

## Электрические переходы (контактные явления).

Электрическим переходом называется переходной **слой** между областями твёрдого тела с различными типами или величинами электропроводности.

Виды электрических переходов:

1. **“p-n” переходы или электронно-дырочные.** В основе этих переходов - контакт двух ПП - такие переходы применяются наиболее широко. В этих переходах создаются области с разной степенью проводимости но с общей границей между ними. Технологически переходы и разная проводимость полупроводников создаются путём применения различных приёмов:

**легирование** – контролируемое введение примесей путём диффузии атомов примесей при высокой температуре,

- *ионное внедрение примесей* – путем бомбардировки ионами примесей ускоренных в электрическом поле,

- *вплавление металла с примесями* в полупроводник.

**эпитаксия** - наращивание на поверхность кристалла являющегося подложкой – тонкой пленки полупроводника с противоположным типом проводимости,

**гетероэпитаксия** - формирование гетеропереходов т.е. переходов между различными полупроводниками отличающимися между собой шириной запрещённой зоны.

**Переходы p-n типа:** **p-n - симметричный переход**, т.е. переход между полупроводниками с одинаковым количеством примесей

**p<sup>+</sup>-n** - переход - значок “+” означает повышенную концентрацию акцепторов

**p-n<sup>+</sup>** - переход - значок “+” означает повышенную концентрацию доноров – эти

два типа переходов называются **несимметричными**.

**p<sup>++</sup>-n<sup>++</sup>** - переход между вырожденными полупроводниками ( $N \geq 10^{19} \text{ см}^{-3}$ );

**p-i-n** – структура: **акцепторный – собственный – донорный** полупроводники

(этот тип перехода используется в диодах работающих на СВЧ),

**p<sup>+</sup>-p; n<sup>+</sup>-n** - переходы с разными величинами электропроводности или **гомопе-**

**реходы:** т.е. переходы между полупроводниками с одинаковыми типами электропроводности но с различной шириной запрещённой зоны.

**Гетеропереходы** – это контакт двух полупроводников с различной шириной запрещённой зоны – например: AlGaAs -GaAs; GaAsP-GaP. Возможны переходы как между полупроводниками **p-** и **n-** типа так и между **p<sup>+</sup>-p** или **n<sup>+</sup>-n**.

**Переходы МДП:** металл-диэлектрик-полупроводник или **МОП** - металл - окисел -ПП.

**Переходы металл-ПП:** **M – i** - металл - собственный ПП

**M – p** - металл - акцепторный ПП

**M – n** - металл – донорный ПП

Технология изготовления таких переходов: вакуумное напыление тонкой металлической плёнки на тщательно очищенную поверхность ПП.

### Электронно-дырочный переход в равновесном состоянии.

Рассмотрим симметричный (самый простой) **p-n** переход. Будем считать, что в месте контакта кристаллическая структура не нарушена, **p** и **n** области разделены плоскостью называемой – **металлургическая граница**.

Исходные данные: 1. внешнее напряжение на переходе равно нулю.

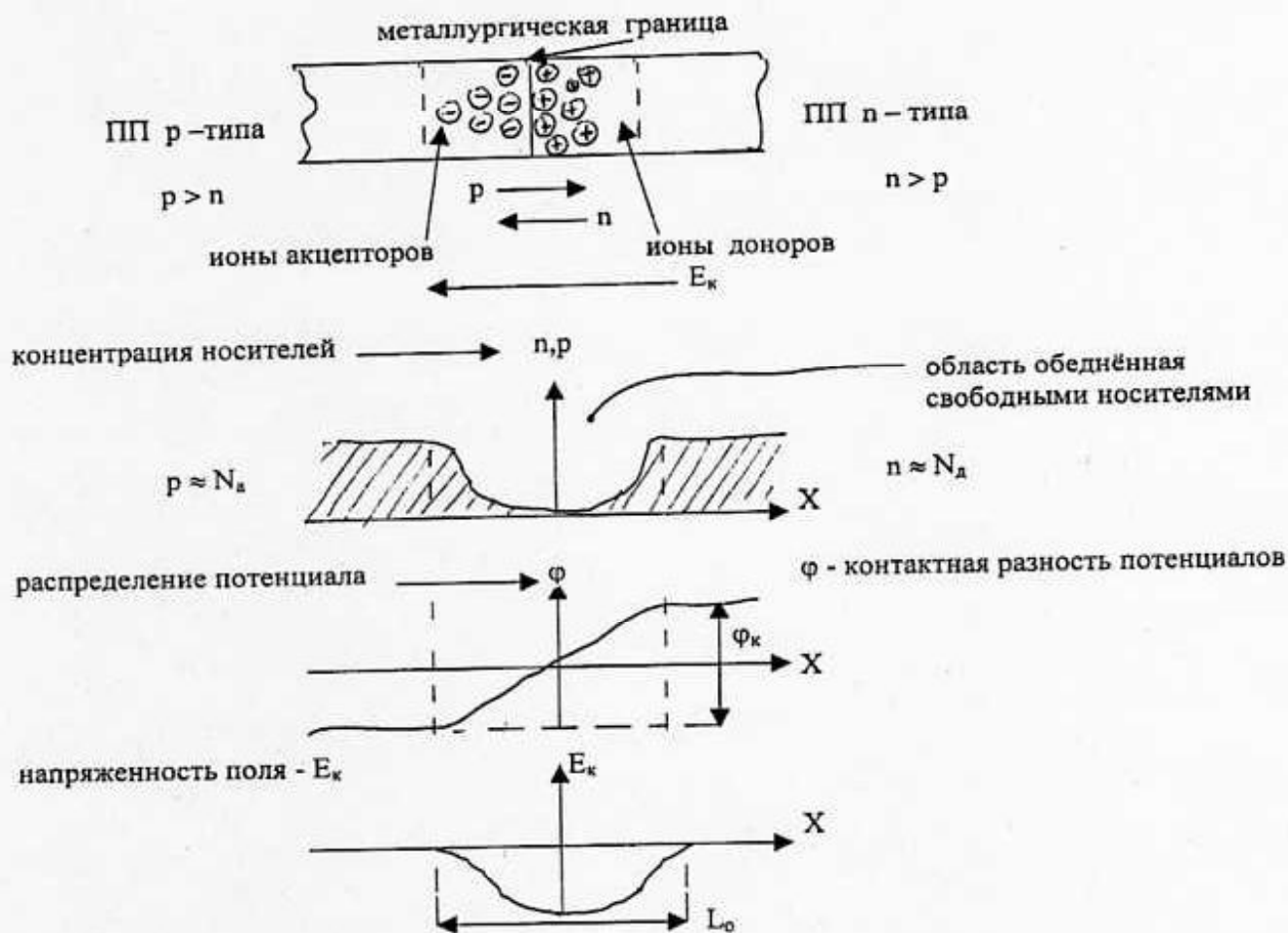
2. температура = 300°K (средняя рабочая температура);

3. концентрация атомов акцепторов примерно равна концентрации атомов доноров  $N_a \approx N_d$  т.е. переход симметричный;

4. выполняется условие электронейтральности: положительный заряд в **p** – области равен отрицательному заряду в **n** – области, т.е. в **p** – области:  $(+)p_p =$

$(-) (P_p + N_a)$ , а в **n** – области  $(-)n_n = (+) (P_n + N_d)$ , где  $P_p$  - концентрация электронов в **p** области, а  $P_n$  – концентрация дырок в **n** области;  $N_a$  и  $N_d$  – концентрации примесей акцепторов и доноров.

5. в полупроводнике преобладает примесная проводимость т.е.  $n_p \gg p_n$  и  $p_p \gg n_p$  - т.е. электронов в  $n$ -области больше чем дырок в  $n$ -области и наоборот - дырок в  $p$ -области больше чем электронов в  $p$ -области.



с ростом концентрации примесей толщина перехода уменьшается, а напряженность поля увеличивается.

- Процессы:** 1. Сразу после образования контакта между полупроводниками - начинается диффузия дырок в  $n$ -область и электронов в  $p$ -область.
2. В  $n$ -области дырки рекомбинируют с электронами, а в  $p$ -области электроны рекомбинируют с дырками - в результате в областях прилегающих к металлургической границе исчезают свободные носители, и образуется область  $L_0$  - область, обеднённая свободными носителями или **обеднённая область**.
3. В  $p$ -области обнажаются отрицательно заряженные ионы акцепторов, а в  $n$ -области обнажаются положительно заряженные ионы доноров - эти ионы находятся **неподвижно (!)** в кристаллической решетке полупроводника.
2. Между областью с положительно заряженными донорами и областью с отрицательно заряженными акцепторами возникает контактная разность потенциалов -  $\phi_k$ .
3. При появлении  $\phi_k$  - появляется и соответствующее ему электрическое поле  $E$ , направленное от области с положительно заряженными донорами к области с отрицательно заряженными акцепторами. Это поле достигает максимального значения у металлургической границы.
6. Поле вызывает дрейфовое движение дырок в  $p$ -области **от** перехода и электронов в  $n$ -области также **от** перехода. Таким образом, диффузионное движение свободных носителей (см. п.1) уравнивается дрейфовым движением. При этом говорят, что  $p-n$  переход находится в **равновесном состоянии**.

## Параметры р – п перехода в равновесном состоянии.

1. Контактная разность потенциалов для рабочего диапазона температур -  $\Delta T$ , когда ионизирована вся примесь – т.е.  $n \approx N_d$  и  $p \approx N_a$ .  
 $N_a$  - концентрация атомов акцепторов  
 $N_d$  - концентрация атомов доноров

$$\phi_k = (kT/q) \cdot \ln(p_p/p_n) = (kT/q) \cdot \ln(n_n/n_p) = (kT/q) \cdot \ln(N_a \cdot N_d / n^2_i)$$

$n^2_i = n \cdot p$  - концентрация свободных носителей “n” и “p” в чистом (собственном) полупроводнике

$p_p$  - концентрация дырок в “p” полупроводнике;  $n_p$  - концентрация электронов в “p” полупроводнике

$p_n$  - концентрация дырок в “n” полупроводнике;  $n_n$  - концентрация электронов в “n” полупроводнике

$T$  - температура;  $k$  - постоянная Больцмана;  $q$  - заряд.

$\phi_k$  - в вольтах при 300° K для Ge  $\approx 0,4$ ; для Si  $\approx 0,7$ ; для GaAs  $\approx 1,2$ .

$$2. \text{ Толщина обеднённого слоя: } L_o = \sqrt{\frac{2\epsilon\epsilon_0\phi_k(N_a + N_d)}{qN_a \cdot N_d}}$$

$\epsilon$  - диэлектрическая проницаемость полупроводника;  $\epsilon_0$  - диэлектрическая проницаемость вакуума.

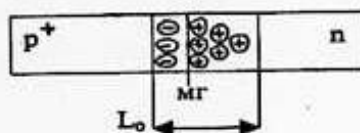
$$3. \text{ Ёмкость перехода: } C_6 = \epsilon\epsilon_0 S / L_o.$$

$S$  - площадь перехода

$L_o$  - толщина обеднённого слоя

“p-n” – переход может быть представлен как конденсатор с двумя заряженными обкладками – при этом образуется барьерная ёмкость перехода.  $C_6$  – зависит от концентрации примесей  $N_a$  и  $N_d$ . При увеличении концентрации примесей толщина обеднённого слоя уменьшается, а величина барьерной ёмкости увеличивается.

Если же переход несимметричный т.е.  $N_a \gg N_d$ , то  $L_o = \sqrt{\frac{2\epsilon\epsilon_0\phi_k}{q \cdot N_d}}$



- переход несимметричный - при этом больший обеднённый слой расположен в области с меньшей концентрацией примеси.

## Неравновесное состояние перехода.

Если к “p-n” переходу подключить источник напряжения – то равновесное состояние перехода нарушается, в цепи потечёт ток – такое состояние перехода называется **неравновесным**.

Комментарии к диаграмме:

1. Первый рисунок (1) - переход находится в равновесии, т.е. к нему не приложено внешнее напряжение. Разность энергий электронов у дна зоны проводимости в левой и правой частях диаграммы - ( $E_{np} - E_{nn}$ ) - равна высоте энергетического барьера  $\Delta E_6 = q\phi_k$  соответствующего потенциальному барьеру  $\phi_k$ . Потенциальный барьер существует только для основных носителей движущихся к переходу. Так электрон (1) с небольшой энергией не может проникнуть в область “p” и выталкивается электрическим полем из “p-n” перехода. То же самое касается и дырки (2). Перейти в противоположную область могут только те основные носители – электроны (3) и дырки (4) энергия которых достаточна для преодоления барьера.

В отличии от этого для не основных носителей барьера нет, а электрическое поле является ускоряющим. Неосновные носители электроны (5) и дырки (6) захватываются полем перехода и переносятся в противоположную область.

Для невырожденных полупроводников ( $N_{np} < 10^{19} \text{ см}^{-3}$ ) и рабочего диапазона температур когда количество свободных носителей примерно равно количеству атомов примеси ( $n \approx N_d$ ) высота потенциального (энергетического) барьера:

$$\Delta E_6 = \Delta E_3 - kT \cdot \ln[(N_n \cdot N_a) / (N_a \cdot N_d)]$$

$N_n$  и  $N_a$  - концентрации разрешенных энергетических состояний в полосе энергий  $kT$ .

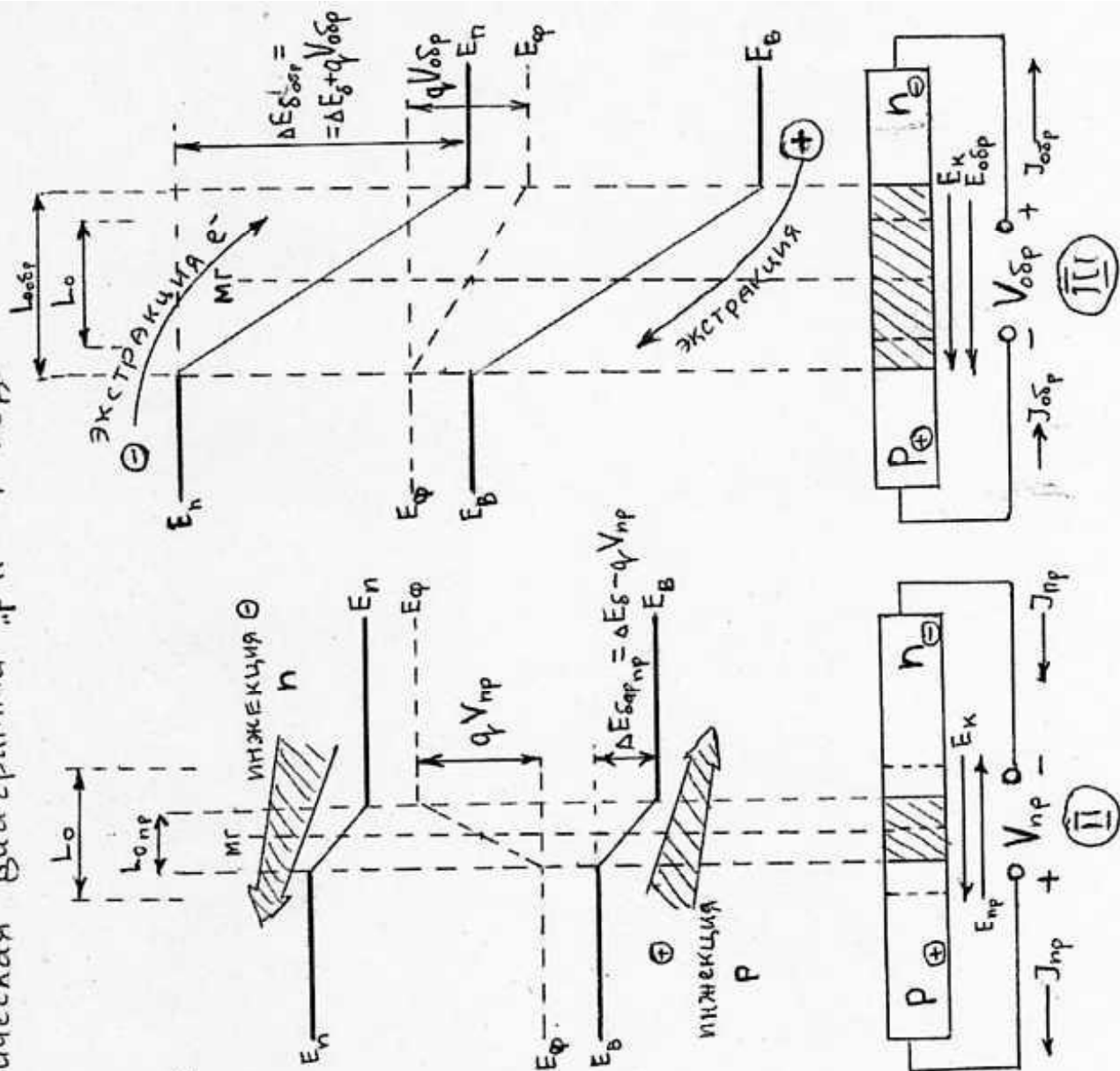
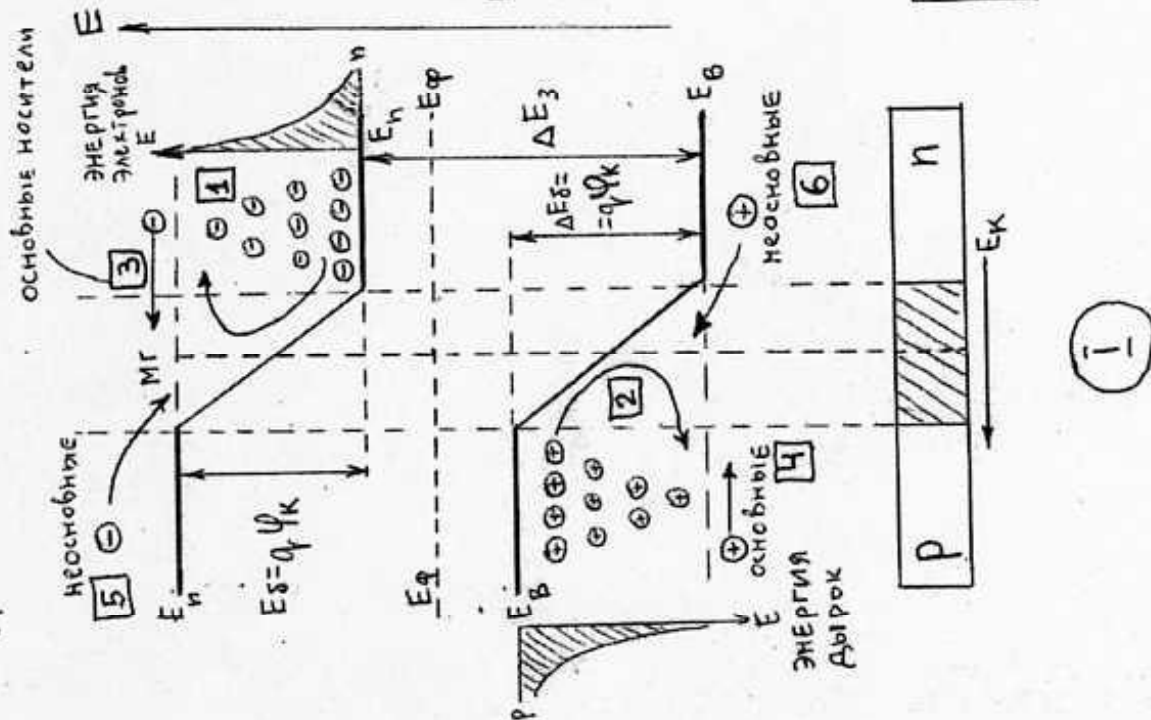
Видно, что высота потенциального барьера прямо пропорциональна ширине запрещенной зоны, уменьшается с ростом температуры и слабо возрастает при увеличении концентрации примесей.

2. Второй рисунок (11) - неравновесное состояние перехода при прямом смещении.



энергетическая диаграмма "p-n" перехода

p-n переход в равновесии



Если к "р-п" переходу подключить источник напряжения, то равновесное состояние нарушается и в цепи потечет ток. Под действием этого внешнего напряжения изменяется высота потенциального барьера  $\phi = \phi_0 - V_{пр}$ . Внешнее напряжение  $V_{пр}$  прикладывается непосредственно к "р-п" переходу т.к. сопротивление перехода  $R_{пер}$  существенно меньше сопротивления нейтральных областей:  $R_{пер} \gg R_p$  и  $R_n$ .

Электрическое поле  $E_{пр} \approx V_{пр}/L_0$  вычитается из поля перехода  $E_k$  – напряжение поля перехода при этом уменьшается. Дрейфовая компонента тока равновесия уменьшается, а растёт диффузионная составляющая и переход (т.е. обеднённая область) сужается до  $L_{прям}$ .

Уменьшается энергетический барьер  $\Delta E_{б\ прям} = \Delta E_b - q \cdot V_{пр}$  и возникает инжекция основных носителей (поток электронов и дырок) через переход образуя прямой ток  $I_{прям}$ .

При несимметричном переходе когда  $N_d \gg N_a$  происходит односторонняя инжекция электронов

$N_d \ll N_a$  происходит односторонняя инжекция дырок.

3. Третий рисунок (111) – неравновесное состояние перехода при обратном смещении.

Обратное напряжение прикладывается так же непосредственно к переходу.

Поле  $E_{обр}$  суммируется с полем  $E_k$ , дрейфовая компонента равновесия увеличивается, диффузия уменьшается и переход (т.е. обеднённая область) расширяется до  $L_{обр}$ .

Увеличивается энергетический барьер  $\Delta E_{б\ обр} = \Delta E_b + q V_{обр}$ , тем самым ещё больше препятствуя переходу основных носителей.

Увеличивается вытягивание – экстракция из областей р и п – неосновных носителей.

### Вольтамперная характеристика (ВАХ) идеализированного р-п перехода.

Идеализированный переход представляет собой упрощенную модель р-п перехода. Условия идеализации следующие: 1. В обеднённом слое нет генерации, рекомбинации и рассеяния носителей поэтому при прямом смещении ток рекомбинации носителей не учитывается и считается, что объёмное сопротивление областей р и п тождественно равно нулю. 2. Полагают, что носители проходят обеднённый слой мгновенно. 3. При обратном смещении не учитывается ток термогенерации в обеднённом слое. Не учитываются явления туннельного перехода носителей между р и п областями, а так же явление ударной ионизации (туннельный и лавинный пробой). 4. Считается, что электрическое поле  $E_k$  есть только в р-п переходе, а в областях р и п поле  $E_k$  тождественно равно нулю  $E_k \equiv 0$ , т.е. всё приложенное напряжение падает на переходе. 5. Границы перехода являются плоскими, носители движутся только в направлении перпендикулярном этим границам, краевые эффекты не учитываются.

При этих условиях справедливо выражение для ВАХ:

$$I = I_0 [\exp(V/\phi_t) - 1]$$

$\phi_t = kT/q$  – разность потенциалов при температуре Т или тепловой потенциал.

$I_0$  – обратный ток р-п перехода или тепловой – так как он сильно зависит от температуры и определяется параметрами неосновных свободных носителей.

$$I_0 = qS(l_p \cdot p_n / \tau_p + l_n \cdot n_p / \tau_n) = qS n_i^2 (l_p / \tau_p N_d + l_n / \tau_n N_a)$$

$l_p$  и  $l_n$  – длины свободного пробега соответственно дырки и электрона,

$\tau_p$  и  $\tau_n$  – время жизни дырок в "п"- и электронов в "р"- областях,

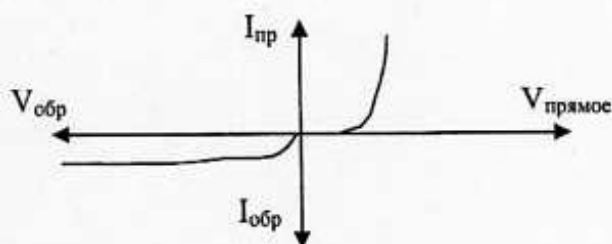
$p_n, n_p$  – концентрации неосновных носителей,

$n_i^2 = n \cdot p$  – концентрация свободных носителей "п" и "р" в чистом полупроводнике,

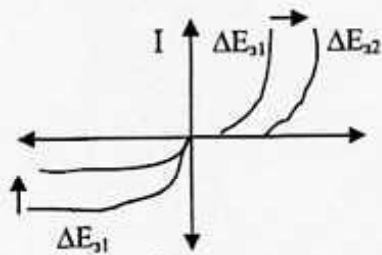
S – площадь р-п перехода

V – напряжение на внешних выводах -  $V = \phi_t \ln[(I + I_0)/I_0]$

ВАХ идеализированного перехода:

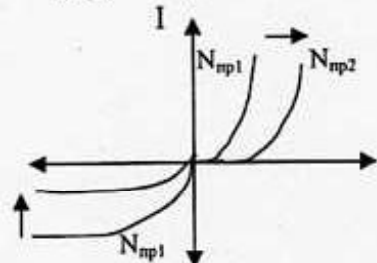


## Зависимости идеализированной ВАХ от $\Delta E_3$ ; $N_{\text{примеси}}$ и $T^0$ .



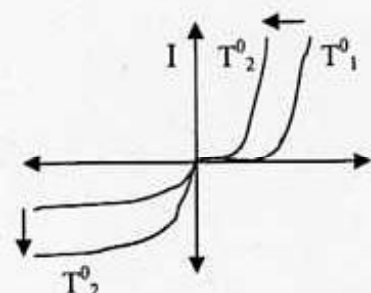
$$\Delta E_{32} \gg \Delta E_{31}$$

- чем больше ширина запрещённой зоны  $\Delta E_3$  - тем больше барьер  $\Delta E_6$ , и тем нужно большее  $V_{\text{пр}}$ , чтобы пошел прямой ток  $I_{\text{пр}}$
- чем больше  $\Delta E_3$ , тем меньше тепловой ток  $I_0$  (труднее идет процесс термогенерации).



$$N_{\text{пр}2} \gg N_{\text{пр}1}$$

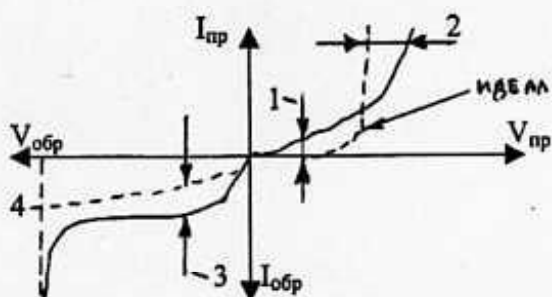
- чем больше концентрация атомов примесей  $N_{\text{пр}}$  ( $N_a$  и  $N_d$ ) - тем больше энергетический барьер  $\Delta E_6$  и необходимо большее прямое напряжение  $V_{\text{пр}}$ , чтобы пошел прямой ток  $I_{\text{пр}}$ ,
- чем больше примесей  $N_{\text{пр}}$  - тем меньше  $I_0$ .



$$T_2^0 \gg T_1^0$$

- чем больше температура  $T^0$  - тем меньше ширина энергетического барьера  $\Delta E_6$ ,
- чем больше  $T^0$  - тем больше собственных носителей  $n_i$  (т.е. больше  $I_0$ ) и больше прямой ток  $I_{\text{пр}}$  за счёт роста концентрации неосновных носителей.

## Вольтамперная характеристика реального p-n перехода

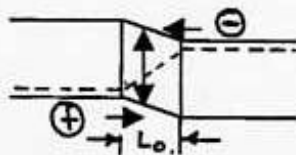


← ВАХ реального p-n перехода.

Отличия реального перехода от идеального:

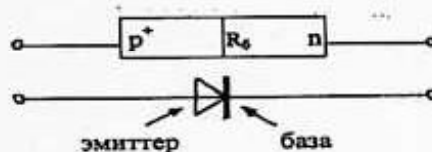
**1-я область ВАХ** - при прямом смещении появляется явление рекомбинации дырок и электронов в обеднённом слое, что приводит к появлению паразитного тока рекомбинации

$$I_{\text{пр}} = I_{\text{рек}} + I$$



**2-я область ВАХ** - в реальном несимметричном p<sup>+</sup>-n переходе объёмное сопротивление области базы значительно больше объёмного сопротивления области эмиттера  $R_6 \gg R_3$ , т.к.  $N_d \ll N_a$  и при прямом смещении  $V_{\text{пр}}$  часть напряжения падает на  $R_6$ .

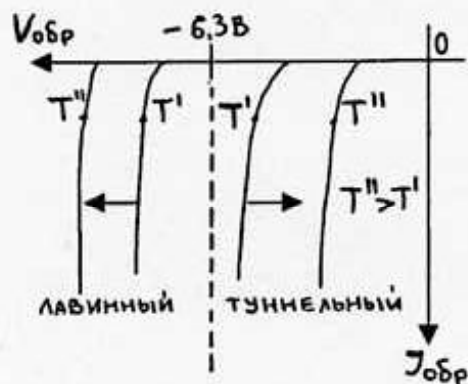
$$V = \underbrace{\varphi_t \ln[(I+I_0)/I_0]}_{\text{падение на переходе}} + \underbrace{I R_6}_{\text{падение на сопротивлении } R_6}$$



**3 -я область ВАХ** - в реальном переходе при обратном смещении  $V_{обр}$  в обеднённом слое идёт процесс термогенерации электронно-дырочных пар. Ток генерации  $I_r$  добавляется к току неосновных носителей  $I_0$  и увеличивает его.

$$I_{обр} = I_0 + I_r$$

**4 - я область ВАХ** – в реальном переходе происходит пробой этого перехода при достижении обратным напряжением величины напряжения пробоя. Пробоев бывает три типа:



**1. Лавинный пробой** – этот тип пробоя возникает при ударной ионизации атомов полупроводника свободными электронами в сильном электрическом поле. При достижении обратным напряжением величины напряжения пробоя в обеднённом слое неосновные носители (процесс экстракции) приобретают кинетическую энергию достаточную для ионизации нейтральных атомов при условии, что ширина обеднённого слоя будет больше длины свободного пробега носителей и при малых концентрациях примеси:  $L_{обр} > L_{св.пробега}$ .

**2. Туннельный пробой** – этот тип пробоя вызван туннельным переходом носителей через потенциальный барьер. При  $V_{обр} = V_{проб}$  и высокой концентрации примеси ( $> 10^{18} \text{ см}^{-3}$ ) толщина барьера уменьшается (до  $\approx 10 \text{ нм}$ ) и возникает возможность перехода барьера электронами без изменения их энергии.

**3. Тепловой пробой** – этот тип пробоя возникает при  $V_{обр} = V_{проб}$  и протекании тока (лавинного или туннельного), при этом кристалл разогревается, ещё более возрастает ток за счёт  $I_0$  и при условии превышения мощности рассеяния тепла - допустимой мощности - переход разрушается – этот тип пробоя – необратимый (переход сгорает).

### Ёмкость р-п перехода.

При прямом и обратном смещении  $p^+-n$  переход имеет ёмкостную реакцию на приложенное напряжение. Ёмкость  $C = \frac{dQ}{dV}$  - характеризует изменение величины зарядов при изменении напряжения. Ёмкостная реакция  $p^+-n$  перехода обусловлена двумя типами зарядов (формулы приведены для несимметричного  $p^+-n$  перехода):

1. объёмными зарядами примеси в обеднённом слое - барьерная ёмкость  $C_{бар}$ :

$$C_{бар} = \frac{dQ_{бар}}{dV} = \frac{\epsilon \epsilon_0 S}{L_0 (V)} = S \sqrt{\frac{q \epsilon \epsilon_0 N_d}{2 (\phi_k - V)}}$$

$S$  – площадь перехода;  $\epsilon, \epsilon_0$  – диэлектрическая проницаемость;  $L_0$  - толщина обеднённого слоя (зависит от напряжения);  $Q_{бар}$  – величина барьерного заряда;  $V$  – напряжение;  $N_d$  – концентрация примесей;  $\phi_k$  – контактная разность потенциалов.

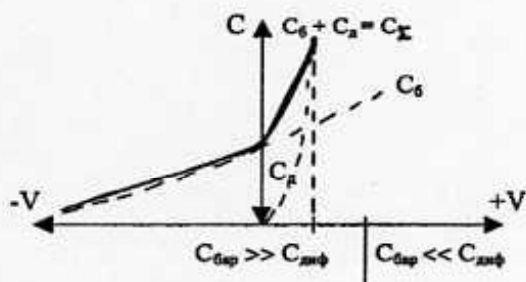
2. зарядами неосновных носителей (т.к. напряжение прямого смещения их тормозит) в областях  $p$  и  $n$  близких к переходу при прямом смещении – диффузионная ёмкость:

$$C_{диф} = dQ_p / dV \approx \tau_p I_{пр} / \phi_1$$

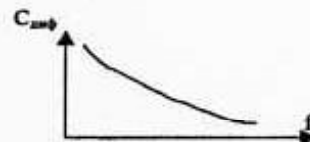
$Q_p$  – заряды  $p$  накопленные в базе;  $\tau_p$  - эффективное время жизни носителя в базе или время рекомбинации;  $I_{пр}$  - ток инжекции;  $\phi_1$  - тепловой потенциал ( $= kT/q$ ).



График зависимости ёмкостей от напряжения:



С ростом частоты  $f$  дифференциальная ёмкость  $C_{диф}$  падает до нуля так как для диффузии неосновных носителей через базу необходимо время  $\tau_{эфф}$ , и в течение малопериода  $T \ll T_{эфф}$  — заряд не успевает измениться.



Эквивалентная схема p-n перехода:



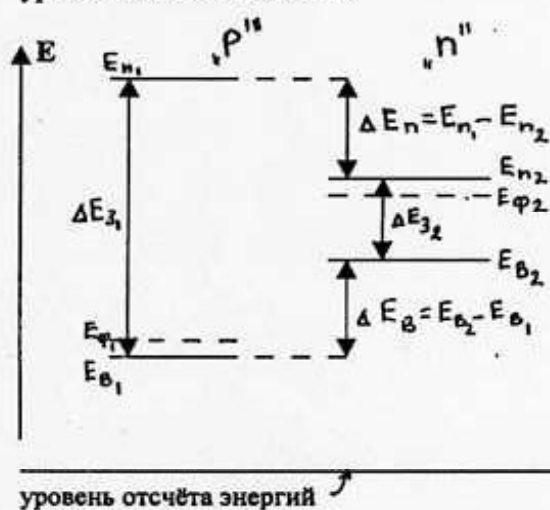
### Гетеропереходы.

Гетеропереходы — это переходы между различными полупроводниками, отличающимися шириной запрещённой зоны. Например: переходы Ge — Si; Ge — As; GaAs — GaP и другие можно получить при соблюдении следующих условий:

1. полупроводники (ПП) должны иметь одинаковые кристаллические структуры;
2. ПП должны иметь близкие значения *постоянной* кристаллической решетки;
3. на границе раздела решетки должен быть минимум дефектов.

На практике используют переходы на родственных ПП: GaAlAs-GaAl; GaAsP-GaP и другие.

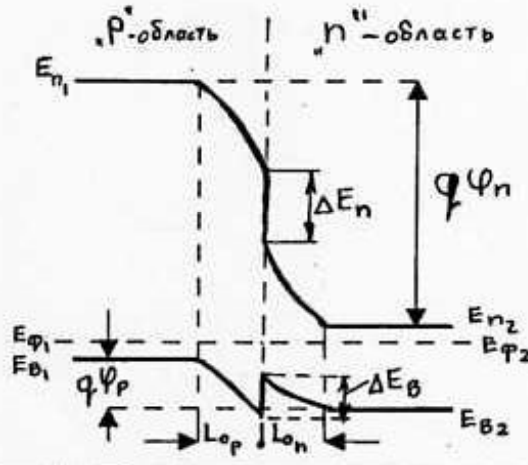
Исходные энергетические диаграммы перехода GaAlAs-GaAl при одинаковом уровне начала отсчета  $E$



уровень отсчёта энергий

$\varphi_k = (E_{\phi 2} - E_{\phi 1})/q$  — для изолированных полупроводников т.е. неконтактирующих между собой

После образования контакта диаграмма приобретает вид:



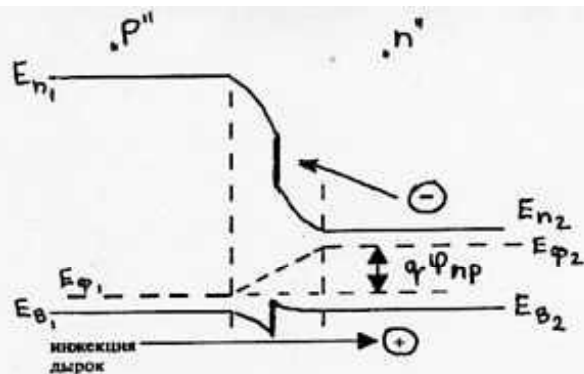
на металлургической границе МГ образуются разрывы зон  $\Delta E_n$  и  $\Delta E_B$  и видно, что энергетические барьеры для электронов и дырок разные:

$$q\varphi_n = q\varphi_k + \Delta E_n$$

$$q\varphi_p = q\varphi_k - \Delta E_B$$

т.е.  $q\varphi_n > q\varphi_p$

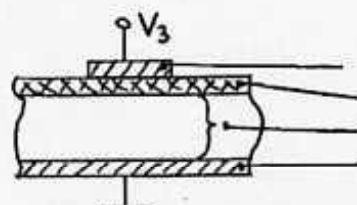




При прямом смещении гетероперехода условия для инжекции дырок и электронов будут разные. При смещении  $V_{пр} = V_p$  - валентные зоны  $E_{a1}$  и  $E_{a2}$  находятся на одном уровне, идёт инжекция дырок, а для электронов остаётся энергетический барьер  $q(\Phi_n - V_{пр})$ .

При сильном прямом смещении появляется и инжекция электронов, и гетеропереход теряет свои полезные свойства, т.е. он работает только при малых токах инжекции.

## Переходы – МДП (металл-диэлектрик-полупроводник) или МОП (металл-окисел $\text{SiO}_2$ -полупроводник)



металлический электрод – затвор.

слой диэлектрика или окисла толщиной  $d - 0,03-0,1 \mu\text{м}$ .

полупроводниковый кристалл – “подложка”

вывод от полупроводника – омический контакт.

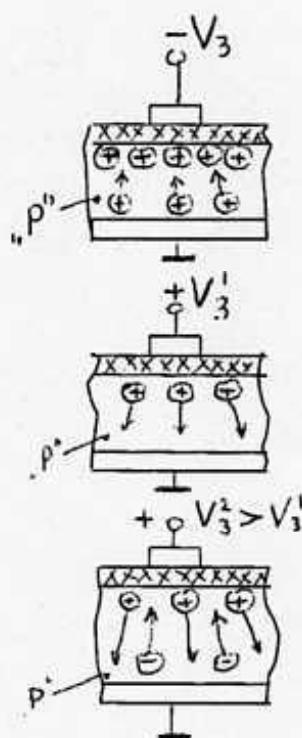
Структура имеет два вывода и является по существу МДП конденсатором, ёмкость которого зависит от напряжения между затвором и выводом подложки -  $V_3$ .

### Принцип действия МДП структуры.

Напряжение на затворе  $V_3$  создаёт в приповерхностном слое полупроводника электрическое поле, изменяющее концентрацию носителей в этом слое. В зависимости от величины и полярности приложенного напряжения в полупроводнике могут возникать три режима работы МДП структуры:

#### Режим обогащения.

При отрицательном напряжении на затворе ( $-V_3$ ) образующееся поле притягивает дополнительные дырки и в подзатворной области  $p > N_a$ . (концентрация основных носителей увеличивается и становится больше концентрации атомов акцепторов).



#### Режим обеднения.

При положительном напряжении на затворе ( $+V_3$ ) образующееся поле выталкивает дырки и в подзатворной области  $p < N_a$  (концентрация основных носителей уменьшается).

#### Режим инверсии.

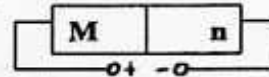
При большом положительном напряжении на затворе ( $+V_3^2 > +V_3^1$ ) поле выталкивает все основные носители - дырки, а в подзатворную область притягиваются неосновные (для полупроводника  $p$ -типа) носители - электроны. Когда концентрация неосновных носителей становится больше концентрации основных  $n > p$  - инверсия проводимости, т.е. проводимость меняется с преимущественно дырочной на преимущественно электронную.

## Переходы металл – полупроводник (переходы Шотки)

Математические соотношения для контактов металл-ПП получены немецким ученым Шотки, именем которого и назван потенциальный барьер между металлом и полупроводником.

Особенностью барьера Шотки, является отсутствие инжекции неосновных носителей.

При прямом смещении перехода **М-п** электроны из полупроводника переходят в металл, создавая ток во внешней цепи.



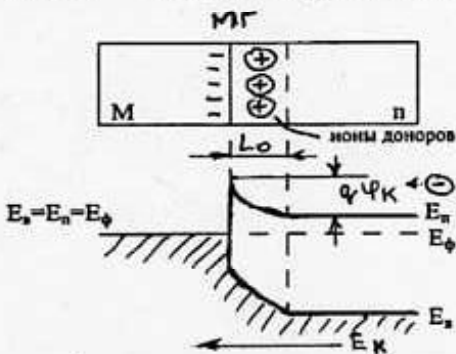
В диодах Шотки нет процесса рекомбинации носителей, что приводит к существенному расширению частотного диапазона применения диодов вплоть до субмиллиметровых волн.

Переходы **М-ПП** делятся на **выпрямляющие**, у которых обязательно наличие обеднённого слоя и на **не выпрямляющие** или **омические** – эти переходы применяются для вывода сигнала от полупроводника (т.е. для улучшения контакта и увеличения площади между выводом и полупроводником).

**Выпрямляющие переходы.** Условие образования обеднённого слоя: для полупроводников **п**-типа - работа выхода электрона из полупроводника меньше работы выхода из металла  $A_{пп} < A_m$  - при этом электроны переходят в металл, а для **р**-типа  $A_{пп} > A_m$ , где  $A$  – работа выхода

Переход похож на несимметричный **p<sup>+</sup>-n** переход.

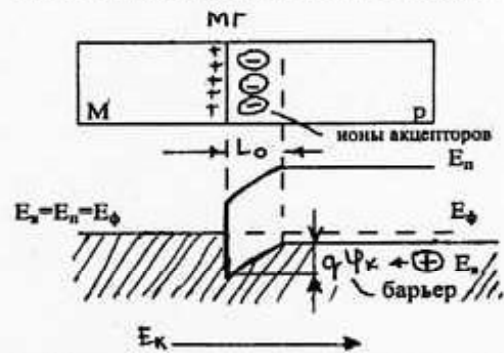
$A_{пп} < A_m$  - электроны переходят в металл



$\phi_k$  - (контактная разность потенциалов) - образуется между положительно заряженными ионами доноров и избыточным зарядом электронов в металле.

Переход похож на несимметричный **n<sup>+</sup>-p** переход.

$A_{пп} > A_m$  электроны переходят в полупроводник



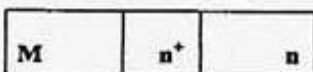
$\phi_k$  - образуется между положительно заряженной областью у поверхности металла и отрицательно заряженными ионами акцепторов.

Контактная разность потенциалов определяется разностью работ выхода электронов:  $\phi_k = (A_m - A_{пп})/q$ . Для переходов применяемых на практике  $\phi_k = 0,3 \div 0,9$  В. Приложенное к переходу прямое напряжение  $V_{пр}$  вычитается из напряжения контактной разности потенциалов  $\phi_k$ , а обратное напряжение  $V_{обр}$  складывается с напряжением  $\phi_k$ . При прямом смещении  $V_{пр}$  идёт инжекция только основных носителей из полупроводника.

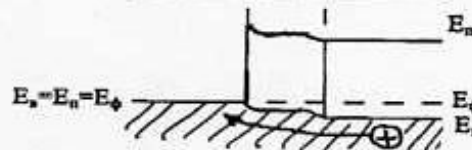
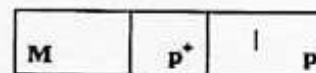
**Невыпрямляющие (омические) переходы.** Условия образования омического контакта:

- для полупроводников **п** типа  $A_{пп} > A_m$
- для полупроводников **р** типа  $A_{пп} < A_m$

При соблюдении этих условий усиливается концентрация основных носителей в области контакта металла и полупроводника. На практике, для уменьшения сопротивления контакта, часто используют переходы типов: **М - n<sup>+</sup>-n** и **М - p<sup>+</sup>-p**.



$A_m < A_{пп}$  - основные носители электроны



$A_m > A_{пп}$  - основные носители дырки