

Лекция 2

1.7 Электрические переходы

Электрическим переходом в полупроводнике называется граничный слой между двумя областями, физические характеристики которых имеют существенные физические различия.

—

—

—

—

$\sqrt{\quad}$

$\sqrt{\quad}$

Различают следующие виды электрических переходов:

- *электронно-дырочный*, или *p-n-переход* – переход между двумя областями полупроводника, имеющими разный тип электропроводности;
- переходы между двумя областями, если одна из них является металлом, а другая полупроводником *p*- или *n*-типа (*переход металл – полупроводник*);
- переходы между двумя областями с одним типом электропроводности, отличающиеся значением концентрации примесей;
- переходы между двумя полупроводниковыми материалами с различной шириной запрещенной зоны (*гетеропереходы*).

1.7.1 Электронно-дырочный переход

Работа целого ряда полупроводниковых приборов (диодов, транзисторов, тиристоров и др.) основана на явлениях, возникающих в контакте между полупроводниками с разными типами проводимости.

Граница между двумя областями монокристалла полупроводника, одна из которых имеет электропроводность типа *p*, а другая – типа *n* называется электронно-дырочным переходом. Концентрации основных носителей заряда в областях *p* и *n* могут быть равными или существенно отличаться.

p-n-переход, у которого концентрации дырок и электронов практически равны $N_p \approx N_n$, называют симметричным. Если концентрации основных носителей заряда различны ($N_n \gg N_p$ или $N_p \gg N_n$) и отличаются в 100...1000 раз, то такие переходы называют *несимметричными*.

Несимметричные *p-n*-переходы используются шире, чем симметричные, поэтому в дальнейшем будем рассматривать только их.

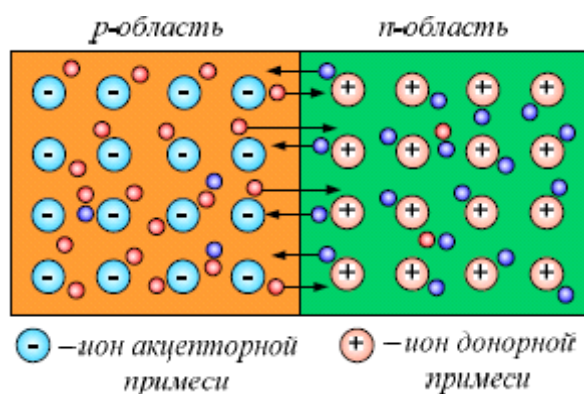


Рисунок 1.12 – Начальный момент образования p-n-перехода

Рассмотрим монокристалл полупроводника (рисунок 1.12), в котором, с одной стороны, введена акцепторная примесь, обусловившая возникновение здесь электропроводности типа *p*, а с другой стороны, введена донорная примесь, благодаря которой там возникла электропроводность типа *n*. Каждому

подвижному положительному носителю заряда в области p (дырке) соответствует отрицательно заряженный ион акцепторной примеси, но неподвижный, находящийся в узле кристаллической решетки, а в области n каждому свободному электрону соответствует положительно заряженный ион донорной примеси, в результате чего весь монокристалл остается электрически нейтральным.

Свободные носители электрических зарядов под действием градиента концентрации начинают перемещаться из мест с большой концентрацией в места с меньшей концентрацией. Так, дырки будут диффундировать из области p в область n , а электроны, наоборот, из области n в область p . Это направленное навстречу друг другу перемещение электрических зарядов образует диффузионный ток p - n -перехода. Но как только дырка из области p перейдет в область n , она оказывается в окружении электронов, являющихся основными носителями электрических зарядов в области n . Поэтому велика вероятность того, что какой-либо электрон заполнит свободный уровень и произойдет явление рекомбинации, в результате которой не будет ни дырки, ни электрона, а останется электрически нейтральный атом полупроводника. Но если раньше положительный электрический заряд каждой дырки компенсировался отрицательным зарядом иона акцепторной примеси в области p , а заряд электрона – положительным зарядом иона донорной примеси в области n , то после рекомбинации дырки и электрона электрические заряды неподвижных ионов примесей, породивших эту дырку и электрон, остались не скомпенсированными. И, в первую очередь, не скомпенсированные заряды ионов примесей проявляют себя вблизи границы раздела (рисунок 1.13), где образуется слой пространственных зарядов, разделенных узким промежутком δ . Между этими зарядами возникает электрическое поле с напряжённостью E , которое называют полем потенциального барьера, а разность потенциалов на границе раздела двух зон, обуславливающих это поле, называют контактной разностью потенциалов $\Delta\varphi_k$.

Это электрическое поле начинает действовать на подвижные носители электрических зарядов. Так, дырки в области p – основные носители, попадая в зону действия этого поля, испытывают со стороны него тормозящее, отталкивающее действие и, перемещаясь вдоль силовых линий этого поля, будут вытолкнуты вглубь области p . Аналогично, электроны из области n , попадая в зону действия поля потенциального барьера, будут вытолкнуты им вглубь области n . Таким образом, в узкой области δ , где действует поле потенциального барьера, образуется слой, где практически отсутствуют свободные носители электрических зарядов и вследствие этого обладающий высоким сопротивлением. Это так называемый запирающий слой.

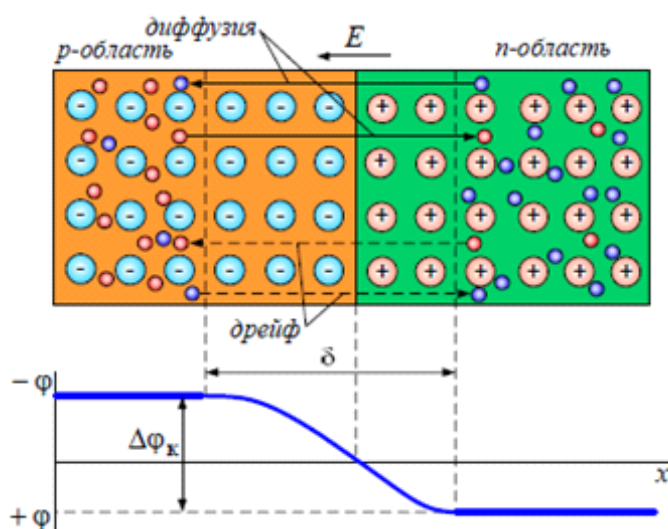


Рисунок 1.13 – p - n -переход при отсутствии внешнего напряжения

Если же в области p вблизи границы раздела каким-либо образом окажется свободный электрон, являющийся неосновным носителем для этой области, то он со стороны электрического поля потенциального барьера будет испытывать ускоряющее воздействие, вследствие чего этот электрон будет переброшен через границу раздела в область n , где он будет являться основным носителем. Аналогично, если в области n появится неосновной носитель – дырка, то под действием поля потенциального барьера она будет переброшена в область p , где она будет уже основным носителем. Движение неосновных носителей через p - n -переход под действием электрического поля потенциального барьера обуславливает составляющую дрейфового тока.

При отсутствии внешнего электрического поля устанавливается динамическое равновесие между потоками основных и неосновных носителей электрических зарядов, т. е. между диффузионной и дрейфовой составляющими тока p - n -перехода, потому что эти составляющие направлены навстречу друг другу.

Потенциальная диаграмма p - n -перехода изображена на рисунке 1.13, причем за нулевой потенциал принят потенциал на границе раздела областей. Контактная разность потенциалов образует на границе раздела потенциальный барьер с высотой $\Delta\varphi_k$. На диаграмме изображен потенциальный барьер для электронов, стремящихся за счет диффузии перемещаться справа налево (из области n в область p). Если отложить вверх положительный потенциал, то можно получить изображение потенциального барьера для дырок, диффундирующих слева направо (из области p в область n).

При отсутствии внешнего электрического поля и при условии динамического равновесия в кристалле полупроводника устанавливается единый уровень Ферми для обеих областей проводимости.

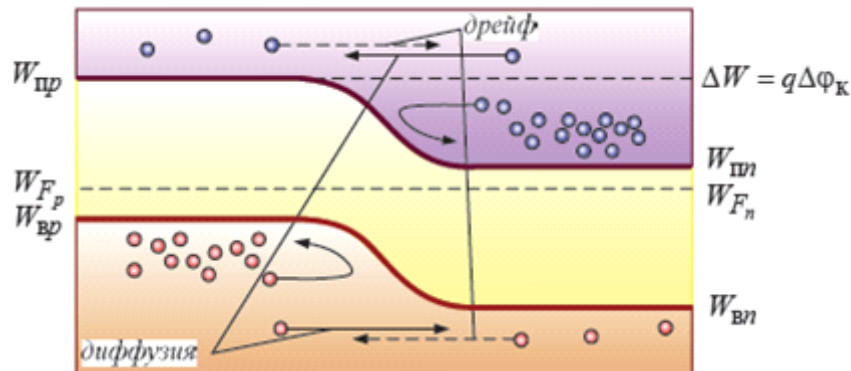


Рисунок 1.14 – Зонная диаграмма р-п-перехода, иллюстрирующая баланс токов в равновесном состоянии

Однако поскольку в полупроводниках *p*-типа уровень Ферми смещается к потолку валентной зоны $W_{вp}$, а в полупроводниках *n*-типа – ко дну зоны проводимости $W_{пн}$, то на ширине *p-n*-перехода δ диаграмма энергетических зон (рисунок 1.14) искривляется и образуется потенциальный барьер:

$$\Delta\varphi_k = \frac{\Delta W}{q}, \quad (1.13)$$

где ΔW – энергетический барьер, который необходимо преодолеть электрону в области *n*, чтобы он мог перейти в область *p*, или аналогично для дырки в области *p*, чтобы она могла перейти в область *n*.

Высота потенциального барьера зависит от концентрации примесей, так как при ее изменении изменяется уровень Ферми, смещаясь от середины запрещенной зоны к верхней или нижней ее границе.

1.7.2 Вентильное свойство *p-n*-перехода

p-n-переход, обладает свойством изменять свое электрическое сопротивление в зависимости от направления, протекающего через него тока. Это свойство называется *вентильным*, а прибор, обладающий таким свойством, называется *электрическим вентилем*.

Рассмотрим *p-n*-переход, к которому подключен внешний источник напряжения $U_{вн}$ с полярностью, указанной на рисунке 1.15, «+» к области *p*-типа, «-» – к области *n*-типа. Такое подключение называют *прямым включе-*

нием p - n -перехода (или *прямым смещением p - n -перехода*). Тогда напряженность электрического поля внешнего источника $E_{вн}$ будет направлена навстречу напряженности поля потенциального барьера E и, следовательно, приведет к снижению результирующей напряженности $E_{рез}$:

$$E_{рез} = E - E_{вн}. \quad (1.14)$$

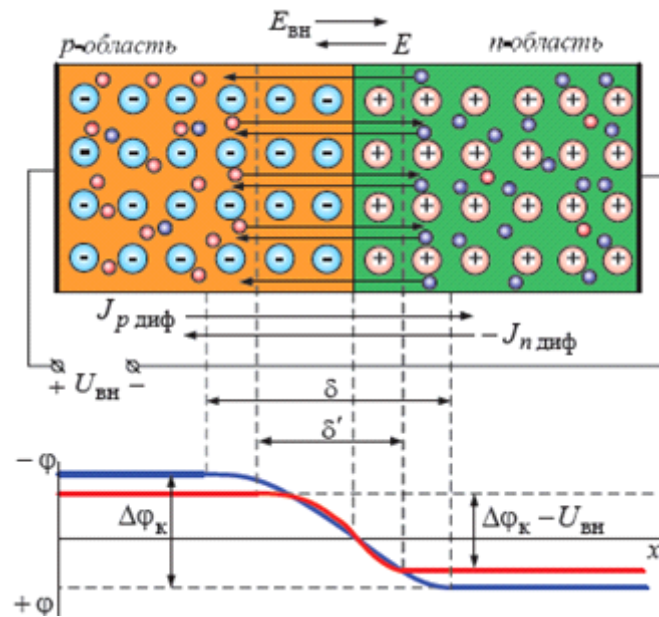


Рисунок 1.15 – Прямое смещение p - n -перехода

Это приведет, в свою очередь, к снижению высоты потенциального барьера и увеличению количества основных носителей, диффундирующих через границу раздела в соседнюю область, которые образуют так называемый прямой ток p - n -перехода. При этом вследствие уменьшения тормозящего, отталкивающего действия поля потенциального барьера на основные носители, ширина запирающего слоя δ уменьшается ($\delta' < \delta$) и, соответственно, уменьшается его сопротивление.

По мере увеличения внешнего напряжения прямой ток p - n -перехода возрастает. Основные носители после перехода границы раздела становятся неосновными в противоположной области полупроводника и, углубившись в нее, рекомбинируют с основными носителями этой области. Но, пока подключен внешний источник, ток через переход поддерживается непрерывным поступлением электронов из внешней цепи в n -область и уходом их из p -области во внешнюю цепь, благодаря чему восстанавливается концентрация дырок в p -области.

Введение носителей заряда через p - n -переход при понижении высоты потенциального барьера в область полупроводника, где эти носители являются неосновными, называют *инжекцией носителей заряда*.

При протекании прямого тока из дырочной области p в электронную область n инжектируются дырки, а из электронной области в дырочную – электроны.

На рисунке 1.16 изображена зонная энергетическая диаграмма, соответствующая прямому смещению p - n -перехода.

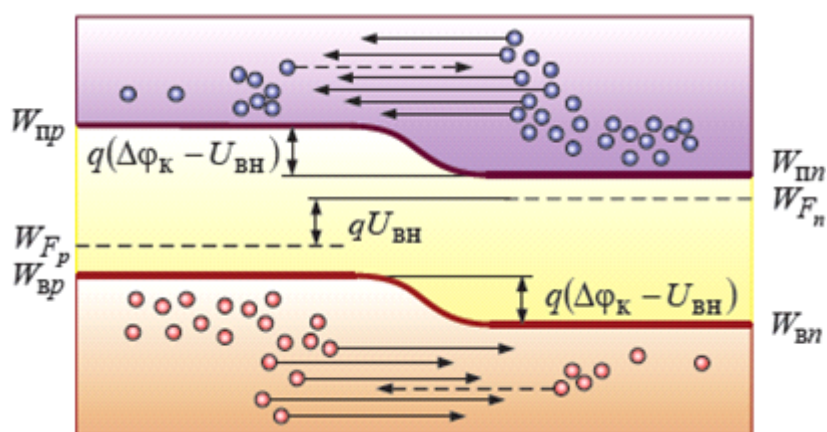


Рисунок 1.16 – Зонная диаграмма прямого смещения p - n -перехода, иллюстрирующая дисбаланс токов

Инжектирующий слой с относительно малым удельным сопротивлением называют *эмиттером*; слой, в который происходит инжекция неосновных для него носителей заряда, – *базой*.

Если к p - n -переходу подключить внешний источник с противоположной полярностью «–» к области p -типа, «+» к области n -типа (рисунок 1.17), то такое подключение называют *обратным включением p - n -перехода* (или *обратным смещением p - n -перехода*).

В данном случае напряженность электрического поля этого источника $E_{\text{вн}}$ будет направлена в ту же сторону, что и напряженность электрического поля E потенциального барьера; высота потенциального барьера возрастает, а ток диффузии основных носителей практически становится равным нулю. Из-за усиления тормозящего, отталкивающего действия суммарного электрического поля на основные носители заряда ширина запирающего слоя δ увеличивается ($\delta'' > \delta$), а его сопротивление резко возрастает.

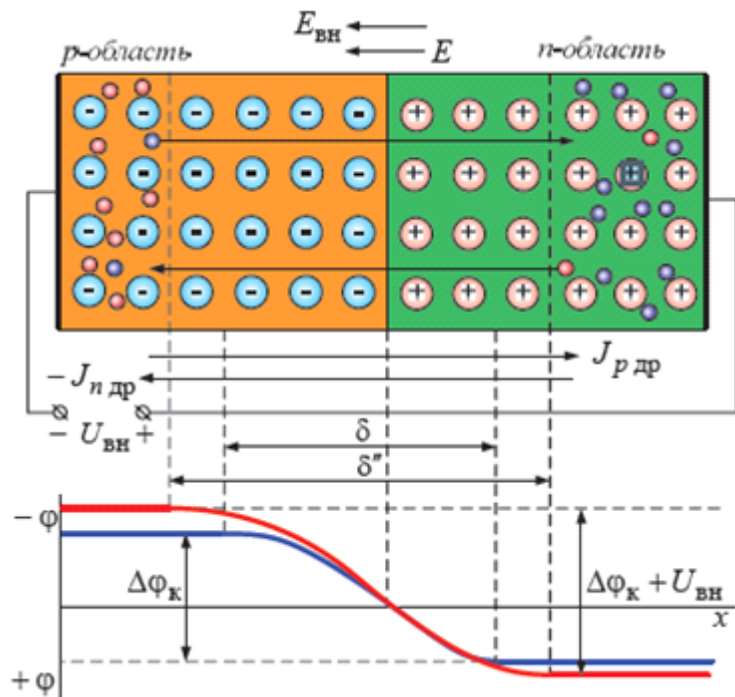


Рисунок 1.17 – Обратное смещение p-n-перехода

Теперь через *p-n*-переход будет протекать очень маленький ток, обусловленный перебросом суммарным электрическим полем на границе раздела, основных носителей, возникающих под действием различных ионизирующих факторов, в основном теплового характера. Процесс переброса неосновных носителей заряда называется *экстракцией*. Этот ток имеет дрейфовую природу и называется *обратным током p-n-перехода*.

На рисунке 1.18 изображена зонная энергетическая диаграмма, соответствующая обратному смещению *p-n*-перехода.

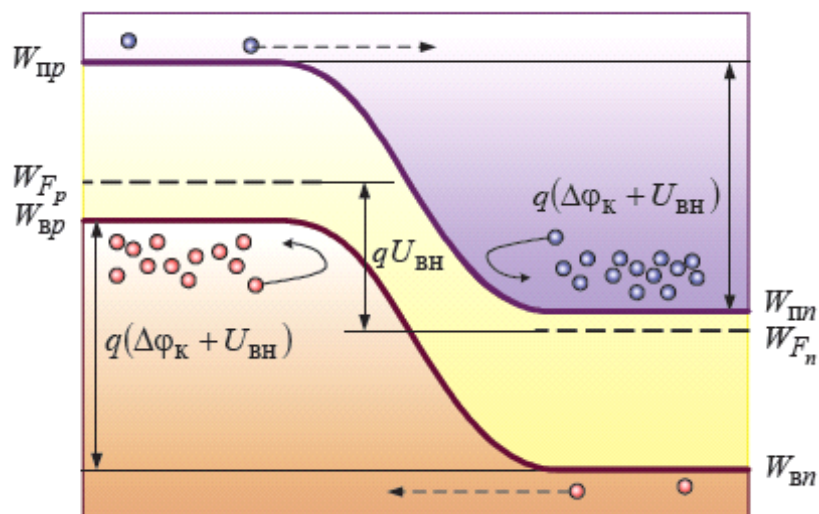


Рисунок 1.18 – Зонная диаграмма обратного смещения p-n-перехода, иллюстрирующая дисбаланс токов

Выводы:

1. p - n -переход образуется на границе p - и n -областей, созданных в монокристалле полупроводника.
2. В результате диффузии в p - n -переходе возникает электрическое поле – потенциальный барьер, препятствующий выравниванию концентраций основных носителей заряда в соседних областях.
3. При отсутствии внешнего напряжения U_{en} в p - n -переходе устанавливается динамическое равновесие: диффузионный ток становится равным по величине дрейфовому току, образованному неосновными носителями заряда, в результате чего ток через p - n -переход становится равным нулю.
4. При прямом смещении p - n -перехода потенциальный барьер понижается и через переход протекает относительно большой диффузионный ток.
5. При обратном смещении p - n -перехода потенциальный барьер повышается, диффузионный ток уменьшается до нуля и через переход протекает малый по величине дрейфовый ток. Это говорит о том, что p - n -переход обладает односторонней проводимостью. Данное свойство широко используется для выпрямления переменных токов.
6. Ширина p - n -перехода зависит: от концентраций примеси в p - и n -областях, от знака и величины приложенного внешнего напряжения U_{en} . При увеличении концентрации примесей ширина p - n -перехода уменьшается и наоборот. С увеличением прямого напряжения ширина p - n -перехода уменьшается. При увеличении обратного напряжения ширина p - n -перехода увеличивается.

1.7.3 Вольтамперная характеристика p - n -перехода

Вольтамперная характеристика p - n -перехода – это зависимость тока через p - n -переход от величины приложенного к нему напряжения. Ее рассчитывают исходя из предположения, что электрическое поле вне обедненного слоя отсутствует, т. е. все напряжение приложено к p - n -переходу. Общий ток через p - n -переход определяется суммой четырех слагаемых:

$$I_{p-n} = I_{n \text{ диф}} + I_{p \text{ диф}} - I_{n \text{ др}} - I_{p \text{ др}}, \quad (1.15)$$

где $I_{n \text{ др}} = q \cdot n_{p0} \cdot v_n$ – электронный ток дрейфа;

$I_{p \text{ др}} = q \cdot n_{n0} \cdot v_p$ – дырочный ток дрейфа;

$I_{n \text{ диф}} = q \cdot n_p \cdot v_{n \text{ диф}} = q \cdot v_{n \text{ диф}} \cdot n_{p0} \cdot e^{\frac{q \cdot U_{en}}{k \cdot T}}$ – электронный ток диффузии;

$I_{p \rightarrow n} = q \cdot p_n \cdot v_{p \rightarrow n} = q \cdot v_{p \rightarrow n} \cdot p_{n0} \cdot e^{\frac{q \cdot U_{BH}}{k \cdot T}}$ – дырочный ток диффузии;

$n_p = n_{p0} \cdot e^{\frac{q \cdot U_{BH}}{k \cdot T}}$ – концентрация электронов, инжектированных в p -область;

$p_n = p_{n0} \cdot e^{\frac{q \cdot U_{BH}}{k \cdot T}}$ – концентрация дырок, инжектированных в n -область.

При этом концентрации неосновных носителей n_{p0} и p_{n0} зависят от концентрации примесей N_p и N_n следующим образом:

$$n_{p0} = \frac{n_i^2}{n_p}; \quad p_{n0} = \frac{p_i^2}{n_n},$$

где n_i, p_i – собственные концентрации носителей зарядов (без примеси) электронов и дырок соответственно.

Скорость диффузии носителей заряда $v_{n,p \rightarrow n}$ можно допустить близкой к их скорости дрейфа $v_{n,p \rightarrow p}$ в слабом электрическом поле при небольших отклонениях от условий равновесия. В этом случае для условий равновесия выполняются следующие равенства:

$$v_{n \rightarrow n} = v_{n \rightarrow p} = v_n, \quad v_{p \rightarrow n} = v_{p \rightarrow p} = v_p. \quad (1.16)$$

Тогда выражение (1.15) можно записать в виде:

$$\begin{aligned} I_{p \rightarrow n} &= q \cdot v_p \cdot \left(p_{n0} \cdot e^{\frac{q \cdot U_{BH}}{k \cdot T}} - p_{n0} \right) + q \cdot v_n \cdot \left(n_{p0} \cdot e^{\frac{q \cdot U_{BH}}{k \cdot T}} - n_{p0} \right) = \\ &= q \cdot v_p \cdot p_{n0} \cdot \left(e^{\frac{q \cdot U_{BH}}{k \cdot T}} - 1 \right) + q \cdot v_n \cdot n_{p0} \cdot \left(e^{\frac{q \cdot U_{BH}}{k \cdot T}} - 1 \right) = \\ &= q \cdot (v_p \cdot p_{n0} + v_n \cdot n_{p0}) \cdot \left(e^{\frac{q \cdot U_{BH}}{k \cdot T}} - 1 \right) = I_0 \cdot \left(e^{\frac{q \cdot U_{BH}}{k \cdot T}} - 1 \right). \end{aligned} \quad (1.16)$$

Обратный ток I_0 можно выразить следующим образом:

$$I_0 = q \cdot (v_p \cdot p_{n0} + v_n \cdot n_{p0}) = \frac{q \cdot D_p \cdot p_{n0}}{L_p} + \frac{q \cdot D_n \cdot n_{p0}}{L_n}$$

где D_p, D_n – коэффициент диффузии дырок или электронов;

L_p, L_n – диффузионная длина дырок или электронов.

Так как параметры D_p , D_n , p_{n0} , n_{p0} , $L_n = \sqrt{D_n \cdot \tau_n}$, и $L_p = \sqrt{D_p \cdot \tau_p}$ зависят от температуры, то обратный ток I_0 чаще называют *тепловым током*.

При прямом напряжении внешнего источника ($U_{вн} > 0$) экспоненциальный член $e^{\frac{q \cdot U_{вн}}{k \cdot T}}$ в выражении (1.16) быстро возрастает, что приводит к быстрому росту прямого тока, который, как уже было отмечено, в основном определяется диффузионной составляющей.

При обратном напряжении внешнего источника ($U_{вн} < 0$) экспоненциальный член много меньше единицы и ток p - n -перехода практически равен обратному току I_0 , определяемому, в основном, дрейфовой составляющей. Вид этой зависимости представлен на рисунке 1.19. Первый квадрант соответствует участку прямой ветви вольт-амперной характеристики, а третий квадрант – обратной ветви. При увеличении прямого напряжения ток p - n -перехода в прямом направлении вначале возрастает относительно медленно, а затем начинается участок быстрого нарастания прямого тока, что приводит к дополнительному нагреванию полупроводниковой структуры. Если количество выделяемого при этом тепла будет превышать количество тепла, отводимого от полупроводникового кристалла либо естественным путем, либо с помощью специальных устройств охлаждения, то могут произойти в полупроводниковой структуре необратимые изменения вплоть до разрушения кристаллической решетки. Поэтому прямой ток p - n -перехода необходимо ограничивать на безопасном уровне, исключая перегрев полупроводниковой структуры. Для этого необходимо использовать ограничительное сопротивление последовательно подключенное с p - n -переходом.

При увеличении обратного напряжения, приложенного к p - n -переходу, обратный ток изменяется незначительно, так как дрейфовая составляющая тока, являющаяся преобладающей при обратном включении, зависит в основном от температуры кристалла, а увеличение обратного напряжения приводит лишь к увеличению скорости дрейфа неосновных носителей без изменения их количества. Такое положение будет сохраняться до величины обратного напряжения, при котором начинается интенсивный рост обратного тока – так называемый *пробой p - n -перехода*.

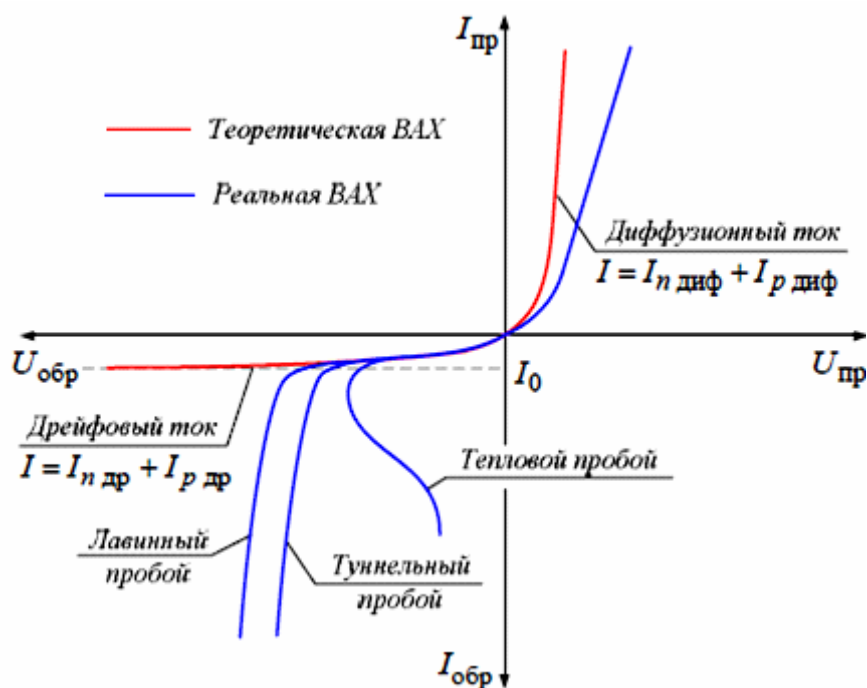


Рисунок 1.19 – Вольт-амперная характеристика p - n -перехода

1.7.4 Виды пробоев p - n -перехода

Возможны обратимые и необратимые пробой. Обратимый пробой – это пробой, после которого p - n -переход сохраняет работоспособность. Необратимый пробой ведет к разрушению структуры полупроводника.

Существуют четыре типа пробоя: лавинный, туннельный, тепловой и поверхностный. Лавинный и туннельный пробой объединяются под названием – *электрический пробой*, который является обратимым. К необратимым относят тепловой и поверхностный.

Лавинный пробой свойственен полупроводникам, со значительной толщиной p - n -перехода, образованным слаболегированными полупроводниками. При этом ширина обедненного слоя гораздо больше диффузионной длины носителей. Пробой происходит под действием сильного электрического поля с напряженностью $E \approx (8...12) \cdot 10^4, \frac{В}{см}$. В лавинном пробое основная роль принадлежит неосновным носителям, образующимся под действием тепла в p - n -переходе.

Эти носители испытывают со стороны электрического поля p - n -перехода ускоряющее действие и начинают ускоренно двигаться вдоль силовых линий этого поля. При определенной величине напряженности неосновные носители заряда на длине свободного пробега l (рисунок 1.20) могут разогнаться до такой скорости, что их кинетической энергии может оказаться достаточно, чтобы при очередном соударении с атомом полупроводника ионизировать его, т. е.

«выбить» один из его валентных электронов и перебросить его в зону проводимости, образовав при этом пару «электрон – дырка». Образовавшиеся носители тоже начнут разгоняться в электрическом поле, сталкиваться с другими нейтральными атомами, и процесс, таким образом, будет лавинообразно нарастать. При этом происходит резкий рост обратного тока при практически неизменном обратном напряжении.

Параметром, характеризующим лавинный пробой, является коэффициент лавинного умножения M , определяемый как количество актов лавинного умножения в области сильного электрического поля. Величина обратного тока после лавинного умножения будет равна:

$$I = M \cdot I_0,$$

$$M = \frac{I}{I_0} = \frac{1}{\left(1 - \frac{U}{U_{\Pi}}\right)^n}, \quad (1.17)$$

где I_0 – начальный ток;

U – приложенное напряжение;

U_{Π} – напряжение лавинного пробоя;

n – коэффициент, равный 3 для Ge, 5 для Si.

Туннельный пробой происходит в очень тонких p - n -переходах, что возможно при очень высокой концентрации примесей $N \approx 10^{19} \text{ см}^{-3}$, когда ширина перехода становится малой (порядка 0,01 мкм) и при небольших значениях обратного напряжения (несколько вольт), когда возникает большой градиент электрического поля. Высокое значение напряженности электрического поля, действуя на атомы кристаллической решетки, повышает энергию валентных электронов и приводит к их туннельному «просачиванию» сквозь «тонкий» энергетический барьер (рисунок 1.21) из валентной зоны p -области в зону проводимости n -области. Причем «просачивание» происходит без изменения энергии носителей заряда. Для туннельного пробоя также характерен резкий рост обратного тока при практически неизменном обратном напряжении.

Если обратный ток при обоих видах электрического пробоя не превысит максимально допустимого значения, при котором произойдет перегрев и разрушение кристаллической структуры полупроводника, то они являются обратимыми и могут быть воспроизведены многократно.

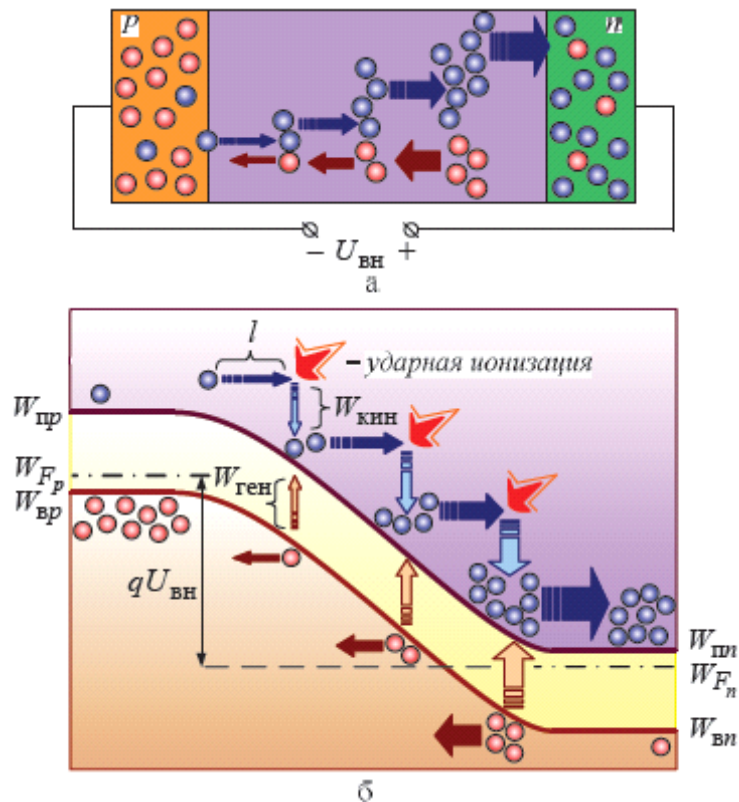


Рисунок 1.20 – Схема, иллюстрирующая лавинный пробой в p - n -переходе:
а – распределение токов;
б – зонная диаграмма, иллюстрирующая лавинное умножение при обратном смещении перехода

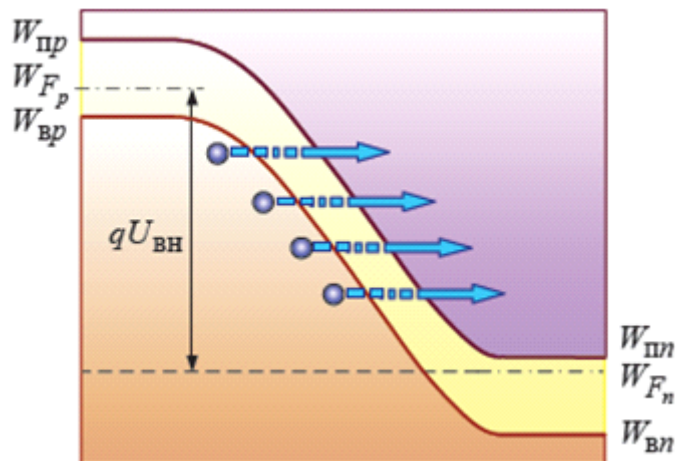


Рисунок 1.21 – Зонная диаграмма, иллюстрирующая туннельный пробой p - n -перехода при обратном смещении

Тепловым называется пробой p - n -перехода, обусловленный ростом количества носителей заряда при повышении температуры кристалла. С увеличением обратного напряжения и тока возрастает тепловая мощность, выделяющаяся в p - n -переходе, и, соответственно, температура кристаллической структуры. Под действием тепла усиливаются колебания атомов кристалла и ослабевает

связь валентных электронов с ними, возрастает вероятность перехода их в зону проводимости и образования дополнительных пар носителей «электрон – дырка». Если электрическая мощность в p - n -переходе превысит максимально допустимое значение, то процесс термогенерации лавинообразно нарастает, в кристалле происходит необратимая перестройка структуры и p - n -переход разрушается.

Для предотвращения теплового пробоя необходимо выполнение условия

$$P_{\text{расс}} = U_{\text{обр}} \cdot I_{\text{обр}} < P_{\text{расс макс}} \quad (1.18)$$

где $P_{\text{расс макс}}$ – максимально допустимая мощность рассеяния p - n -перехода.

Поверхностный пробой. Распределение напряженности электрического поля в p - n -переходе может существенно изменить заряды, имеющиеся на поверхности полупроводника. Поверхностный заряд может привести к увеличению или уменьшению толщины перехода, в результате чего на поверхности перехода может наступить пробой при напряженности поля, меньшей той, которая необходима для возникновения пробоя в толще полупроводника. Это явление называют *поверхностным пробоем*. Большую роль при возникновении поверхностного пробоя играют диэлектрические свойства среды, граничащей с поверхностью полупроводника. Для снижения вероятности поверхностного пробоя применяют специальные защитные покрытия с высокой диэлектрической постоянной.

1.7.5 Ёмкость p - n -перехода

Изменение внешнего напряжения на p - n -переходе приводит к изменению ширины обедненного слоя и, соответственно, накопленного в нем электрического заряда (это также обусловлено изменением концентрации инжектированных носителей заряда вблизи перехода). Исходя из этого, p - n -переход ведет себя подобно конденсатору, ёмкость которого определяется как отношение изменения накопленного в p - n -переходе заряда к обусловившему это изменение приложенному внешнему напряжению.

Различают *барьерную* (или *зарядную*) и *диффузионную* ёмкость p - n -перехода.

Барьерная ёмкость соответствует обратновключенному p - n -переходу, который рассматривается как обычный конденсатор, где пластинами являются границы обедненного слоя, а сам обедненный слой служит несовершенным диэлектриком с увеличенными диэлектрическими потерями:

$$C_{бар} = \frac{\varepsilon \cdot \varepsilon_0 \cdot S}{\delta}, \quad (1.19)$$

где ε – относительная диэлектрическая проницаемость полупроводникового материала;

ε_0 – электрическая постоянная $\left(\varepsilon_0 \approx 8,86 \cdot 10^{-12} \frac{\Phi}{м} \right)$;

S – площадь p - n -перехода;

δ – ширина обеднённого слоя.

Барьерная ёмкость возрастает при увеличении площади p - n -перехода и диэлектрической проницаемости полупроводника и уменьшении ширины обеднённого слоя. В зависимости от площади перехода $C_{бар}$ может быть от единиц до сотен пикофарад.

Особенностью барьерной ёмкости является то, что она является нелинейной ёмкостью. При возрастании обратного напряжения ширина перехода увеличивается и ёмкость $C_{бар}$ уменьшается. Характер зависимости $C_{бар} = f(U_{обр})$ показывает график на рисунке 1.22. Как видно, под влиянием обр ёмкость $C_{бар}$ изменяется в несколько раз.

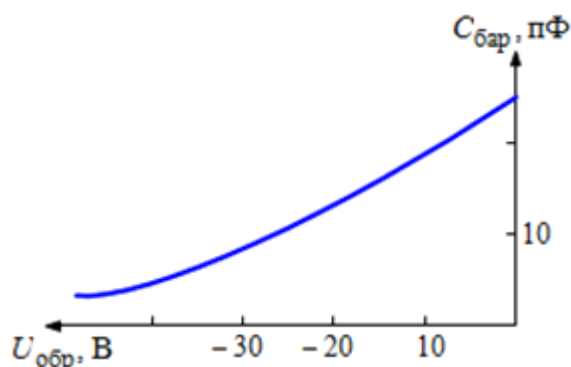


Рисунок 1.22 – Зависимость барьерной ёмкости от обратного напряжения

Диффузионная ёмкость 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 диффундируют (инжектируют) в большом количестве через пониженный потенциальный барьер и, не успев рекомбинировать, накапливаются в n - и p -областях. Каждому значению прямого напряжения соответствуют определенные значения двух разноименных зарядов $+Q_{диф}$ и $-Q_{диф}$, накопленных в n - и p -областях за счет

диффузии носителей через переход. Ёмкость $C_{диф}$ представляет собой отношение зарядов к разности потенциалов:

$$C_{диф} = \frac{\Delta Q_{диф}}{\Delta U_{np}}, \quad (1.20)$$

С увеличением U_{np} прямой ток растет быстрее, чем напряжение, т. к. вольт-амперная характеристика для прямого тока имеет нелинейный вид, поэтому $Q_{диф}$ растет быстрее, чем U_{np} и $C_{диф}$ увеличивается.

Диффузионная ёмкость значительно больше барьерной, но использовать её не удастся, т. к. она оказывается шунтированной малым прямым сопротивлением p - n -перехода. Численные оценки величины диффузионной ёмкости показывают, что ее значение доходит до нескольких единиц микрофард.

Таким образом, p - n -переход можно использовать в качестве конденсатора переменной ёмкости, управляемого величиной и знаком приложенного напряжения.

1.7.6 Контакт «металл – полупроводник»

В современных полупроводниковых приборах помимо контактов с p - n -переходом применяются контакты «металл – полупроводник».

Контакт «металл – полупроводник» возникает в месте соприкосновения полупроводникового кристалла n - или p -типа проводимости с металлами. Происходящие при этом процессы определяются соотношением работ выхода электрона из металла A_M и из полупроводника A_n . Под *работой выхода электрона* понимают энергию, необходимую для переноса электрона с уровня Ферми на энергетический уровень свободного электрона. Чем меньше работа выхода, тем больше электронов может выйти из данного тела.

В результате диффузии электронов и перераспределения зарядов нарушается электрическая нейтральность прилегающих к границе раздела областей, возникает контактное электрическое поле и контактная разность потенциалов:

$$\varphi_{конт} = \frac{A_M - A_n}{q}, \quad (1.21)$$

Переходный слой, в котором существует контактное электрическое поле при контакте «металл-полупроводник», называется *переходом Шоттки*, по

имени немецкого ученого В. Шоттки, который первый получил основные математические соотношения для электрических характеристик таких переходов.

Контактное электрическое поле на переходе Шоттки сосредоточено практически в полупроводнике, так как концентрация носителей заряда в металле значительно больше концентрации носителей заряда в полупроводнике. Перераспределение электронов в металле происходит в очень тонком слое, сравнимом с межатомным расстоянием.

В зависимости от типа электропроводности полупроводника и соотношения работ выхода в кристалле может возникать обеднённый, инверсный или обогащённый слой носителями электрических зарядов.

1. $A_M < A_n$, полупроводник n -типа (рисунок 1.23, а). В данном случае будет преобладать выход электронов из металла (M) в полупроводник, поэтому в слое полупроводника около границы раздела накапливаются основные носители (электроны), и этот слой становится обогащенным, т. е. имеющим повышенную концентрацию электронов. Сопротивление этого слоя будет малым при любой полярности приложенного напряжения, и, следовательно, такой переход не обладает выпрямляющим свойством. Его иначе называют *невыпрямляющим переходом*.

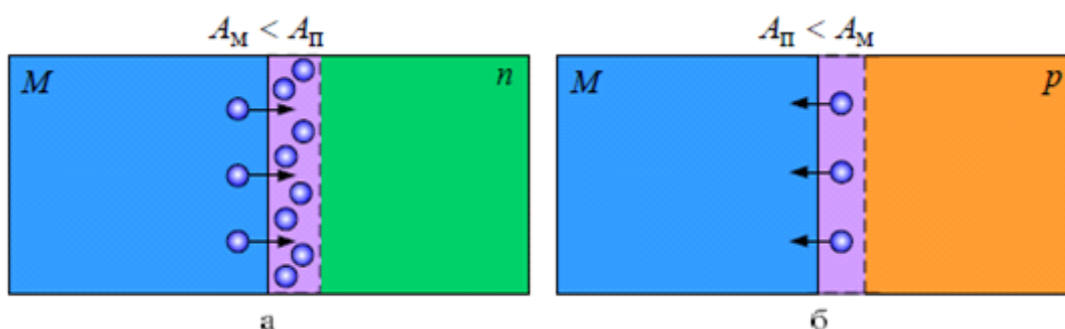


Рисунок 1.23 – Контакт «Металл-полупроводник», не обладающий выпрямляющим свойством

2. $A_M > A_n$, полупроводник p -типа (рисунок 1.23, б). В этом случае будет преобладать выход электронов из полупроводника в металл, при этом в приграничном слое также образуется область, обогащенная основными носителями заряда (дырками), имеющая малое сопротивление. Такой переход также не обладает выпрямляющим свойством.

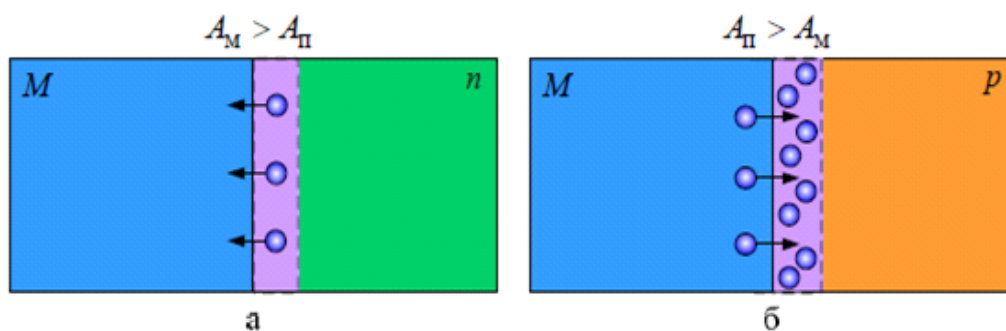


Рисунок 1.24 – Контакт «Металл-полупроводник», обладающий выпрямляющим свойством

3. $A_M > A_n$, полупроводник n -типа (рисунок 1.24, а). При таких условиях электроны будут переходить главным образом из полупроводника в металл и в приграничном слое полупроводника образуется область, обедненная основными носителями заряда и имеющая большое сопротивление. Здесь создается сравнительно высокий потенциальный барьер, высота которого будет существенно зависеть от полярности приложенного напряжения. Если $A_M \ll A_n$, то возможно образование инверсного слоя (p -типа). Такой контакт обладает выпрямляющим свойством.

4. $A_M < A_n$, полупроводник p -типа (рисунок 1.24, б). Контакт, образованный при таких условиях обладает выпрямляющим свойством, как и предыдущий.

Отличительной особенностью контакта «металл – полупроводник» является то, что в отличие от обычного p - n -перехода здесь высота потенциального барьера для электронов и дырок разная. В результате такие контакты могут быть при определенных условиях неинжектирующими, т. е. при протекании прямого тока через контакт в полупроводниковую область не будут инжектироваться неосновные носители, что очень важно для высокочастотных и импульсных полупроводниковых приборов.

1.7.7 Контакт между полупроводниками одного типа проводимости

Области вблизи контакта полупроводников с одним типом проводимости, но с различной концентрацией примесей, обычно обозначают $p^+ - p$ - или $n^+ - n$ -переход, причем знаком «+» обозначают полупроводник с большей концентрацией примесей. На рисунке 1.25 приведен пример контакта $p^+ - p$, где обе области полупроводника обладают электропроводностью p -типа.

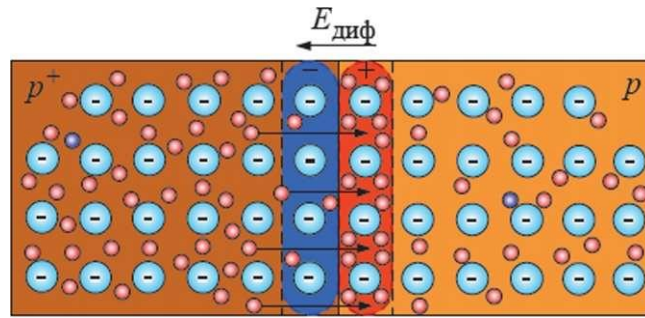


Рисунок 1.25 – Переход между двумя областями с одним типом электропроводности, отличающимися значениями концентрации примесей

Процессы вблизи такого контакта аналогичны происходящим в p - n -переходе, т. е. носители из области с большой концентрацией переходят в область с меньшей концентрацией, в результате чего в области p^+ возникает объемный заряд из нескомпенсированных зарядов ионов примеси, а в области p – объемный заряд из избыточных носителей – дырок, перешедших из области p^+ . Появление объемных электрических зарядов приводит к образованию диффузионного электрического поля $E_{\text{диф}}$ и контактной разности потенциалов. Но в отличие от обычных p - n -переходов здесь отсутствует запирающий слой, так как здесь не может быть области с концентрацией меньшей, чем в слаболегированном полупроводнике. Поэтому такие контакты вентильным свойством не обладают, но зато в них при любой полярности приложенного напряжения не происходит инжекции из низкоомной области в высокоомную, что является важным для некоторых типов полупроводниковых приборов. Аналогичные процессы протекают в контакте $n^+ - n$.

1.7.8 Гетеропереходы

Гетеропереходом называют переходный слой с существующим там диффузионным электрическим полем между двумя различными по химическому составу полупроводниками, обладающие различной шириной запрещенной зоны.

Для получения гетеропереходов хорошего качества необходимо, чтобы у материалов, образующих переход с высокой точностью, совпадали два параметра: температурный коэффициент расширения и постоянная кристаллической решетки, что ограничивает выбор материалов для гетеропереходов. В настоящее время наиболее исследованными являются пары: германий – арсенид галлия (Ge-GaAs), арсенид галлия – фосфид индия (GaAs-InP), арсенид галлия – арсенид индия (GaAs-InAs), германий – кремний (Ge-Si).

Каждый из полупроводников, образующих гетеропереход, может иметь различный тип электропроводности. Поэтому для каждой пары полупроводни-

ков, в принципе, возможно осуществить четыре типа гетероструктур: $p_1 - n_2$; $n_1 - n_2$; $n_1 - p_2$ и $p_1 - p_2$.

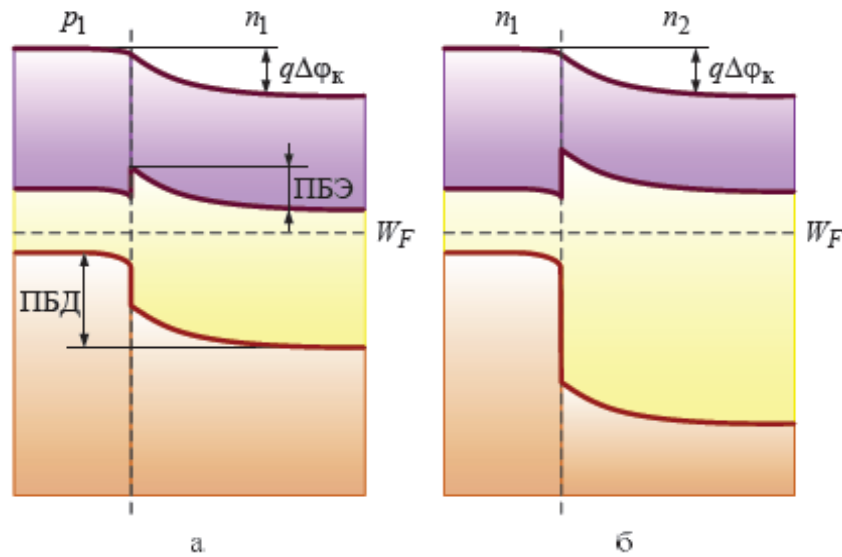


Рисунок 1.26 – Зонные энергетические диаграммы гетеропереходов:

а – выпрямляющий гетеропереход между полупроводниками p - и n -типа с преимущественной инжекцией электронов в узкозонный проводник;

б – выпрямляющий гетеропереход между полупроводниками p - и n -типа с преимущественной инжекцией электронов в широкозонный проводник.

При образовании гетероперехода из-за разных работ выхода электронов из разных полупроводников происходит перераспределение носителей заряда в приконтактной области и выравнивание уровней Ферми в результате установления термодинамического равновесия (рисунок 1.26). Остальные энергетические уровни и зоны должны соответственно изогнуться, т. е. в гетеропереходе возникают диффузионное поле и контактная разность потенциалов. При этом энергетический потолок верхней свободной зоны должен быть непрерывным. Энергетический уровень потолка верхней свободной зоны является энергетическим уровнем потолка зоны проводимости, т. к. свободные энергетические зоны перекрывают друг друга.

Ширина энергетических зон различных полупроводников различна. Поэтому на границе раздела двух полупроводников получается обычно разрыв дна проводимости. Разрыв дна зоны проводимости определяется различием энергий сродства к электрону двух контактирующих полупроводников (*энергия сродства к электрону* – разница энергий потолка верхней свободной зоны и дна проводимости).

В результате разрывов дна зоны проводимости и потолка валентной зоны высота потенциальных барьеров для электронов и дырок в гетеропереходе ока-

зывается различной. Это является особенностью гетеропереходов, обуславливающей специфические свойства гетеропереходов в отличие p - n -переходов, которые формируются в монокристалле одного полупроводника.

Если вблизи границы раздела двух полупроводников, образующих гетеропереход, возникают обедненные основными носителями слои, то основная часть внешнего напряжения, приложенного к структуре с гетеропереходом, будет падать на обедненных слоях. Высота потенциального барьера для основных носителей заряда будет изменяться: уменьшается при полярности внешнего напряжения, противоположной полярности контактной разности потенциалов, и увеличивается при совпадении полярностей внешнего напряжения и контактной разности потенциалов. Таким образом, гетеропереходы могут обладать выпрямляющим свойством.

Из-за различия по высоте потенциальных барьеров для электронов (ПБЭ) и дырок (ПБД) прямой ток через гетеропереход связан в основном с движением носителей заряда только одного знака. Поэтому гетеропереходы могут быть как инжектирующими неосновные носители заряда (рисунок 1.26, а), так и неинжектирующими (рисунок 1.26, б). Инжекция неосновных носителей заряда происходит всегда из широкозонного в узкозонный полупроводник. В гетеропереходах, образованных полупроводниками одного типа электропроводности, выпрямление происходит без инжекции неосновных носителей заряда.

1.7.9 Свойства омических переходов

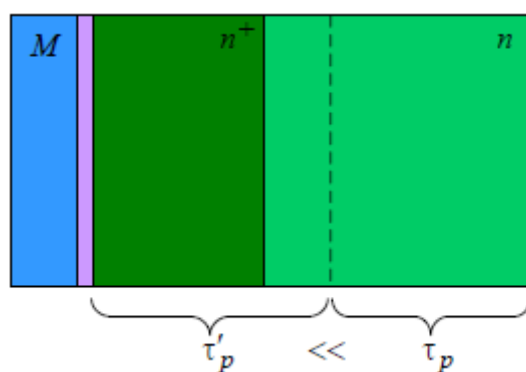


Рисунок 1.27 – Структура реального невыпрямляющего контакта с последовательно соединенными омическими переходами

Основное назначение омических переходов – электрическое соединение полупроводника с металлическими токоведущими частями полупроводникового прибора. Омических переходов в полупроводниковых приборах больше, чем выпрямляющих. Случаи производственного брака и отказов работы полупроводниковых приборов из-за низкого качества омических переходов довольно

часты. При разработке полупроводниковых приборов создание совершенных омических переходов нередко требует больших усилий, чем создание выпрямляющих переходов.

Омический переход имеет меньшее отрицательное влияние на параметры и характеристики полупроводникового прибора, если выполняются следующие условия:

- если вольт-амперная характеристика омического перехода линейна, т. е. омический переход действительно является омическим;
- если отсутствует инжекция неосновных носителей заряда через омический переход в прилегающую область полупроводника и накопление неосновных носителей в омическом переходе или вблизи него;
- при минимально возможном падении напряжения на омическом переходе, т. е. при минимальном его сопротивлении.
- Структура реального омического контакта в полупроводниковых приборах, в соответствии с перечисленными требованиями, имеет сложное строение и состоит из нескольких омических переходов (рисунок 1.27).
- Для уменьшения вероятности накопления неосновных носителей заряда около омического перехода между металлом и полупроводником высота потенциального барьера для неосновных носителей заряда должна быть как можно меньше. Для этого необходимо подобрать металл и полупроводник с равной или близкой работой выхода электрона: $A_M \cong A_n$. Так как это трудно обеспечить, то поверхностный слой полупроводника должен быть сильно легирован соответствующей примесью для обеспечения возможности туннелирования носителей заряда сквозь тонкий потенциальный барьер.
- Вблизи омического перехода между полупроводниками с одним типом электропроводности, но с различной концентрацией примеси, также может происходить накопление неосновных носителей заряда. Для уменьшения влияния этого эффекта на параметры и характеристики полупроводникового прибора в поверхностный слой полупроводника вводят примеси рекомбинационных ловушек (к примеру, золото), что уменьшает время жизни носителей заряда в этой части структуры. При этом накопленные носители заряда будут быстрее рекомбинировать.

Контрольные вопросы

1. Что такое разрешенные и запрещенные энергетические зоны?
2. Что такое уровень Ферми?
3. Как влияет концентрация примеси на положение уровня Ферми?
4. Что такое собственная электропроводность полупроводника?
5. Что такое диффузия и дрейф носителей заряда?
6. Как объяснить температурную зависимость концентрации носителей заряда в полупроводнике?
7. Что такое примесная электропроводность полупроводника?
8. Поясните механизм образования электронно-дырочного перехода.
9. Что такое инжекция и экстракция носителей заряда?
10. Как влияет внешнее напряжение на высоту потенциального барьера и ширину p - n -перехода.
11. Нарисуйте вольт-амперную характеристику p - n -перехода и напишите ее уравнение.
12. Объясните механизм лавинного пробоя.
13. При каких условиях в p - n -переходе возможен туннельный пробой?
14. Что такое барьерная ёмкость p - n -перехода?
15. Что такое диффузионная ёмкость?
16. Почему электрический переход между двумя одинаковыми полупроводниками с одним типом электропроводности, но с разной концентрацией примесей, является омическим и неинжектирующим носители заряда в высокоомную область?
17. При каких условиях контакт «металл – полупроводник» будет невыпрямляющим?
18. При каких условиях контакт «металл – полупроводник» будет выпрямляющим?
19. В чем состоят особенности гетероперехода?
20. Каким требованиям должны удовлетворять омические переходы?