

## Лекция 4. ПОЛУПРОВОДНИКОВЫЕ ДИОДЫ

### 4.1. Основные сведения

**Полупроводниковым диодом** называется двухэлектродный прибор, основу которого составляет электронно-дырочный ( $n$ - $p$ ) переход (рис.4.1).

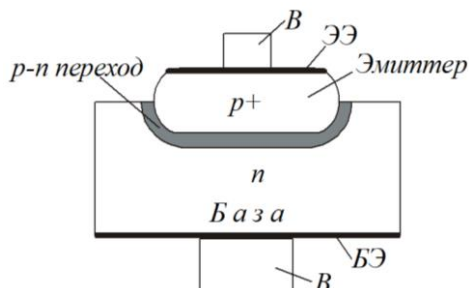


Рис.4.1. Устройство полупроводникового диода

Изготавливают диоды главным образом из кремния и германия. Одна из областей  $n$ - $p$ -структуры диода – эмиттер вследствие того, что в нее введено больше примеси, имеет большую концентрацию основных носителей, чем другая область, называемая базой. Поэтому при прохождении прямого тока носители инжектируются преимущественно из эмиттера в базу. База и эмиттер с помощью специальных электродов ЭЭ, БЭ, обеспечивающих омический контакт, соединяются с металлическими выводами В, посредством которых диод включается в электрическую цепь.

### 4.2. Отличия реальной характеристики от теоретической

Свойствами электронно-дырочного перехода определяются все важнейшие характеристики и параметры полупроводникового диода. **Реальная вольт-амперная характеристика** полупроводникового диода показана на рис. 4.2, здесь же пунктиром нанесена **теоретическая вольт-амперная характеристика** электронно-дырочного перехода.

В области малых токов реальная и теоретическая характеристики совпадают. Но при больших прямых токах, а также при больших обратных напряжениях характеристики расходятся, что является следствием ряда причин, не учтенных при теоретическом анализе процессов в электронно-дырочном переходе.

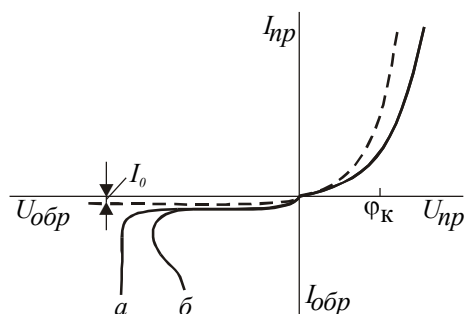


Рис.4.2. Теоретическая и реальная вольт-амперная характеристика диода

В области больших прямых токов порядка десятков и более миллиампер становится значительным падение напряжения на омическом распределенном сопротивлении базы диода и сопротивлении электродов. При этом напряжение на электронно-дырочном переходе будет заметно меньше напряжения, приложенного к диоду, в результате реальная характеристика идет ниже теоретической и оказывается почти линейной.

Сравнивая вольт-амперные характеристики кремниевого и германиевого диодов, отметим, что кремниевые диоды имеют значительно меньшую величину обратного тока из-за более низкой концентрации неосновных носителей. По этой же причине прямая ветвь характеристики у кремниевых диодов идет значительно ниже, чем у германиевых (рис. 4.3).

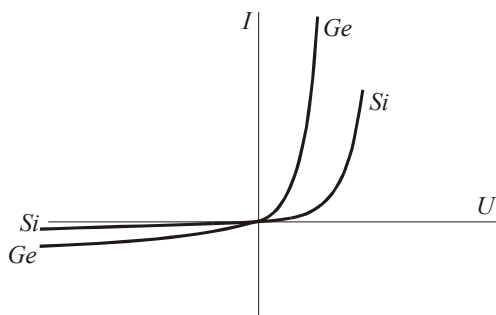


Рис. 4.3. Сравнение вольт-амперных характеристик кремниевого и германиевого диодов

### 4.3. Пробой диода

Когда обратное напряжение диода достигает определенного критического значения, ток диода начинает резко возрастать (рис. 4.2). Это явление называется пробоем диода. Заметим, что пробой сопровождается выходом диода из строя лишь в том случае, когда возникает чрезмерный разогрев перехода и происходят необратимые изменения его структуры. Если же мощность, выделяющаяся в диоде, поддерживается на допустимом уровне, он сохраняет работоспособность и после пробоя. Более того, для некоторых типов диодов пробой является основным рабочим режимом.

Напряжение, при котором наступает пробой перехода, зависит от типа диода и может иметь величину от десятков вольт до тысяч вольт.

Различают два основных вида пробоя электронно-дырочного перехода: **электрический** и **тепловой**. В обоих случаях резкий рост тока связан с увеличением количества носителей в переходе. При электрическом пробое количество носителей в переходе возрастает под действием сильного электрического поля и ударной ионизации атомов решетки, при тепловом пробое - за счет термической ионизации атомов.

Электрический пробой является обратимым, т.е. при этом пробое в переходе не происходит необратимых изменений (разрушения структуры вещества). Поэтому работа диода в режиме электрического пробоя допустима (рис. 4.2, участок а).

Могут существовать два вида электрического пробоя, которые нередко сопутствуют друг другу: **лавинный** и **туннельный**.

**Лавинный пробой** объясняется лавинным размножением носителей за счет ударной ионизации и за счет вырывания электронов из атомов сильным электрическим полем. Этот пробой характерен для  $n$ - $p$ -переходов большой толщины, получающихся при сравнительно малой концентрации примесей в полупроводниках. Пробивное напряжение для лавинного пробоя составляет десятки или сотни вольт.

**Туннельный пробой** объясняется явлением туннельного эффекта. Сущность последнего состоит в том, что при поле напряженностью более  $10^5 \text{ В/см}$ , действующем в  $n$ - $p$ -переходе малой толщины, некоторые электроны проникают через переход без изменения своей энергии. Тонкие переходы, в которых возможен туннельный эффект, получаются при высокой концентрации примесей. Напряжение, соответствующее туннельному пробое, обычно не превышает единиц вольт.

Области **теплового пробоя** соответствует на рис. 4.2 участок *б*. Тепловой пробой необратим, так как он сопровождается разрушением структуры вещества в месте *n-p*-перехода. Причиной теплового пробоя является нарушение устойчивости теплового режима *n-p*-перехода. Это означает, что количество теплоты, выделяющейся в переходе от нагрева его обратным током, превышает количество теплоты, отводимой от перехода. В результате температура перехода возрастает, сопротивление его уменьшается и ток увеличивается, что приводит к перегреву перехода и его тепловому разрушению.

#### 4.4. Емкость *n-p*-перехода

*n-p*-переход при обратном напряжении  $U_{обр}$  аналогичен конденсатору со значительным током утечки в диэлектрике. Запирающий слой имеет высокое сопротивление и играет роль диэлектрика, а по обе его стороны расположены два разноименных объемных заряда  $+Q_{обр}$  и  $-Q_{обр}$  созданные ионизированными атомами донорной и акцепторной примеси. Поэтому *n-p*-переход обладает емкостью, подобной конденсатору с двумя обкладками. Эту емкость называют **барьерной емкостью**. При постоянном напряжении она определяется отношением:  $C_{\bar{\phi}} = Q_{обр} / U_{обр}$ , а при переменном напряжении –  $C_{\bar{\phi}} = \Delta Q_{обр} / \Delta U_{обр}$ .

Барьерная емкость, как и емкость обычных конденсаторов, возрастает при увеличении площади *n-p*-перехода, диэлектрической проницаемости полупроводника и уменьшении толщины запирающего слоя.

Особенность барьерной емкости состоит в том, что она нелинейна, т.е. изменяется при изменении напряжения на переходе. Если обратное напряжение возрастает, то толщина запирающего слоя увеличивается и емкость  $C_{\bar{\phi}}$  уменьшается. Характер этой зависимости показывает график на рис. 4.4. Как видно, под влиянием напряжения  $U_{обр}$  емкость  $C_{\bar{\phi}}$  изменяется в несколько раз.

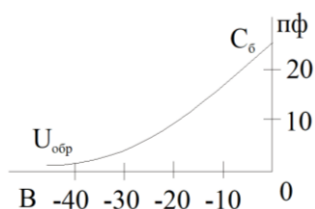


Рис. 4.4. Зависимость барьерной емкости от обратного напряжения

Барьерная емкость вредно влияет на выпрямление переменного тока, т.к. шунтирует диод и через нее на более высоких частотах проходит переменный ток.

При прямом напряжении диод кроме барьерной емкости обладает так называемой **диффузионной емкостью**  $C_{диф}$ , которая также нелинейна и возрастает при увеличении  $U_{пр}$ . Диффузионная емкость характеризует накопление подвижных носителей заряда в  $n$ - и  $p$ -областях при прямом напряжении на переходе. Она практически существует только при прямом напряжении, когда носители заряда в большом количестве диффундируют (инжектируют) через пониженный потенциальный барьер и, не успев рекомбинировать, накапливаются в  $n$ - и  $p$ -областях. Так, например, если в некотором диоде  $p$ -область является эмиттером, а  $n$ -область – базой, то при подаче прямого напряжения из  $p$ -области в  $n$ -область через переход устремляется большое число дырок и, следовательно, в  $n$ -области появляется положительный заряд. Одновременно под действием источника прямого напряжения из провода внешней цепи в  $n$ -область входят электроны и в этой области возникает отрицательный заряд. Дырки и электроны в  $n$ -области не могут мгновенно рекомбинировать. Поэтому каждому значению прямого напряжения соответствует определенное значение двух равных разноименных зарядов  $+Q_{диф}$  и  $-Q_{диф}$  накопленных в  $n$ -области за счет диффузии носителей через переход. Емкость  $C_{диф}$  представляет собой отношение заряда к разности потенциалов:

$$C_{диф} = Q_{диф} / U_{пр} - \text{при постоянном напряжении,}$$

$$C_{диф} = \Delta Q_{диф} / \Delta U_{пр} - \text{при переменном напряжении.}$$

Диффузионная емкость значительно больше барьерной, но использовать ее не удастся, так как она зашунтирована малым прямым сопротивлением самого диода.

С учетом рассмотренных емкостей на рис.4.5 показана эквивалентная схема диода для переменного тока.

Сопротивление  $R_0$  в этой схеме представляет собой суммарное, сравнительно небольшое сопротивление  $n$ - и  $p$ -областей и контактов этих областей с выводами. Нелинейное сопротивление  $R_{нл}$  при прямом напряжении равно  $R_{пр}$ , т.е. невелико, а при обратном напряжении

$$R_{нл} = R_{обр}, \text{ т.е. оно очень большое.}$$

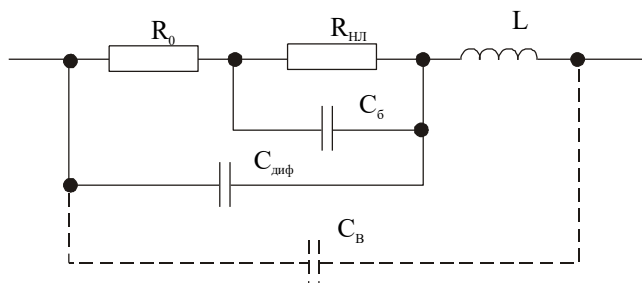


Рис. 4.5. Эквивалентная схема полупроводникового диода

Следует иметь в виду, что существует еще емкость  $C_б$  между выводами диода, которая может заметно шунтировать диод на очень высоких частотах. Она показана на рисунке штрихами. На сверхвысоких частотах (СВЧ) может также проявляться индуктивность выводов.

#### 4.5. Влияние температуры на характеристики диода

На вольт-амперные характеристики диода оказывает существенное влияние температура окружающей среды (рис. 4.6). При увеличении температуры резко возрастает концентрация неосновных носителей в полупроводнике и, как следствие, обратный ток перехода  $I_0$ .

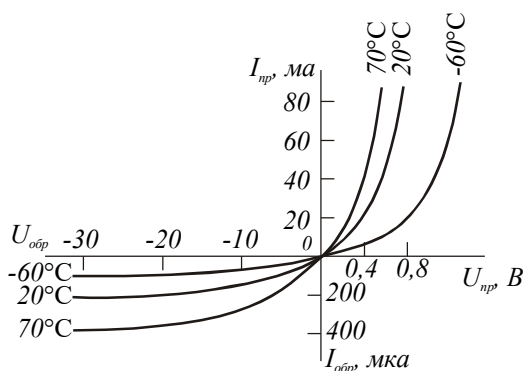


Рис. 4.6. Влияние температуры на характеристики полупроводникового диода

Из рис. 4.6 видно, что прямая ветвь характеристики изменяется с ростом температуры относительно мало.

Влияние температуры на характеристики более значительно в германиевых диодах, т.к. германий имеет меньшую энергию

ионизации, чем кремний, и его собственная проводимость с ростом температуры растет быстрее.

Максимальная температура диода, определяемая допустимым увеличением обратного тока, составляет в германиевых диодах  $80-100^{\circ}\text{C}$ , а в кремниевых  $150-200^{\circ}\text{C}$ . Минимальная рабочая температура диода определяется энергией ионизации акцепторных и донорных примесей и теоретически составляет  $-200^{\circ}\text{C}$ . Практически минимальная рабочая температура ограничивается величиной порядка  $-(60-70)^{\circ}\text{C}$ .

#### 4.6. Рабочий режим

В практических схемах в цепь диода включается какая-либо нагрузка, например, резистор (рис. 4.7).

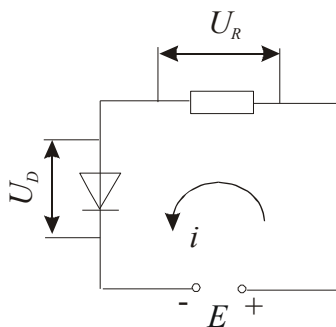


Рис. 4.7. Схема диода с нагрузкой

Режим диода с нагрузкой называют **рабочим режимом**. Если бы диод обладал линейным сопротивлением, то общее сопротивление цепи было бы равно сумме сопротивления диода постоянному току  $R_0$  и сопротивления нагрузочного резистора  $R_n$ . Но диод обладает нелинейным сопротивлением, и значение  $R_0$  у него изменяется при изменении тока. Поэтому расчет тока делают графически. Задача состоит в следующем: известны значения  $E$ ,  $R_n$  и характеристика диода. Требуется определить ток в цепи и напряжение на диоде.

Характеристику диода следует рассматривать как график некоторого уравнения, связывающего величины  $i$  и  $U$ . Для сопротивления  $R_n$  подобным уравнением является закон Ома:

$$i = U_R / R_H = (E - U) / R_H \quad (4.1)$$

Имеется два уравнения с двумя неизвестными  $i$  и  $U$ , причем одно из уравнений дано графически. Для решения такой системы уравнений надо построить график второго уравнения и найти координаты точки пересечения двух графиков.

Уравнение для сопротивления  $R_H$  – это прямая линия, называемая **линией нагрузки**. Ее можно построить по двум точкам на осях координат. При  $i=0$  из уравнения (4.1) получим:  $E - U_D = 0$  или  $U_D = E$ , что соответствует точке  $A$  на рис. 4.8. Если  $U=0$ , то  $i = E / R_H$  (точка  $B$  на рис. 4.8). Через точки  $A$  и  $B$  проводим прямую, которая является линией нагрузки. Координаты точки  $T$  дают решение поставленной задачи. Следует отметить, что все остальные точки прямой  $AB$  не соответствуют каким-либо рабочим режимам диода.

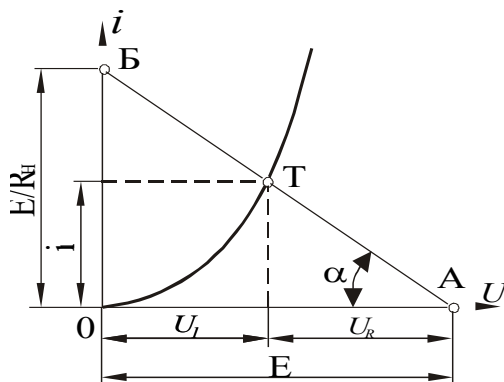


Рис. 4.8. Построение линии нагрузки

Цепь, изображенная на рис. 4.7 является нелинейной. Характеристику такой цепи, называемую **рабочей характеристикой диода**, т. е. график зависимости  $i = f(U)$ , можно получить суммированием напряжений для характеристик диода и нагрузочного резистора  $R_H$  (рис. 4.9). Характеристика резистора  $R_H$  выражает закон Ома  $i = U_R / R_H$  и является прямой линией, проходящей через начало координат.

Для построения этой прямой на график наносится точка, соответствующая произвольному напряжению  $U_R$  и току  $U_R / R_H$ . Через эту точку и начало координат проводится прямая.



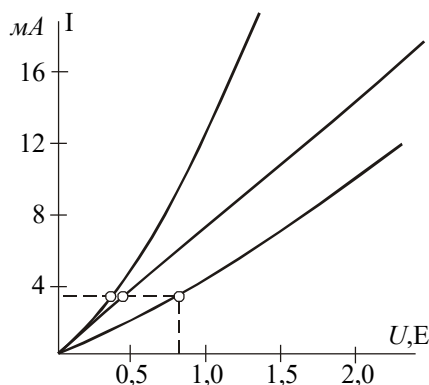


Рис. 4.9. Построение рабочей характеристики для цепи, изображенной на рис. 4.7

Рабочую характеристику цепи  $i = f(U)$  строим, складывая для нескольких значений тока  $i$  напряжения  $U$  и  $U_R$ , т.к.  $E = U + U_R$ . Например, при токе  $3\text{ мА}$  имеем:  $U = 0,4\text{ В}$  и  $U_R = 0,5\text{ В}$ . Суммируя эти напряжения, получаем  $E = 0,9\text{ В}$  и соответствующую точку результирующей характеристики. Аналогично находим другие точки, и через них проводим кривую.

#### 4.7. Применение полупроводниковых диодов для выпрямления переменного тока

Выпрямление переменного тока – один из основных процессов в радиоэлектронике. В выпрямительном устройстве энергия переменного тока преобразуется в энергию постоянного тока. Полупроводниковые диоды находят здесь применение поскольку они хорошо проводят ток в прямом направлении и плохо в обратном.

Однополупериодная схема выпрямления переменного тока показана на рис. 4.10.

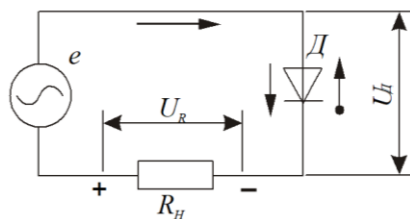


Рис. 4.10. Схема выпрямителя

В ней последовательно соединены генератор переменной ЭДС ( $e$ ), диод  $D$  и нагрузочный резистор  $R_n$ .

Работа выпрямителя происходит следующим образом. Будем считать, что генератор дает синусоидальную ЭДС  $e = E_m \sin \omega t$ . В течение одного полупериода напряжение для диода является прямым и проходит ток, создающий на резисторе  $R_n$  падение напряжения  $U_R$ . В течение следующего полупериода напряжение является обратным, тока практически нет и  $U_R = 0$ . Таким образом, через диод, нагрузочный резистор и генератор проходит пульсирующий ток в виде импульсов, длящихся полупериода и разделенных промежутками также в полупериода. Этот ток называют **выпрямленным током**. Он создает на резисторе  $R_n$  выпрямленное напряжение.

На рис. 4.11 изображена синусоида с амплитудой  $E_m$ , что соответствует переменной ЭДС генератора. Как правило, сопротивление нагрузки  $R_n$  во много раз больше сопротивления диода, и тогда нелинейностью диода можно пренебречь (рабочая характеристика близка к линейной). В этом случае выпрямленный ток имеет форму импульсов, близкую к полусинусоиде с максимальным значением  $I_{max}$ . Аналогичная кривая, но с другим масштабом, будет и для выпрямленного напряжения  $U_R$ , т.к.  $U_R = iR_n$  (рис. 4.11).

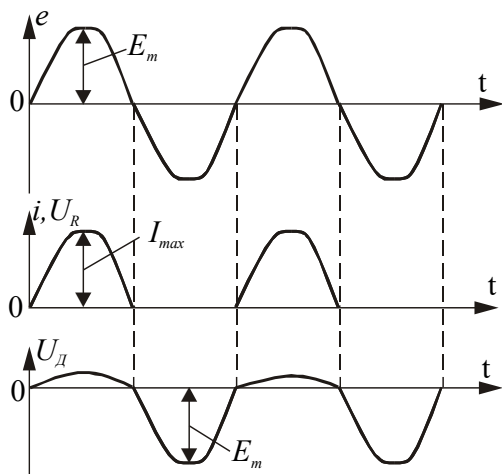


Рис. 4.11. Временные диаграммы [работы выпрямителя](#)

Напряжение на диоде (рис. 4.11) имеет несинусоидальную форму. У этого напряжения амплитуды положительных и отрицательных полувольт неодинаковы. Амплитуда положительных полувольт очень мала. Это объясняется тем, что когда проходит прямой ток, то большая часть напряжения источника падает на нагрузочном резисторе  $R_n$ , сопротивление которого значительно превышает сопротивление диода. В этом случае:

$$U_{np.max} = E_m - U_{Rmax} = E_m - I_{max}R_n = E_m.$$

Рассмотрим подробнее выпрямленное напряжение (все, что будет показано для него, относится и к выпрямленному току). Из рис. 4.11 видно, что это напряжение сильно пульсирует. Полпериода напряжения совсем нет. Полезной частью такого напряжения является его постоянная составляющая, или среднее значение  $U_{cp}$ . Найдем это значение:

$$U_{cp} = 2U_{max} / \pi = 0,636U_{max}.$$

Т.к. во втором полупериоде напряжения совсем нет, то за весь период среднее значение вдвое меньше:

$$U_{cp} = U_{max} / \pi = 0,318U_{max}.$$

Таким образом приближенно  $U_{cp}$  считают равным 30% максимального значения. Поскольку падение напряжения на диоде очень мало, можно считать:  $U_{max} \approx E_m$  и  $U_{cp} \approx 0,3E_m$ .

Вычтем из выпрямленного пульсирующего напряжения его среднее значение, получим переменную составляющую  $U_{\sim}$ , которая имеет несинусоидальную форму. Для нее нулевой осью является прямая линия, изображающая постоянную составляющую (рис. 4.12). Полувольты переменной составляющей на рис.4.12 заштрихованы.

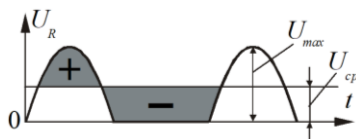


Рис. 4.12. Составляющие выпрямленного напряжения

Положительная полуволна представляет собой верхние две трети полусинусоиды, а отрицательная имеет форму, близкую к трапеции.

Длительность этих полуволн неодинакова, но площади, ограниченные ими, равны, т.к. постоянной составляющей уже нет.

Переменная составляющая является «вредной» частью выпрямленного напряжения. Для ее уменьшения в нагрузочном резисторе, т.е. для сглаживания пульсации выпрямленного напряжения, применяют специальные сглаживающие фильтры.

#### 4.8. Последовательное и параллельное соединение диодов

При выпрямлении более высоких напряжений приходится **соединять диоды последовательно**, с тем чтобы обратное напряжение на каждом диоде не превышало предельного. Но вследствие разброса обратных сопротивлений у различных экземпляров диодов одного и того же типа на отдельных диодах обратное напряжение может оказаться выше предельного, что повлечет пробой диодов.

Пусть в некотором выпрямителе амплитуда обратного напряжения составляет  $U_{обр} = 1000\text{ В}$  и применены диоды с  $U_{обр.мах} = 400\text{ В}$ . Очевидно, что необходимо соединить последовательно не менее трех диодов. Предположим, что обратные сопротивления диодов  $R_{обр.1} = R_{обр.2} = 1\text{ МОм}$  и  $R_{обр.3} = 3\text{ МОм}$ . Обратное напряжение распределяется пропорционально обратным сопротивлениям, и поэтому получится  $U_{обр.1} = U_{обр.2} = 200\text{ В}$  и  $U_{обр.3} = 600\text{ В}$ . Третий диод может быть пробит, поскольку  $U_{обр.3} > U_{обр.мах}$ . Если это произойдет, то напряжение  $1000\text{ В}$  распределится между оставшимися диодами, что может повлечь за собой пробой одного или двух диодов.

Для того чтобы обратное напряжение распределялось равномерно между диодами независимо от их обратных сопротивлений, применяют шунтирование диодов резисторами (рис. 4.13). Сопротивления  $R_{ш}$  резисторов должны быть одинаковы и значительно меньше наименьшего из обратных сопротивлений диодов. Но вместе с тем  $R_{ш}$  не должно быть слишком малым, чтобы чрезмерно не возрос ток при обратном напряжении, т.е. чтобы не ухудшилось выпрямление. Для рассмотренного примера можно взять резисторы с сопротивлением  $100\text{ кОм}$ . Тогда при обратном напряжении сопротивление каждого участка цепи, состоящего из диода и шунтирующего резистора, будет несколько меньше  $100\text{ кОм}$  и общее обратное напряжение разделится между этими участками примерно на три равные части. На каждом участке это напряжение окажется меньше  $400\text{ В}$  и диоды будут работать надежно.

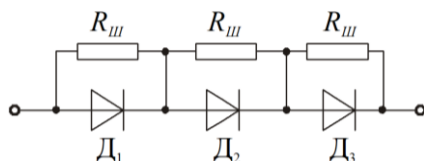


Рис. 4.13. Последовательное соединение диодов

**Параллельное соединение диодов** применяют тогда, когда нужно получить прямой ток, больший предельного тока одного диода. Но если диоды одного типа просто соединить параллельно, то вследствие неодинаковости вольт – амперных характеристик они окажутся различно нагруженными и в некоторых ток будет больше предельного.

Рассмотрим характеристики прямого тока двух диодов одного и того же типа, у которых  $I_{np.max} = 0,2 \text{ A}$  (рис. 4.14). Пусть от этих диодов требуется получить прямой ток  $0,4 \text{ A}$ . Если их соединить параллельно, то при токе  $0,2 \text{ A}$  на первом диоде напряжение равно  $0,4 \text{ B}$  (кривая 1, рис. 4.14). А на втором диоде при таком же напряжении ток будет лишь  $0,05 \text{ A}$  (кривая 2, рис. 4.14). Таким образом, общий ток составит  $0,25 \text{ A}$ , а не  $0,4 \text{ A}$ . Увеличивать напряжение на диодах нельзя, т.к. в первом диоде ток станет больше предельного.

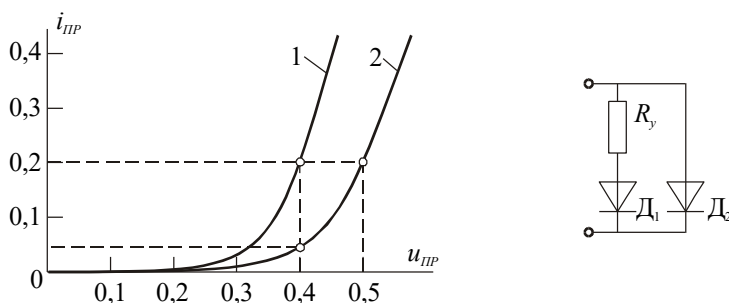


Рис. 4.14. Параллельное соединение диодов

Из характеристик видно, что для получения во втором диоде тока  $0,2 \text{ A}$  надо иметь на нем напряжение  $0,5 \text{ B}$ , т.е. на  $0,1 \text{ B}$  больше, чем на первом диоде. Поэтому, чтобы установить правильный режим работы диодов, надо подвести к ним напряжение  $0,5 \text{ B}$ , но последовательно с первым диодом включить уравнивающий резистор  $R_y$  (рис. 4.14) – с целью поглощения излишнего для первого диода напряжения  $0,1 \text{ B}$ . Сопротивление этого резистора:  $R_y = 0,1 / 0,2 = 0,5 \text{ Ом}$ .

При наличии такого резистора оба диода будут нагружены одинаково током в  $0,2\text{ А}$ .

Практически редко включают параллельно больше трех диодов. Уравнивающие резисторы с сопротивлением в десятые доли Ома или единицы Ом обычно подбирают экспериментально до получения в рабочем режиме одинаковых токов в диодах. Иногда включают уравнивающие резисторы с сопротивлением, в несколько раз большим, чем прямое сопротивление диодов, для того чтобы ток в каждом диоде определялся главным образом сопротивлением  $R_y$ . Если нежелательно включать уравнивающие резисторы, то надо подобрать диоды с примерно одинаковыми характеристиками. Однако рекомендуется по возможности не прибегать к параллельному соединению диодов.

#### 4.9. Импульсный режим работы диода

Одним из режимов работы диодов является импульсный, с длительностью импульсов, равной единицам или долям микросекунды. Рассмотрим пример, когда диод соединен последовательно с нагрузкой, сопротивление которой  $R_n$  во много раз больше прямого сопротивления диода  $R_n \gg R_{np}$ . Пусть такая цепь находится под действием импульсного напряжения, которое состоит из короткого импульса прямого напряжения (положительного импульса), запирающего диод, и более длительного импульса обратного напряжения (отрицательного импульса), надежно запирающего диод до прихода следующего положительного импульса. Импульсы напряжения имеют прямоугольную форму (рис. 4.15).

На рис. 4.15 показан график тока, а, следовательно, и пропорционального ему напряжения на  $R_n$ . При прямом напряжении ток в цепи определяется сопротивлением  $R_n$ . Хотя прямое сопротивление диода нелинейно, но оно почти не влияет на ток, т.к. во много раз меньше  $R_n$ . Поэтому импульсы прямого тока почти не искажены.

При перемене полярности напряжения, т.е. при подаче обратного напряжения, диод запирается не сразу. В течение некоторого времени проходит импульс обратного тока (рис. 4.15), значительно превосходящий по амплитуде обратный ток в установившемся режиме ( $i_{обр.уст}$ ). Главная причина этого – разряд диффузионной емкости, т.е. рассасывание зарядов, образованных подвижными носителями в  $n$ - и  $p$ -областях. Поскольку концентрации примесей в этих областях

обычно, весьма различны, то практически импульс обратного тока создается рассасыванием заряда, накопленного в базе, т.е. в области с относительно малой проводимостью. Например, если  $n$ -область является эмиттером, а  $p$ -область – базой, то при прямом токе можно пренебречь потоком дырок из  $p$ -области в  $n$ -область и рассматривать только поток электронов из  $n$ -области в  $p$ -область.

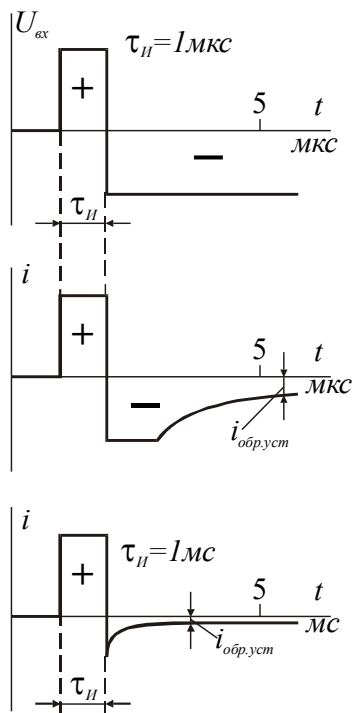


Рис. 4.15. Временная диаграмма импульсного режима работы диода

Этот диффузионный поток через переход вызывает накопление электронов в  $p$ -области, т.к. они не могут сразу рекомбинировать с дырками или дойти до вывода от  $p$ -области. При перемене полярности напряжения накопленный в базе заряд начинает двигаться в обратном направлении и возникает импульс обратного тока. Чем больше был прямой ток, тем больше электронов накапливалось в базе и тем сильнее импульс обратного тока. Двигаясь от базы обратно в эмиттер, электроны частично рекомбинируют с дырками, а частично проходят через  $n$ -область до металлического вывода от этой области.

Исчезновение (рассасывание) заряда, накопленного в базе, длится некоторое время. К концу рассасывания обратный ток достигает своего установившегося малого значения  $i_{обр.уст}$ . Иначе можно сказать, что обратное сопротивление диода  $R_{обр}$  сначала оказывается сравнительно небольшим, а затем постепенно возрастает до своего нормального установившегося значения.

Время  $\tau_{вос}$  от момента возникновения обратного тока до момента, когда он принимает установившееся значение, называют **временем восстановления обратного сопротивления**. Это время – важный параметр диодов, предназначенных для импульсной работы. Чем  $\tau_{вос}$  меньше, тем лучше, т.к. диод быстрее запирается.

Вторая причина возникновения импульса обратного тока - заряд емкости диода под действием обратного напряжения. Зарядный ток этой емкости складывается с током рассасывания заряда, и в результате получается суммарный импульс обратного тока, который тем больше, чем больше емкость диода. Эта емкость у специальных диодов для импульсной работы не превышает единиц пикофарад ( $nФ$ ).

Если импульс прямого тока имеет длительность значительно большую, чем длительность рассмотренных переходных процессов, то импульс обратного тока получается во много раз более коротким (рис. 4.15) и его можно не принимать во внимание.

Импульсные диоды, помимо параметров  $\tau_{вос}$  и  $C$  характеризуются еще рядом параметров. К ним относятся постоянное прямое напряжение  $U_{пр}$ , постоянный прямой ток  $I_{пр}$ , обратный ток  $I_{обр}$ , обратное напряжение  $U_{обр}$ , максимальные допустимые обратное напряжение  $U_{обр.мах}$  и высота импульса прямого тока  $I_{обр.мах}$ .

#### 4.10. Основные типы диодов

Полупроводниковые диоды подразделяются на группы по многим признакам. Бывают диоды из различных полупроводниковых материалов, предназначенные для низких или высоких частот, для выполнения различных функций и отличающиеся друг от друга по конструкции. В зависимости от структуры различают **точечные** и **плоскостные** диоды. У точечных диодов линейные размеры, определяющие площадь  $n$ – $p$ –перехода, такие же, как толщина



перехода, или меньше ее. У плоскостных диодов эти размеры значительно больше толщины перехода.

Точечные диоды имеют малую емкость  $n$ - $p$ -перехода (обычно менее 1  $nФ$ ) и поэтому применяются на любых частотах вплоть до СВЧ. Но они могут пропускать токи не более единиц или десятков миллиампер. Плоскостные диоды в зависимости от площади перехода обладают емкостью в десятки  $nФ$ . Поэтому их применяют на частотах не выше десятков кГц. Допустимый ток в плоскостных диодах бывает от десятков миллиампер до сотен ампер.

Основой точечных и плоскостных диодов являются пластинки полупроводника, вырезанные из монокристалла, имеющего во всем своем объеме правильное кристаллическое строение. В качестве полупроводниковых веществ для точечных и плоскостных диодов применяют чаще всего германий и кремний, а в последнее время также арсенид галлия (GaAs) и другие соединения.

Принцип устройства точечного диода показан на рис. 4.16.

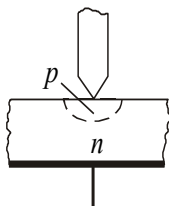


Рис. 4.16. Устройство точечного диода

Тонкая заостренная проволока (игла) с нанесенной на нее примесью приваривается при помощи импульса тока к пластинке полупроводника с определенным типом электропроводности. При этом из иглы в основной полупроводник диффундируют примеси, которые создают область с другим типом электропроводности. Этот процесс называется формовкой диода. Таким образом, около иглы образуется миниатюрный  $n$ - $p$ -переход полусферической формы.

Германиевые точечные диоды обычно изготавливаются из германия  $n$ - $p$ -типа со сравнительно большим удельным сопротивлением. К пластинке германия приваривают проволочку из вольфрама, покрытого индием. Индий является для германия акцептором. Полученная область германия  $p$ -типа работает в качестве эмиттера. Для изготовления кремниевых точечных диодов используются кремний  $n$ -типа и игла, покрытая алюминием, который служит акцептором для кремния.

Плоскостные диоды изготавливаются главным образом методами **сплавления** (вплавления) или **диффузии** (рис. 4.17).

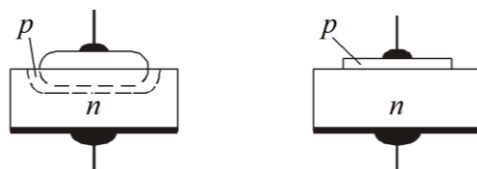


Рис. 4.17. Принцип устройства плоскостных германиевых диодов

В пластинку германия  $n$ -типа вплавляют при температуре около  $500^{\circ}\text{C}$  каплю индия, которая, сплавляясь с германием, образует слой германия  $p$ -типа. Область с электропроводностью  $p$ -типа имеет более высокую концентрацию примеси, нежели основная пластинка сравнительно высокоомного германия, и поэтому является эмиттером. К основной пластинке германия и к индию припаивают выводные проволочки, обычно из никеля. Если за исходный материал взят высокоомный германий  $p$ -типа, то в него вплавляют сурьму и тогда получается эмиттерная область  $n$ -типа.

Следует отметить, что сплавным методом получают так называемые резкие, или ступенчатые,  $n$ - $p$ -переходы, в которых толщина области изменения концентрации примесей значительно меньше толщины области объемных зарядов в переходе.

Диффузионный метод изготовления  $n$ - $p$ -перехода основан на том, что атомы примеси диффундируют в основной полупроводник. Примесное вещество при этом обычно находится в газообразном состоянии. Для того чтобы диффузия была интенсивной, основной полупроводник нагревают до более высокой температуры, чем при методе сплавления. Например, пластинку германия  $n$ -типа нагревают до  $900^{\circ}\text{C}$  и помещают в пары индия. Тогда на поверхности пластинки образуется слой германия  $p$ -типа. Изменяя длительность диффузии, можно довольно точно получать слой нужной толщины. После охлаждения его удаляют путем травления со всех частей пластинки, кроме одной грани. Диффузионный слой играет роль эмиттера. От него и от основной пластинки делают выводы. При диффузионном методе атомы примеси проникают на относительно большую глубину в основной полупроводник, и поэтому  $n$ - $p$ -переход получается плавным, т.е. в нем толщина области изменения концентрации примеси сравнима с толщиной области объемных зарядов.