

## Лекция 18. ЭЛЕКТРОННО-ДЫРОЧНЫЙ ПЕРЕХОД И ПОЛУПРОВОДНИКОВЫЕ ДИОДЫ

### План

1. Общие сведения о полупроводниках.
2. Характеристики  $p$ - $n$ -перехода.
3. Полупроводниковые диоды.
4. Выводы.

### 1. Общие сведения о полупроводниках

*Полупроводниками* называют вещества, удельная проводимость которых имеет промежуточное значение между удельными проводимостями металлов и диэлектриков. Граница между полупроводниками и диэлектриками условна, так как диэлектрики при высоких температурах могут вести себя как полупроводники, а чистые полупроводники при низких температурах – как диэлектрики. В полупроводниках носители заряда возникают лишь при повышении температуры или поглощении энергии от другого источника.

Процессы электропроводности в полупроводниках во многом отличаются от процессов электропроводности в металлах. Наиболее важное отличие состоит в том, что в полупроводниках электропроводность осуществляется двумя различными видами движения электронов. Кроме того, проводимость полупроводников можно менять в широких пределах, добавляя ничтожно малые количества примесей.

Типичными полупроводниками являются германий (Ge) и кремний (Si). Рассмотрим качественно процессы электропроводности в полупроводниках на примере кремния. В состав его атома входят 14 электронов, четыре из которых находятся на незаполненной внешней оболочке и являются слабо связанными. Эти электроны называются валентными. Атомы кремния способны объединять свои валентные электроны с другими атомами кремния с помощью ковалентных связей. На рис. 18.1 представлена структура кристалла кремния.

При температуре, равной абсолютному нулю, свободные носители заряда в кристалле отсутствуют. При повышении температуры тепловые колебания приводят к разрыву некоторых валентных связей. В результате этого электроны, участвовавшие ранее в создании валентных связей, отщепляются и становятся электронами проводимости. При наличии электрического поля они перемещаются против поля и образуют электрический ток.

При освобождении электрона в кристаллической решетке появляется незаполненная межатомная связь. Такие «пустые» места с отсутствующими электронами получили название дырок. Возникновение дырок в кристалле по-

лупроводника создает дополнительную возможность для переноса заряда. Действительно, дырка может быть заполнена электроном, перешедшим под действием тепловых колебаний от соседнего атома. В результате на этом месте будет восстановлена нормальная связь, но в другом месте появится дырка. В эту новую дырку, в свою очередь, может перейти какой-либо из других электронов связи и т. д. Последовательное заполнение свободной связи электронами эквивалентно движению дырки в направлении, противоположном движению электронов, что равносильно перемещению положительного заряда. Таким образом, в полупроводнике имеются два типа носителей заряда – электроны и дырки, а общая проводимость полупроводника является суммой электронной проводимости ( $n$ -типа) и дырочной проводимости ( $p$ -типа).

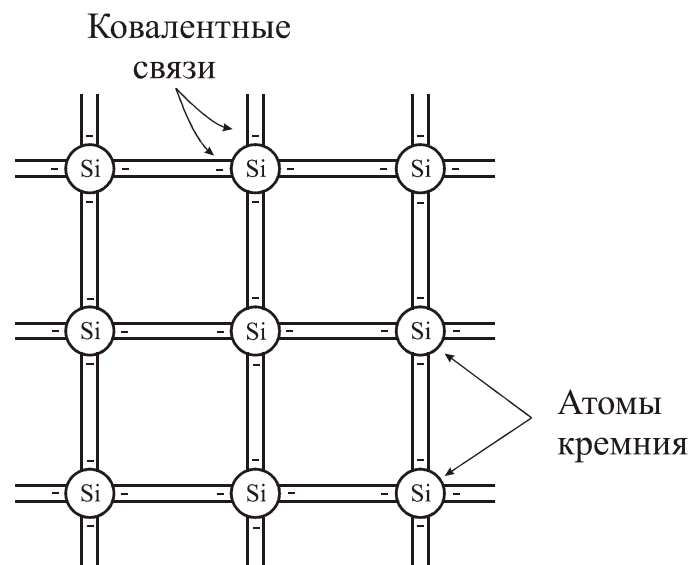


Рис. 18.1

Наряду с переходом электронов из связанного состояния в свободное возможен и обратный переход, при котором электрон проводимости возвращается на одно из свободных мест электрона связи. Этот процесс называют *рекомбинацией* электрона и дырки. В равновесном состоянии устанавливается такая концентрация электронов (и равная ей концентрация дырок), при которой число прямых и обратных переходов в единицу времени одинаково.

Рассмотренный процесс проводимости в чистых полупроводниках, обусловленный генерацией пар электрон – дырка называется *собственной проводимостью*. В отличие от металлов собственная проводимость полупроводников быстро возрастает с повышением температуры.

Для увеличения проводимости чистых полупроводниковых материалов применяют *легирование* – добавление небольших количеств посторонних элементов, называемых примесями. Используются два типа примесей. Примеси первого типа – пентавалентные – состоят из атомов с пятью валентными электронами. Примеси второго типа – трехвалентные – состоят из атомов с тремя валентными электронами.

Когда чистый полупроводниковый материал легируется пентавалентным материалом, таким как фосфор (P), то некоторые атомы полупроводника замещаются атомами фосфора. Атом фосфора вводит четыре своих валентных электрона в ковалентные связи с соседними атомами. Его пятый электрон слабо связан с ядром и легко может стать свободным (рис. 18.2).

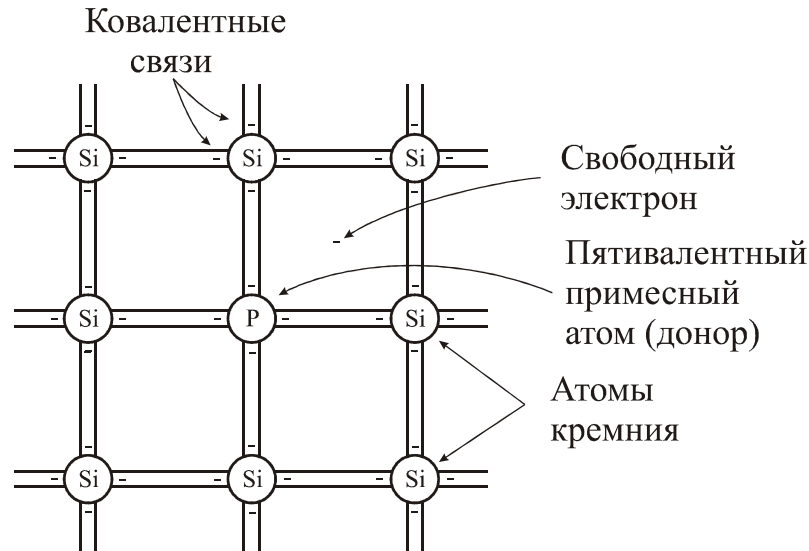


Рис. 18.2

Атом фосфора называют *донором*, поскольку он отдает свой лишний электрон. В легированном полупроводниковом материале находится достаточное количество донорских атомов, а следовательно, и свободных электронов для поддержания тока. Электроны в таком полупроводнике являются *основными носителями*, а дырки – *неосновными носителями*. Поскольку основные носители имеют отрицательный заряд, такой материал называется полупроводником *n*-типа. В качестве донорных примесей для германия и кремния используют фосфор, мышьяк, сурьму.

Когда полупроводниковый материал легирован тривалентными атомами, например атомами индия (In), то эти атомы разместят свои три валентных электрона среди трех соседних атомов. Это создаст в ковалентной связи дырку (рис. 18.3). Наличие дополнительных дырок позволит электронам легко дрейфовать от одной ковалентной связи к другой. Так как дырки легко принимают электроны, то атомы, которые вносят в полупроводник дополнительные дырки, называются *акцепторами*. При обычных условиях количество дырок в таком материале значительно превышает количество электронов. Следовательно, дырки являются основными носителями, а электроны – неосновными. Поскольку основные носители имеют положительный заряд, материал называется полупроводником *p*-типа. В качестве акцепторных примесей в германии и кремнии используют бор, алюминий, галлий, индий.

Полупроводниковые материалы *n*- и *p*-типов имеют значительно более высокую проводимость, чем чистые полупроводники. Эта проводимость может быть увеличена или уменьшена путем изменения количества примесей. Чем сильнее легирован полупроводниковый материал, тем меньше его электрическое сопротивление.

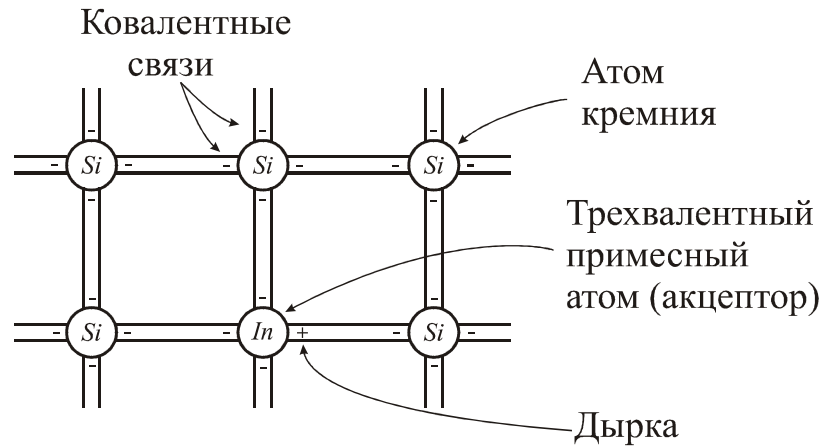


Рис. 18.3

Приведенное качественное описание процессов электропроводности в полупроводниках позволяет сделать следующие выводы.

1. В полупроводниках имеются два вида подвижных носителей заряда: положительно заряженные дырки и отрицательно заряженные свободные электроны.

2. Соотношением между концентрациями свободных электронов и дырок в полупроводнике можно управлять, добавляя соответствующие примеси. Материалы, в которых основными носителями заряда являются дырки, называются материалами *p*-типа; а материалы, в которых основными носителями являются электроны, называются материалами *n*-типа.

## 2. Характеристики *p-n*-перехода

Контакт двух полупроводников с различными типами проводимости называется *p-n*-переходом. Он обладает очень важным свойством: его сопротивление зависит от направления тока. Такой контакт нельзя получить, прижимая друг к другу два полупроводника, поэтому *p-n*-переход создается в одной пластине полупроводника путем образования в ней областей с различными типами проводимости.

Итак, в монокристаллической полупроводниковой пластине между двумя слоями с различного рода проводимостями образуется *p-n*-переход. В области *p-n*-перехода наблюдается значительный перепад концентраций носителей зарядов. Концентрация электронов в *n*-области значительно больше их концентрации в *p*-области. Вследствие этого происходит диффузия электронов из *n*-области в *p*-область. В *n*-области остаются неподвижные поло-

жительно заряженные ионы доноров. Одновременно происходит диффузия дырок из  $p$ -области в  $n$ -область. За счет этого приграничная  $p$ -область приобретает отрицательный заряд, обусловленный отрицательно заряженными ионами акцепторов. Эти прилегающие к переходу области образуют слой объемного заряда, обедненный основными носителями (рис. 18.4). Области объемного заряда с каждой стороны перехода имеют заряд, противоположный заряду основных носителей. В слое объемного заряда возникает контактное электрическое поле  $E_k$ , препятствующее дальнейшему переходу электронов и дырок из одной области в другую.

Контактное поле поддерживает состояние равновесия на определенном уровне. Под действием тепла небольшая часть электронов и дырок преодолевает контактное поле, создавая *ток диффузии*. Одновременно с этим под действием контактного поля неосновные носители заряда  $p$ - и  $n$ -областей (электроны и дырки) создают небольшой *ток проводимости*. В состоянии равновесия эти токи взаимно компенсируются.

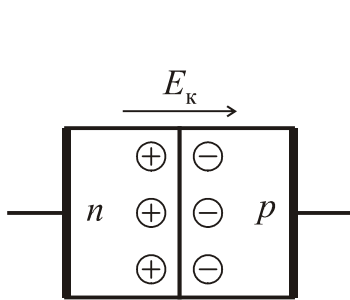


Рис. 18.4

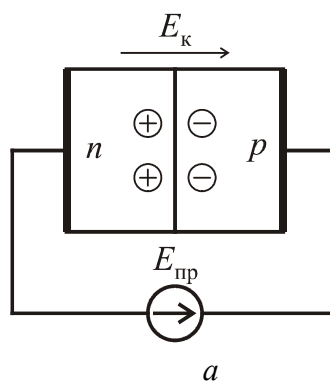
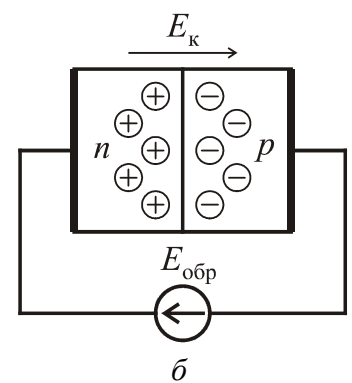


Рис. 18.5



Рассмотрим теперь случай, когда к  $p$ - $n$ -переходу приложено внешнее напряжение. Сначала предположим, что напряжение имеет такую полярность, что  $p$ -область становится положительной по отношению к  $n$ -области (рис. 18.5,  $a$ ). Такое напряжение называют *прямым*. Прямое напряжение уменьшает контактное поле. В результате возникает ток дырок из  $p$ -области и ток электронов из  $n$ -области. Результирующий перенос электронов и дырок в противоположных направлениях образует полный ток через переход. Требуется небольшое прямое напряжение (меньше 1 В), чтобы получить большие токи.

Предположим теперь, что к  $p$ - $n$ -переходу приложено напряжение противоположной полярности. Такое напряжение называют *обратным*. Обратное напряжение приводит к появлению внешнего поля, совпадающего по направлению с контактным полем  $E_k$ . В результате ширина обедненного слоя увеличится, и тока за счет основных носителей практически не будет. В цепи возможен лишь незначительный ток за счет неосновных носителей (обратный ток). Обратный ток  $p$ - $n$ -перехода значительно, на несколько порядков, меньше прямого.

Таким образом,  $p$ - $n$ -переход обладает ярко выраженной односторонней проводимостью. Это отражает его вольт-амперная характеристика (рис. 18.6).

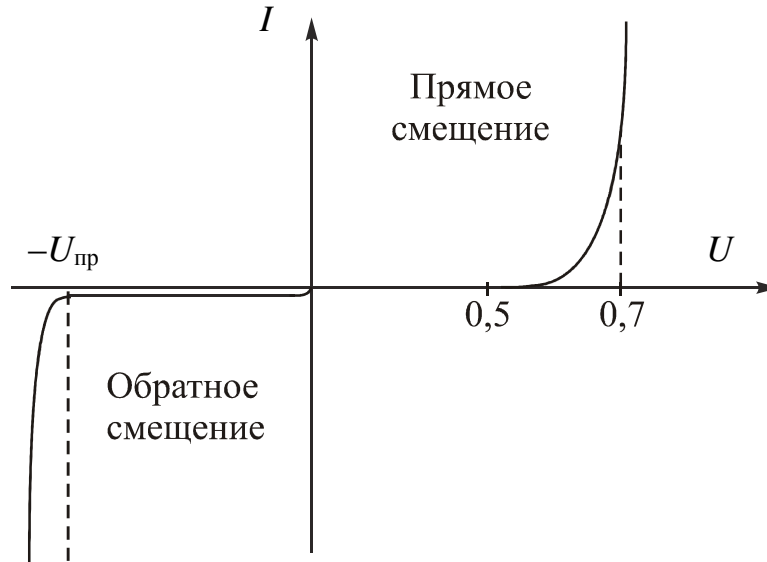


Рис. 18.6

Заметим, что участки ВАХ в первом и третьем квадрантах имеют разный масштаб. Участок ВАХ правее точки  $-U_{\text{пр}}$  описывается уравнением

$$I = I_0 \left( e^{U/Vt} - 1 \right). \quad (18.1)$$

здесь  $Vt = kT/e$  – температурный потенциал;  $k$  – постоянная Больцмана;  $T$  – абсолютная температура в градусах кельвина;  $e$  – заряд электрона.

Ток  $I_0$  называют *тепловым, или обратным, током насыщения*. Величина этого тока зависит от материала, площади  $p$ - $n$ -перехода и от температуры. Обратный ток кремниевого перехода на 1–2 порядка меньше, чем германиевого.

При комнатной температуре ( $20^\circ\text{C}$ )  $Vt = 25.2$  мВ. Для упрощения расчетов полагают, что при комнатной температуре  $Vt = 25$  мВ.

Если прямое напряжение перехода  $U > 0.1$  В, то  $e^{U/Vt} \gg 1$ , и (18.1) можно записать в упрощенном виде:

$$I \approx I_0 e^{U/Vt} = I_0 e^{40U}. \quad (18.2)$$

В последнем равенстве мы учли, что  $Vt = 25$  мВ.

Из равенства (18.2) следует, что прямое напряжение  $p$ - $n$ -перехода

$$U = Vt \cdot \ln(I/I_0).$$

Предположим, что при напряжении  $U_1$  ток  $I_1 = I_0 e^{U_1/Vt}$ , а при напряжении  $U_2$  ток достигает величины  $I_2 = I_0 e^{U_2/Vt}$ . Отношение токов

$$\frac{I_2}{I_1} = e^{(U_2-U_1)/Vt}.$$

Прологарифмировав левую и правую части последнего равенства, получим

$$U_2 - U_1 = Vt \cdot \ln(I_2/I_1) \approx 2.3 \cdot Vt \cdot \log(I_2/I_1).$$

Из последнего равенства следует, что прямой ток  $p$ - $n$ -перехода увеличивается в десять раз при изменении напряжения на величину, приблизительно равную  $2.3Vt = 60$  мВ. На практике считают, что прямой ток  $p$ - $n$ -перехода увеличивается в 10 раз при изменении напряжения на 0,1 В.

При отрицательных значениях напряжения, превышающих 0,1 В,  $e^{U/Vt} \rightarrow 0$  и ток диода  $I = -I_0$ . Обратный ток не изменяется, пока обратное напряжение не достигнет значения  $U_{пр}$ . Это так называемое *напряжение пробоя*, при котором наступает пробой  $p$ - $n$ -перехода. После начала пробоя незначительное увеличение обратного напряжения сопровождается резким увеличением тока.

В основе пробоя  $p$ - $n$ -перехода лежат следующие явления:

- 1) туннельный пробой (эффект Зенера);
- 2) лавинный пробой;
- 3) тепловой пробой.

*Туннельный пробой* наблюдается тогда, когда напряженность электрического поля такова, что становится возможным туннельный переход из валентной зоны полупроводника с электропроводностью одного типа в зону полупроводника с электропроводностью другого типа. Как правило, туннельный пробой наблюдается при напряжениях ниже 6 В.

*Лавинный пробой* обусловлен образованием носителей заряда из-за ударной ионизации атомов полупроводника. Если напряженность электрического поля достаточно велика, то электроны приобретают энергию, достаточную для того, чтобы выбивать другие электроны из атомов кристаллической решетки. Этот процесс приводит к быстрому (лавинному) нарастанию обратного тока.

*Тепловой пробой* происходит при нагреве перехода. За счет тепловой энергии происходит генерация пар электрон – дырка. Это приводит к увеличению обратного тока и дальнейшему увеличению температуры. Процесс нарастает лавинообразно и приводит к изменению структуры кристалла, выводя его из строя.

### 3. Полупроводниковые диоды

Полупроводниковый диод – двухполюсный прибор, имеющий один  $p-n$ -переход. По функциональному назначению диоды делят на две группы: выпрямительные и специальные. Выпрямительные диоды предназначены для выпрямления переменного тока. В специальных типах полупроводниковых диодов используют различные свойства  $p-n$ -перехода: явление пробоя, барьерную емкость перехода и т. д.

Упрощенная структура диода показана на рис. 18.7, а, а его условное графическое изображение – на рис. 18.7, б. Электрод диода, подключенный к  $p$ -области, называют *анодом* (А), а электрод, подключенный к  $n$ -области – *катодом* (К). Эти названия заимствованы у вакуумных диодов. Если анод положителен по отношению к катоду, то на диод подано прямое смещение; ток диода при этом называют *прямым*. При обратном смещении катод более положителен, чем анод. Обратный ток при этом ограничен малым током насыщения.

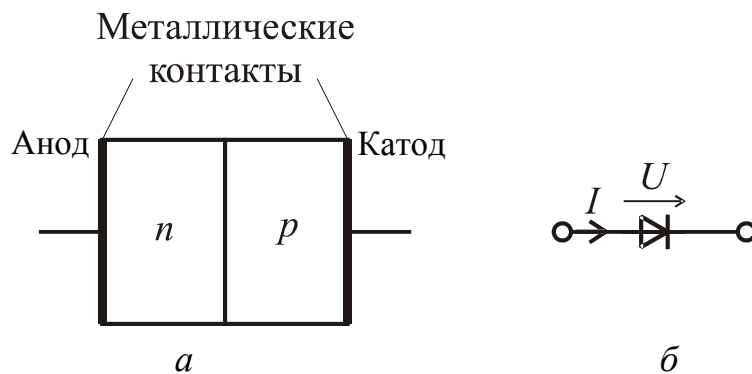


Рис. 18.7

Как правило, полупроводниковые диоды выполняют на основе несимметричных  $p-n$ -переходов. В этом случае в одной из областей концентрация примеси, определяющей вид проводимости, значительно больше, чем в другой области. Область с высокой концентрацией примеси называют *эмиттером*. Функции эмиттера может выполнять как катод, так и анод. Область с низкой концентрацией примесей называют *базой*. База имеет значительно большее объемное сопротивление, чем эмиттер.

Идеальная ВАХ диода описывается выражением (18.1). Величина обратного тока  $I_0$  в формуле (18.1) зависит от типа полупроводника и размеров



диода. Для маломощных приборов ток  $I_0$  имеет порядок  $10^{-15}$  А. Обратный ток кремниевых диодов на 1–2 порядка меньше, чем германиевых. Кроме того, обратный ток диода зависит от температуры. У кремниевых диодов он удваивается при увеличении температуры приблизительно на  $7^\circ\text{C}$ . На практике считают, что обратный ток кремниевых диодов увеличивается в 2,5 раза при увеличении температуры на каждые  $10^\circ\text{C}$ .

Прямая ветвь ВАХ диода отличается от идеальной из-за рекомбинации электронов и дырок в  $p$ – $n$ -переходе, падения напряжения на базе. Уравнение ВАХ  $p$ – $n$ -перехода с учетом падения напряжения на базе имеет вид

$$I = I_0 \left( e^{\frac{(U - RI)}{Vt}} - 1 \right).$$

Здесь  $R$  – сопротивление базы диода.

Прологарифмировав левую и правую части последнего равенства, решим его относительно напряжения:

$$U = Vt \ln \left( \frac{I}{I_0} + 1 \right) + RI. \quad (18.3)$$

Для малых токов это выражение можно упростить:

$$U = Vt \ln \left( \frac{I}{I_0} + 1 \right). \quad (18.4)$$

Из формул (18.3) и (18.4) следует, что напряжение диода зависит от тока через него и имеет тем большее значение, чем меньше обратный ток  $I_0$ . Поэтому у кремниевых диодов начальный участок прямой ветви ВАХ значительно более пологий, чем у германиевых. Напряжение на открытом кремниевом диоде равно 0.6–0.8 В, а на германиевом – 0.2–0.3 В.

#### 4. Специальные типы диодов

**Стабилитроны.** Стабилитроном называют полупроводниковый диод, работающий в режиме управляемого лавинного пробоя. В зависимости от удельного сопротивления базы в стабилитроне может иметь место и туннельный, и лавинный, и смешанный пробой.

Стабилитроны изготавливают из кремния, обеспечивающего необходимую форму вольт-амперной характеристики. Германиевые диоды для стабилизации напряжения непригодны, так как электрический пробой у них легко переходит в тепловой.

Условное графическое изображение стабилитрона и его вольт-амперная характеристика показаны на рис. 18.8.

Прямая ветвь ВАХ стабилитрона имеет такой же вид, как и у типичного кремниевого диода. У стабилитронов рабочей является обратная ветвь ВАХ. Она имеет излом и вслед за ним – круто падающий линейный участок. Поэтому при изменении тока в широких пределах напряжение на приборе практически не изменяется. Это свойство стабилитрона позволяет использовать его в качестве стабилизатора напряжения.

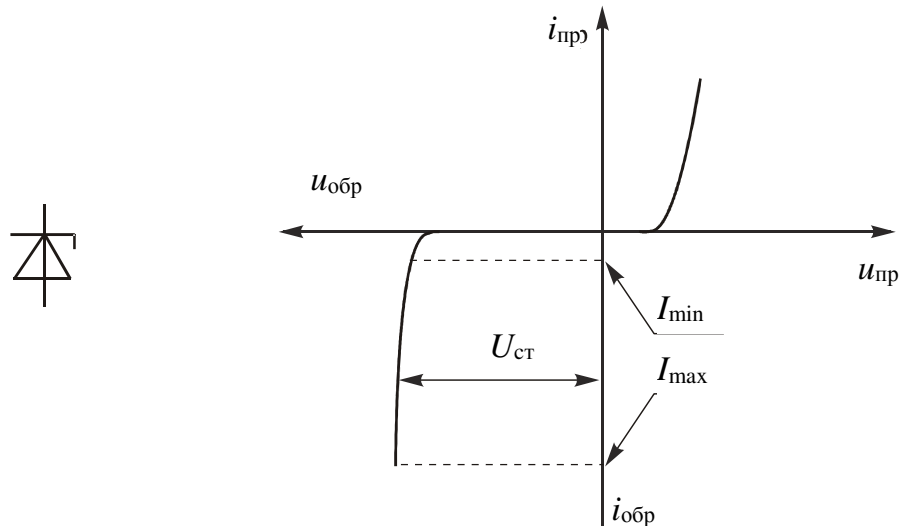


Рис. 18.8

Поскольку электрический пробой наступает при сравнительно низком обратном напряжении, мощность, выделяющаяся в  $p-n$ -переходе, будет небольшой, что предохраняет переход от теплового (необратимого) пробоя. Ток стабилитрона колеблется в пределах от единиц миллиампер до нескольких ампер. Рабочее напряжение стабилитрона, являющееся напряжением пробоя  $p-n$ -перехода, лежит в пределах от единиц до нескольких десятков вольт.

Основное применение кремниевых стабилитронов – стабилизация напряжения.

**Диоды Шоттки.** Диоды с барьером Шоттки (диоды Шоттки) названы по имени немецкого ученого В. Шоттки. В диодах этого типа используется переход металл – полупроводник. Этот переход ведет себя как диод; проводит электрический ток в одном направлении (от металлического анода к полупроводниковому катоду) и действует как разомкнутая цепь в другом направлении. Инжекция неосновных носителей в базу в таких диодах отсутствует, так как ток образуется только электронами, движущимися из кремния в металл. По этой причине у диодов Шоттки отсутствует накопление зарядов в базе и время переключения значительно меньше, чем кремниевого диода. Другая важная особенность барьера Шоттки – меньшее прямое напряжение,



Рис. 18.9

чем прямое напряжение кремниевого  $p-n$ -перехода. Условное графическое обозначение диода Шоттки показано на рис. 18.9.

Диоды Шоттки находят применение в логических элементах транзисторно-транзисторной логики (ТТЛШ), в схемах высокочастотных выпрямителей и т. д.

**Фотодиоды.** Фотодиод – элемент, преобразующий световые сигналы в электрические. Простейший фотодиод представляет полупроводниковый диод, в корпус которого вмонтирована линза, пропускающая световой поток и фокусирующая его в области  $p-n$ -перехода.

Если на  $p-n$ -переход, смещенный в обратном направлении, падает свет, происходит разрыв ковалентных связей и образуются пары электрон – дырка. Под действием контактного электрического поля электроны перемещаются в  $n$ -область, а дырки – в  $p$ -область. Таким образом, возникает ток, пропорциональный интенсивности светового потока.

Условное графическое обозначение фотодиода показано на рис. 18.10, а. Семейство ВАХ фотодиода показано на рис. 18.10, б. Ток фотодиода зависит от интенсивности светового потока. Если световой поток равен нулю, ВАХ фотодиода повторяет характеристику обычного диода. При увеличении светового потока обратный ток возрастает. Если на прибор подано обратное напряжение, то он работает в фотодиодном режиме. Ему соответствуют участки ВАХ, расположенные в третьем квадранте. В таком режиме фотодиод потребляет энергию от внешнего источника.

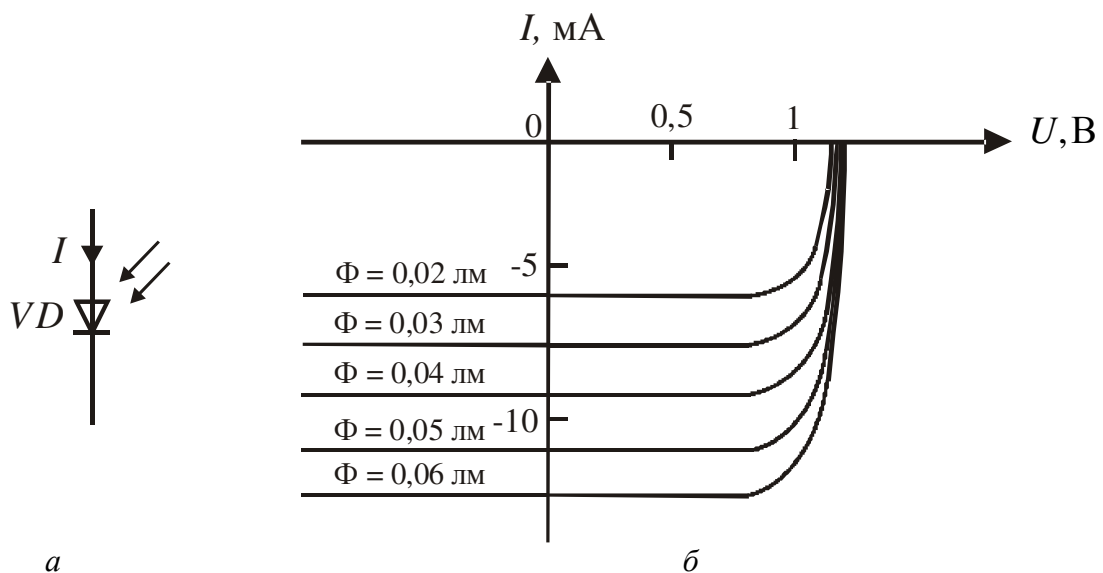


Рис. 18.10

Если на фотодиод подано прямое смещение, его ток может быть отрицательным (участки ВАХ в четвертом квадранте). При этом прибор вырабатывает энергию. В таком режиме работают солнечные элементы.

**Излучающие диоды (светодиоды).** Светодиоды выполняют функцию, обратную функции фотодиодов; они преобразуют прямой ток в свет. Работа

светодиодов основана на генерации оптического излучения в прямо смещенном  $p-n$ -переходе. Интенсивность излучаемого света пропорциональна числу рекомбинаций в области  $p-n$ -перехода, что, в свою очередь, пропорционально прямому току через него. Условное графическое обозначение светодиода показано на рис. 18.11.

Цвет свечения определяется типом полупроводниковых материалов, образующих  $p-n$ -переход. Различные оттенки получают, комбинируя синий, красный и желтый цвета.

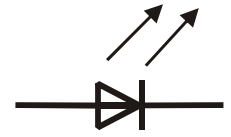


Рис. 18.11

Технологии производства светодиодов непрерывно совершенствуются, а сфера применения все более расширяется. Они используются в устройствах индикации, дисплеях лабораторных инструментов, источниках света. Преимущества таких источников перед обычными лампами накаливания – значительно меньшая (в несколько раз) потребляемая мощность и длительное время непрерывной работы (более десяти лет).

Светодиоды могут испускать когерентный свет с очень узкой полосой частот. Такие устройства называют лазерными диодами. Лазерные диоды находят применение в оптических системах связи, CD-плеерах и т. д.

**Оптрон (оптонара).** Оптрон – полупроводниковый прибор, содержащий источник и приемник излучения, расположенные в одном корпусе. Условное графическое обозначение диодного оптрона показано на рис. 18.12.

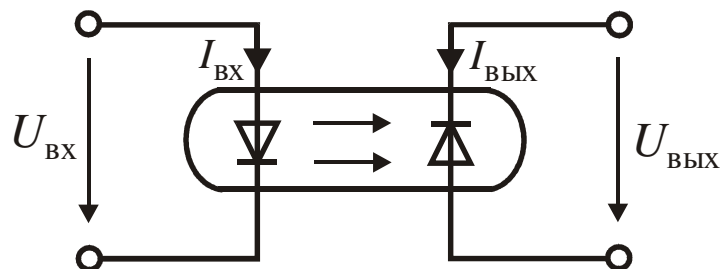


Рис. 18.12

Оптрон обеспечивает гальваническую развязку между двумя участками электронной цепи. Такая развязка может использоваться, например, в медицинском оборудовании для снижения риска поражения пациентов электрическим током.

Источником излучения в диодном оптроне служит светодиод из арсенида галлия, а фотоприемником – кремниевый фотодиод. Излучающий диод должен быть смещен в прямом направлении, а фотодиод – в прямом (режим фотогенератора) или обратном направлении (режим фотопреобразователя). Для получения большего коэффициента полезного действия оптрона работают в инфракрасной области спектра.

Диодные оптроны имеют высокое быстродействие. Они используются для передачи как цифровых, так и аналоговых сигналов, а также в качестве электронных ключей.

#### 4. Выводы

1. В полупроводниках имеются два вида подвижных носителей заряда: положительно заряженные дырки и отрицательно заряженные свободные электроны.

2. Соотношением между концентрациями свободных электронов и дырок в полупроводнике можно управлять, добавляя соответствующие примеси. Материалы, в которых основными носителями заряда являются дырки, называются материалами *p*-типа; а материалы, в которых основными носителями являются электроны, называются материалами *n*-типа.

3. Контакт двух полупроводников с различными типами проводимости называется электронно-дырочным или *p-n*-переходом. Электронно-дырочный переход обладает односторонней проводимостью.

4. Полупроводниковым диодом называют двухполюсный прибор, имеющий один *p-n*-переход.