

## ДВУХСЛОЙНЫЕ ПОЛУПРОВОДНИКОВЫЕ СТРУКТУРЫ (ДИОДЫ)

**Полупроводники.** Полупроводники обязаны своим названием тому обстоятельству, что по величине удельного сопротивления  $\rho$  они занимают промежуточное положение между металлами и изоляторами ( $\rho = 10^{-3} - 10^8$  Ом·см). Разная величина проводимости у металлов, полупроводников и диэлектриков обусловлена разной величиной энергии, необходимой для того, чтобы освободить валентный электрон от связей с атомами, расположенными в узлах кристаллической решетки. Полупроводниками являются вещества, у которых валентная зона полностью заполнена электронами, а ширина запрещенной зоны невелика (у собственных полупроводников не более 3 эВ). Однако характерным для них является не величина проводимости, а то, что их проводимость растет с повышением температуры (напомним, что у металлов она уменьшается). Наиболее часто в качестве полупроводников используются на сегодняшний день кремний, германий, арсенид галлия. Несколько десятилетий назад широко использовался селен для низкочастотных (50 Герц) выпрямителей. Различают собственную и примесную проводимости полупроводников.

**Собственная проводимость.** Собственная проводимость возникает в результате перехода электронов с верхних уровней валентной зоны в зону проводимости. При этом в зоне проводимости появляется некоторое число носителей тока – электронов, занимающих уровни вблизи дна зоны; одновременно в валентной зоне освобождается такое же число мест на верхних уровнях. Такие свободные от электронов места на уровнях заполненной при абсолютном нуле валентной зоны называют дырками.

Распределение электронов по уровням валентной зоны и зоны проводимости определяется функцией Ферми. Вычисления показывают, что уровень Ферми лежит точно посередине запрещенной зоны (рис. 1.1). Следовательно, для электронов, перешедших на нижние уровни зоны проводимости, величина  $(W - W_F)$  мало отличается от половины ширины запрещенной зоны. Уровни зоны проводимости лежат на хвосте кривой распределения, и вероятность их заполнения электронами можно найти по классической формуле

$$f(W) \approx e^{-\frac{\Delta W}{2kT}}. \quad (1.1)$$

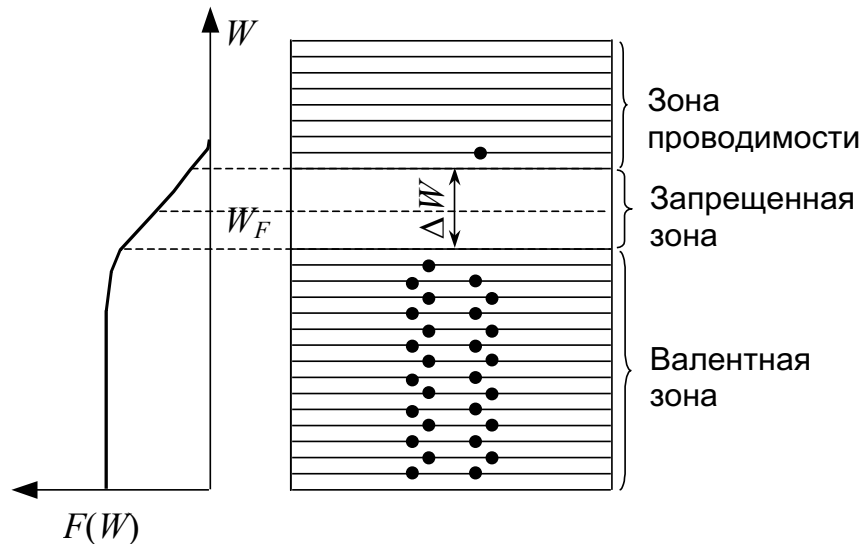


Рис. 1.1

Количество электронов, перешедших в зону проводимости, будет пропорционально вероятности (1.1). Эти электроны, а также, как мы увидим ниже, образовавшиеся в таком же числе дырки, являются носителями тока. Поскольку проводимость пропорциональна числу носителей, она также должна быть пропорциональна выражению (1.1). Следовательно, электропроводность полупроводников быстро растет с температурой, изменяясь по закону

$$\sigma = \sigma_0 e^{-\frac{\Delta W}{2kT}}, \quad (1.2)$$

где  $\Delta W$  – ширина запрещенной зоны.

Типичными полупроводниками являются элементы IV группы периодической системы Менделеева – германий и кремний. Оба эти вещества, естественно, четырехвалентны. Они образуют решетку, в которой каждый атом связан ковалентными (парно-электронными) связями с четырьмя равноотстоящими от него соседними атомами. Условно такое взаимное расположение атомов можно представить в виде плоской структуры, изображенной на рис. 1.2. Кружки со знаком «+» обозначают положительно заряженные атомные остатки (т.е. ту часть атома, которая остается после удаления валентных электронов), кружки со знаком «—» – валентные электроны, двойные линии – ковалентные связи.

При достаточно высокой температуре тепловое движение может разорвать отдельные пары, освободив один электрон (такой случай показан на рис. 1.2).

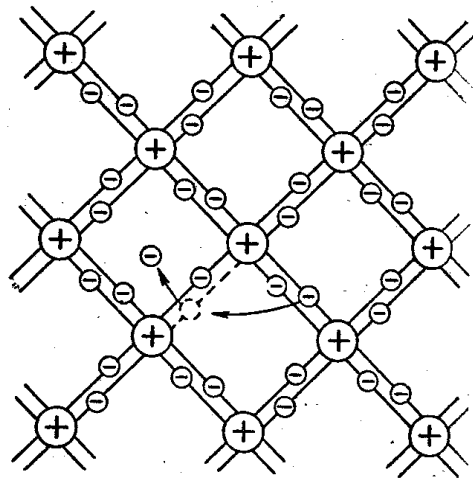


Рис. 1.2

Покинутое электроном место перестает быть нейтральным, в его окрестности возникает избыточный положительный заряд  $+e$  — образуется дырка. На это место может перескочить электрон одной из соседних пар. В результате дырка начинает также странствовать по кристаллу, как и освободившийся электрон.

Если свободный электрон встретится с дыркой, они рекомбинируют (соединяются). Это означает, что электрон нейтрализует избыточный положительный заряд, имеющийся в окрестности дырки, и теряет свободу передвижения до тех пор, пока снова не получит от кристаллической решетки энергию, достаточную для своего высвобождения. Рекомбинация приводит к одновременному исчезновению свободного электрона и дырки. На схеме уровней (рис. 1.1) процессу рекомбинации соответствует переход электрона из зоны проводимости на один из свободных уровней валентной зоны.

Итак, в полупроводнике идут одновременно два процесса: рождение попарно свободных электронов и дырок и рекомбинация, приводящая к попарному исчезновению электронов и дырок. Вероятность первого процесса быстро растет с температурой. Вероятность рекомбинации пропорциональна как числу свободных электронов, так и числу дырок. Следовательно, каждой температуре соответствует определенная равновесная концентрация электронов и дырок, величина которой изменяется с температурой по такому же закону, как и  $\sigma$  (см. формулу 1.2).

В отсутствие внешнего электрического поля электроны проводимости и дырки движутся хаотически. При включении поля на хаотическое движение накладывается упорядоченное движение: электронов против поля и дырок — в направлении поля. Оба движения — и дырок, и электронов — приводят к переносу заряда вдоль кристалла. Следовательно, собственная электропроводность обуславливается как бы

носителями заряда двух знаков – отрицательными электронами и положительными дырками.

Собственная проводимость наблюдается во всех без исключения полупроводниках при достаточно высокой температуре.

**Примесная проводимость.** Этот вид проводимости возникает, если некоторые атомы данного полупроводника заменить в узлах кристаллической решетки атомами, валентность которых отличается на единицу от валентности основных атомов. В качестве таких веществ используются трехвалентные алюминий, бор, индий или пятивалентные фосфор, мышьяк, сурьма. На рис. 1.3 условно изображена решетка германия с примесью 5-валентных атомов фосфора. Для образования ковалентных связей с соседями атому фосфора достаточно четырех электронов. Следовательно, пятый валентный электрон оказывается как бы лишним и легко отщепляется от атома за счет энергии теплового движения, образуя странствующий свободный электрон. В отличие от рассмотренного раньше случая образование свободного электрона не сопровождается нарушением ковалентных связей, т. е. образованием дырки.

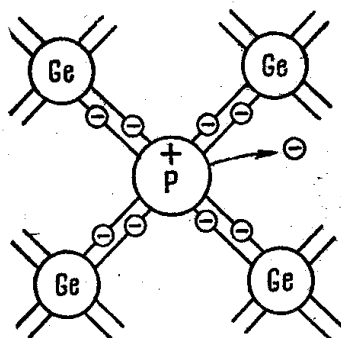


Рис. 1.3

Хотя в окрестности атома примеси возникает избыточный положительный заряд, но он связан с этим атомом и перемещаться по решетке не может. Благодаря этому заряду атом примеси может захватить приблизившийся к нему электрон, но связь захваченного электрона с атомом будет непрочной и легко нарушается вновь за счет тепловых колебаний решетки.

Таким образом, в полупроводнике с 5-валентной примесью имеется только один вид носителей тока – электроны. Соответственно говорят, что такой полупроводник обладает электронной проводимостью или является полупроводником n-типа (от слова *negativ* — отрицательный). Атомы примеси, поставляющие электроны проводимости, называются **донорными**.

Примеси искажают поле решетки, что приводит к возникновению на энергетической схеме так называемых локальных уровней, расположенных в запрещенной зоне кристалла (рис. 1.4).

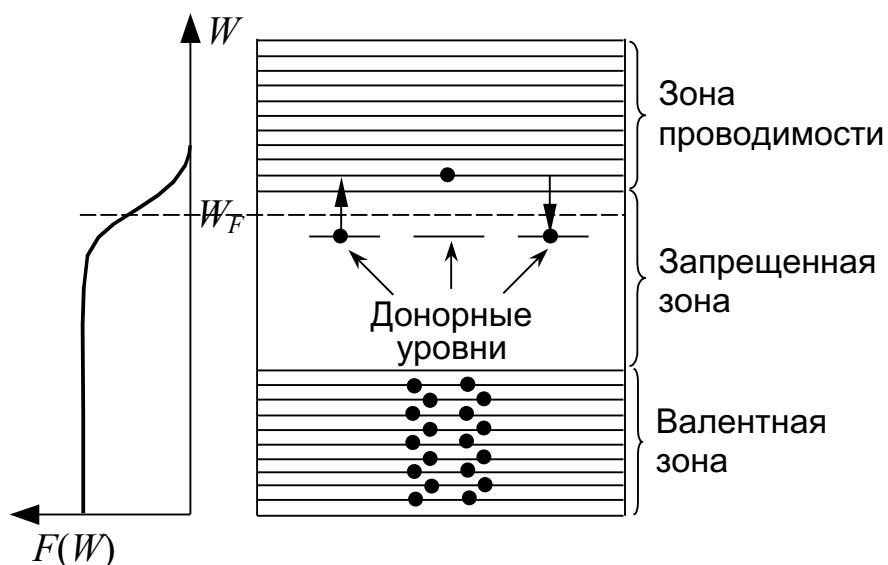


Рис. 1.4

Уровень Ферми  $W_F$  в полупроводнике n-типа лежит между донорными уровнями и дном зоны проводимости, при невысоких температурах – приблизительно посередине между ними.

Любой уровень валентной зоны или зоны проводимости может быть занят электроном, находящимся в любом месте кристалла. Энергию, соответствующую локальному уровню, электрон может иметь, лишь находясь вблизи атома примеси, вызвавшего появление этого уровня. Следовательно, электрон, занимающий примесный уровень, локализован вблизи атома примеси.

Если донорные уровни расположены недалеко от потолка валентной зоны, они не могут существенно повлиять на электрические свойства кристалла. Иначе обстоит дело, когда расстояние таких уровней от дна зоны проводимости гораздо меньше, чем ширина запрещенной зоны. В этом случае энергия теплового движения даже при обычных температурах оказывается достаточной для того, чтобы перевести электрон с донорного уровня в зону проводимости. На рис. 1.3 этому процессу соответствует отщепление пятого валентного электрона от атома примеси. На рис. 1.4 этому же процессу соответствует переход электрона с донорного уровня на один из нижних уровней зоны проводимости, а обратному процессу – захвату свободного электрона атомом примеси – соответствует переход электрона из зоны проводимости на один из донорных уровней.

На рис. 1.5 условно изображена решетка кремния с примесью трехвалентных атомов бора. Трех валентных электронов атома бора

недостаточно для образования связей со всеми четырьмя соседями. Поэтому одна из связей является неупакованной и представляет собой место, способное захватить электрон.

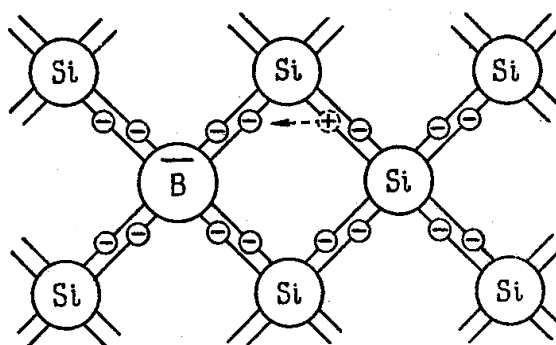


Рис. 1.5. Возникновение дырки после перехода электрона на незаполненную связь атома В

При переходе на это место электрона одной из соседних пар возникнет дырка, которая будет кочевать по кристаллу. Вблизи атома примеси возникнет избыточный отрицательный заряд, но он будет связан с данным атомом и не может стать носителем тока. Таким образом, в полупроводнике с трехвалентной примесью возникают носители тока только одного вида – дырки. Проводимость в этом случае называется дырочной, а о полупроводнике говорят, что он принадлежит к р-типу (от слова *positiv* – положительный). Примеси, вызывающие возникновение дырок, называются **акцепторными**.

На схеме уровней (рис. 1.6) акцептору соответствует расположенный в запрещенной зоне недалеко от ее дна локальный уровень. Уровень Ферми в полупроводнике р-типа лежит между потолком валентной зоны и акцепторными уровнями, при невысоких температурах – приблизительно посередине между ними.

Образованию дырки отвечает переход электрона из валентной зоны на акцепторный уровень. Обратный переход соответствует разрыву одной из четырех ковалентных связей атома примеси с его соседями и рекомбинации образовавшегося при этом электрона и дырки.

С повышением температуры концентрация примесных носителей тока быстро достигает насыщения. Это означает, что практически освобождаются все донорные или заполняются электронами все акцепторные уровни. Вместе с тем по мере роста температуры всё в большей степени начинает сказываться собственная проводимость полупроводника, обусловленная переходом электронов непосредственно из валентной зоны в зону проводимости.

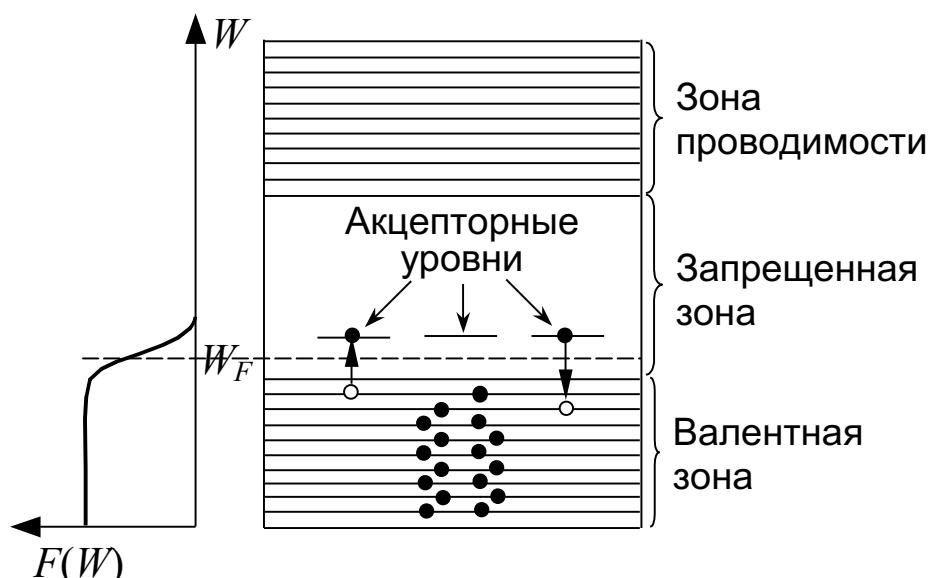


Рис. 1.6

Таким образом, при высоких температурах проводимость полупроводника будет складываться из примесной и собственной проводимости. При низких температурах преобладает примесная, а при высоких – собственная проводимость.

Почти все самые важные, практически значимые свойства полупроводниковых приборов (усиление, односторонняя проводимость, электрически управляемая емкость, излучение света и т. д.) реализуются при использовании примесной проводимости. В качестве исключения можно упомянуть генерирующий диод Ганна и фоторезистор.

Абсолютное количество примесей, вводимых в кристалл полупроводника, ничтожно. Так, для получения кремния n-типа на 1 кг кремния необходимо 20 мкг фосфора, т.е. на пятьдесят тысяч (приблизительно) атомов кремния приходится один атом фосфора, при этом случайных примесей должно быть еще много меньше.

**Р-п переход.** Выпрямление токов и усиление напряжений можно осуществить с помощью полупроводниковых устройств, называемых полупроводниковыми (или кристаллическими) диодами и триодами. Полупроводниковые триоды называют также транзисторами.

Основным элементом полупроводниковых диодов является р-п переход. Он представляет собой тонкий слой на границе между двумя областями одного и того же кристалла, отличающимися типом примесной проводимости. Для изготовления такого перехода берут, например, монокристалл из очень чистого германия (рис.1.7) с электронным механизмом проводимости (обусловленным соответствующей пентавалентной примесью). В вырезанную из кристалла тонкую пластинку вплавляют с одной стороны кусочек индия.

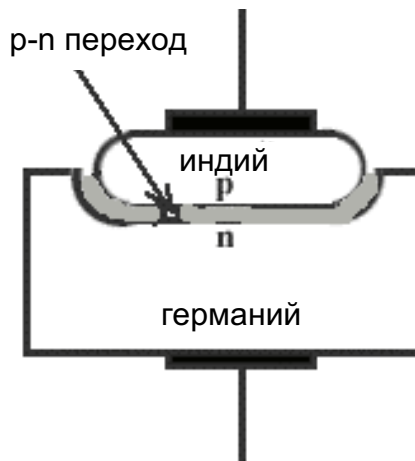


Рис. 1.7

Во время этой операции, которая осуществляется в вакууме или в атмосфере инертного газа, атомы индия диффундируют в германий на некоторую глубину. В той области, в которую проникают атомы индия, проводимость германия становится дырочной. На границе этой области возникает p-n переход.

На рис. 1.8 показан ход концентрации примесей в направлении, перпендикулярном к граничному слою. В p-области основными носителями тока являются дырки, образовавшиеся в результате захвата электронов атомами примеси (акцепторы при этом становятся отрицательными ионами); кроме того, в этой области имеется небольшое число неосновных носителей – электронов, возникающих вследствие перевода тепловым движением электронов из валентной зоны непосредственно в зону проводимости (этот процесс немного увеличивает и число дырок).

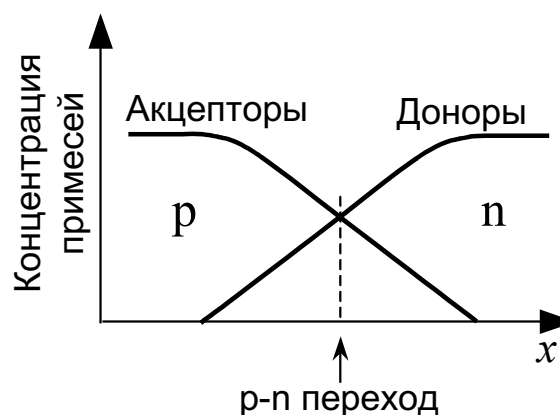


Рис. 1.8

В n-области основные носители тока – электроны, отданные донорами в зону проводимости (доноры при этом превращаются в положительные ионы), происходящий за счет теплового движения переход электронов из валентной зоны в зону проводимости приводит к



образованию небольшого числа дырок – неосновных носителей для этой области. Диффундируя во встречных направлениях через пограничный слой, дырки и электроны рекомбинируют друг другом. Поэтому р-n переход оказывается сильно обедненным носителями тока и приобретает большое сопротивление.

Одновременно на границе между областями возникает двойной электрический слой, образованный отрицательными ионами акцепторной примеси, заряд которых теперь не компенсируется дырками, и положительными ионами донорной примеси, заряд которых теперь не компенсируется электронами (рис. 1.9).

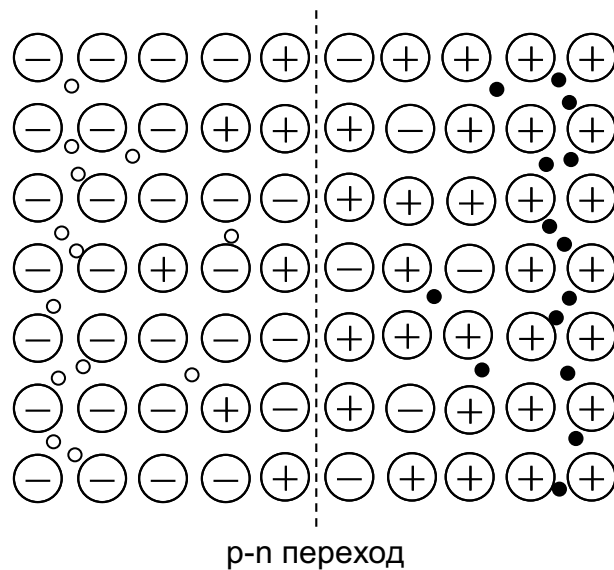


Рис.1.9

Кружки – ионы, черные точки – электроны, белые точки – дырки

Электрическое поле в этом слое направлено так, что противодействует дальнейшему переходу через слой основных носителей. Изгиб энергетических зон в области перехода вызван тем, что потенциал

р-области в состоянии равновесия ниже, чем потенциал n-области; соответственно потенциальная энергия электрона в р-области больше, чем в n-области. Таким образом, изгиб энергетических зон соответствует ходу потенциальной энергии электрона  $W_{pэ}$  в направлении, перпендикулярном к переходу. Поскольку заряд дырок противоположен заряду электронов, их потенциальная энергия  $W_{pд}$  больше там, где меньше  $W_{pэ}$ , и наоборот (рис. 1.10).

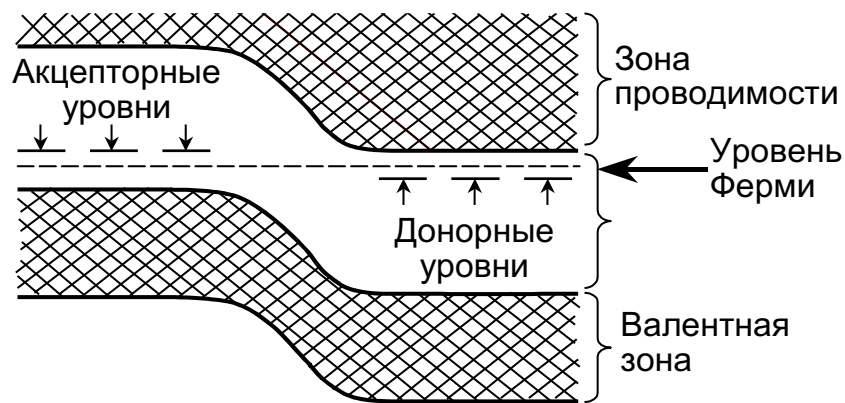


Рис. 1.10

Рассмотрим, какому потенциальному барьеру соответствует равновесие между р- и n-областями. Некоторому количеству основных носителей удастся преодолеть потенциальный барьер, вследствие чего через переход течет небольшой ток  $I_{осн}$ . Этот ток компенсируется обусловленным неосновными носителями встречным током  $I_{неосн}$ . Неосновных носителей очень мало, но они легко проникают через границу областей, «скатываясь» с потенциального барьера. Величина  $I_{неосн}$  определяется числом рождающихся каждую секунду неосновных носителей и от высоты потенциального барьера почти не зависит. Величина  $I_{осн}$ , напротив, сильно зависит от высоты барьера. Равновесие устанавливается как раз при такой высоте потенциального барьера, при которой оба тока —  $I_{осн}$  и  $I_{неосн}$  — компенсируют друг друга. Отметим, что в состоянии равновесия уровни Ферми обеих областей располагаются на одинаковой высоте.

Подадим на кристалл внешнее напряжение такого направления, чтобы «+» был подключен к р-области, а «-» — к n-области (такое напряжение называется прямым). Это приведет к возрастанию потенциала р-области и понижению потенциала n-области. В результате высота потенциального барьера уменьшится и ток  $I_{осн}$  возрастет. Ток же  $I_{неосн}$  останется практически без изменений (он, как отмечалось, от высоты барьера почти не зависит). Следовательно, результирующий ток станет отличен от нуля. Понижение потенциального барьера пропорционально приложенному напряжению (оно равно  $eU$ ). При дальнейшем уменьшении высоты барьера ток основных носителей, а следовательно, и результирующий ток быстро нарастает. Таким образом, в направлении от р-области к n-области р-n переход пропускает ток, сила которого быстро нарастает при увеличении приложенного напряжения. Это направление называется прямым (или пропускным, или проходным).

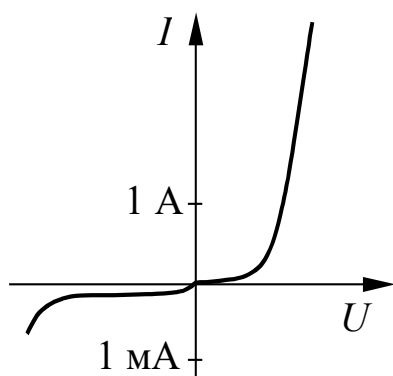


Рис. 1.11

Возникающее в кристалле при прямом напряжении электрическое поле «поджимает» основные носители к границе между областями, вследствие чего ширина переходного слоя, обедненного носителями, сокращается. Соответственно уменьшается и сопротивление перехода, причем тем сильнее, чем больше напряжение. Таким образом, вольт-амперная характеристика в пропускной области не является прямой (рис. 1.11).

Теперь приложим к кристаллу напряжение такого направления, чтобы «+» был подключен к n-области, а «-» был подключен к p-области (такое напряжение называется обратным или запиорным). Обратное напряжение приводит к повышению потенциального барьера и соответственному уменьшению тока основных носителей  $I_{осн.}$ . Возникающий при этом результирующий ток (называемый обратным) довольно быстро достигает насыщения (т. е. перестает зависеть от  $U$ , рис. 1.11) и становится равным  $I_{неосн.}$ . Таким образом, в направлении от n-области к p-области p-n переход пропускает слабый ток, целиком обусловленный неосновными носителями. Лишь при очень большом обратном напряжении сила тока начинает резко возрастать, что обусловлено электрическим пробоем перехода. Каждый p-n переход характеризуется своим предельным значением обратного напряжения, которое он способен выдержать без разрушения. Поле, возникающее в кристалле при наложении обратного напряжения, «оттягивает» основные носители от границы между областями, что приводит к возрастанию ширины переходного слоя, обедненного носителями. Соответственно увеличивается и сопротивление перехода. Следовательно, p-n переход обладает в обратном направлении гораздо большим сопротивлением, чем в прямом.

Из сказанного вытекает, что p-n переход может быть использован для выпрямления переменного тока. На рис. 1.12 показан график тока, текущего через переход в том случае, если приложенное напряжение изменяется по гармоническому закону. В этом случае ширина слоя, обедненного носителями, и сопротивление перехода пульсируют, изменяясь в такт с изменениями напряжения.

Германиевые выпрямители выдерживают обратное напряжение до 1000 В. При напряжении в 1 В плотность тока в прямом направлении достигает  $100 \text{ а/см}^2$ , в обратном – не больше нескольких микроампер. Еще более высокое обратное напряжение и более высокую рабочую температуру допускают кремниевые выпрямители.

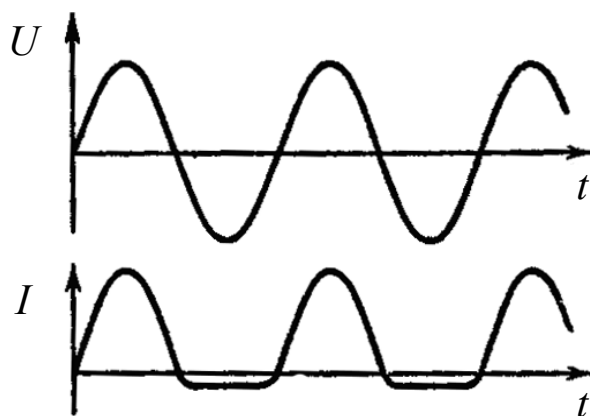


Рис. 1.12

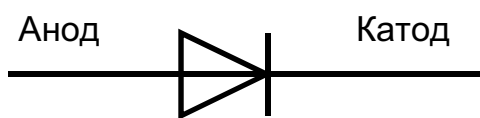


Рис. 1.13

На электрических принципиальных схемах диоды изображаются так, как показано на рис. 1.13. Анод – это вывод от р-области, катод – вывод от n-области.

Исследование диодов производится на экспериментальном макете, принципиальная схема которого приведена на рис. 1.14.

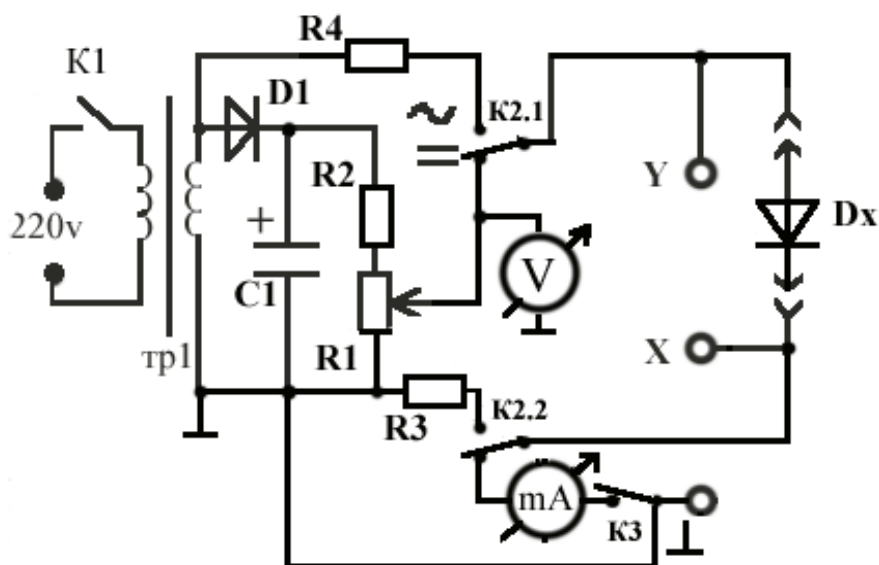


Рис. 1.14

Макет позволяет с помощью ключа K2 прикладывать к диоду постоянное или переменное (50 герц) напряжение. Резистор R2 служит ограничителем тока, предохраняя исследуемый диод от выхода из строя. Постоянное напряжение регулируется резистором R1 и используется при снятии вольт-амперной характеристики диода с помощью стрелочных приборов или при записи этой характеристики на самописец. При этом соответствующие входы самописца подключаются к гнездам макета X и Y.

Поскольку ток через диод в запирающем направлении в тысячи раз меньше прямого, для его измерения необходимо использовать внешний

микроамперметр, который нужно подключить к общему проводу макета и гнезду Х. Ключ КЗ при этом должен быть разомкнут.

Переменное напряжение необходимо для получения вольт-амперной характеристики на экране осциллографа. Соответствующие входы осциллографа, как и самописца, подключаются к гнездам Х и Y макета.

### **Практические задания**

1. Получить у преподавателя или лаборанта несколько типов диодов.
2. Определить выводы анода и катода на каждом диоде, используя стрелочные приборы макета.
3. Снять вольт-амперные характеристики полученных диодов при прямом включении, составив таблицы напряжений и токов. Построить ВАХ (можно на тетрадном листе в клетку) для всех диодов на одном графике для более наглядного их сравнения.
4. Измерить обратные токи исследуемых диодов, используя отдельный микроамперметр. Для смены знака напряжения нужно поменять выводы диода в контактных зажимах.
5. Подключить к макету самописец и записать ВАХ для одного из диодов.
6. Вывести ВАХ одного из диодов на экран осциллографа.

### **Контрольные вопросы**

1. Какие вещества называются полупроводниками?
2. Смешав мелкодисперсные порошки металла и диэлектрика в различных пропорциях, можно получить вещество с различной проводимостью. Можно ли таким образом получить полупроводник?
3. Что такое собственная проводимость полупроводника?
4. Как получают два типа примесной проводимости?
5. Выполняется ли закон Ома для обратного тока р-n перехода?