и биполярных транзисторов: высокое входное сопротивление с высокой токовой нагрузкой и малым сопротивлением во включенном состоянии.

Транзистор (рис. 5.1, а) имеет три внешних вывода: G (*gate*) — затвор, C (*collector*) — коллектор, E (*emitter*) — эмиттер. Входная часть транзистора изображается как вход МОП-транзистора с индуцированным каналом, выходная часть — как выход биполярного транзистора типа $p-n-p$. Соединения эмиттера и стока (D), базы и истока (S) являются внутренними. «Коллектору» IGBT соответствует «эмиттер» выходного биполярного $p-n-p$ транзистора, а «эмиттеру», наоборот, — «коллектор».

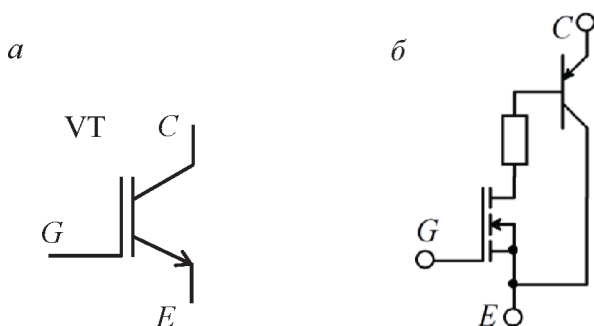


Рис. 5.1. IGBT:

а — схематическое обозначение; б — упрощенная эквивалентная схема
(Рынок микроэлектроники : справ. URL: <https://clck.ru/s58ty>)

Остановимся подробнее на структуре IGBT (рис. 5.2).

В закрытом состоянии транзистора напряжение между коллектором и эмиттером оказывается приложенным к объединенной области n -. При прикладывании к затвору положительного потенциала, в p -области появляется проводящий канал и начинает протекать ток

из области $n-$ в область $n+$ (открывается МОП-транзистор), обеспечивая открытие биполярного $p-n-p$ транзистора. Из рис. 5.2 видно, что эквивалентная схема IGBT будет несколько отличаться от той, что изображена на рис. 5.1, б. Входной МОП-транзистор шунтируется паразитным $n-p-n$ транзистором, возникшим при изготовлении.

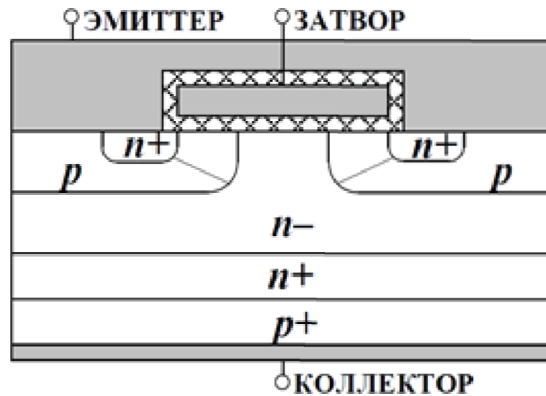


Рис. 5.2. Структура IGBT (Рынок микроэлектроники : справ. URL: <https://clck.ru/s58ty>)

Уточненную структуру IGBT можно представить в виде эквивалентной схемы (рис. 5.3).

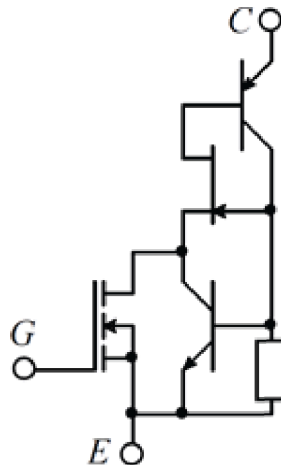


Рис. 5.3. Уточненная эквивалентная схема IGBT (Рынок микроэлектроники : справ. URL: <https://clck.ru/s58ty>)

Промежуточный n -канальный полевой транзистор выполняет роль динамического сопротивления, которое уменьшается в открытом состоянии IGBT и пропускает ток через базовую область биполярного p - n - p транзистора, тем самым уменьшая остаточное напряжение в области n — (рис. 5.2). Большую опасность представляет паразитный биполярный n - p - n транзистор. Совместно с выходным p - n - p транзистором оба транзистора образуют паразитный тиристор, который может перейти в открытое состояние (в литературе это называется эффектом «защелкивания» IGBT), вследствие чего IGBT потеряет управляемость. Современные IGBT практически лишены такого недостатка; «защелкивание» транзистора может наблюдаться при превышении предельной допустимой частоты переключения транзистора.

Транзисторы IGBT выпускаются, как правило, в виде модулей в прямоугольных корпусах с односторонним прижимом и охлаждением (Mitsubishi, Siemens, Semikron и др.) и в таблеточном виде с двухсторонним охлаждением (Toshiba Semiconductor Group). Модули с односторонним охлаждением выполняются в прочном пластмассовом корпусе с паяными контактами и изолированным основанием (рис. 5.4). Все электрические контакты находятся в верхней части корпуса. Отвод тепла осуществляется через основание.

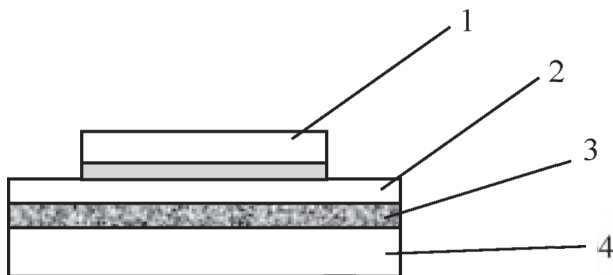


Рис. 5.4. Типовая конструкция IGBT-модуля:

- 1 — кристалл; 2 — слой керамики; 3 — спайка;
- 4 — нижнее тепловыводящее основание

Ток управления IGBT мал, поэтому цепь управления — драйвер — имеет компактную конструкцию. Наиболее целесообразно располагать цепи драйвера в непосредственной близости от силового ключа. В модулях IGBT драйверы включены непосредственно в их структуру.

IGBT-модуль по внутренней электрической схеме может представлять собой:

- единичный IGBT;
- двойной модуль (*half-bridge*), в котором два IGBT соединены последовательно (полумост) (рис. 5.5);
- прерыватель (*chopper*), в котором единичный IGBT последовательно соединен с диодом;
- однофазный мост;
- трехфазный мост.

В IGBT-модулях параллельно каждому IGBT встроен обратный диод.

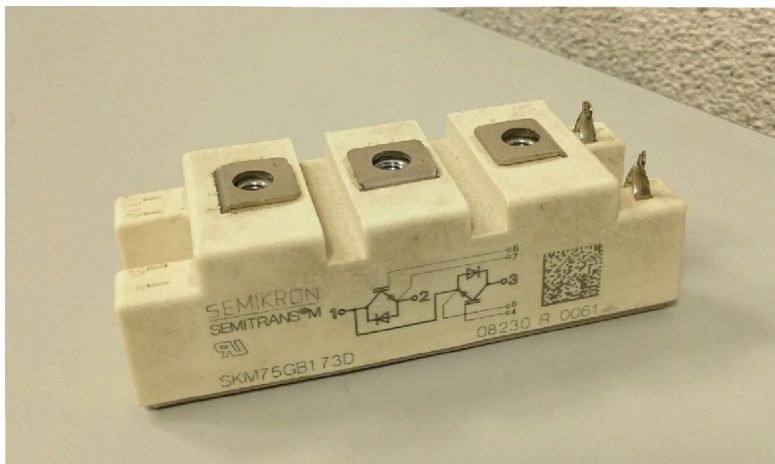


Рис. 5.5. Двойной модуль (*half-bridge*) фирмы SEMIKRON

Наиболее распространенные схемы соединений IGBT-модулей приведены на рис. 5.6.

Можно подытожить, что IGBT являются компромиссным техническим решением, позволившим объединить положительные качества как биполярных (малое падение напряжения в открытом состоянии, высокие коммутируемые напряжения), так и MOSFET-транзисторов (малая мощность управления, высокие скорости коммутации). В то же время потери у них растут пропорционально току, а не квадрату тока, как у полевых транзисторов. По быстродействию силовые IGBT пока уступают MOSFET-транзисторам, но превосходят биполярные.

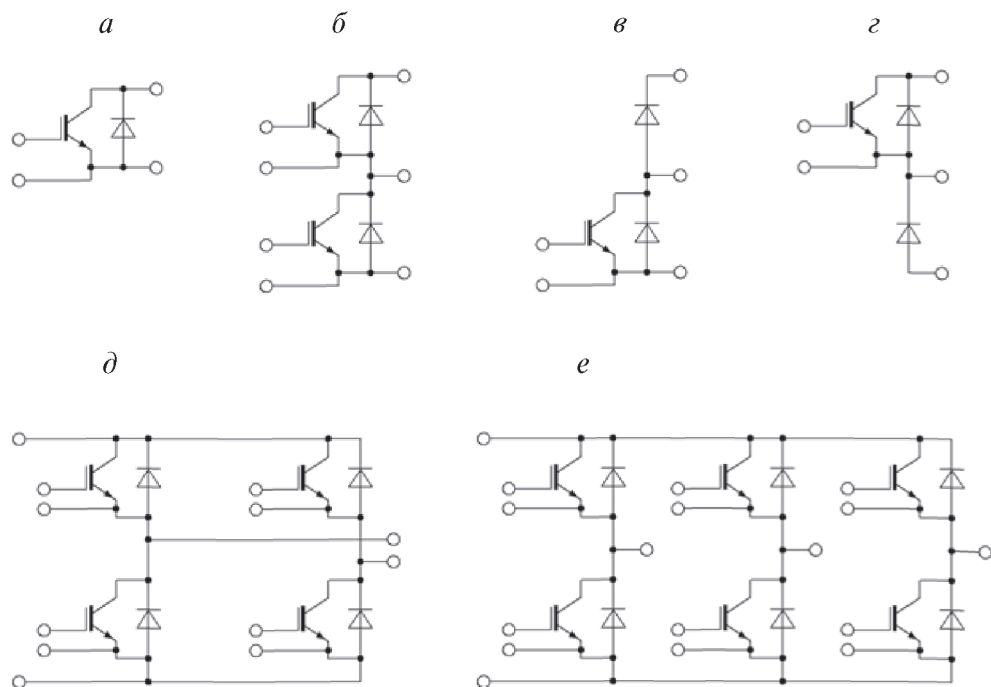


Рис. 5.6. Схемы IGBT-модулей (Алфавит силовой электроники : [сайт]. URL: <https://clck.ru/sAqLD>):

а — одиночный IGBT; *б* — двойной модуль (*half-bridge* — полумост);
в, г — прерыватель (*chopper*); *д* — однофазный мост; *е* — трехфазный мост

Тесты к главе 5

1. Какие полупроводниковые приборы лежат в основе структуры IGBT?

Варианты ответов:

- а. Биполярный транзистор и тиристор.
- б. Полевой транзистор с $p-n$ переходом и биполярный транзистор.
- в. Динистор и МОП-транзистор со встроенным каналом.
- г. Биполярный транзистор и МОП-транзистор с индуцированным каналом.

2. Какой элемент не входит в состав двойного IGBT-модуля (*half-bridge*)?

Варианты ответов:

- а. Диод.
- б. Конденсатор.
- в. Резистор.
- г. IGBT.

3. Превосходят ли IGBT по быстродействию биполярные транзисторы?

Варианты ответов:

- а. Превосходят.
- б. Не превосходят.
- в. Быстродействие одинаковое.

6

Тиристоры

Типы тириستоров ► Принцип действия однооперационного тиристора

Т*иристор* — это четырехслойный полупроводниковый прибор, имеющий два устойчивых состояния: состояние низкой проводимости (тиристор закрыт) и состояние высокой проводимости (тиристор открыт). Перевод тиристора из закрытого состояния в открытое в электрической цепи осуществляется путем внешнего воздействия на прибор.

К числу факторов, наиболее широко используемых для отпирания тириستоров, относится воздействие напряжением (током) или светом (фототиристоры).

6.1. Типы тиристоров

Основными типами являются диодные (рис. 6.1, *а*) и триодные (рис. 6.1, *б–д*) тиристоры.

В диодных тиристорах (динисторах) (рис. 6.1, *а*) переход прибора из закрытого состояния в открытое связан с тем, что напряжение между анодом и катодом достигает некоторого граничного значения, которое является параметром прибора.

В триодных тиристорах состояние прибора управляется по цепи третьего — управляющего — электрода (уэ). По цепи управляющего электрода при этом могут выполняться либо одна, либо две операции изменения состояния тиристора. В зависимости от этого различают одно- и двухоперационные тиристоры.

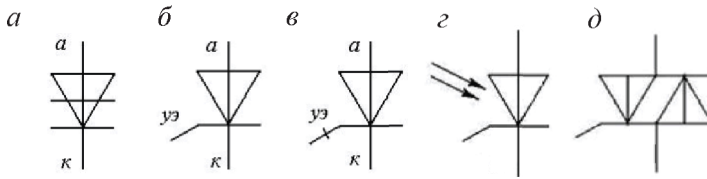


Рис. 6.1. Условные обозначения тиристорov:

a — динистор; *б* — однооперационный тиристор;
в — двухоперационный тиристор; *г* — фототиристор; *д* — симистор

В однооперационных тиристорах (см. рис. 6.1, *б*) по цепи управляющего электрода осуществимо только отпирание тиристора. С этой целью на управляющий электрод подается положительный относительно катода импульс напряжения. Запирается однооперационный тиристор, а также динистор по цепи анода путем изменения полярности напряжения анод — катод.

Двухоперационные тиристоры (см. рис. 6.1, *в*) допускают по цепи управляющего электрода как отпирание, так и запираение прибора. Для запираения на управляющий электрод подается отрицательный импульс напряжения.

В фототиристорах (см. рис. 6.1, *г*) отпирается прибор с помощью светового импульса.

Все перечисленные приборы выполняют функцию бесконтактного ключа, обладающего односторонней проводимостью тока. Прибор, который позволяет проводить ток в обоих направлениях, называют симметричным тиристором (симистором). По своему назначению симистор (см. рис. 6.1, *д*) призван выполнять функции двух обычных тиристорov (см. рис. 6.1, *б*), включенных встречно-параллельно.

Для анализа принципа действия указанных типов тиристорov подробно рассмотрим работу однооперационного тиристора (см. рис. 6.1, *б*) как наиболее распространенного и покажем особенности других типов.

6.2. Принцип действия однооперационного тиристора

Тиристор представляет собой четырехслойную полупроводниковую структуру типа $p-n-p-n$ с тремя $p-n$ переходами (рис. 6.2), в которой p_1 -слой выполняет функцию анода, а n_2 -слой — катода. Управляющий электрод связан с p_2 -слоем структуры.

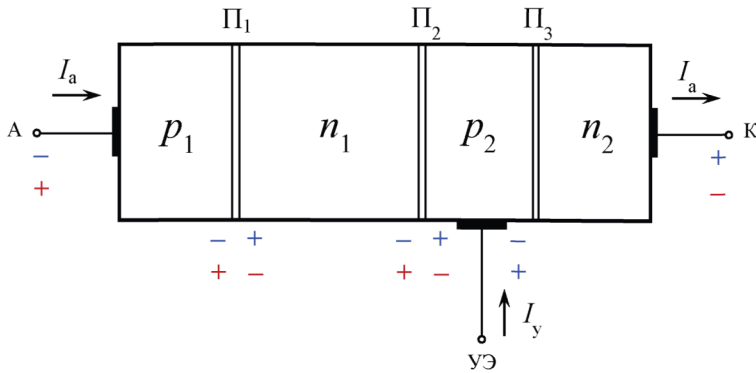


Рис. 6.2. Упрощенная структура однооперационного тиристора

Основной материал в производстве тиристоров — кремний. Сначала с обеих сторон пластины создают транзисторную структуру типа $p-n-p$, затем, после локальной обработки поверхности p -слоя, вносят донорную примесь в p -слой для получения четвертого n -слоя.

Изучение процессов, протекающих в тиристоре, проведем с помощью вольт-амперной характеристики тиристора (рис. 6.3) при включении внешних напряжений в соответствии с рис. 6.2.

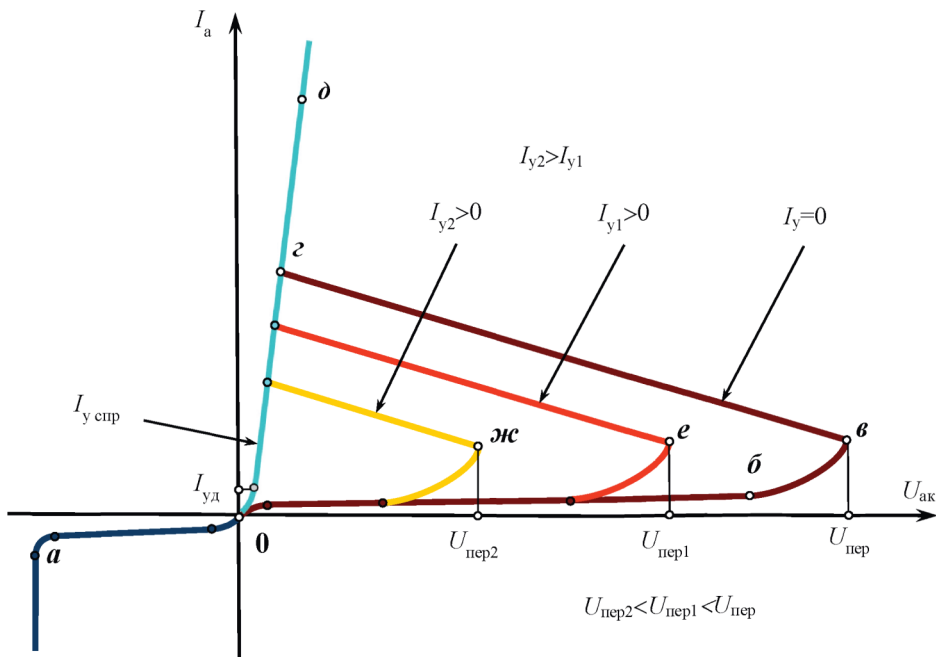


Рис. 6.3. Вольт-амперные характеристики однооперационного тиристора

6.2.1. Обратная ветвь вольт-амперной характеристики тиристора

Рассмотрим обратную ветвь вольт-амперной характеристики тиристора, которая снимается при токе управления $I_y = 0$ (участок **0–a**). Обратному напряжению тиристора ($U_{ак} < 0$) соответствует подключение внешнего напряжения отрицательным полюсом к аноду и положительным — к катоду. Полярность напряжения на тиристоре и его распределение по переходам структуры показаны на рис. 6.2 синим цветом.

В результате приложения обратного напряжения к тиристору смещается средний переход Π_2 в прямом направлении, а два крайние перехода Π_1 и Π_3 — в обратном. Переход Π_2 открыт, и падение напряжения на нем мало. Поэтому можно предположить, что обратное напряжение $U_{обр}$ распределяется главным образом по переходам Π_1 и Π_3 . Однако, в процессе изготовления тиристора, концентрацию примеси в p_2 - и n_2 -слоях делают достаточно высокой по сравнению с концентрацией в p_1 - и n_1 -слоях, и переход Π_3 получается узким. С приложением обратного напряжения переход Π_3 вступает в режим электрического пробоя при напряжении, существенно меньшем рабочих напряжений $U_{обр}$. Обратное напряжение по существу прикладывается к переходу Π_1 .

Обратная ветвь вольт-амперной характеристики тиристора (см. рис. 6.3) представляет собой обратную ветвь вольт-амперной характеристики перехода Π_1 . Таким образом, способность тиристора выдерживать обратное напряжение возлагается на p - n переход Π_1 .

Проведенный в п. 2.4 анализ обратной ветви вольт-амперной характеристики диода целиком применим p - n переходу Π_1 .

6.2.2. Прямая ветвь вольт-амперной характеристики тиристора

Проанализируем поведение тиристора при подведении к нему напряжения в прямом направлении ($U_{ак} > 0$). Полярность внешнего напряжения на тиристоре и переходах структуры показана на рис. 6.2 красным цветом. Крайние переходы Π_1 , Π_3 смещаются в прямом направлении, а средний переход Π_2 — в обратном. В связи с этим напряжение на приборе оказывается приложенным практически к переходу Π_2 . Сначала

рассмотрим случай отсутствия тока управления ($I_y = 0$). Этот режим, как и предыдущий, справедлив и для динистора.

Анализ процессов в тиристоре при $U_{ак} > 0$ удобно проводить, воспользовавшись так называемой двухтранзисторной аналогией. При наличии на тиристоре напряжения в прямом направлении, его можно представить в виде двух транзисторов типов $p-n-p$ и $n-p-n$: транзистора T_1 типа $p_1-n_1-p_2$ и транзистора T_2 типа $n_1-p_2-n_2$. Эмиттерным переходом для первого транзистора является переход Π_1 , для второго транзистора — переход Π_3 . Переход Π_2 служит общим коллекторным переходом обоих транзисторов. При этом полярность напряжений на переходах соответствует той, какая требуется для работы обоих транзисторов в усилительном режиме: эмиттерные переходы смещены в прямом направлении, а коллекторный — в обратном.

Представив тиристор в виде сочетания транзистора T_1 с коэффициентом передачи тока α_1 и током эмиттера $I_{э1}$, а также транзистора T_2 с коэффициентом передачи тока α_2 и током эмиттера $I_{э2}$, нетрудно показать составляющие тока в приборе. Составляющая $(1-\alpha_1) I_{э1}$ — ток базы транзистора T_1 , составляющая $\alpha_1 I_{э1}$ — ток коллектора этого транзистора. Токи транзистора T_1 обусловлены главным образом движением дырок через n_1 -базу. В транзисторе T_2 ток переносится в основном электронами. Его составляющие представляют собой: $(1-\alpha_2) I_{э2}$ — ток базы; $\alpha_2 I_{э2}$ — ток коллектора. Поскольку коллекторный переход смещен в обратном направлении, через него протекают также составляющие, обусловленные неосновными носителями заряда: дырки n_1 -области создают ток $I_{кp}$, электроны p_2 -области — ток $I_{кн}$. Токи $I_{кp}$ и $I_{кн}$ образуют суммарный ток $I_{к0}$.

Одним из факторов, влияющих на прямую ветвь вольт-амперной характеристики тиристора, является зависимость коэффициентов α_1 и α_2 от тока (рис. 6.4).

Большее значение коэффициента α_2 по сравнению со значением α_1 объясняется меньшей толщиной p_2 -базы по сравнению с n_1 -базой. В связи с этим n_1 -базу часто называют толстой, а p_2 -базу — тонкой. Требуемая зависимость коэффициентов от тока создается в процессе изготовления приборов.

После выяснения составляющих токов тиристора и установления зависимости коэффициентов от тока можно рассмотреть прямую ветвь вольт-амперной характеристики прибора (см. рис. 6.3).

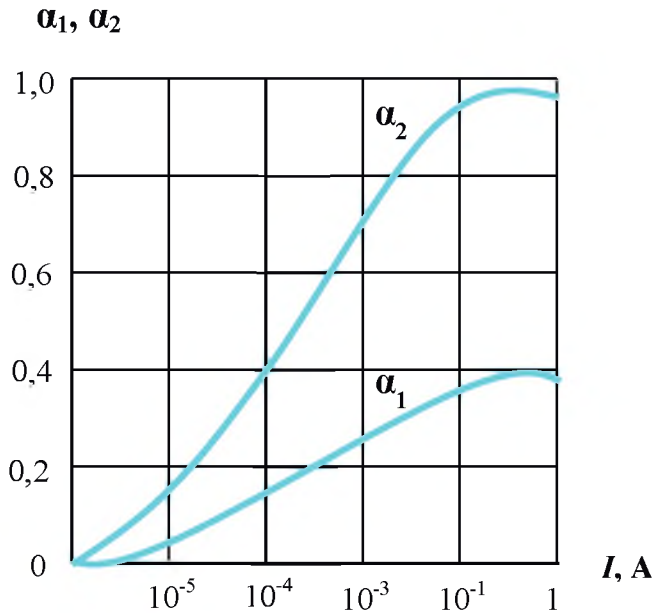


Рис. 6.4. Примерный вид зависимости коэффициентов α_1 и α_2 от тока

На начальном участке **0–б**, соответствующем малым значениям прямого напряжения, ток I_a мал. Коэффициенты α_1 и α_2 близки к нулю. Близки к нулю также составляющие токов $\alpha_1 I_{\alpha 1}$ и $\alpha_2 I_{\alpha 2}$ перехода Π_2 . Ток через переход Π_2 , а следовательно, и ток через тиристор I_a будут равны току I_{k0} , т. е. в данном случае будут определяться обратным (тепловым) током перехода Π_2 .

Таким образом, начальный участок **0–б** прямой ветви вольт-амперной характеристики тиристора представляет собой обратную ветвь вольт-амперной характеристики p - n перехода Π_2 , смещенного в обратном направлении.

По мере роста анодного напряжения, а следовательно, и напряжения, на коллекторном переходе увеличивается ток I_{k0} и анодный ток через тиристор. Причина возрастания тока I_{k0} связана с увеличением тока утечки по поверхности перехода и умножением в нем носителей заряда (см. п. 2.4). Увеличение тока через прибор сопровождается повышением значений коэффициентов α_1 и α_2 . С некоторого значения тока I_a необходимо учитывать составляющие токов транзисторов $\alpha_1 I_{\alpha 1}$ и $\alpha_2 I_{\alpha 2}$, протекающих через коллекторный переход.

Вследствие того что повышение напряжения U_a приводит к увеличению тока $I_{к0}$, а также составляющих $\alpha_1 I_{э1}$ и $\alpha_2 I_{э2}$, на вольт-амперной характеристике появляется участок **б–в** с более сильной зависимостью тока I_a от напряжения U_a . Ток I_a можно найти, определив ток $I_{П2}$, протекающий через коллекторный переход,

$$I_{П2} = \alpha_1 I_{э1} + \alpha_2 I_{э2} + I_{к0}. \quad (6.1)$$

С учетом того, что в любом сечении прибора при $I_y = 0$ протекает один и тот же ток I_a ($I_{П2} = I_{э1} = I_{э2} = I_a$), соотношение (6.1) приобретает вид

$$I_{П2} = I_a = (\alpha_1 + \alpha_2) I_a + I_{к0},$$

откуда

$$I_a = \frac{I_{к0}}{1 - (\alpha_1 + \alpha_2)}. \quad (6.2)$$

Точка **в** является граничной, в ней создаются условия для отпирания тиристора. Напряжение на приборе в точке **в** называется напряжением переключения $U_{пер}$ (или напряжением отпирания). Участок **з–д** соответствует открытому состоянию тиристора.

Процесс отпирания тиристора сопровождается двумя явлениями:

- уменьшением напряжения на переходе Π_2 и тиристоре;
- скачкообразным характером процесса отпирания (вследствие действия в приборе внутренней положительной обратной связи).

Рассмотрим поведение тиристора при наличии тока управления ($I_y > 0$). С этой целью получим выражение для его анодного тока. При $I_y > 0$ также справедливо выражение (6.1), определяющее ток коллекторного перехода по его составляющим. Как и в предыдущем случае, $I_{П2} = I_{э1} = I_a$, но в ток $I_{э2}$ будет входить I_y , поэтому $I_{э2} = I_a + I_y$. С учетом приведенных соотношений решение (6.2) относительно I_a дает

$$I_a = \frac{I_{к0} + \alpha_2 I_y}{1 - (\alpha_1 + \alpha_2)}. \quad (6.3)$$

В соответствии с выражением (6.3) ток управления приводит к более крутому нарастанию анодного тока. Это связано, во-первых, с наличием в числителе выражения (6.2) составляющей $\alpha_2 I_y$ и, во-вторых, с большим значением коэффициента α_2 вследствие возрастания тока $I_{э2}$ на величину тока управления. В результате появления дополнительной составляющей $\alpha_2 I_y$ в токе коллекторного перехода и повышения коэффициента α_2 , переключение тиристора из закрытого со-

стояния в открытое происходит при меньшем напряжении на приборе (см. рис. 6.3). Влияние тока I_y на вольт-амперную характеристику тиристора иллюстрируют участки кривых $0-e$ и $0-ж$, показанные для двух значений тока управления $I_{y2} > I_{y1}$.

При некотором значении тока управления, участок закрытого состояния тиристора на прямой ветви вольт-амперной характеристики исчезает, и характеристика приближается к прямой ветви вольт-амперной характеристики простого $p-n$ перехода (ветвь $0-z-d$). Наблюдается так называемое спрямление характеристики. Значение тока I_y , при котором происходит спрямление характеристики, называется током управления спрямления $I_{y,спр}$.

Тиристор, как ключевой элемент, нашел широкое применение в цепях постоянного и переменного токов. Рассмотренный режим работы, когда отпирание прибора следует после достижения на нем напряжения переключения $U_{пер}$ (переключение по цепи анода), используется лишь в схемах с динисторами.

Переключение по цепи анода в тиристоре представляет интерес лишь с точки зрения анализа принципа действия и вольт-амперной характеристики этого прибора. Практическое применение нашел режим отпирания по управляющему электроду, т. е. за счет подачи на управляющий электрод отпирающего импульса напряжения. Сущность этого режима отпирания тиристора заключается в следующем.

В исходном состоянии тиристор закрыт, ток управления равен нулю. Напряжение источника питания $U_{пит}$ меньше напряжения переключения тиристора $U_{пер}$. В требуемый момент времени подается импульс управления U_y , который задает необходимый для отпирания тиристора импульс тока управления, который больше тока спрямления $I_{y,спр}$. Тиристор открывается, и рабочая точка переходит на ветвь $z-d$. Импульс управления U_y (или пачка импульсов) должен иметь прямоугольную форму. Его длительность должна быть такова, чтобы ток через прибор превысил некоторое граничное значение, называемое током удержания $I_{уд}$, в противном случае тиристор закроется сразу же после снятия управляющего импульса.

Основными параметрами тиристорov являются:

- напряжение переключения (постоянное $U_{пер}$, импульсное $U_{пер\text{ имп}}$);
- напряжение в открытом состоянии U_{oc} — падение напряжения на тиристоре в открытом состоянии;

- обратное напряжение $U_{обр}$ — напряжение, при котором тиристор может работать длительное время без нарушения его работоспособности;
- ток в открытом состоянии I_{oc} — максимальное значение тока открытого тиристора;
- ток удержания $I_{уд}$;
- обратный ток $I_{обр}$;
- отпирающий ток управления $I_{y\,отп}$ — наименьший ток управляющего электрода, необходимый для включения тиристора;
- скорость нарастания напряжения в закрытом состоянии — максимальная скорость нарастания напряжения в закрытом состоянии;
- время включения $t_{вкл}$ — интервал времени, в течение которого тиристор переходит из закрытого состояния в открытое;
- время выключения $t_{выкл}$ — наименьший интервал времени, в течение которого восстанавливаются запирающие свойства тиристора. По истечении этого времени на тиристор может быть снова подано прямое напряжение. Тиристор остается закрытым до следующего отпирающего импульса.

Тесты к главе 6

1. Сколько p - n переходов в однооперационном тиристоре?

Варианты ответов:

- а. 1.
- б. 2.
- в. 3.
- г. 4.

2. Можно ли перевести однооперационный тиристор в проводящее состояние без воздействия на управляющий электрод?

Варианты ответов:

- а. Можно.
- б. Нельзя.
- в. Только при использовании дополнительных средств защиты электродов.

3. Можно ли перевести однооперационный тиристор в непроводящее состояние по цепи управляющего электрода?

Варианты ответов:

- а. Можно.
- б. Нельзя.
- в. При определенных условиях.

4. Какой ток называется током удержания?

Варианты ответов:

- а. Ток управляющего электрода.
- б. Ток через прибор при отпирании тиристора.
- в. Обратный ток тиристора.
- г. Граничное значение тока через прибор, при котором тиристор остается открытым.

Оптоэлектронные полупроводниковые приборы

Классификация оптоэлектронных приборов ► Полупроводниковый излучатель

► Полупроводниковый приемник излучения ► Оптоэлектронные пары

Оптоэлектронный полупроводниковый прибор — это полупроводниковый прибор, чувствительный к электромагнитному излучению в оптическом диапазоне спектра, или излучающий электромагнитную энергию в том же диапазоне, или использующий электромагнитное излучение для своей работы.

Оптический диапазон спектра электромагнитных волн занимает интервал длин волн 1 мм...1 нм. Оптический диапазон включает в себя три поддиапазона: ультрафиолетовый (1 нм...0,38 мкм), видимый (0,38...0,78 мкм) и инфракрасный (0,78 мкм...1 мм). Рабочим диапазоном полупроводниковых приборов является область длин волн 0,2...20 мкм.

7.1. Классификация оптоэлектронных приборов

Оптоэлектронные приборы можно разделить:

- на полупроводниковые излучатели —
 - когерентные,
 - некогерентные;

- приемники излучения —
 - тепловые;
 - фотоэлектрические;
- оптопары —
 - диодные;
 - транзисторные;
 - тиристорные;
 - резисторные;
- оптоэлектронные интегральные микросхемы.

7.2. Полупроводниковый излучатель

Полупроводниковый излучатель — это оптоэлектронный полупроводниковый прибор, преобразующий электрическую энергию в энергию электромагнитного излучения в оптическом диапазоне спектра (рис. 7.1).

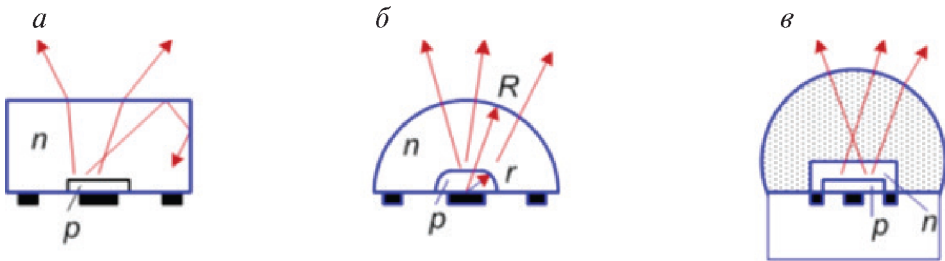


Рис. 7.1. Конструктивное исполнение полупроводниковых излучателей (URL: <https://clck.ru/s5L5y>):

a — плоская конструкция; *б* — с полусферическим кристаллом полупроводника; *в* — с прозрачным полусферическим покрытием

Существуют некогерентные и когерентные полупроводниковые излучатели.

Некогерентные полупроводниковые излучатели — это излучатели видимой области спектра. К ним относятся полупроводниковые приборы отображения информации и инфракрасные излучающие приборы (инфракрасные излучающие диоды).

Когерентные полупроводниковые излучатели — полупроводниковые лазеры с различными типами возбуждения.

Светоизлучающий диод (СИД) — это полупроводниковый диод, предназначенный для преобразования электрической энергии в энергию некогерентного светового излучения.

Характеристики и параметры полупроводниковых излучателей можно разделить на фотометрические, характеризующие приборы как источники излучения, и электрические, характеризующие приборы как элементы электронных схем.

Основными параметрами и характеристиками полупроводниковых излучателей являются:

- сила света — излучаемый световой поток, приходящийся на единицу телесного угла в направлении, перпендикулярном плоскости излучаемого кристалла (измеряется в канделах — кд);
- яркость излучения — отношение силы света в заданном направлении к площади светящейся поверхности (измеряется в канделах на квадратный метр при заданном значении прямого тока — $\text{кд}/\text{м}^2$);
- видность — отношение светового потока (оцениваемой глазом мощности) и истинной полной мощности лучистой энергии;
- яркостная характеристика — зависимость яркости излучения от протекающего через излучатель прямого тока;
- спектральная характеристика — зависимость мощности излучения от длины волны.

7.3. Полупроводниковый приемник излучения

Полупроводниковый приемник излучения — это оптоэлектронный полупроводниковый прибор, чувствительный к электромагнитному излучению оптического диапазона или преобразующий энергию электромагнитного излучения непосредственно в электрическую энергию.

В соответствии с характером взаимодействия оптического излучения с веществом различают:

- тепловые полупроводниковые приемники. В них поглощенная энергия увеличивает тепловую энергию кристалла, следствием чего является изменение его физических свойств;

- фотоэлектрические полупроводниковые приемники. Их работа основана на внутреннем фотоэффекте — образовании неравновесных носителей заряда внутри полупроводниковой структуры под действием оптического излучения.

7.3.1. Тепловые полупроводниковые приемники

К тепловым полупроводниковым приемникам относят: болометры, терморезисторы, пироэлектрические приемники, термоэлементы.

Болометр предназначен для регистрации и измерения параметров теплового излучения в широком спектральном диапазоне (рис. 7.2).

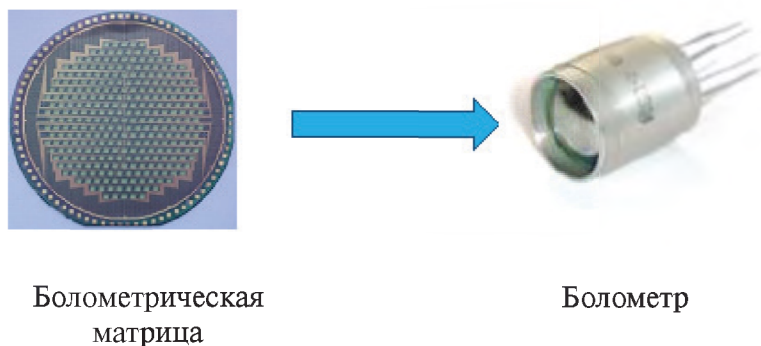


Рис. 7.2. Болометр (URL: <https://clck.ru/s5L5y>)

Терморезистор (термистор) — полупроводниковый прибор, электрическое сопротивление которого изменяется в зависимости от его температуры (рис. 7.3, 7.4).

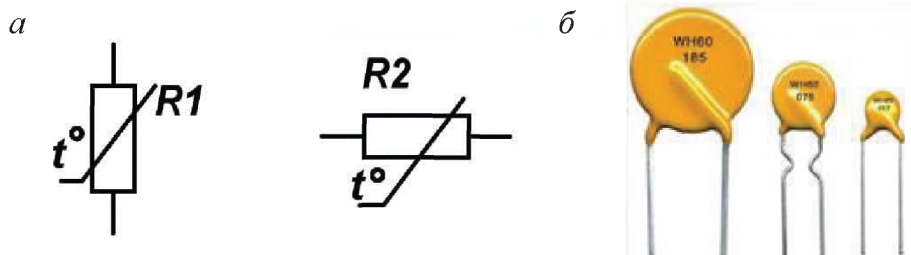


Рис. 7.3. Терморезистор (URL: <https://clck.ru/s5L5y>):

a — обозначение на принципиальной схеме; *б* — внешний вид

Величина сопротивления термистора с отрицательным температурным коэффициентом сопротивления (ОТКС) в рабочем диапазоне температур изменяется в зависимости от температуры по экспоненциальному закону

$$R = Ae^{B/T}, \quad (7.1)$$

где A , B — постоянные; T — абсолютная температура, К.

Величину постоянной B определяют экспериментально путем измерения сопротивления R при двух разных температурах T_1 и T_2 .

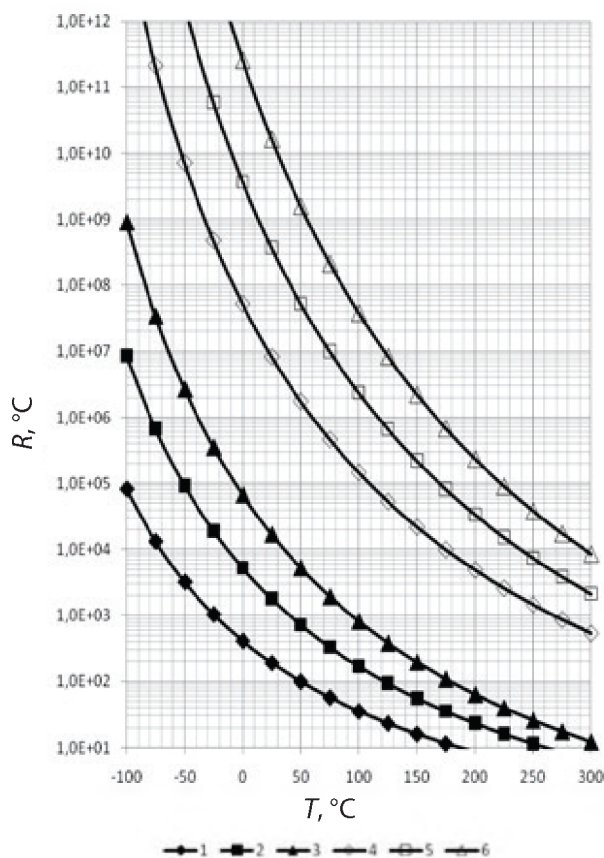


Рис. 7.4. Зависимость величины сопротивления терморезисторов с ОТКС от температуры для разных значений постоянной B
(URL: <https://clck.ru/s5L5y>):

- 1 — 2500 К ($R_{20^\circ\text{C}} = 220 \text{ Ом}$); 2 — 3500 К ($R_{20^\circ\text{C}} = 2,2 \text{ кОм}$); 3 — 4500 К ($R_{20^\circ\text{C}} = 22 \text{ кОм}$);
4 — 6000 К ($R_{150^\circ\text{C}} = 22 \text{ кОм}$); 5 — 7500 К ($R_{150^\circ\text{C}} = 220 \text{ кОм}$);
6 — 9000 К ($R_{150^\circ\text{C}} = 2,2 \text{ МОм}$)

7.3.2. Фотоэлектрические полупроводниковые приемники

Работа фотоэлектрических приемников основана на внутреннем фотоэффекте — образовании неравновесных носителей заряда внутри полупроводниковой структуры под действием оптического излучения. Подавляющая часть фотоэлектрических приемников использует две формы внутреннего фотоэффекта, которые называются фоторезистивным и фотогальваническим эффектами.

К фотоэлектрическим приемникам относят: фоторезисторы, фототранзисторы, фотодиоды, фототиристоры, фотоэлементы. Рассмотрим наиболее часто применяющиеся фотоэлектрические приемники.

Фотодиод — это фотоэлектрический приемник излучения на основе диодной структуры, действие которого обусловлено фотогальваническим эффектом в обратном смещенном p - n переходе (рис. 7.5).

Фотогальваническим эффектом называют явление возникновения фото-ЭДС за счет разделения носителей заряда, возникающих под действием оптического излучения, электрическим полем выпрямляющего электрического перехода.

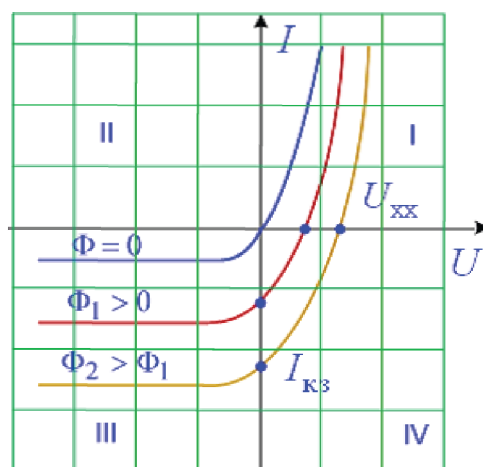


Рис. 7.5. Семейство вольт-амперных характеристик фотодиода
(URL: <https://clck.ru/s5L5y>)

Темновая ВАХ (при световом потоке $\Phi = 0$) представляет собой ВАХ обычного p - n перехода. В этом случае обратный тепловой ток насыщения носит название темнового тока.

Увеличение светового потока ($\Phi > 0$) вызывает рост обратного тока через переход, и характеристики смещаются вниз. В рабочем диапазоне изменения обратных напряжений, обратные токи практически не зависят от напряжения. В диапазоне положительных напряжений ток фотодиода быстро возрастает с увеличением напряжения.

Полупроводниковый фотоэлемент — это фотоэлектрический приемник излучения с выпрямляющим электрическим переходом, предназначенный для непосредственного преобразования световой энергии в электрическую. Принцип действия фотоэлемента основан на работе выпрямляющего электрического перехода в фотогальваническом режиме (фотогальванический режим — режим работы фотодиода без внешнего источника напряжения). При этом внешние источники питания отсутствуют, а фотоэлемент сам является источником энергии, генерируя фотоЭДС, значение которой зависит от величины светового потока.

Фотоэлементы можно разделить:

- на кристаллические кремниевые;
- монокристаллические;
- поликристаллические;
- фотоэлементы из аморфного кремния;
- органические фотоэлементы;
- CIS — фотоэлементы (Copper Indium Selenide, соединения селена с медью и индием);
- CIGS — фотоэлементы (Copper Indium Gallium Selenide, соединения селена с медью, индием и галлием).

Вольт-амперные характеристики фотоэлемента представляют собой расположенные в IV квадранте участки ВАХ освещенного $p-n$ перехода.

Точки пересечения ВАХ с осью напряжений соответствуют напряжениям холостого хода, а точки пересечения с осью токов — токам короткого замыкания. Семейство вольт-амперных характеристик показывает, что с ростом светового потока напряжение холостого хода и абсолютная величина тока короткого замыкания увеличиваются.

Оптимальному режиму работы фотоэлемента соответствует наибольшая площадь прямоугольника с вершиной на ВАХ при данной освещенности.

У кремниевых фотоэлементов напряжение холостого хода составляет значение порядка 0,5...0,55 В, а плотность тока короткого замыкания при средней освещенности — 20...25 мА/см². Поскольку ширина запрещенной зоны арсенида галлия больше, чем кремния, то арсенид-

галлиевый фотоэлемент обладает большим значением напряжения холостого хода, но меньшим током короткого замыкания.

Световые характеристики фотоэлемента — это зависимости напряжения холостого хода и тока короткого замыкания от величины светового потока.

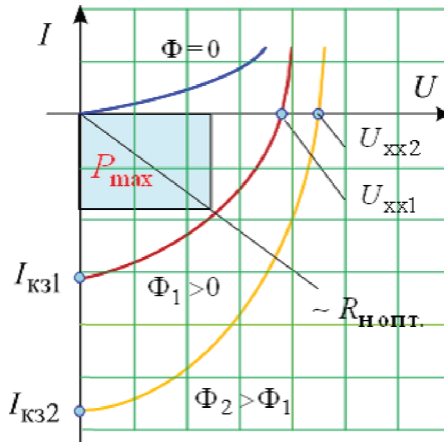


Рис. 7.6. Вольт-амперные характеристики фотоэлемента (URL: <https://clck.ru/s5L5y>)

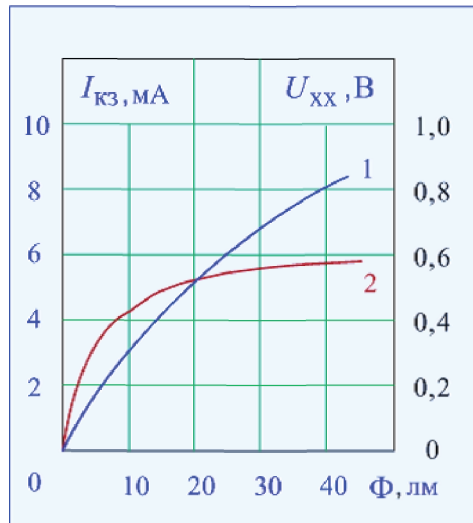


Рис. 7.7. Световые характеристики фотоэлемента (URL: <https://clck.ru/s5L5y>):

1 — при коротком замыкании; 2 — при холостом ходе

Коэффициент полезного действия фотоэлемента — это отношение максимальной мощности P_{\max} , которую можно получить от фотоэлемента, к полной мощности $P_{\text{изл}}$ лучистого потока, падающего на рабочую поверхность фотоэлемента,

$$\eta = \frac{P_{\max}}{P_{\text{изл}}}.$$

Фотоэлементы широко применяются для непосредственного преобразования энергии солнечного света в электрическую энергию. Такие фотоэлементы называются солнечными преобразователями. Совокупность электрически соединенных солнечных преобразователей образует солнечную батарею.

7.4. Оптоэлектронные пары

7.4.1. Состав оптоэлектронной пары

Оптоэлектронная пара (оптопара) — это оптоэлектронный полупроводниковый прибор, состоящий из излучающего и фотоприемного элементов, между которыми имеется оптическая связь и обеспечена электрическая изоляция (гальваническая развязка).

Состав оптоэлектронной пары определяется в соответствии типом излучающего и фотоприемного элементов (рис. 7.8).

Принцип действия оптопар основан на двойном преобразовании энергии. В излучателе электрический сигнал вызывает изменение светового потока, который излучается на рабочей длине волны в направлении фотоприемника, проходит через оптическую среду с малым затуханием и в фотоприемнике преобразуется в электрический сигнал, вызывая в зависимости от вида оптопары изменение тока, напряжения или сопротивления (рис. 7.9).

Оптическая связь между излучателем и фотоприемником осуществляется за счет электрически нейтральных фотонов и только в одном направлении — к фотоприемнику, где энергия излучения практически полностью поглощается.

Гальваническая развязка входной и выходной цепей оптопары достигается за счет оптически прозрачной диэлектрической среды между излучателем и фотоприемником.



Рис. 7.8. Состав оптоэлектронной пары

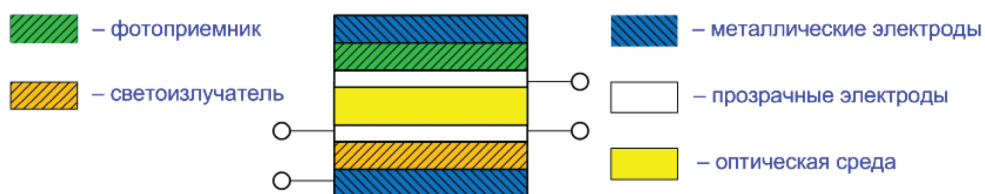


Рис. 7.9. Обобщенная структура оптоэлектронной пары
(URL: <https://clck.ru/s5L5y>)

Оптоэлектронные пары можно классифицировать в соответствии с рис. 7.10.

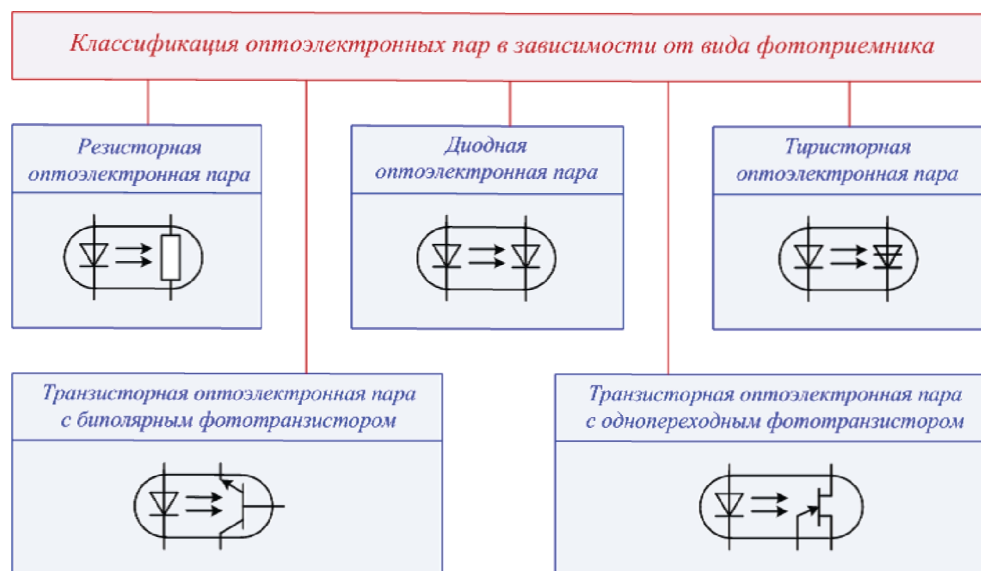


Рис. 7.10. Классификация оптопар в зависимости от вида фотоприемника (URL: <https://clck.ru/s5L5y>)

7.4.2. Основные параметры оптоэлектронных пар

Можно выделить четыре блока параметров оптоэлектронных пар:

- входные электрические параметры;
- выходные электрические параметры;
- параметры передачи;
- параметры гальванической развязки.

Входные электрические параметры характеризуют электрический режим светоизлучателя:

- входное напряжение при заданном постоянном входном токе;
- максимальный входной ток через излучатель;
- максимальное входное обратное напряжение;
- номинальный входной ток;
- входная емкость.

Выходные электрические параметры характеризуют электрический режим фотоприемника:

- максимально допустимый выходной ток через фотоприемник во включенном состоянии оптопары;
- максимально допустимое выходное обратное напряжение;
- выходная емкость.

Параметры передачи характеризуют взаимосвязь входных и выходных сигналов на низких и высоких частотах, а также частотные и импульсные свойства оптопар:

- коэффициент передачи оптопары;
- граничную частоту входных сигналов;
- максимальную скорость передачи сигналов;
- время задержки фронта импульса;
- время нарастания выходного импульса;
- время спада выходного импульса;
- время включения;
- время выключения.

Параметрами гальванической развязки являются:

- максимально допустимое напряжение между входом и выходом (характеризует электрическую прочность оптопары и обычно превышает 1 кВ);
- сопротивление гальванической развязки;
- проходная емкость;
- максимально допустимая скорость изменения напряжения между входом и выходом (определяется из условия, что выходной сигнал помехи, проникающий через проходную емкость, не превышает заданного уровня).

Тесты к главе 7

1. За счет чего осуществляется оптическая связь между излучателем и фотоприемником в оптоэлектронной паре?

Варианты ответов:

- а. Оптически прозрачной диэлектрической среды между излучателем и фотоприемником.
- б. Электрически нейтральных фотонов.

2. Что называется фотогальваническим эффектом?

Варианты ответов:

- а. Явление возникновения фотоЭДС за счет разделения носителей заряда, возникающих под действием оптического излучения.

- б. Явление возникновения модуляции ширины базового слоя.
- в. Явление смещения p - n перехода при его освещении.

3. Какие элементы входят в состав оптоэлектронной пары?

Варианты ответов:

- а. Излучающий и передающий элемент.
- б. Фотоприемный и исполнительный элемент.
- в. Излучающий и фотоприемный элемент.

Библиографический список

1. Беликов, О. В. Практикум по радиоэлектронике. Лабораторная работа № 11. Биполярный транзистор с изолированным затвором (IGBT). Методическое руководство к вводной части практикума : учеб. пособие / О. В. Беликов. — Новосибирск : Новосибирский государственный университет, 2008. — 12 с.
2. Гуртов, В. А. Твердотельная электроника : учеб. пособие / В. А. Гуртов. — Москва : Техносфера, 2008. — 512 с. — ISBN 978-5-94836-187-1 .
3. Электроника и схемотехника. Основы электроники: конспект лекций для высшего профессионального образования / В. Т. Еременко, А. А. Рабочий, И. И. Невров [и др.]. — Орел : Госуниверситет — УНПК, 2012. — 290 с. — ISBN 978-5-93932-475-5.
4. Жеребцов, И. П. Основы электроники / И. П. Жеребцов. — 5-е изд., перераб. и доп. — Ленинград : Энергоатомиздат, 1990. — 352 с. — ISBN 5-283-04448-3.
5. Забродин, Ю. С. Промышленная электроника : учебник для энергетических и электромеханических вузов / Ю. С. Забродин. — 2-е изд., стер. — Москва : Альянс, 2013. — 496 с. — ISBN 978-5-903-034-34-5.
6. Легостаев, Н. С. Твердотельная электроника : учеб. пособие / Н. С. Легостаев, К. В. Четвергов. — Томск : Эль Контент, 2011. — 244 с. — ISBN 978-5-4332-0021-0.
7. Легостаев, Н. С. Твердотельная электроника: методич. указания по изучению дисциплины / Н. С. Легостаев, К. В. Четвергов. — Томск : ЭльКонтент, 2012. — 52 с. — ISBN 978-5-4332-0030-2.

8. Светцов, В. И. Физическая электроника и электронные приборы : учеб. пособие / В. И. Светцов, И. В. Холодков ; Иван. гос. хим.-технол. ун-т. — Иваново, 2008. — 494 с. — ISBN 978-5-9616-0267-8.
9. Шука, А. А. Электроника : учеб. пособие / А. А. Шука ; под ред. А. С. Сигова. — 2-е изд. — Санкт-Петербург : БХВ-Петербург, 2008. — 752 с. — ISBN 978-5-9775-0160-6.

Приложение (Справочное)

Ответы к тестовым вопросам

Глава	Номер вопроса. Ответы			
	1	2	3	4
1	а, г	б, в	а	—
2	б	а	а, б	г
3	а	в	б	—
4	б	б	б	—
5	г	б, в	а	—
6	в	а	б	г
7	б	а	в	—

Учебное издание

Кириллов Андрей Владиславович

Костылев Алексей Васильевич

Яснев Николай Дмитриевич

ОСНОВЫ ЭЛЕКТРОНИКИ

Редактор И. В. Меркурьева

Верстка Е. В. Ровнушкиной

Подписано в печать 12.10.2022. Формат 70×100 1/16.
Бумага офсетная. Цифровая печать. Усл. печ. л. 8,4.
Уч.-изд. л. 6,0. Тираж 30 экз. Заказ 170.

Издательство Уральского университета
Редакционно-издательский отдел ИПЦ УрФУ
620049, Екатеринбург, ул. С. Ковалевской, 5
Тел.: 8 (343) 375-48-25, 375-46-85, 374-19-41
E-mail: rio@urfu.ru

Отпечатано в Издательско-полиграфическом центре УрФУ
620083, Екатеринбург, ул. Тургенева, 4
Тел.: 8 (343) 358-93-06, 350-58-20, 350-90-13
Факс: 8 (343) 358-93-06
<http://print.urfu.ru>

Для заметок

