

ЭЛЕКТРОНИКА

Лектор:

к.ф.-м.н. Алимгазинова Назгуль Шакаримовна

ПОЛУПРОВОДНИКИ

ПРОВОДНИК (МЕТАЛЛ) – имеет большое число свободных электронов, которые и способствуют возникновению электрического тока (*серебро, медь, алюминий*). Обладают малым сопротивлением.

ПОЛУПРОВОДНИК – содержит мало свободных электронов, но их количество может возрастать с увеличением температуры (облучением или введением примесей), что приведет к увеличению проводимости (*германий, кремний*).

ДИЭЛЕКТРИК (ИЗОЛЯТОР) – материал, имеющий малое количество свободных электронов. Изолятор препятствует протеканию электрического тока и имеет большое сопротивление (*стекло, резина, сухое дерево*).



Отличаются

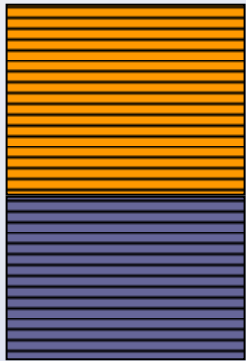
- типом химической связи,
- зонной диаграммой,
- величиной удельного сопротивления

Полупроводники:

- химические элементы: бор (B), угле-род (C), кремний (Si), фосфор (P), сера (S), германий (Ge), мышьяк (As), селен (Se), олово (Sn), сурьма (Sb), теллур (Te), йод (I);
- химические соединения типа: $A^I B^{VII}$, $A^{III} B^V$, $A^{IV} B^{IV}$, $A^I B^{VI}$, $A^{IV} B^{VI}$, (GaAs, GeSi, CuO, PbS и др.);
- большинство при-родных химических соединений — минералов, число которых со-ставляет около 2 тыс.,
- многие органические вещества.

ПРОВОДНИК

$$\sigma_{\text{проводник}} = 10^4 \dots 10^8 \text{ См/м}$$



$$\Delta W = 0$$

ПОЛУПРОВОДНИК

$$\sigma_{\text{полупроводник}} = 10^2 \dots 10^{-8} \text{ См/м}$$

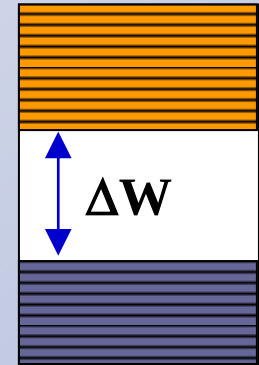


ширина запрещенной
зоны

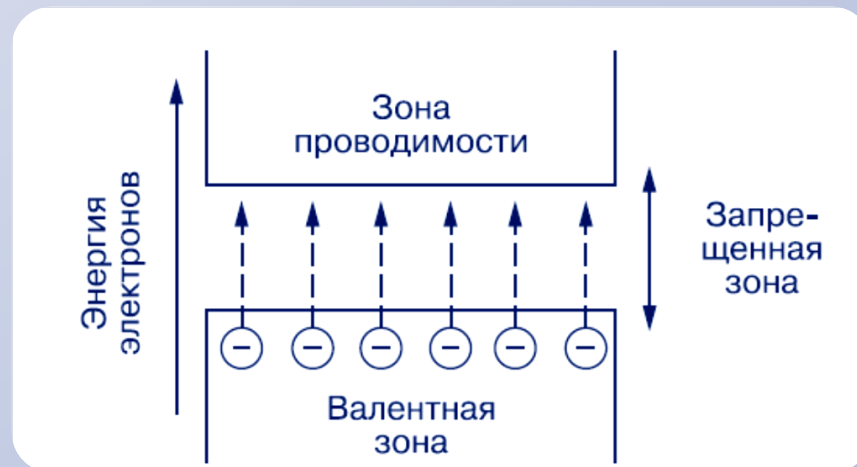
$$\Delta W < 3 \text{ эВ}$$

ДИЭЛЕКТРИК

$$\sigma_{\text{диэлектрик}} < 10^{-8} \text{ См/м}$$



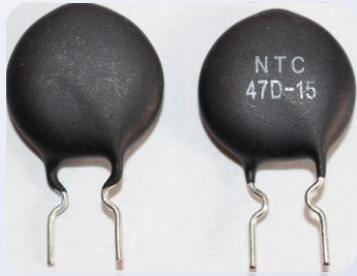
$$\Delta W > 3 \text{ эВ}$$



Полупроводниковые приборы

используются:

- для выпрямления и усиления электрических сигналов
- превращения различных видов энергии в электрическую.



Терморезисторы — сопротивления, величина которых изменяется от температуры. Используются как датчики температуры в различных схемах автоматики.

Термоэлементы — устройства, с помощью которых можно преобразовывать энергию электрического поля в тепловую энергию, и наоборот — тепловую в электрическую.



Фотоэлементы — элементы, служащие для преобразования световой энергии в электрическую. Используются в солнечных батареях, вентильных элементах. В основе фотоэлементов лежит **p—n-переход**

Фоторезисторы — элементы, сопротивления которых зависят от интенсивности светового потока, действующего на него.



Варикапы — элементы, ёмкость которых зависит от приложенного напряжения.

Варисторы — элементы, сопротивление которых зависит от приложенного напряжения.



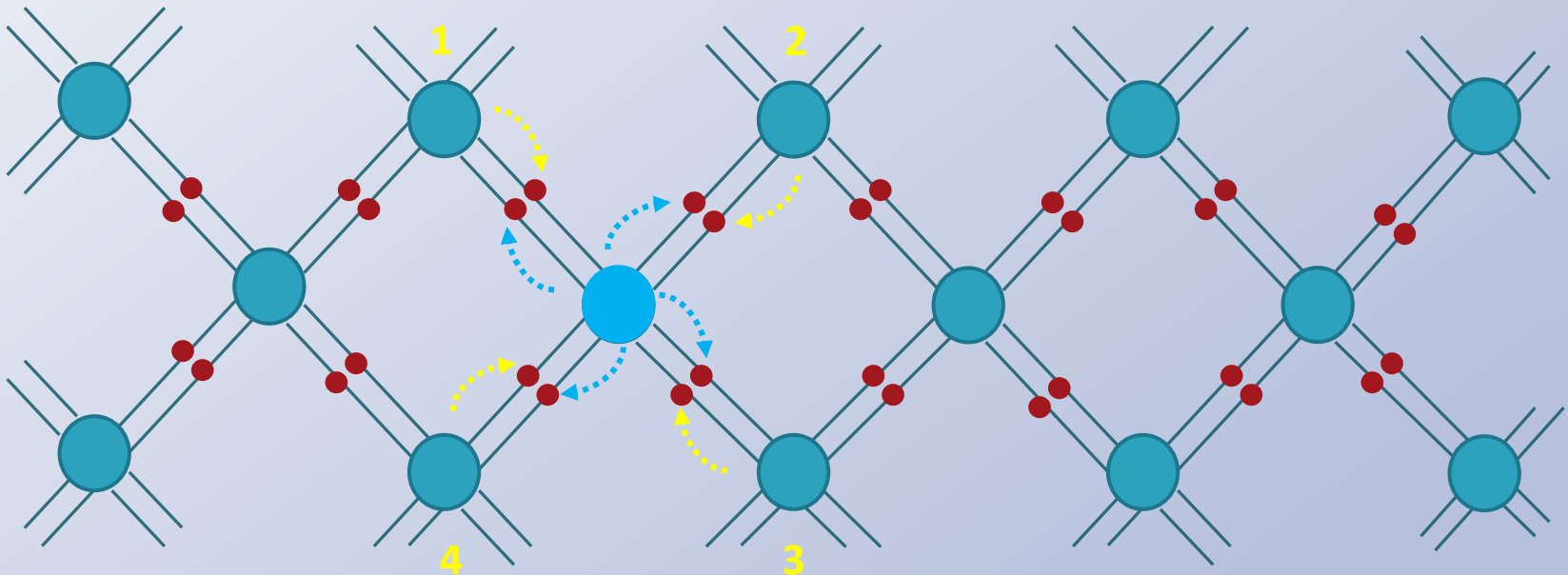
Ковалентная связь в полупроводниках



Атомы полупроводника

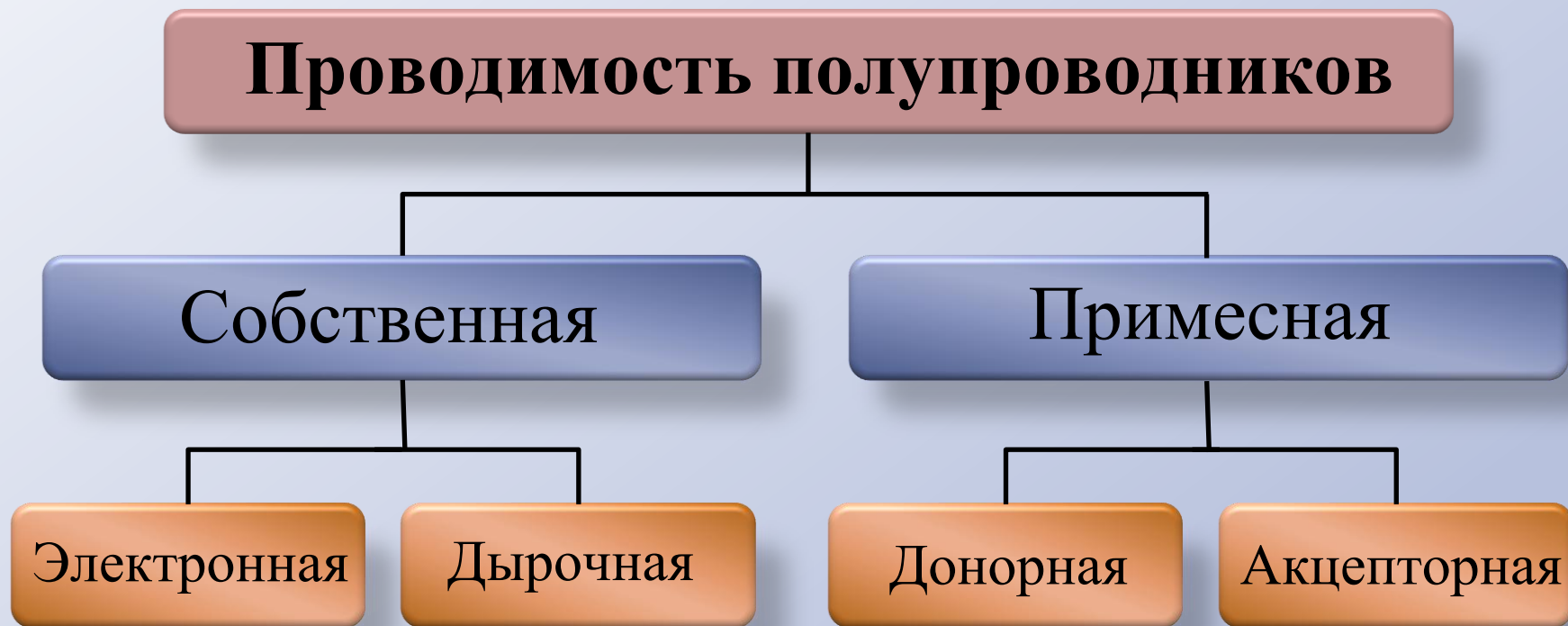


электроны



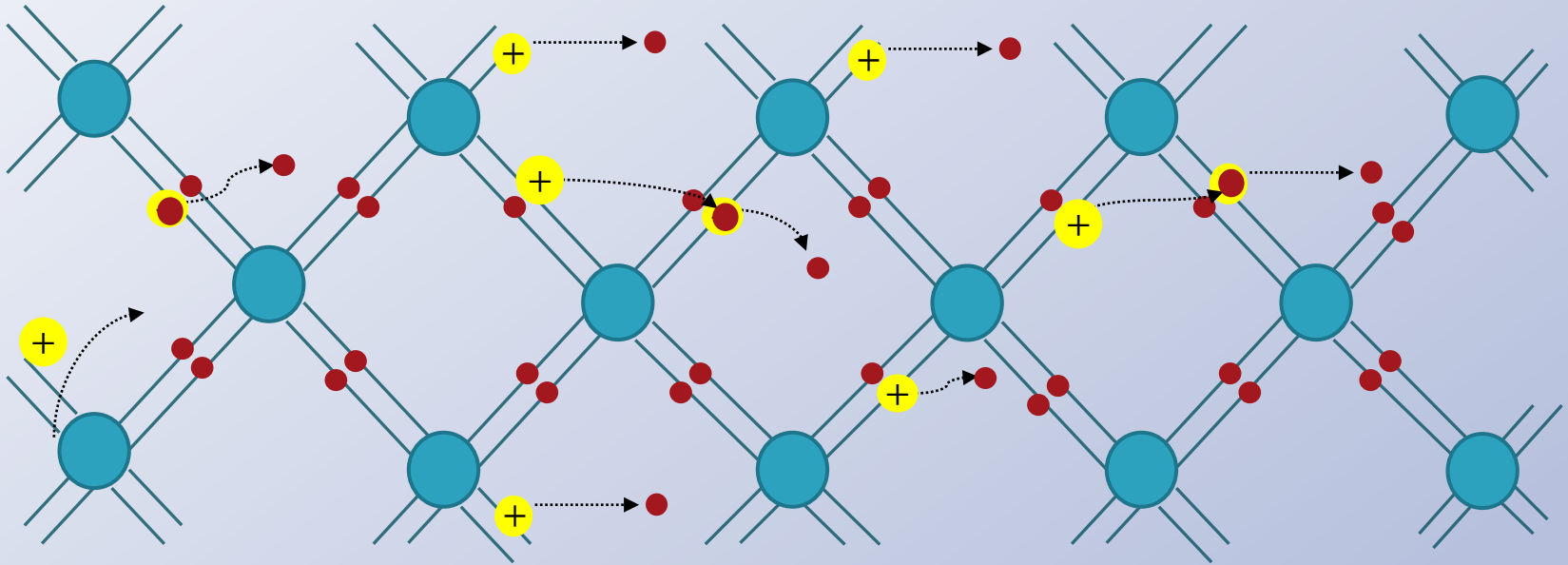
- Чистые полупроводники в полупроводниковых приборах не используются, так как обладают малой проводимостью и не обеспечивают односторонней проводимости.
- Полупроводник можно сделать хорошим проводником благодаря легированию (введению примеси).

Электропроводность полупроводников



СОБСТВЕННАЯ ПРОВОДИМОСТЬ

Если **электрон** «покидает» валентную зону, то образуется свободный энергетический уровень, как бы вакантное место (состояние), которое назвали **«дыркой»**.



В полупроводниках имеются носители зарядов двух типов: **электроны** и **дырки**.

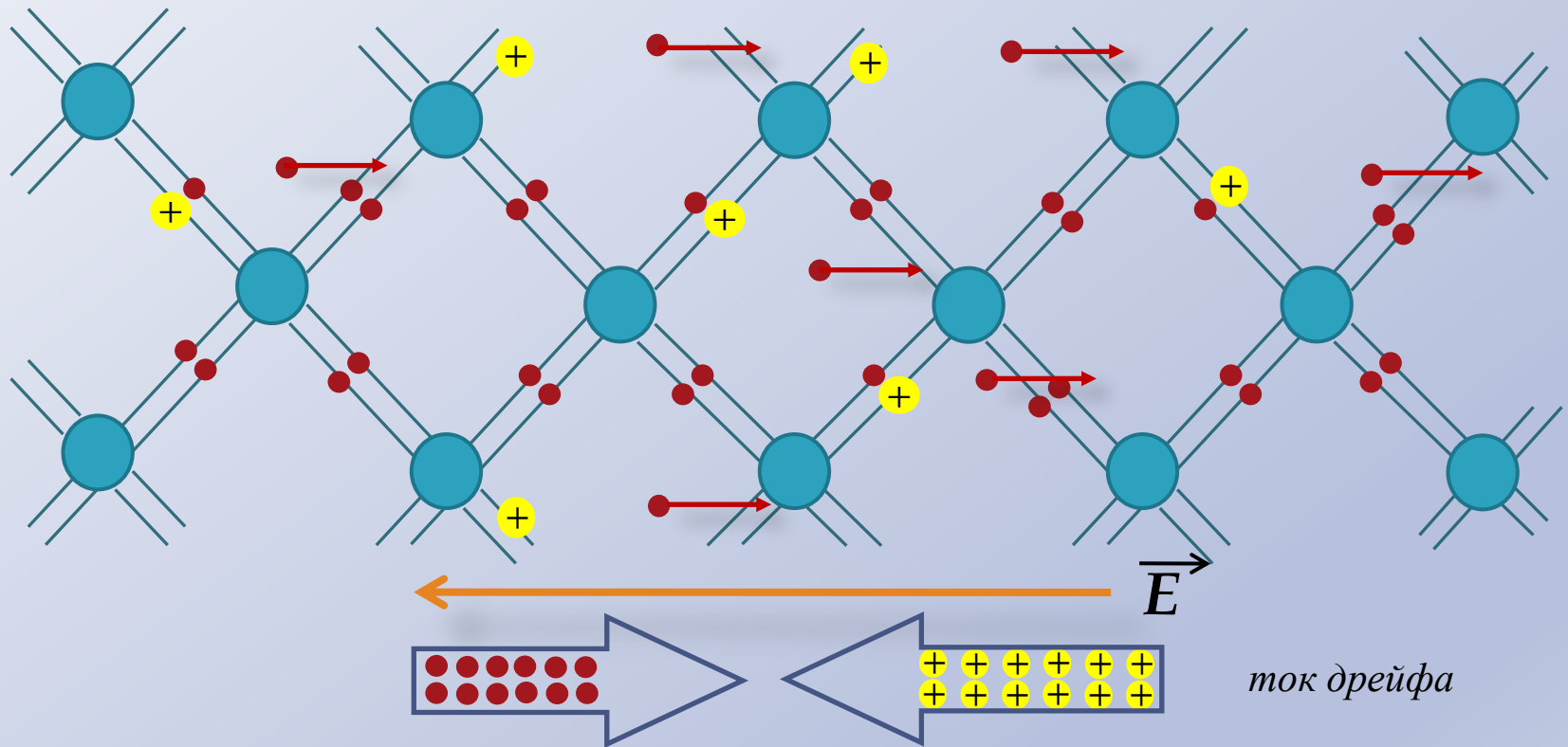
Процесс образования пары электрон – «дырка» называют **генерацией** зарядов, обратный процесс – **рекомбинацией**.

Движение зарядов, обусловленное тепловой энергией, называют **диффузией**. Средний промежуток времени между генерацией и рекомбинацией характеризует так называемое **время жизни носителей заряда**, а расстояние, которое успевает преодолеть заряд за это время, называется **диффузионной длиной**.

СОБСТВЕННАЯ ПРОВОДИМОСТЬ

Электропроводность, обусловленная движением электронов называется электронной, а движением дырок – дырочной.

Если $\vec{E} = 0$, то перемещение дырок беспорядочно, поэтому электрического тока нет.



Если $\vec{E} \neq 0$, то движение дырок становится упорядоченным, и к электрическому току, образованному движением электронов, добавляется ток, связанный с перемещением дырок.

СОБСТВЕННАЯ ПРОВОДИМОСТЬ

Плотности токов

$$\begin{aligned}j_n &= q_n \cdot n \cdot \mu_n \cdot E, \\j_p &= q_p \cdot p \cdot \mu_p \cdot E,\end{aligned}$$

j_n, j_p – плотности токов, созданных соответственно электронами и дырками;

q_n, q_p – заряды электрона и дырки;

n, p – удельная концентрация зарядов (количество в единице объема);

μ_n, μ_p – подвижность зарядов, т.е. средняя скорость зарядов под действием электрического поля с напряжённостью поля $E = 1$ В/см.

Результирующая плотность дрейфового тока

$$j_{\text{дрейф}} = E(q_n \cdot n \cdot \mu_n + q_p \cdot p \cdot \mu_p),$$

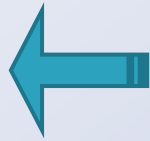
удельная электропроводность полупроводника

$$\sigma = j_{\text{дрейф}} / E = (q_n \cdot n \cdot \mu_n + q_p \cdot p \cdot \mu_p)$$

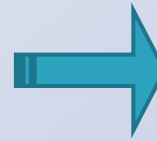
зависит от концентрации зарядов и их подвижности.

ПРИМЕСНАЯ ПРОВОДИМОСТЬ

ДОНОРНЫЕ



ПРИМЕСИ



АКЦЕПТОРНЫЕ

Примеси, легко отдающие электроны, увеличивающие количество свободных электронов.

Атом **мышьяка** имеет 5 валентных электронов, 4 из которых участвуют в образовании парноэлектронных связей, а пятый становится свободным.

Полупроводники, содержащие донорные примеси, называются полупроводниками ***n – типа*** от слова ***negative*** – отрицательный

Примеси, легко принимающие электроны, увеличивающие количество дырок.

Атом **индия** имеет 3 валентных электрона, которые участвуют в образовании парноэлектронных связей, а для образования четвертой электрона недостает, в результате образуется дырка.

Полупроводники, содержащие акцепторные примеси, называются полупроводниками ***p – типа*** от слова ***positive*** – положительный

ПРИМЕСНАЯ ПРОВОДИМОСТЬ

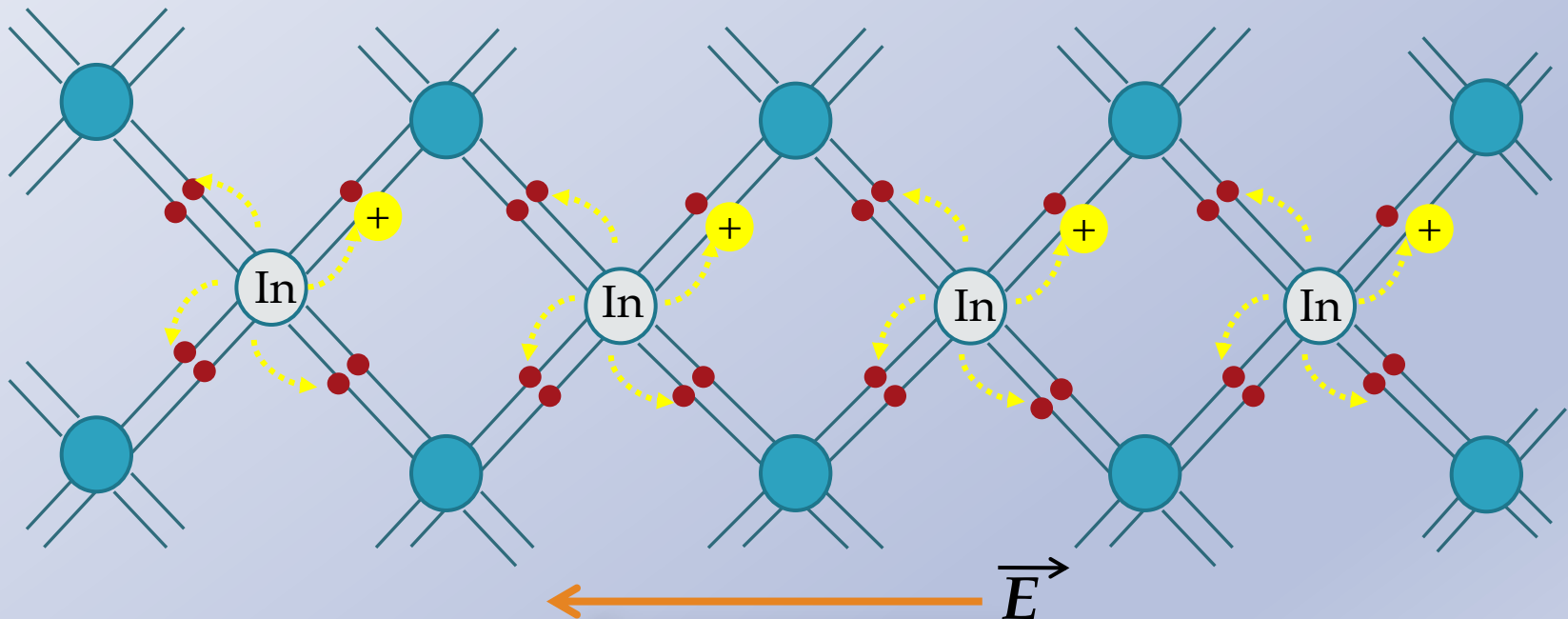
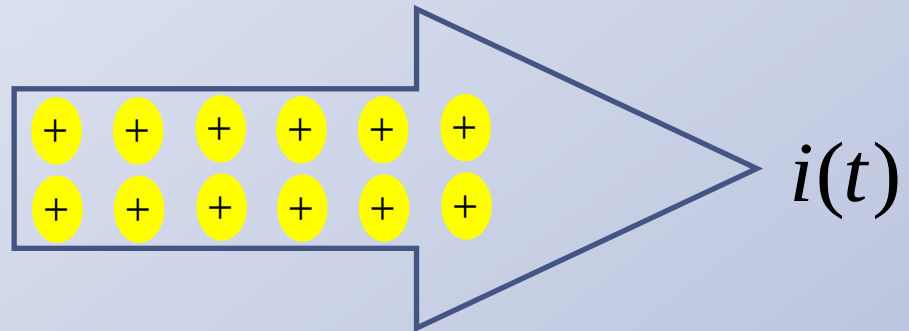
Полупроводники p-типа

Основные носители: **дырки**

Неосновные носители: **электроны**

Примеси называются **акцепторы**

- атом бора (B)
- атом индия (In)
- атом алюминия (Al)



ПРИМЕСНАЯ ПРОВОДИМОСТЬ

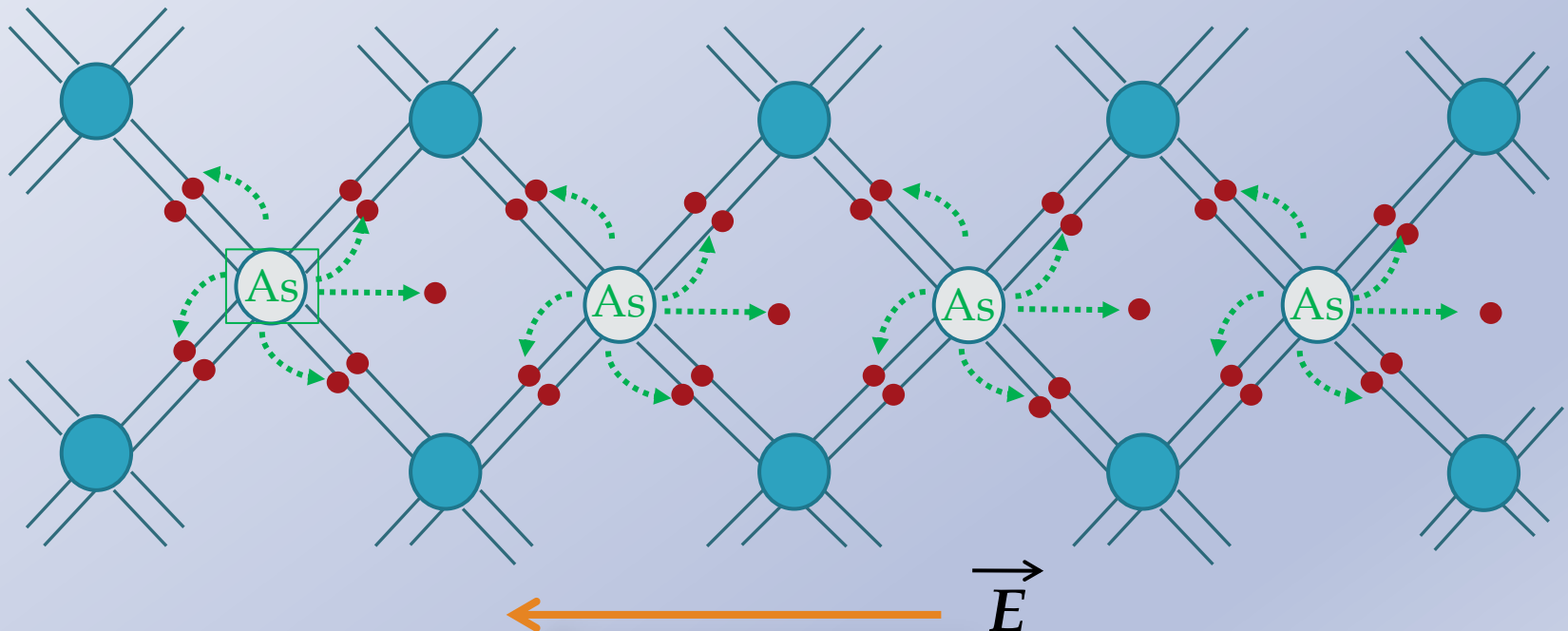
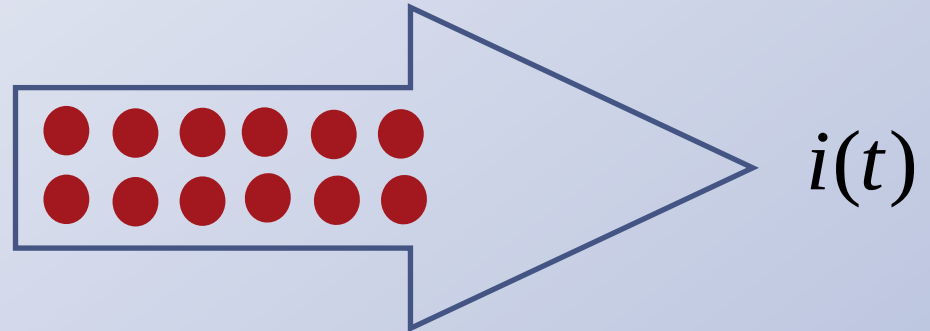
Полупроводники n-типа

Основные носители: **электроны**

Неосновные носители: **дырки**

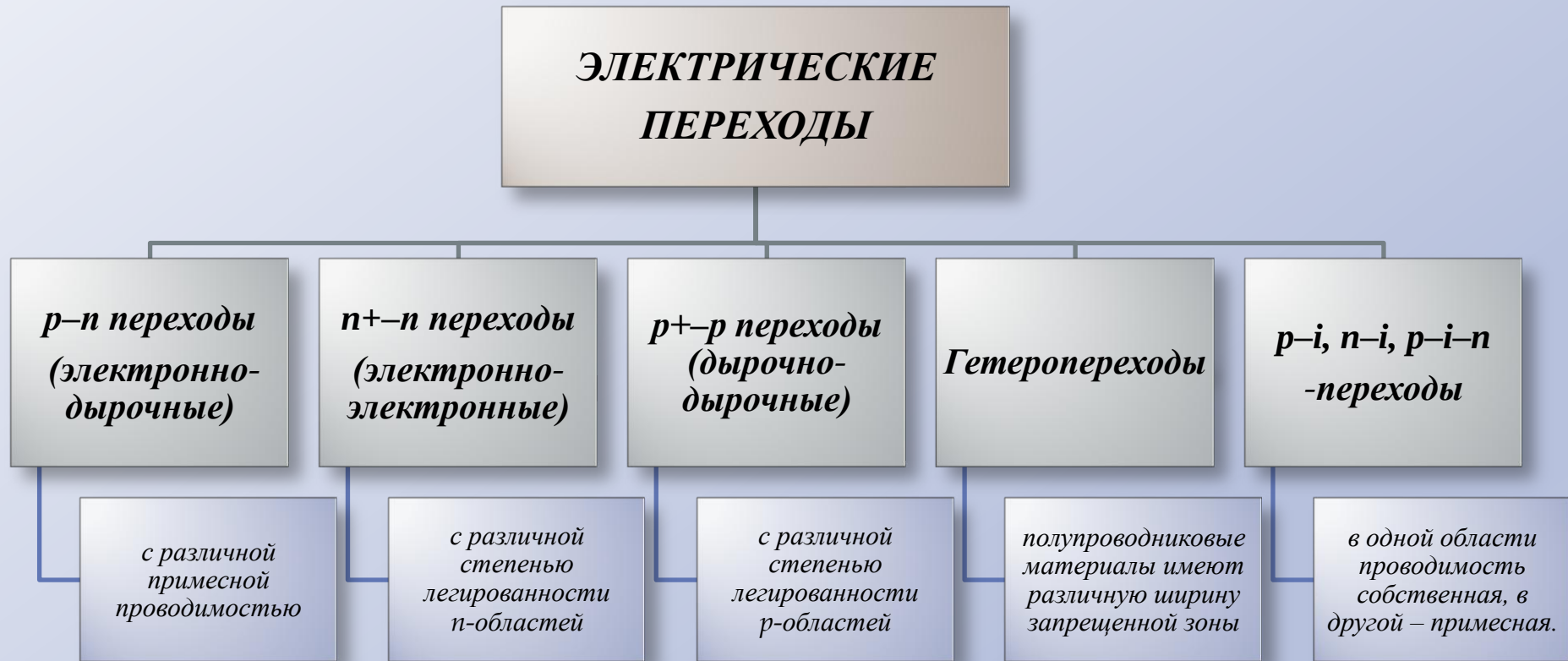
Примеси называются **донорами**

- атом мышьяка As
- атом фосфора P
- атом сурьмы Sb



ЭЛЕКТРИЧЕСКИЙ ПЕРЕХОД

Электрический переход – это граничный слой между двумя областями материалов, физические характеристики которых различаются.



ЭЛЕКТРОННО-ДЫРОЧНЫЙ ПЕРЕХОД

р-п переход

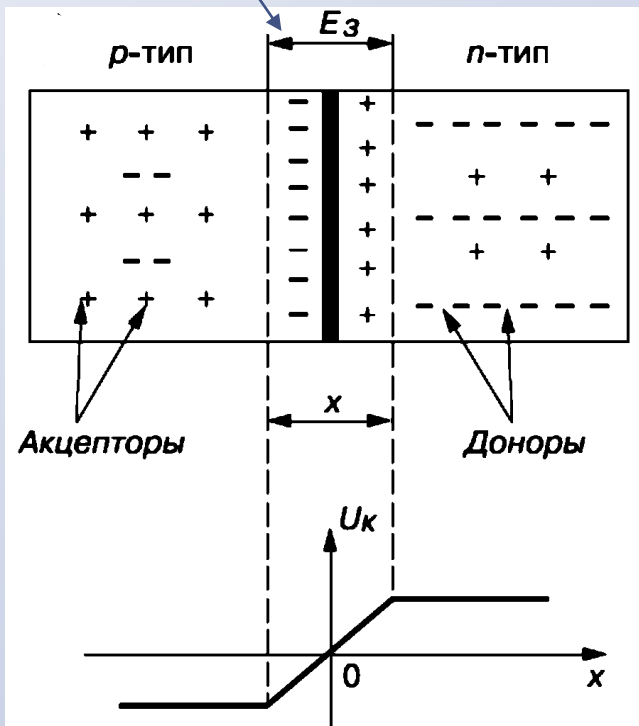
симметричный

$p_p \sim n_n$ - концентрации зарядов одинаковы

несимметричный

$n_n \gg p_p$ или $p_p \gg n_n$
(в 100 – 1000 раз)

запирающий
(барьерный) слой



Потенциальная энергия поля

$$W_0 = q_e (\varphi_a - \varphi_b) = q_e U_k$$

$$q_e = -1.602 \cdot 10^{-19} \text{ Кл}$$

Контактная разность потенциалов

$$U_k = Vt \ln \left(N_a \cdot \frac{N_d}{n_i} \right),$$

$$Vt = \frac{kT}{q_e} - \text{температурный потенциал,}$$

k – постоянная Больцмана,

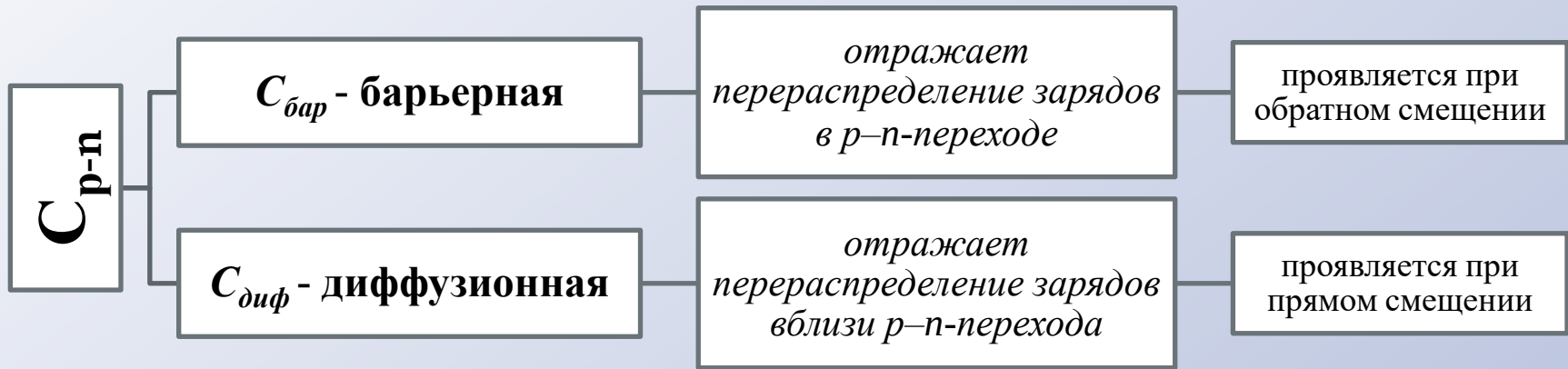
T – абсолютная температура, $^{\circ}\text{K}$,

N_a и N_d – концентрации акцепторной и донорной примесей,

n_i – собственная концентрация электронов.

для германия (Ge) $U_k = 0,3\text{В}$, для кремния (Si) $U_k = 0,7\text{В}$

ЕМКОСТЬ p-n перехода



паразитные емкости → определяют частотные свойства диодов

p-n-переход при обратном смещении подобен конденсатору со значительным током утечки в диэлектрике. **Запирающий слой** – диэлектрик, а **объемные заряды** ($+Q_{обр}$, $-Q_{обр}$) по обеим сторонам диэлектрика – обкладки конденсатора, созданные ионизированными атомами донорной и акцепторной примеси. Эту емкость называют **барьерной емкостью** $C_{бар}$. При постоянном напряжении:

$$C_{бар} = \frac{Q_{обр}}{U_{обр}}.$$

$$C_{бар} = \left(\varepsilon \varepsilon_0 \cdot \frac{S}{l_0} \right) \cdot \sqrt[n]{\frac{U_k}{U_k + |U|}},$$

U_k – значение контактной разности потенциалов;

U – приложенное напряжение;

l_0 – толщина p-n перехода при $U = 0$;

ε – относительная диэлектрическая проницаемость материала;

ε_0 – диэлектрическая проницаемость вакуума;

S – площадь поперечного сечения p-n-перехода;

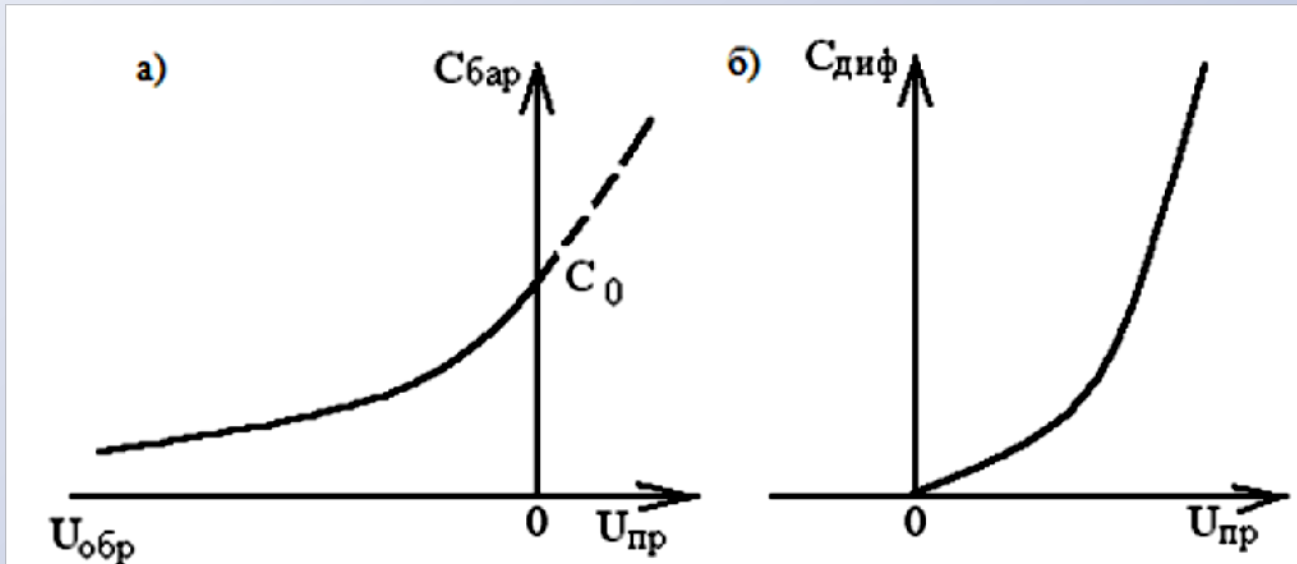
$n = 2$ для резких переходов,

$n = 3$ для плавных переходов.

При прямом напряжении р-п-переход обладает *диффузионной емкостью* $C_{\text{диф}}$.

Диффузионная емкость *появляется в результате накопления подвижных носителей заряда в базе, когда после прохождения перехода носители не успевают рекомбинировать.*

$$C_{\text{диф}} = \frac{Q_{\text{диф}}}{U_{\text{пр}}}.$$



Зависимость барьерной (а) и диффузионной (б) емкости от приложенного напряжения

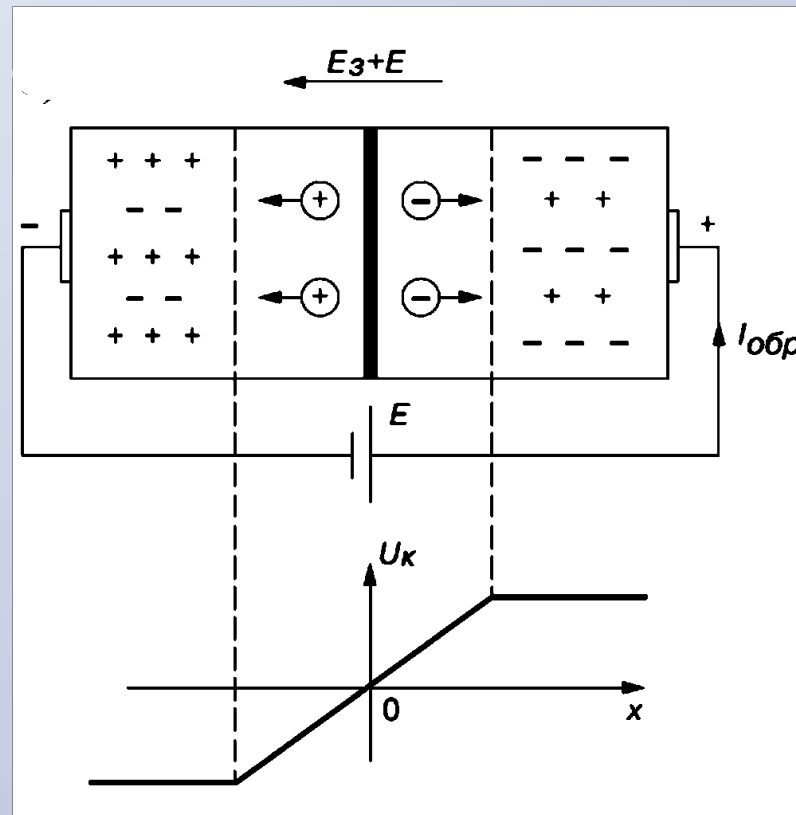
$C_{\text{бар}}$ = единицы ÷ сотни пФ.

$C_{\text{диф}}$ = десятки ÷ тысячи пФ.

Влияние паразитных емкостей необходимо учитывать при использовании диодов на высоких частотах и в импульсных схемах!!!

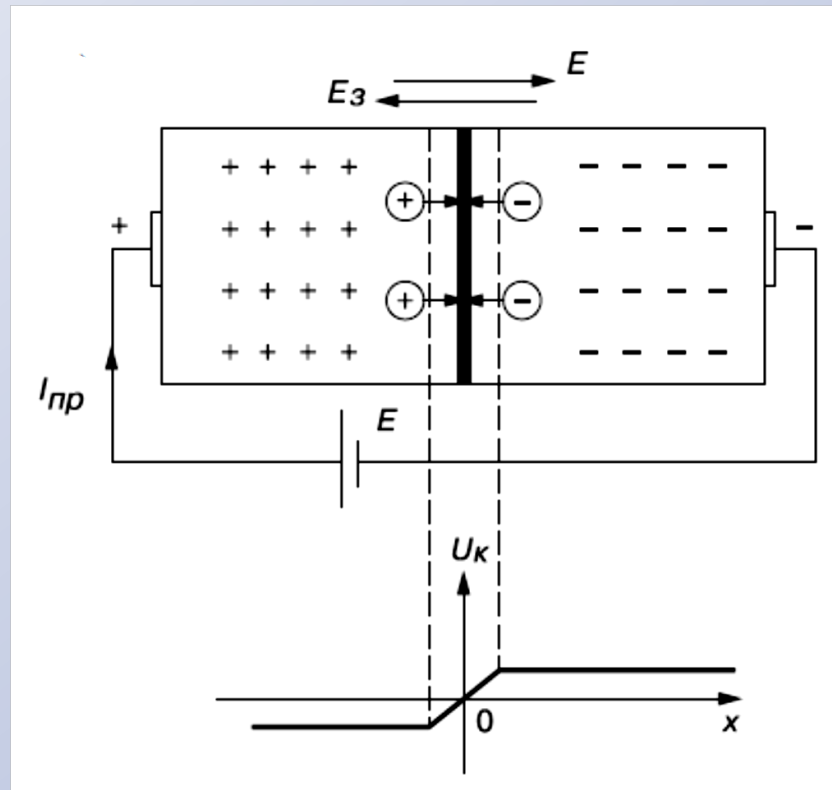
р-n переход при подаче обратного напряжения

Если к р-n переходу приложить *обратное напряжение*, то создаваемая им напряженность E электрического поля повышает потенциальный барьер и препятствует переходу электронов из n -области в p -область и дырок из p -области в n -область. При этом *поток неосновных носителей* (дырок из n -области и электронов из p -области), их *экстракция*, образует *обратный ток* $I_{обр}$.



р-n переход при подаче прямого напряжения

Если включить внешний источник энергии E , то создаваемая им напряженность электрического поля будет противоположной направлению напряженности объёмного заряда, и в область раздела полупроводников будет *инжектироваться* (поток основных носителей (дырок из р-области и электронов из n-области)) все большее количество дырок (являющимися неосновными для n-области носителями заряда), которые и образуют прямой ток $I_{пр}$.



p-n-переход обладает односторонней проводимостью

$$I = I_0 (e^{U/V_t} - 1)$$

Тепловой (обратный) ток насыщения

$$V_t = kT/q_e - \text{температурный потенциал}$$

Величина тока зависит от материала, площади *p-n*-перехода и от температуры.
Обратный ток кремниевого перехода на 1–2 порядка меньше, чем германиевого.

При $t=20^\circ\text{C}$ температурный потенциал $V_t \approx 25\text{ мВ}$.
Если прямое напряжение перехода $U > 0.1\text{ В}$, то

$$e^{U/V_t} \gg 1$$



$$I \approx I_0 e^{U/V_t} = I_0 e^{40U}$$



$$U = V_t \cdot \ln(I/I_0).$$

Если $I_1 = I_0 e^{U_1/V_t}$, $I_2 = I_0 e^{U_2/V_t} \Rightarrow \frac{I_2}{I_1} = e^{(U_2 - U_1)/V_t}$



$$U_2 - U_1 = V_t \cdot \ln\left(\frac{I_2}{I_1}\right) \approx 2.3 \cdot V_t \cdot \log\left(\frac{I_2}{I_1}\right)$$

