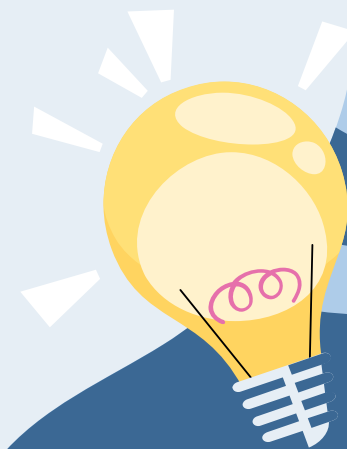


Полупроводниковые приборы.

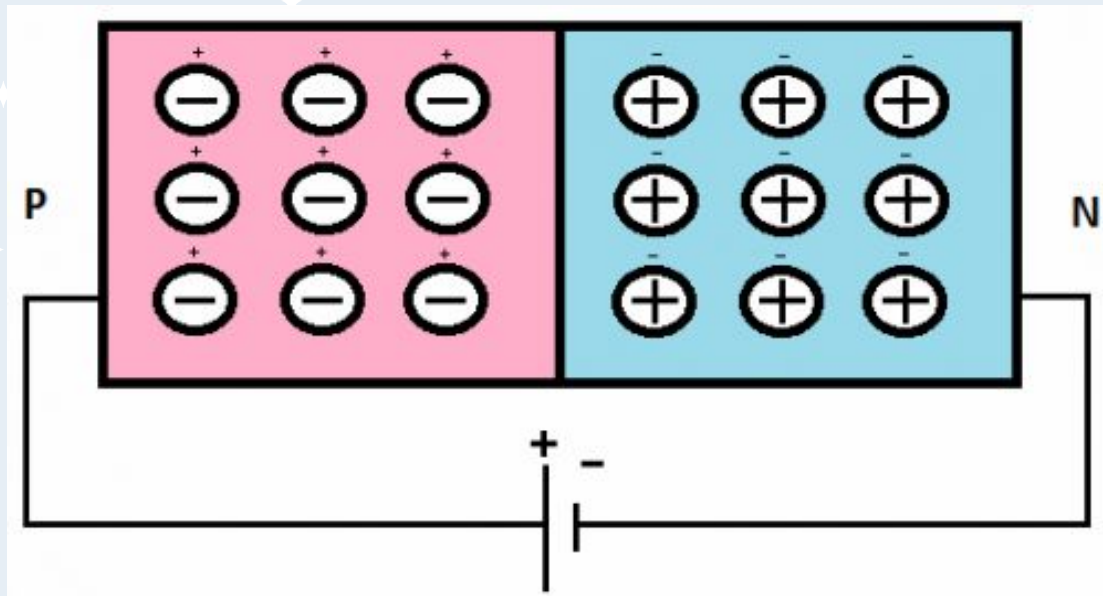
Свойства р-п перехода



Что такое электронно-дырочный переход р-n-переход

1. К полупроводникам относятся вещества с удельным сопротивлением от 10^{-5} до 10^2 ом \times м. По своим электрическим свойствам они занимают промежуточное положение между металлами и изоляторами.
2. Сопротивление полупроводника подвержено влиянию многих факторов: оно сильно зависит от температуры (с ростом температуры сопротивление уменьшается), зависит от освещения (под действием света сопротивление уменьшается) и т. д.
3. В зависимости от рода примеси в полупроводнике преобладает одна из проводимостей — электронная (n-типа) или дырочная (p-типа).

1. Основной частью любого полупроводникового прибора (диода, светодиода, транзистора, тиристора и т.д.) является так называемый электронно-дырочный р-п-переход. Он получается, если часть кристалла имеет проводимость п-типа, а другая часть — р-типа. Обе эти области должны быть получены в одном монокристалле с однородной решеткой. Р-п-переход нельзя получить механическим соединением двух кристаллов с различными типами проводимости.
2. Основные носители тока — дырки в р-области и свободные электроны в п-области — диффундируют из одной области в другую. Вследствие рекомбинации (взаимной нейтрализации зарядов) электронов и дырок между областями р и п образуется слой полупроводника, обедненный носителями тока (запирающий слой).
3. Избыточный заряд создается отрицательными ионами р-области и положительными ионами п-области, причем весь объем полупроводника в целом остается электрически нейтральным. В результате этого в месте р-п-перехода возникает электрическое поле, направленное из п-области к р-области и препятствующее дальнейшей диффузии дырок и электронов.



В р-п-переходе образуется разность электрических потенциалов, т. е. возникает так называемый потенциальный барьер. Распределение потенциала в переходном слое зависит от расстояния. За нуль потенциала условно принимают потенциал в р-области непосредственно вблизи р-п-перехода, где нет объемного заряда.

1. Можно показать, что р-п-переход обладает выпрямительным свойством. Если к р-области присоединить отрицательный полюс источника постоянного напряжения, то потенциальный барьер возрастет на величину приложенного напряжения и основные носители тока не смогут проходить через р-п-переход. В этом случае полупроводниковый выпрямительный диод будет обладать весьма высоким сопротивлением и так называемый обратный ток будет очень мал.
2. Если же к р-области присоединить положительный, а к п-области отрицательный полюс источника, то потенциальный барьер снизится и основные носители тока получат возможность проходить через р-п-переход. В цепи возникнет так называемый прямой ток, который будет расти с увеличением напряжения источника.

1. Итак, электронно-дырочный переход — переход между двумя областями полупроводников, одна из которых имеет электропроводность n-типа, а другая — p-типа. Электронно-дырочный переход служит основой полупроводниковых приборов. В области перехода образуется слой объемного заряда, обедненный подвижными носителями заряда. Этот слой представляет собой потенциальный барьер для основных и потенциальную яму для неосновных носителей заряда. Основное свойство электронно-дырочного перехода — униполярная проводимость.
2. Нелинейные полупроводниковые элементы с несимметричной вольт-амперной характеристикой широко применяются для преобразования переменного тока в постоянный. Такие элементы, обладающие односторонней проводимостью, называются выпрямителями или электрическими вентилями.

Полупроводниковый р-п-переход.

р-п-переход или электронно-дырочный переход — область соприкосновения двух полупроводников с разными типами проводимости — дырочной (р, от англ.— положительная) и электронной (п, от англ.— отрицательная). Электрические процессы в р-п-переходах являются основой работы полупроводниковых приборов с нелинейной вольт-амперной характеристикой (диодов, транзисторов и др.)

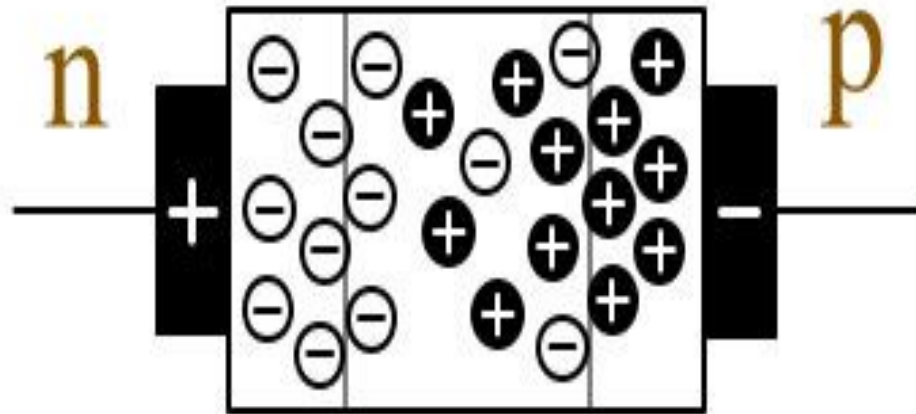
Свойства р-п перехода

1. свойство односторонней проводимости;
2. температурные свойства р-п перехода;
3. частотные свойства р-п перехода;
4. пробой р-п перехода.



Обратное включение

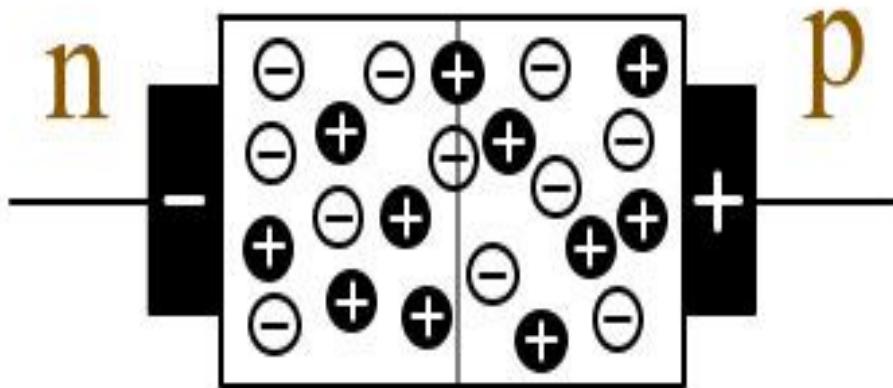
1. Когда осуществляется обратное включение р-п перехода, то в образовавшейся цепи сила тока оказывается существенно ниже, чем при прямом включении. Дело в том, что дырки из области n будут следовать в область p , а электроны – из области p в область n . Невысокая сила тока обуславливается тем обстоятельством, что в области p мало электронов, а в области n , соответственно, – дырок.
- 2.
3. Таким образом, при обратном включении полупроводникового прибора в цепь, переход через контакт двух областей осуществляется с помощью неосновных носителей заряда, количество которых совсем невелико. Поэтому электрическое сопротивление оказывается достаточно большим, а проводимость – незначительной. Это означает, что возникает запирающий слой.



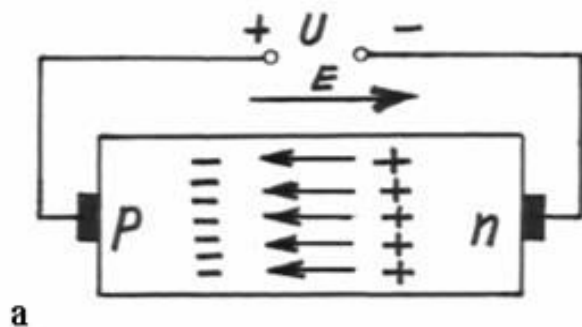
Обратное включение

Прямое включение р-n перехода

1. Когда осуществляется прямое включение р-n перехода, то под воздействием внешнего напряжения в нем создается поле. Его направление по отношению к направлению внутреннего диффузионного электрического поля противоположно. В результате этого происходит падение напряженности результирующего поля, а запирающий слой сужается.
2. Вследствие такого процесса в соседнюю область переходит немалое количество основных носителей заряда. Это означает, что из области р в область n результирующий электрический ток будет протекать дырками, а в обратном направлении – электронами.

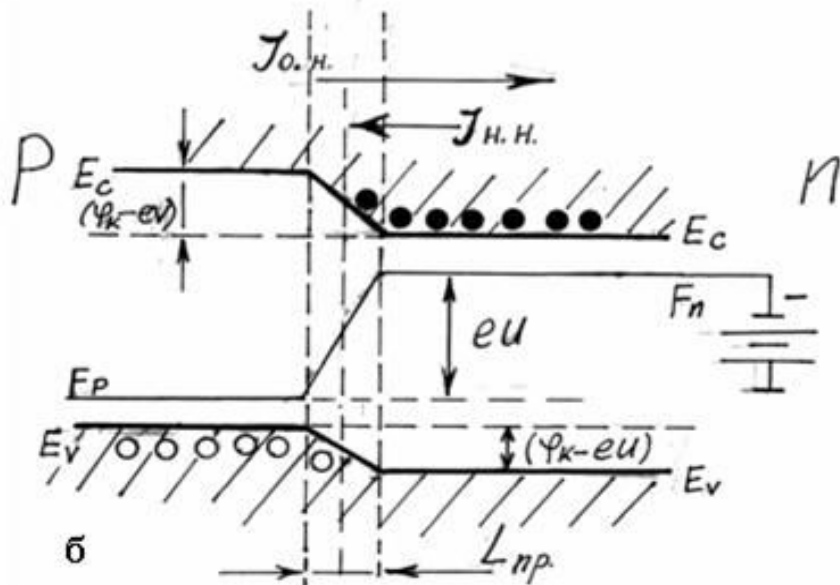


Прямое включение



а

Рис. 8.2.1. Прямое включение *p-n* перехода:
 а – схема подключения источника;
 б – энергетическая диаграмма.



б

1. Такое включение называют *прямым*. Оно приводит к снижению величины потенциального барьера на величину равную eU . Основные носители заряда получают возможность приблизиться к контакту, скомпенсировав заряд примесей. Поэтому ширина p - n перехода уменьшится.

1. Из рис.8.2.1,б видно, что для этого случая уровень Ферми в **n**-области поднимается, а в **p**-области опускается. Часть основных носителей, имеющих наибольшие значения энергии, сможет преодолеть сравнительно узкий и невысокий потенциальный барьер и перейти через границу, разделяющую проводники **n**- и **p** - типа. Это приводит к нарушению равновесия между дрейфовым и диффузионными токами. Диффузионная составляющая тока становится больше дрейфовой, и результирующий прямой ток через переход оказывается отличным от нуля :
2. $I_{\text{пр}} = I_{\text{диф}} - I_{\text{др}} > 0$ (8.2.2)
3. По мере увеличения внешнего прямого напряжения прямой ток через переход может возрасти до весьма больших значений, так как он обусловлен главным образом движением основных носителей, концентрация которых в обеих областях велика.
4. Нетрудно заметить, что преодолевшие потенциальный барьер носители заряда попадают в область полупроводника, для которой они являются не основными.
5. В n-области появившиеся избыточные неосновные носители заряда – дырки Δp создадут в первый момент вблизи p-nперехода положительный объемный заряд. Однако через очень короткое время, определяемое максвелловским временем релаксации, этот заряд будет скомпенсирован объемным зарядом основных носителей заряда – электронов, которые под действием электрического поля , созданного избыточными дырками , будут подтянуты в количестве Δn из глубины n области , а в n область электроны продвигаются к переходу , создавая электронный ток I_n . По мере приближения к переходу этот ток вследствие рекомбинации с дырками падает до нуля. Суммарный ток в n-области $I = I_p + I_n$ во всех точках полупроводника n- типа остается неизменным (рис. 8.2.2).

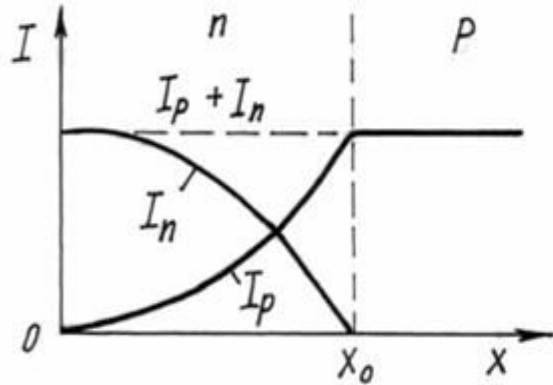


Рис. 8.2.2. Распределение токов, обусловленных инжекцией дырок.

Таким образом, во всех частях электронного полупроводника будет соблюдаться электронейтральность, но в области р-перехода концентрация электронов и дырок будет повышена на $\Delta n = \Delta p$ по сравнению с равновесным состоянием. Введение в полупроводник носителей заряда с помощью р-перехода при подаче на него прямого смещения в область, где эти носители являются неосновными, называют инжекцией. В этом случае, концентрация дырок в n-области вблизи контакта будет равна :

$$p = p_n + \Delta p \quad (8.2.3)$$

1. Свойства электронно-дырочного перехода наглядно иллюстрируются его вольтамперной характеристикой (рис. 8.4.1), показывающей зависимость тока через p-переход от величины и полярности приложенного напряжения.

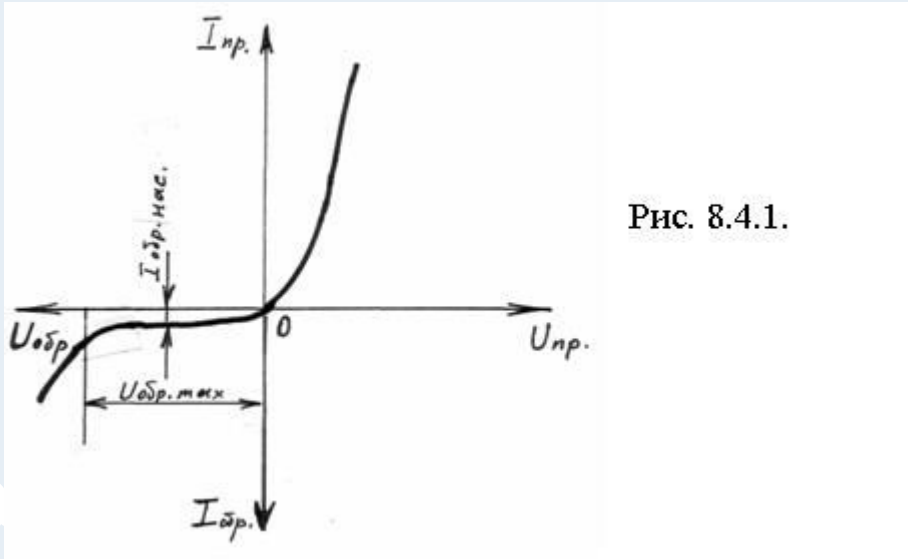


Рис. 8.4.1.

1. Дальнейшее увеличение обратного напряжения приводит к пробую р-пперехода , при котором обратный ток резко увеличивается .
2. Различают два вида пробоя : электрический (обратимый) и тепловой (необратимый).
3. Электрический пробой происходит в результате внутренней электростатической эмиссии (зинеровский пробой) и под действием ударной ионизации атомов полу-проводника (лавинный пробой). Внутренняя электростатическая эмиссия в полупроводниках аналогична электростатической эмиссии электронов из металла.
4. Сущность этого явления заключается в том, что под действием сильного электрического поля электроны могут освободиться из ковалентных связей и получить энергию, достаточную для преодоления высокого потенциального барьера в области р-пперехода. Двигаясь с большей скоростью на участке р-пперехода, электроны сталкиваются с нейтральными атомами и ионизируют их.
5. В результате такой ударной ионизации появляются свободные электроны и дырки, которые, в свою очередь, разгоняются полем и создают всевозрастающее количество носителей тока. Описанный процесс носит лавинообразный характер и приводит к значительному увеличению обратного тока через р-ппереход. Таким образом, чрезмерно увеличить такое напряжение нельзя. Если оно превысит максимально допустимую для данного р-пперехода величину (Уобр тахна рис. 8.4.1), то участок р-пперехода пробьется, и р-ппереход потеряет свойство односторонней проводимости (тепловой пробой).

1. Тепловой пробой р-перехода происходит вследствие вырывания валентных электронов из связей в атомах при тепловых колебаниях кристаллической решетки. Тепловая генерация пар электрон-дырка приводит к увеличению концентрации не-основных носителей заряда и к росту обратного тока. Увеличение тока, в свою очередь, приводит к дальнейшему увеличению температуры. Процесс нарастает лавинообразно.
2. Электрический и тепловой пробой р-перехода во многих случаях происходят одновременно. При чрезмерном разогреве перехода, когда происходит изменение структуры кристалла. Переход необратимо выходит из строя. Если же при возникновении пробоя ток через р-переход ограничен сопротивлением внешней цепи и мощность, выделяющаяся на переходе, не-велика, то пробой обратим. В этом случае можно управлять обратным током путем изменения внешнего напряжения, подводимого к переходу.
3. Анализ вольтамперной характеристики р-перехода позволяет рассматривать его как нелинейный элемент, сопротивление которого изменяется в зависимости от величины и полярности приложенного напряжения (рис. 8.4.1). При увеличении прямого напряжения сопротивление р-перехода уменьшается. С изменением полярности и величины приложенного напряжения сопротивление р-перехода резко возрастает. Следовательно, прямая (линейная) зависимость между напряжением и током (закон Ома) для р-переходов не соблюдается. Нелинейные свойства р-переходов лежат в основе работы полупроводниковых приборов, использующихся для выпрямления переменного тока, преобразования частоты, ограничения амплитуд и т.д.

Температурные и частотные свойства р-п перехода.

1. Свойства р-п перехода существенно зависят от температуры окружающей среды. При повышении температуры возрастает генерация пар носителей заряда – электронов и дырок, т.е. увеличивается концентрация неосновных носителей и собственная проводимость полупроводника.

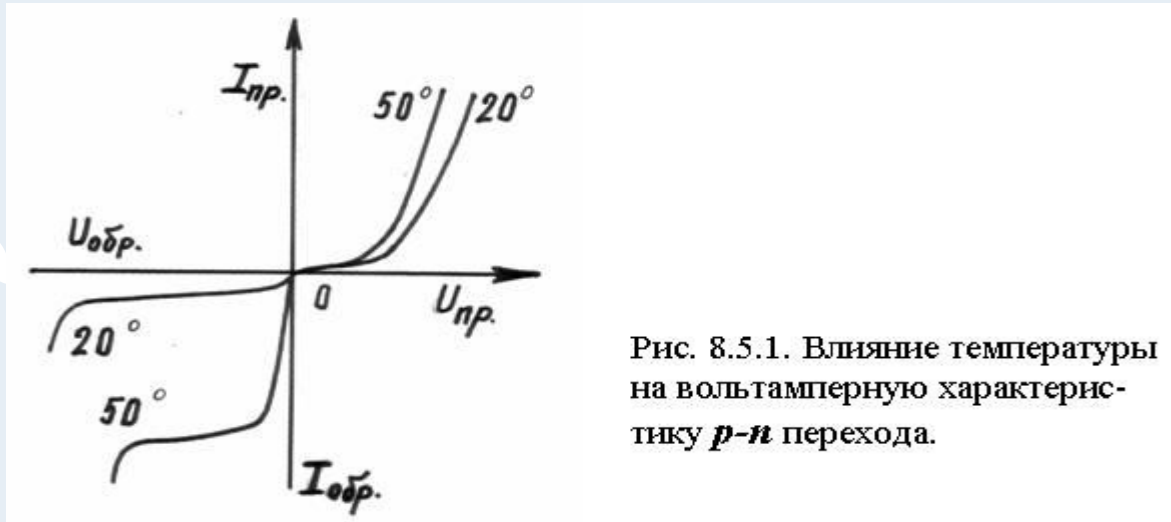


Рис. 8.5.1. Влияние температуры на вольтамперную характеристику *p-n* перехода.

1. Это наглядно показывают вольтамперные характеристики германиевого р-п перехода, снятые при различной температуре (рис. 8.5.1).
2. Как видно из рисунка, при повышении температуры прямой и обратный токи растут, а р-п переход теряет свое основное свойство – одностороннюю проводимость.
3. Зависимость от температуры обратной ветви вольтамперметной характеристики определяется температурными изменениями тока насыщения. Этот ток пропорционален равновесной концентрации неосновных носителей заряда, которая с увеличением температуры возрастает по экспоненциальному закону. По этому же закону с ростом температуры увеличивается и ток насыщения

$$I_0(T) = I_0(T_0) e^{\alpha \Delta T}$$

где $I_0(T)$ и $I_0(T_0)$ – обратные точки насыщения при рассматриваемой (T) и комнатной (T_0) температурах;

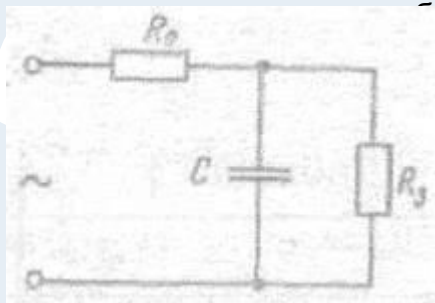
$\Delta T = T - T_0$ – перепад температур;

α – коэффициент, зависящий от свойств полупроводника

(для германия $\alpha \gg 0,05 \dots 0,09 \text{ К}^{-1}$; для кремния $\alpha \gg 0,07 \dots 0,13 \text{ К}^{-1}$).

1. Для германиевых и кремневых р-п переходов обратный ток возрастает примерно в 2-2,5 раза при повышении температуры на каждые 10 оС.
2. Прямой ток р-п перехода при нагреве возрастает не так сильно, как обратный ток. Это объясняется тем, что прямой ток возникает в основном за счет примесной проводимости. Но концентрация примесей от температуры практически не зависит. Температурная зависимость прямой ветви вольтамперной характеристики в соответствии с формулой (8.4.1) определяется изменением тока I_0 и показателя экспоненты.
3. Для германиевых приборов верхний температурный предел 70...90оС. У кремниевых приборов вследствие большей энергии, необходимой для отрыва валентного электрона от ядра атома, этот предел более высок: 120...150оС.

4. Свойства р-п перехода зависят также от частоты приложенного напряжения. Это объясняется тем, что при обратном напряжении, приложенном к р-п переходу, носители зарядов обоих знаков находятся по обе стороны перехода, а в области самого перехода их очень мало. Таким образом, в режиме обратного напряжения р-п переход представляет собой емкость, величина которой пропорциональна площади р-п перехода, концентрации носителей заряда и диэлектрической проницаемости материала полупроводника. Эту емкость, как мы знаем, называют барьерной (C_b).



1. При малом обратном напряжении, приложенном к **p-n** переходу, носители зарядов противоположных знаков находятся на небольшом расстоянии друг от друга. При этом собственная емкость **p-n** перехода велика. При увеличении обратного напряжения электроны все дальше отходят от дырок по обе стороны от **p-n** перехода, и емкость **p-n** перехода уменьшается. Следовательно, **p-n переход можно использовать как емкость, управляемую величиной обратного напряжения¹**.
2. При прямом напряжении **p-n** переход, кроме барьерной емкости, обладает так называемой диффузионной емкостью $C_{диф}$. Эта емкость обусловлена накоплением подвижных носителей заряда в **n**- и **p**-областях. Как было показано выше, при прямом напряжении в результате инжекции основные носители заряда в большом количестве диффундируют через пониженный потенциальный барьер и, не успев рекомбинировать, накапливаются в **n**- и **p**-областях. Каждому значению прямого напряжения $U_{пр}$ соответствует определенная величина заряда $Q_{диф}$, накопленного в области **p-n** перехода. Поэтому

$$C_{диф} = \frac{Q}{U_{пр}}$$

Диффузионная емкость не оказывает существенного влияния на работу **p-n** перехода, так как она всегда зашунтирована малым прямым сопротивлением перехода. Наибольшее практическое значение имеет барьерная емкость. В связи с этим эквивалентная схема **p-n** перехода (схема замещения) для переменного тока имеет вид, показанный на рис. 8.5.2.

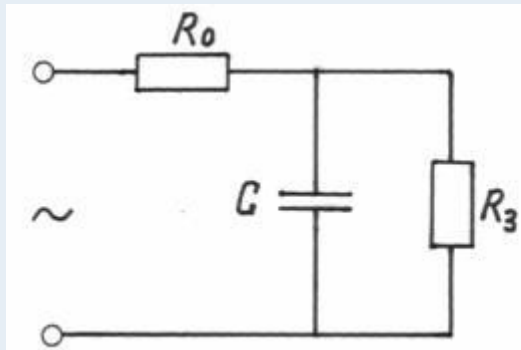
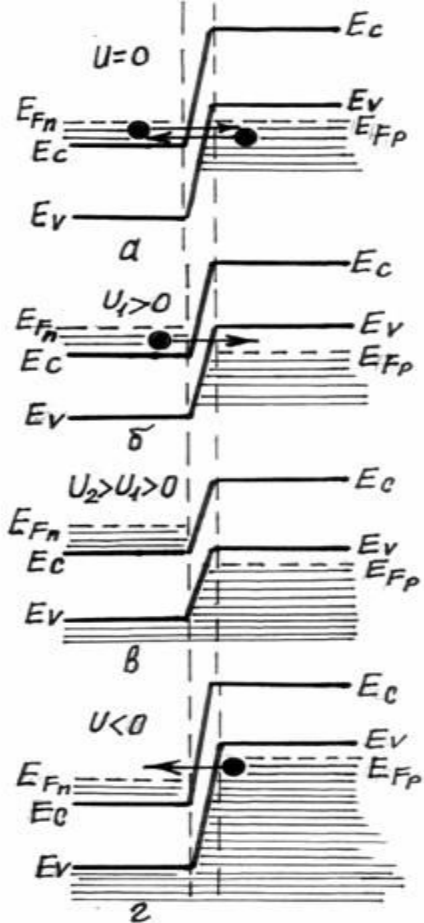


Рис. 8.5.2. Эквивалентная схема *p-n* перехода.

1. На этой схеме R_0 – сопротивление толщи полупроводников *n*- и *p*-типа и выводов от них (около 1 Ом); R_3 – сопротивление перехода, зависящее от величины и полярности приложенного напряжения ; C – сумма барьерной и диффузионной емкостей.
2. При обратном напряжении диффузионная емкость отсутствует и $C=C_b$, а $R_3=R_{обр}$, т.е. имеет очень большую величину. При работе на вы-соких частотах емкостное сопротивление $X_c =$ уменьшается, и обрат-ный ток может пройти через эту емкость, несмотря на большую величину сопротивления $R_3=R_{обр}$. Это нарушает нормальную работу прибора, так как *p-n* переход теряет свойство односторонней проводимости. Поэтому для ра-боты на высоких частотах используются в основном точечные полупровод-никовые приборы, у которых площадь *p-n* перехода незначительна и собст-венная емкость мала.

1. В настоящее время имеются полупроводниковые приборы, успешно работающие в очень широком диапазоне частот – до сотен мегагерц и выше.
2. Это свойство р-п перехода используется в варикапах– полупроводниковых диодах с управляемой величиной емкости.
3. Туннельный эффект.
4. В 1958г. Японский ученый Лео Эсаки открыл явление туннельного эффекта в полупроводниках.
5. Туннельный эффект заключается в том, что электроны проходят через потенциальный барьер р-п перехода, не изменяя своей энергии.
6. Для получения туннельного эффекта используется полупроводниковый материал (германий, арсенид галлия) с очень большой концентрацией примесей (до 10^{21} примесных атомов в 1 см^3), в то время как обычно концентрация примесей в полупроводниках не превышает 10^{15} см^{-3} .
7. Полупроводники с таким высоким содержанием примесей называются вырожденными, а их свойства очень близки к свойствам металлов.

1. Вследствие высокого содержания примесей в обеих областях полупроводникового кристалла ширина р-п перехода оказывается очень малой (не более 0,01 мкм), что приводит к значительному повышению напряженности электрического поля на переходе (порядка 10^8 В/м). В этих условиях имеется конечная вероятность того, что электрон, движущийся в сторону очень узкого барьера, пройдет сквозь него (как через “туннель”) и займет свободное состояние с такой же энергией по другую сторону от барьерного слоя. Чтобы подчеркнуть специфичность прохождения электронов через р-п переход, описанное явление было названо туннельным эффектом.
2. Известно, что увеличение концентрации донорных примесей смещает уровень Ферми вверх, а увеличение концентрации акцепторных примесей – вниз относительно середины запрещенной зоны.
3. При концентрации примесей порядка 10^{21} см⁻³ уровень Ферми полупроводника n-типа внутри зоны проводимости, а уровень Ферми полупроводника р-типа – внутри валентной зоны.
4. Из рис. 8.6.1,а видно, что при отсутствии внешнего напряжения уровни Ферми E_{Fn} и E_{Fp} совпадают, так как величина энергии на уровне Ферми должна быть одинаковой по всей структуре.
5. Внутрив-п перехода границы энергетических зон полупроводников р- и n-типов искривляются. Вследствие того, что уровни Ферми в вырожденных полупроводниках расположены за пределами запрещенной зоны, при осуществлении контакта образуется зона перекрытия, расположенная между границей валентной зоны E_v полупроводника р-типа и границей зоны проводимости E_c полупроводника типа n-типа. В этой зоне разрешенные уровни электронного полупроводника расположены против разрешенных уровней дырочного полупроводника. Для простоты рассуждений будем считать, что все разрешенные уровни, расположенные ниже уровня Ферми, заняты



1. В очень узком р-п переходе при высокой напряженности поля возникают условия для беспрепятственного туннельного прохождения электронов из одного слоя в другой сквозь потенциальный барьер. Однако для этого необходимо: чтобы против занятого электроном уровня по одну сторону барьера имелся свободный уровень за барьером. При отсутствии внешнего напряжения ($U=0$ на рис. 8.6.1,а) такой возможности фактически нет, так как занятым уровням в зоне проводимости полупроводника n-типа противостоят занятые уровни в валентной зоне полупроводника р-типа .
2. В действительности столь резкой границы между областями с занятыми и свободными уровнями нет. Поэтому при комнатной температуре некоторая часть этих уровней освобождается за счет электронов, перешедших на уровни, расположенные выше уровня Ферми. Тем не менее, при отсутствии внешнего напряжения ток, проходит через р-п переход, практически отсутствует. Это объясняется тем, что встречные потоки тех немногочисленных электронов, которые все же совершают туннельные переходы, взаимно компенсируются и результирующий туннельный ток оказывается равным нулю ($I_{T.} = I_{T.пр.} - I_{T.обр.} = 0$).

Рис. 8.6.1. Энергетические диаграммы **p-n** перехода при туннельном эффekte.

1. Если к р-п переходу приложить небольшое прямое напряжение, то высота потенциального барьера и перекрытие зон уменьшатся (рис. 8.6.1,б). Энергетическая диаграмма полупроводника n –типа поднимется вверх, а полупроводника р-типа опустится вниз. При этом уровни некоторых электронов проводимости n –области расположатся против свободных уровней валентной зоны р-области. Тем самым создаются благоприятные условия для туннельного перехода электронов из электронного полупроводника в дырочный. Поэтому через р-п переход потечет туннельный ток, величина которого будет зависеть от величины приложенного прямого напряжения. Следует отметить, что при прямом напряжении через р-п переход, кроме туннельного тока, проходит и диффузионный ток $I_{\text{диф}}$, создаваемый перемещением электронов и дырок проводимости. Следовательно, полный ток р-п перехода при туннельном эффекте составляет

2. $I = I_{\text{т.пр.}} - I_{\text{т.обр.}} + I_{\text{диф}}$ (8.6.1)

3. Отметим также, что диффузионный ток в случае использования вырожденных полупроводников оказывается на несколько порядков меньше тока в обычном р-ппереходе. Это объясняется весьма малой концентрацией неосновных носителей из-за увеличения концентрации примесей. На рис. 8.6.2 показана вольтамперная характеристика р-п перехода с туннельным эффектом. Основная ее особенность состоит в том, что при подаче прямого напряжения, превышающего некоторое напряжение U_1 , прямой туннельный ток начинает резко убывать.

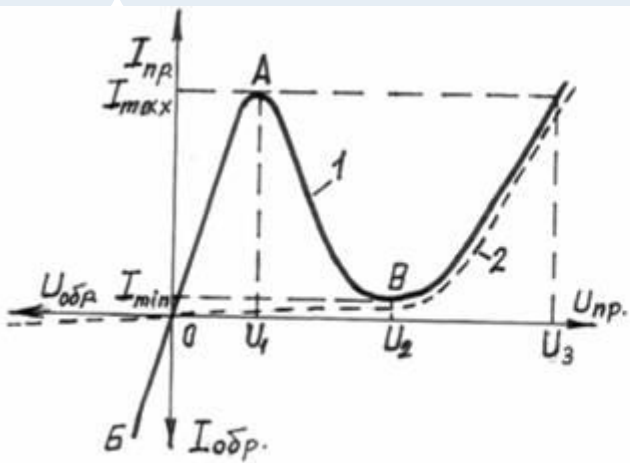


Рис. 8.6.2. Вольтамперная характеристика **p-n** перехода с туннельным эффектом.

1. Наличие падающего участка характеристики (AB на рис. 8.6.2) можно объяснить следующим образом. Увеличение прямого напряжения, с одной стороны, приводит к увеличению туннельного тока, а с другой - уменьшает напряженность электрического поля в p-n переходе. Поэтому при некотором значении прямого напряжения U_2 (рис. 8.6.1,в), когда напряженность электрического поля в p-n переходе резко снижается, туннельный ток прекращается, а p-n переход приобретает обычные свойства, связанные с прохождением через него диффузионного тока (на рис. 8.6.2 кривая 1 в интервале после U_2 , соответствующая полному току p-n перехода, совпадает с кривой 2 диффузионного тока, показанной пунктиром).

1. При подаче на р-п переход обратного напряжения (рис. 8.6.1, г) энергетическая диаграмма полупроводника n-типа опускается в низ, а полупроводника р-типа поднимается вверх. Ширина зоны перекрытия увеличивается, что приводит к росту обратного туннельного тока, поскольку возникают условия для свободного туннельного перехода валентных электронов р-области в зону проводимости n-области. Величина обратного тока зависит от величины обратного напряжения, с увеличением которого энергетические зоны n- и р-областей смещаются сильнее.
2. Односторонняя проводимость р-п перехода при туннельном эффекте полностью отсутствует (рис. 8.6.2).
3. С ростом напряжения в интервале от U_1 до U_2 ток падает. Следовательно, на этом участке р-п переход оказывает переменному току некоторое отрицательное сопротивление

$$-R = \frac{+\Delta U}{-\Delta I}$$

Уменьшение тока с ростом напряжения эквивалентно сдвигу фазы между указанными величинами на 180° . Поэтому мощность переменного сигнала, равная произведению тока на напряжение, будет иметь отрицательный знак. Это показывает, что отрицательное сопротивление не потребляет мощности переменного сигнала, а отдает его во внешнюю цепь.

1. В электронике понятие “**отрицательное сопротивление**” известно давно. Так, вольтамперные характеристики с падающим участком наблюдаются при динатронном эффекте в многоэлектродных лампах. С помощью отрицательного сопротивления можно скомпенсировать потери, вносимые в схему положительным сопротивлением, и, таким образом, в зависимости от поставленной задачи осуществить усиление, генерирование или преобразование электрических сигналов.
2. На этом явлении основано действие туннельных диодов, пригодных для усиления и генерирования СВЧ колебаний и для построения сверхбыстр-родействующих импульсных устройств.

Вопросы для повторения:

1. Запишите выражение для дрейфовых и диффузионных токов в p - n -переходе в условиях термодинамического равновесия.
2. Нарисуйте зонную диаграмму p - n -перехода в условиях термодинамического равновесия.
3. Расскажите о свойствах p - n -перехода при прямом включении. Нарисуйте зонную диаграмму.
4. Расскажите о свойствах p - n -перехода при обратном включении. Нарисуйте зонную диаграмму.
5. Запишите аналитическое выражение для вольтамперной характеристики и нарисуйте типичную вольтамперную характеристику p - n -перехода.
6. Расскажите о причинах возникновения и механизме пробоя p - n -перехода. Какие типы пробоя вы знаете?
7. Как влияет температура на свойства p - n -перехода?

1. 9. Что такое туннельный эффект? Как он возникает? Проиллюстрируйте свой рассказ зонными диаграммами.
2. 10. Что называется барьерной емкостью р-перехода? Объясните механизм ее возникновения. Как ее можно использовать?
3. 11. Нарисуйте вольтамперную характеристику р-перехода с туннельным эффектом.
4. 12. Что понимают в электронике под отрицательным сопротивлением?