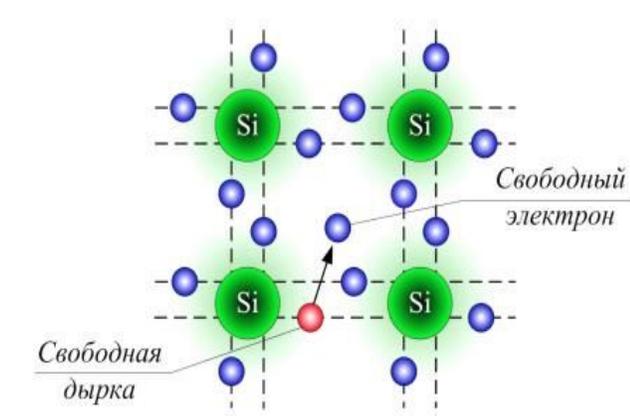
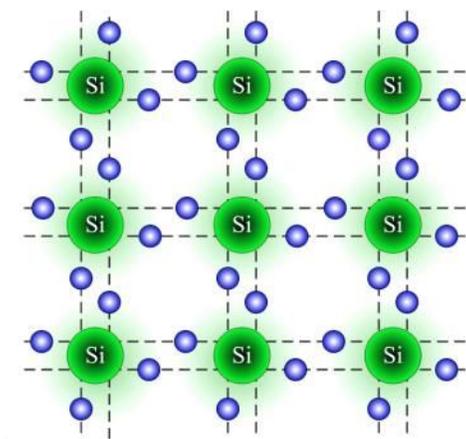
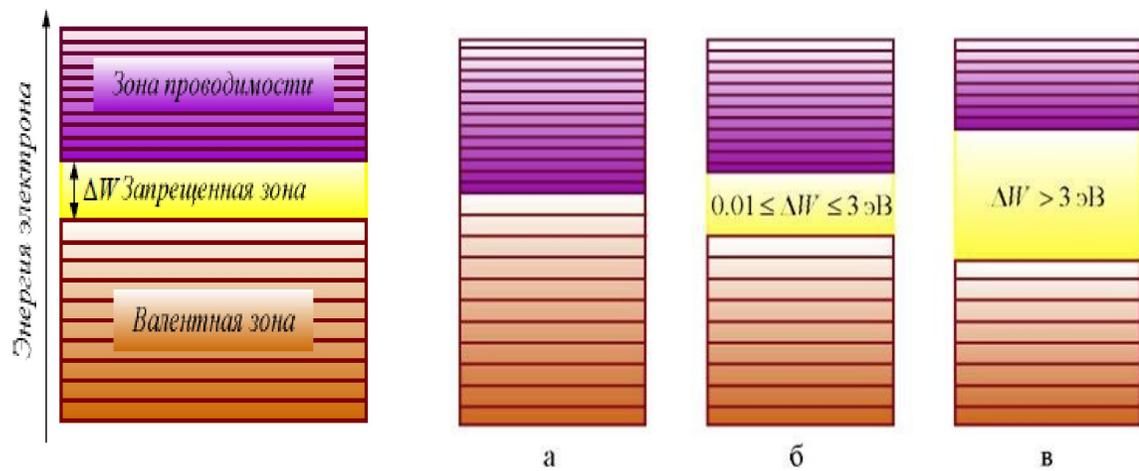


Раздел 1

Физические основы микроэлектроники

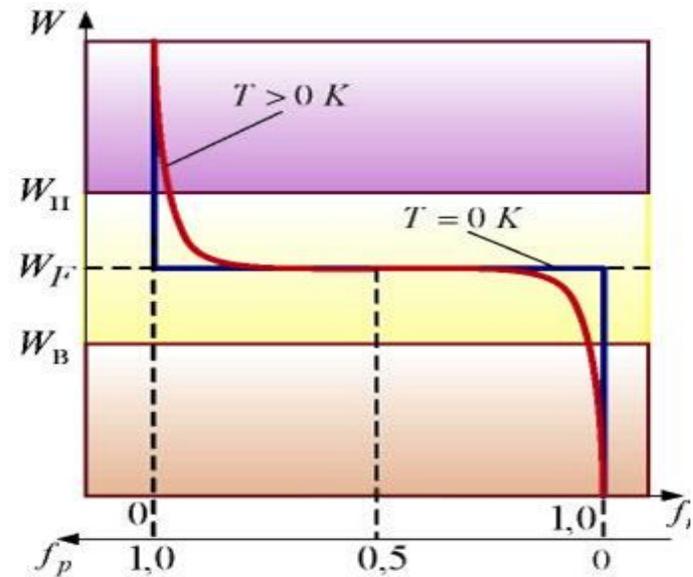
**Собственная и примесные электропроводимости
полупроводников**



Структура кристаллической Решётки чистого кремния

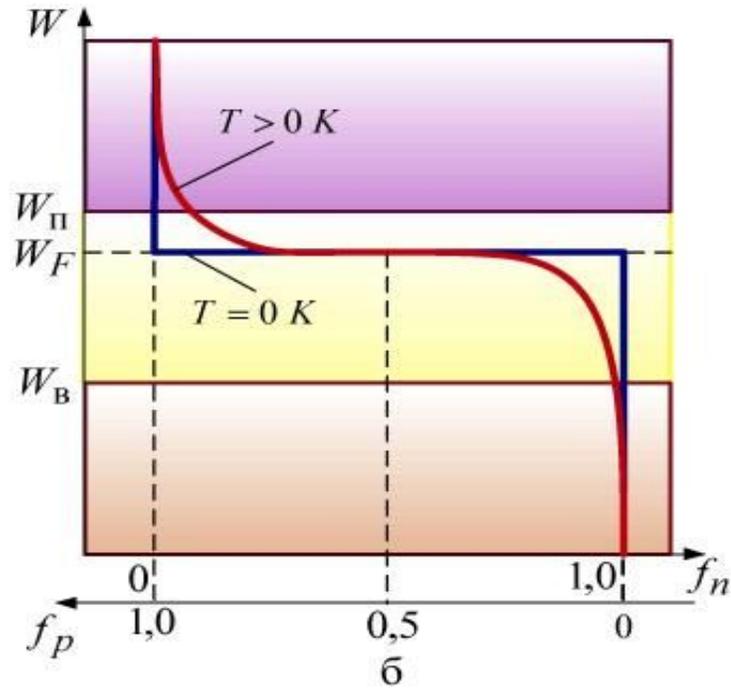
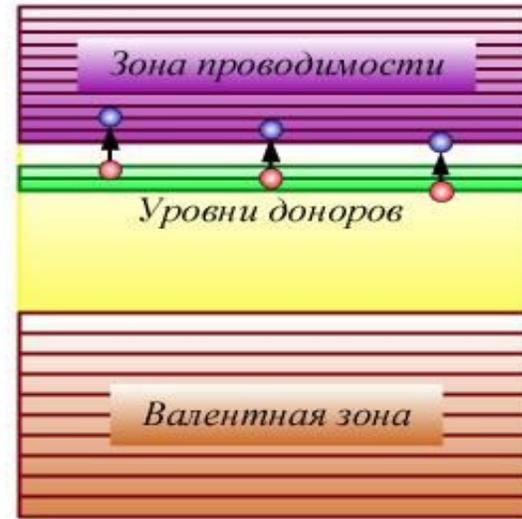
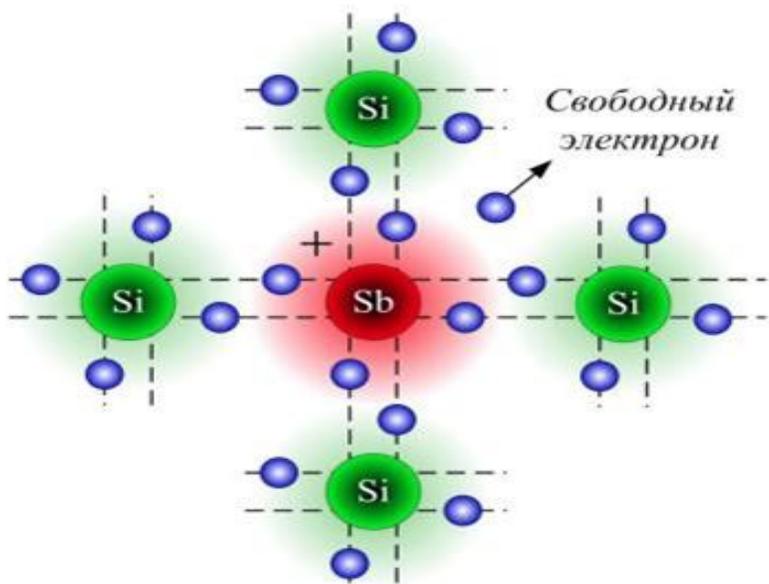
Термогенерация пар электрон (n_i) – дырка (p_i)

Распределение энергетических зонных энергетические диаграммы уровней электронов в твёрдых телах и диэлектриков (в)



$$f_n(W) = \frac{1}{1 + e^{\frac{W - W_F}{kT}}}$$

$$f_p(W) = 1 - f_n(W) = \frac{1}{1 + e^{\frac{W_F - W}{kT}}}$$

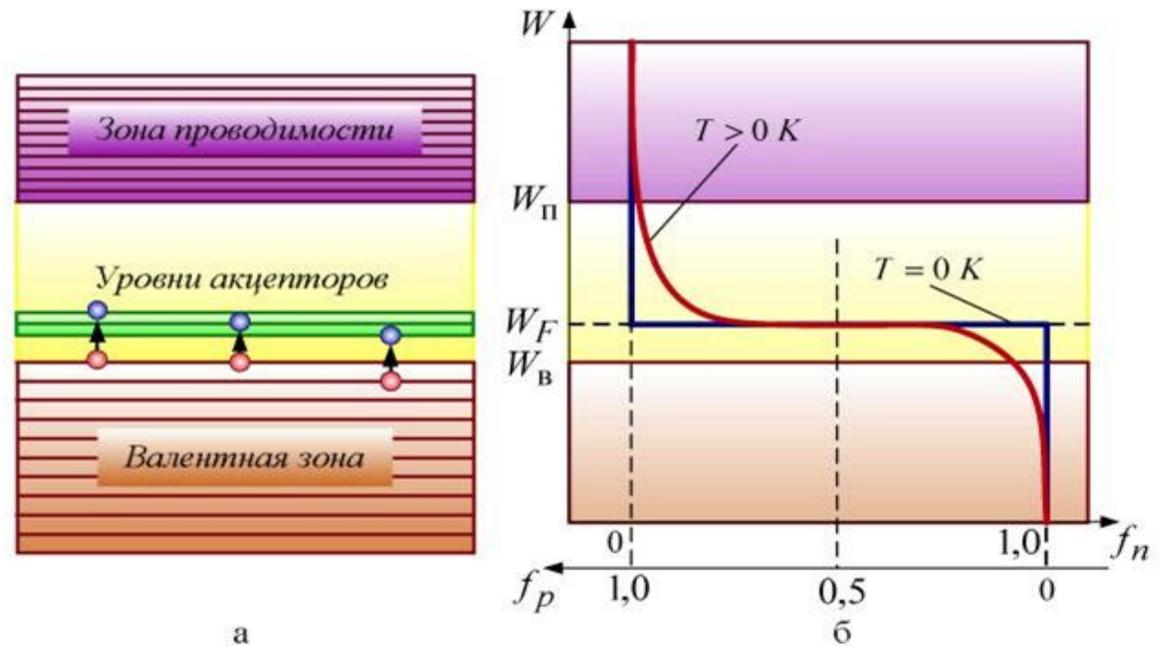
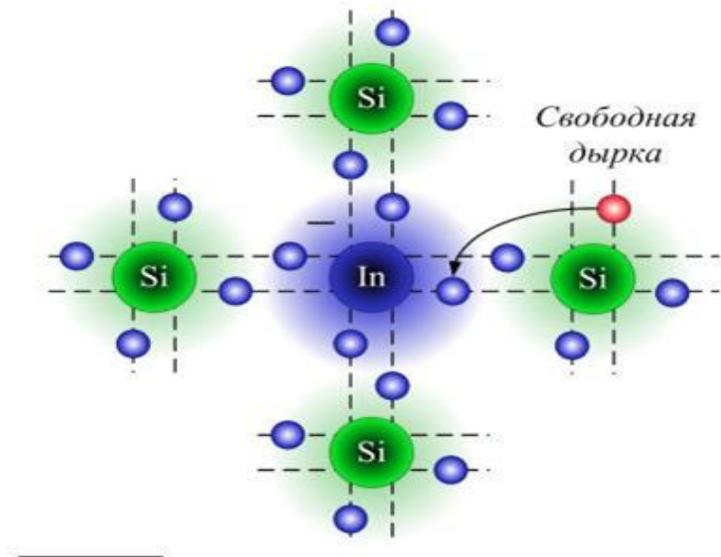


Структура полупроводника с донорными примесями (элемент 5-ой группы Сурьма).

Зонная диаграмма (а) и распределение электронов по энергетическим уровням (б) полупроводника **n** типа.

- $n_n = n_d + n_i$ - основные подвижные носители заряда (электроны)
- $p_n = p_i$ - не основные подвижные носители заряда (дырки)
- $n_d = +N_D$ - неподвижный положительно заряженный ион донора.

$$n_n \gg p_n$$



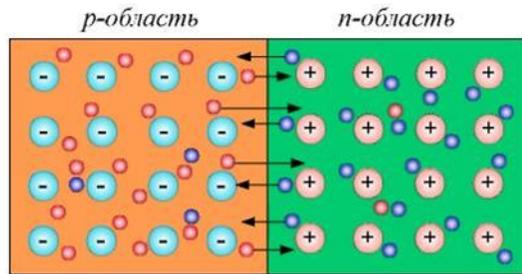
Структура полупроводника с акцепторными примесями (с элементами 3-й группы - индий).

Зонная диаграмма (а) и распределение электронов по энергетическим уровням (б) полупроводника **р- типа**.

- $p_p = p_a + p_i$ - основные подвижные носители заряда (дырки)
- $n_p = n_i$ - неосновные подвижные носители заряда (электроны)
- $n_d = -Na$ - неподвижный отрицательно заряженный ион акцептора.

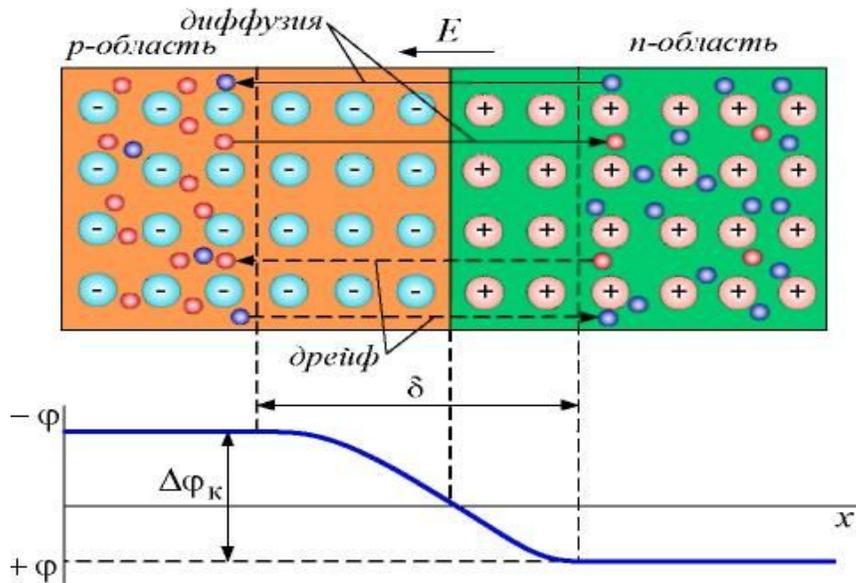
$$p_p \gg n_p$$

Электронно-дырочный р-п переход и основные его свойства.

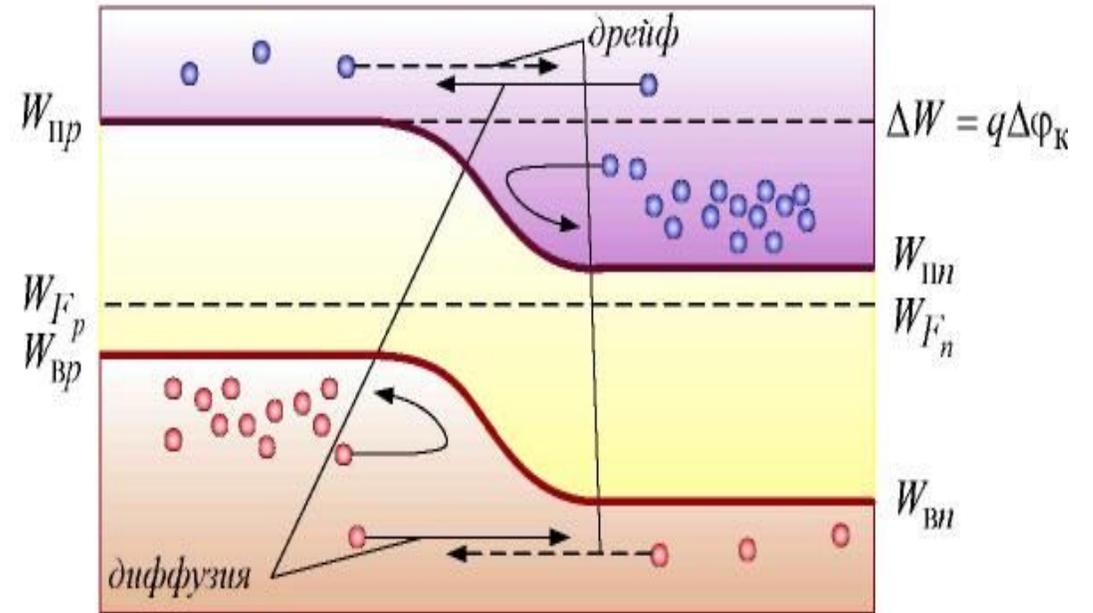


Начальная стадия образования р-п перехода

⊖ - ион акцепторной примеси ⊕ - ион донорной примеси



р-п переход при отсутствии внешнего напряжения



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

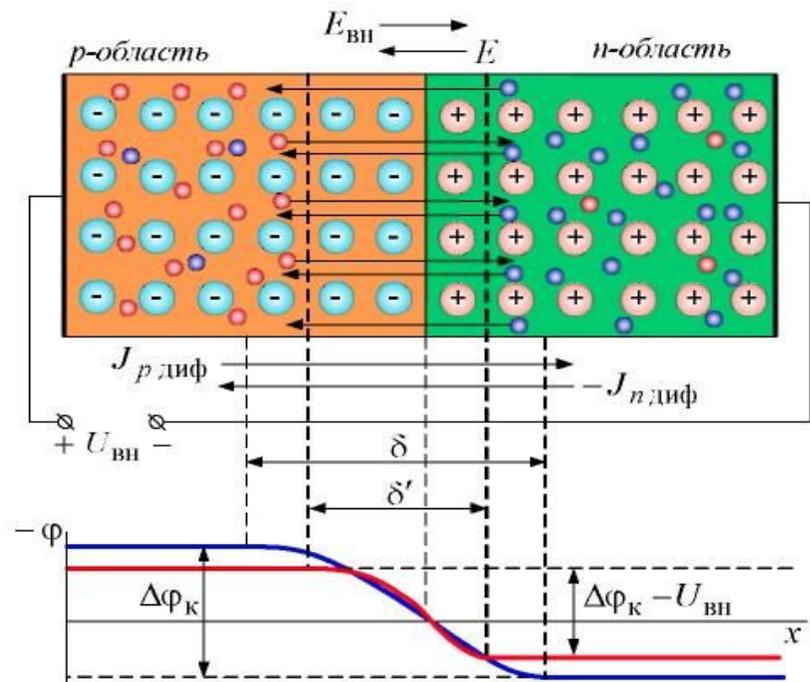
Наличие градиента концентраций основных носителей на границе раздела обуславливает появление

$I_{диф} = (I_{р\ диф} + I_{n\ диф})$. При этом на границе раздела появляется не скомпенсированный объёмный заряд (+) в **n** области (-) в **p** области и запирающее электрическое поле E_z , которое в свою очередь вызывает дрейфовый ток неосновных носителей

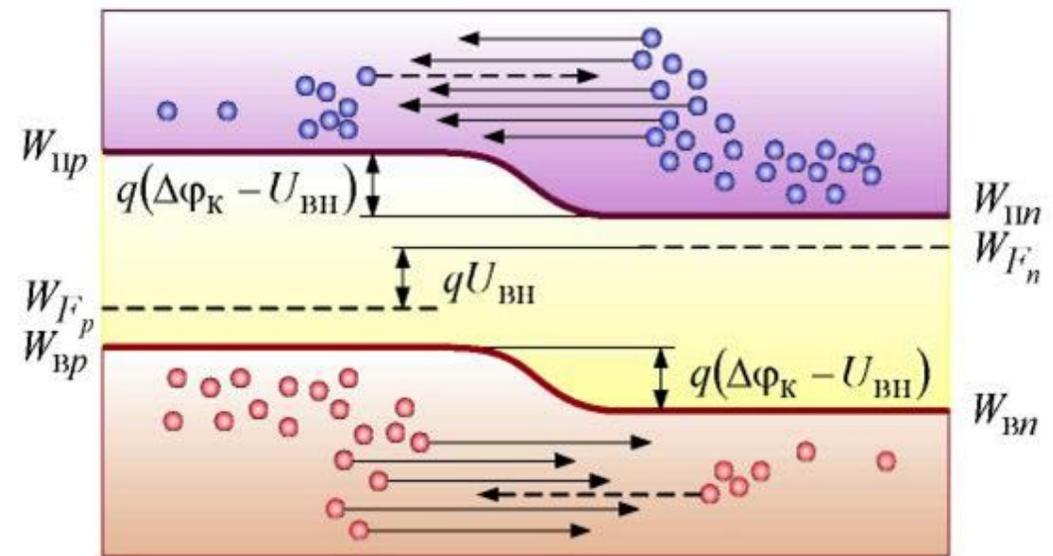
$I_{др} = (I_{р\ др} + I_{n\ др})$, направленный встречно $I_{диф}$ В результате чего устанавливается динамическое равновесие когда

$I_{рп} = I_{диф} - I_{др} = 0$, характеризуемое определённой величиной $E_z; \Delta\phi_k; \delta$.

Прямое включение



Прямое включение p-n перехода.



Зонная диаграмма прямого смещения p-n перехода, иллюстрирующая дисбаланс токов.

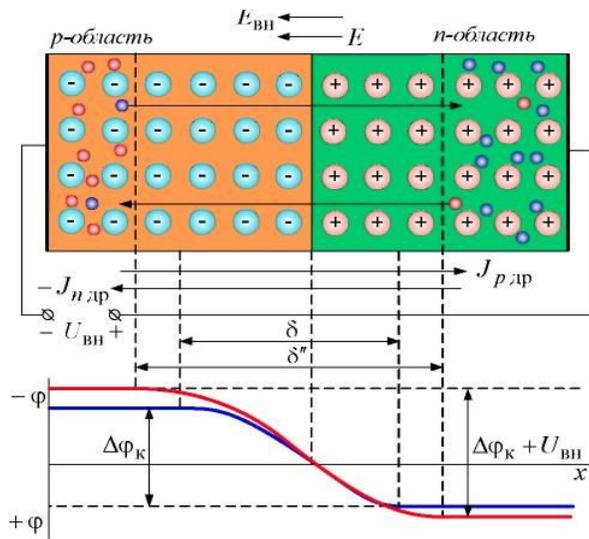
При $U_{вн} > 0$ $\downarrow E_{пр} = E_z - E_{вн}$; $\downarrow \phi_K = \Delta \phi_K - U_{вн}$; $\downarrow \delta'$; $\uparrow I_{диф}$; $\downarrow I_{др} \approx I_0$.

$$I_{pn} = I_{диф} - I_{др} \approx I_{np} = I_0 e^{\frac{U_{пр}}{\phi_T}}, \text{ т.к. } I_{др} \approx 0$$

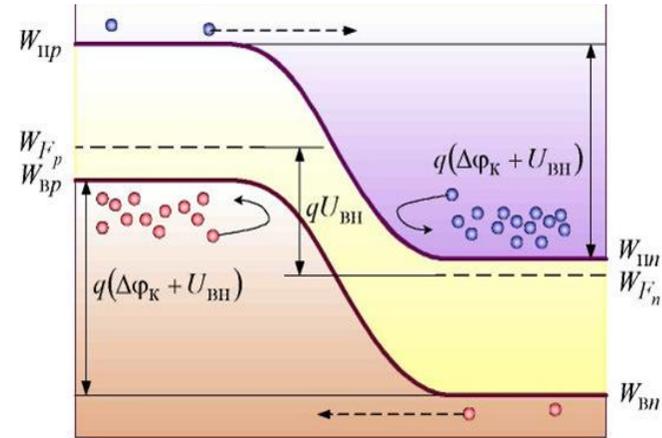
где: I_0 – начальный ток диффузии при $U_{пр} = 0$

$$\phi_T = \frac{kT}{q} \approx 0,026 \text{ В} - \text{температурный потенциал для Si при } t = 20^\circ \text{C}$$

Обратное включение



Обратное смещение p-n перехода.



Зонная диаграмма обратного смещения p-n перехода, иллюстрирующая дисбаланс токов.

При $U_{вн} < 0$ $\uparrow E_{пр} = E_z + E_{вн}$; $\uparrow \varphi_k = \Delta \varphi_k + U_{вн}$; $\uparrow \delta'$; $\downarrow I_{диф} \approx 0$; $\uparrow I_{др} \approx I_0$.

$$I_{pn} = (I_{p\text{ диф}} + I_{n\text{ диф}}) - (I_{p\text{ др}} + I_{n\text{ др}}) = -(I_{p\text{ др}} + I_{n\text{ др}}) = -I_0,$$

т.к. $I_{диф} \approx 0$, а ток I_0 мал (ед. мА) и называется тепловым током.

$$I_{пер} = I_{диф} - I_{др} = I_0 \left(e^{\frac{\pm U_{вн.}}{\varphi_T}} - 1 \right)$$

Где: $I_{диф} = I_{n\ диф} + I_{p\ диф}$;

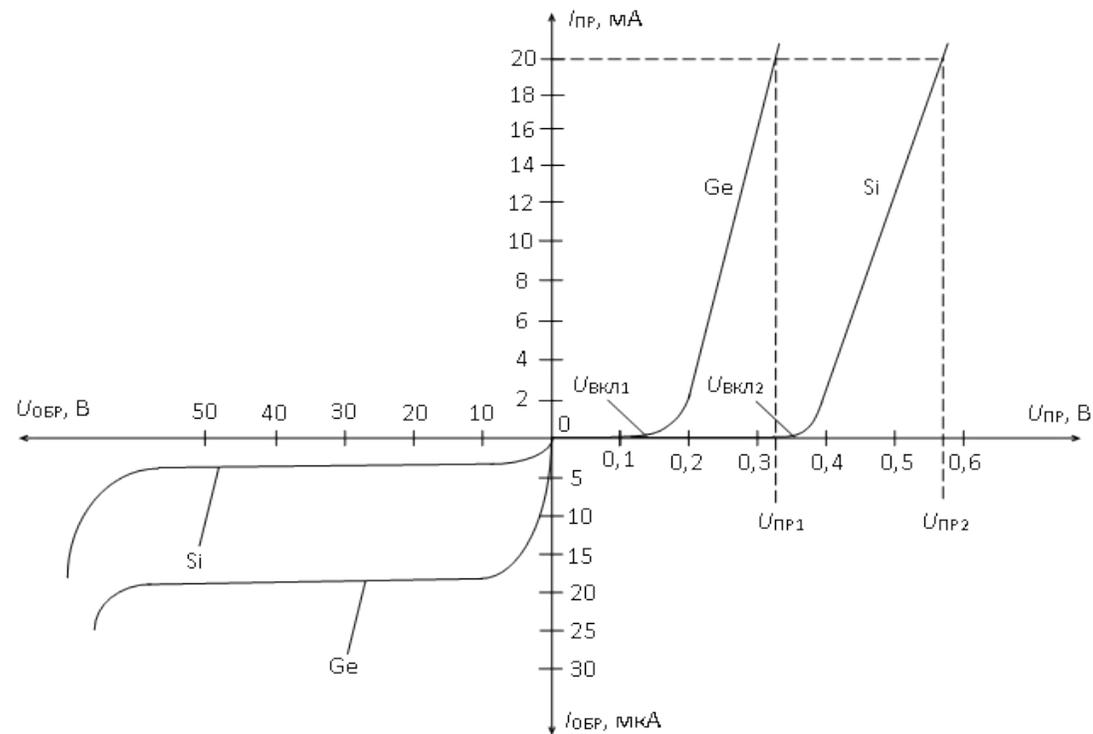
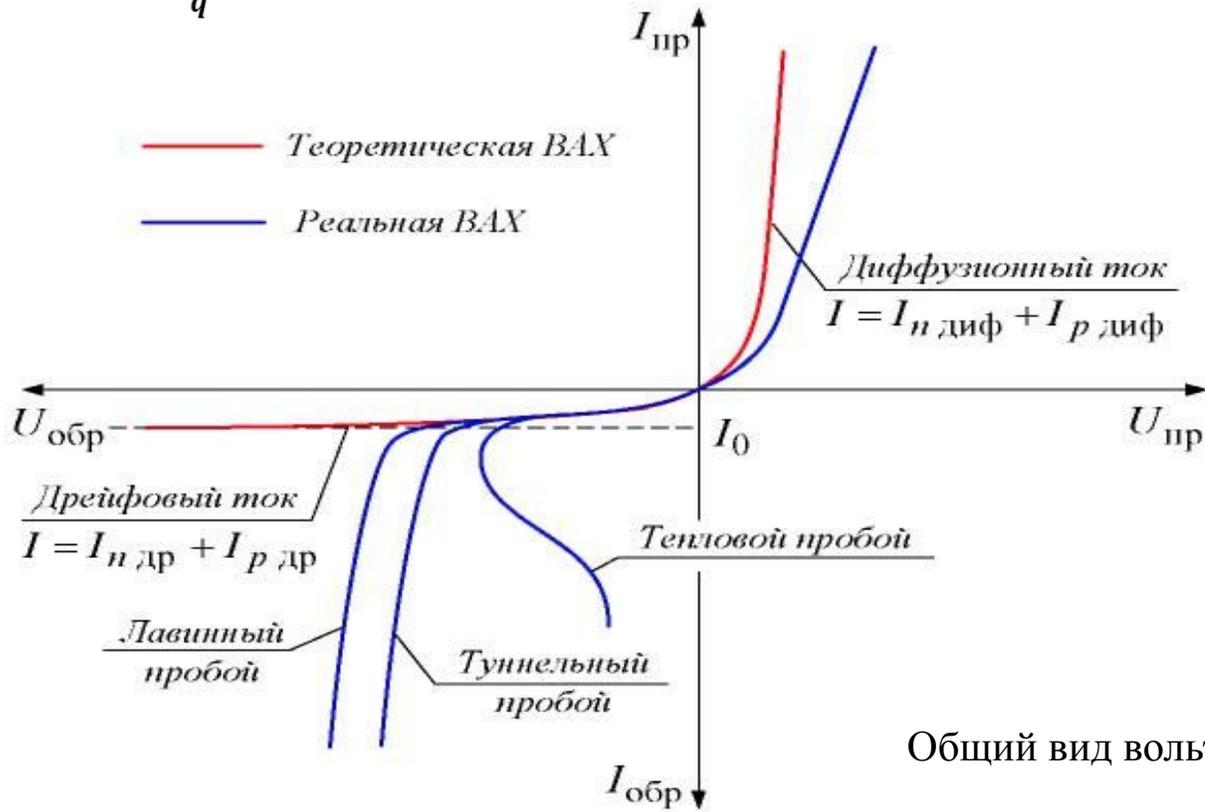
$I_{др} = I_{n\ др} + I_{p\ др}$.

При $U_{вн.} = +U_{пр} > \varphi_T$; $I_{пер} = I_{пр} = I_0 e^{\frac{U_{пр}}{\varphi_T}}$, т.к. $e^{\frac{U_{пр}}{\varphi_T}} \gg 1$;

При $U_{вн.} = -U_{обр} > \varphi_T$; $I_{пер} = I_{обр} = I_0 \left(e^{-\frac{U_{обр}}{\varphi_T}} - 1 \right) = -I_0$, т.к. $e^{-\frac{U_{обр}}{\varphi_T}} \ll 1$

где: I_0 – начальный тепловой ток при $U_{пр} = 0$, который определяется концентрацией неосновных носителей;

$\varphi_T = \frac{kT}{q}$ - температурный потенциал.



Общий вид вольт-амперных характеристик «р-п» перехода .

Основные свойства р-п перехода.

№	Свойство « р-п» перехода	Физическая сущность	Где используется
1	Вентильное свойство (односторонняя проводимость)	$I_{пр} \gg I_{обр}$, т.к. $I_{пр}$ - это ток основных носителей, а $I_{обр}$ –неосновных.	У подавляющего большинства ПП и интегральных микросхемах
2	Возможность управлять величиной тока через переход, изменяя $+U_{пр}$		У приборов обладающих усилительными свойствами: БТ; ОПТ; ПТ с управляющим « р-п» переходом; и т.д.
3	Электрический лавинный и тунельный пробой.		У стабилитронов; ОПТ; динисторов ; тиристоров и т.д.
4	$p-n$ -переход как конденсатор переменной емкости, регулируемой напряжением $C=f(U_{вн})$.		У варикапов; ПЗС; в различных радиотехнических устройствах .
5	Тепловой и поверхностный пробой « р-п» перехода. Это необратимые пробой.	При $P_{пер} = I_{пер} * U_{вн} > P_{макс. доп}$ переход перегревается и разрушается кристаллическая решётка структуры.	При программировании ПЗУ; ПЛМ и многослойных ИМС для соединения различных элементов.
6	зависимость $i_0 = f(t^0 c)$. это свойство отрицательно влияет на температурную стабильность ПП приоров.		Используется в некоторых датчиках температуры.

