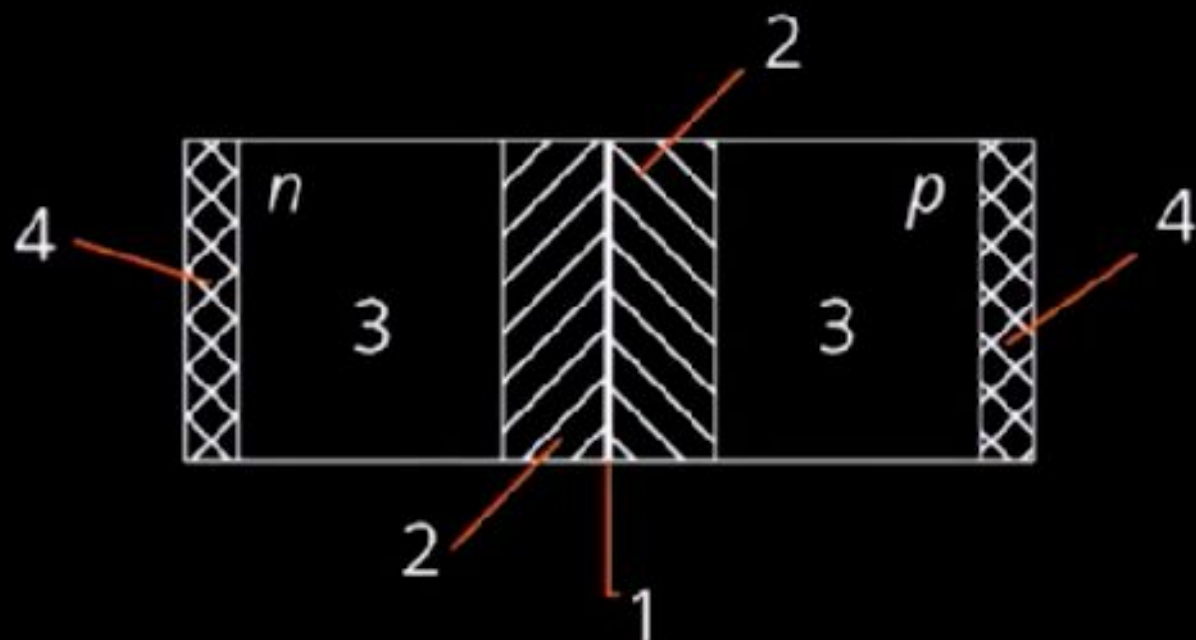


***Электронно-дырочный
переход***

Электронно-дырочный (p-n) переход – это переход между двумя областями полупроводника с разными типами электропроводности.



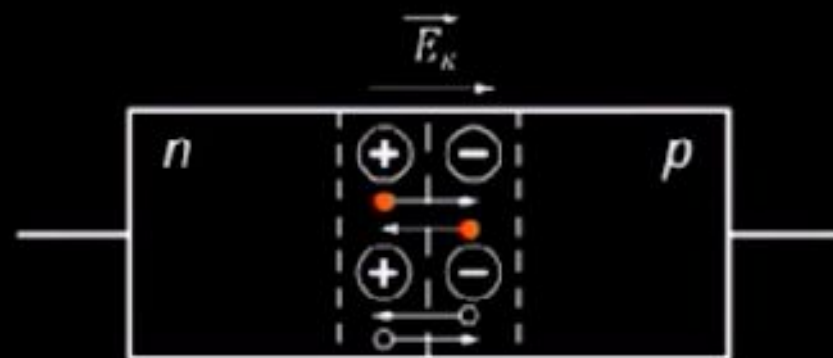
- 1 – металлургическая граница (воображаемая плоскость, разделяющая n - и p - области)
- 2 – область перехода
- 3 – нейтральные n- и p-области
- 4 – омические контакты

***P-n-переход в
состоянии равновесия***

Диффузия – перемещение носителей заряда, обусловленное неравномерным распределением их концентрации по объему полупроводника.

В результате диффузии носителей заряда и их последующей рекомбинации в р-п-переходе возникает **обедненный (запирающий) слой** толщиной $d \approx 0,3\text{мкм}$.

Наличие не скомпенсированного заряда примесных ионов приводит к возникновению электрического поля E_k , которому соответствует потенциальный барьер (**контактная разность потенциалов U_k**). Этот барьер препятствует дальнейшей диффузии.



1. Контактная разность потенциалов U_k .

Величина U_k зависит от концентрации примесей, температуры, свойств материала полупроводника.

$$U_k = \varphi_T \ln \frac{N_D N_A}{n_i^2}$$

Для Si: $U_k \sim 0,9 - 1,2$ В
Ge: $U_k \sim 0,6 - 0,7$ В

$\varphi_T = \frac{kT}{e}$ – тепловой потенциал
(25 мВ при комнатной температуре)

2. Толщина $p - n$ перехода (запирающего слоя) d .

$$d = \sqrt{\frac{2\varepsilon_0 \varepsilon U_k}{e} \left(\frac{1}{N_D} + \frac{1}{N_A} \right)}$$

$\varepsilon_0 = 8,85 \cdot 10^{-12}$ (Ф/м) – эл. постоянная;
 ε – диэлектрическая проницаемость.

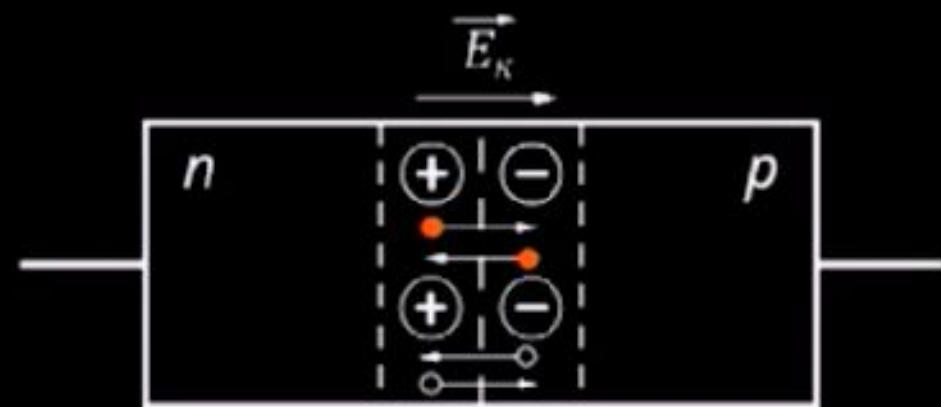
При больших концентрациях примесей $p - n$ переход получается узким.

Одновременно с диффузией носителей заряда происходит обратное их перемещение под действием электрического поля E_K . Такое перемещение неосновных носителей заряда называется дрейфом.

При постоянной температуре $p - n$ - переход находится в состоянии динамического равновесия. Токи диффузии и дрейфа равны и противоположны по направлению.

Полный ток через переход равен нулю.

$$j_{\text{диф}} + j_{\text{др}} = 0$$

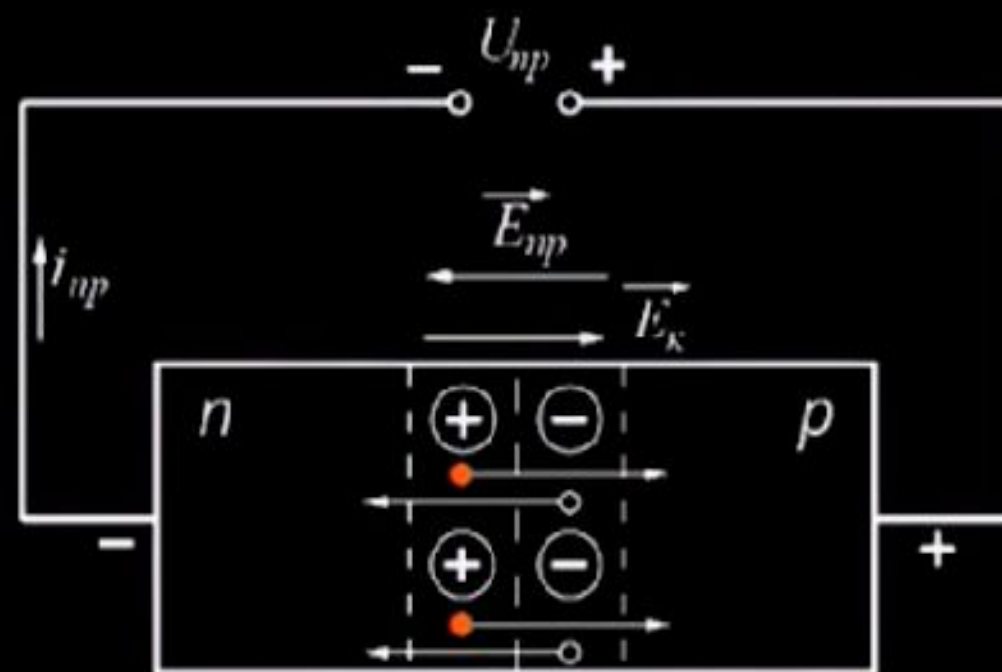


***P-n-переход при прямом
напряжении***

Напряжение, полярность которого совпадает с полярностью основных носителей, называется **прямым**.

Прямое напряжение приводит к уменьшению высоты потенциального барьера и возрастанию диффузионного тока.

Через переход при этом протекает достаточно большой прямой ток основных носителей. $p-n$ переход имеет малое сопротивление (1-10 Ом).



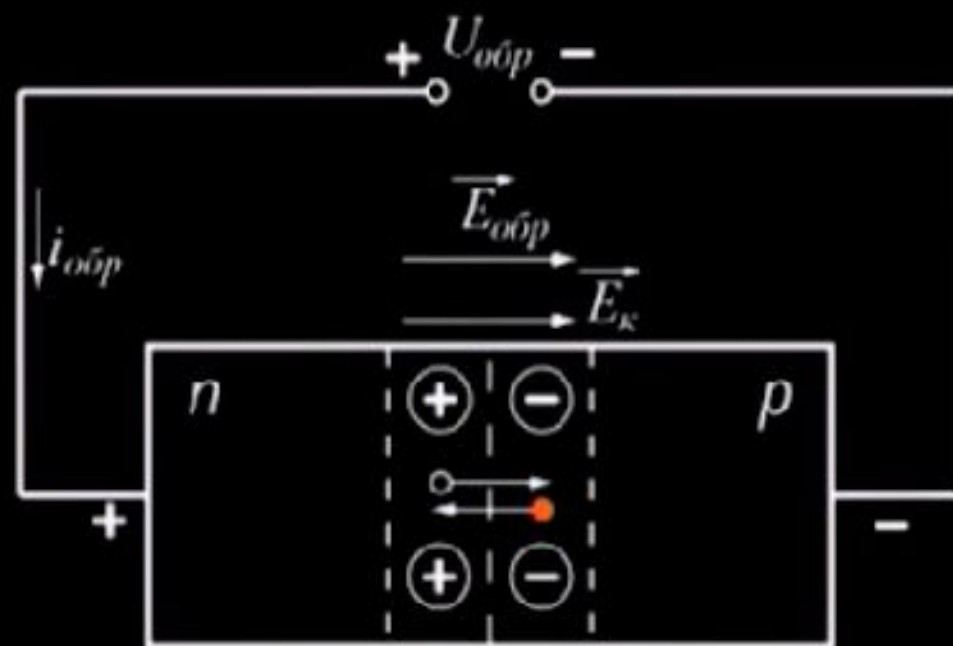
Если $N_d \gg N_A$, то такой переход обозначается как $n^+ - p$ и называется **несимметричным**. Обедненный слой в нем смещается в сторону области с меньшей концентрацией примеси.

При прямом напряжении уменьшается толщина $p-n$ перехода $d_{np} < d$.

***P-n-переход при обратном
напряжении***

Обратное напряжение приводит к увеличению высоты потенциального барьера в переходе и практически полному исчезновению диффузионного тока.

Через переход при этом протекает малый обратный ток, обусловленный дрейфом неосновных носителей. $p - n$ переход имеет большое сопротивление (100 кОм - 1 МОм).



При обратном напряжении увеличивается толщина $p - n$ перехода: $d_{обр} > d$.

***Вольт-амперная
характеристика
р-п-перехода***

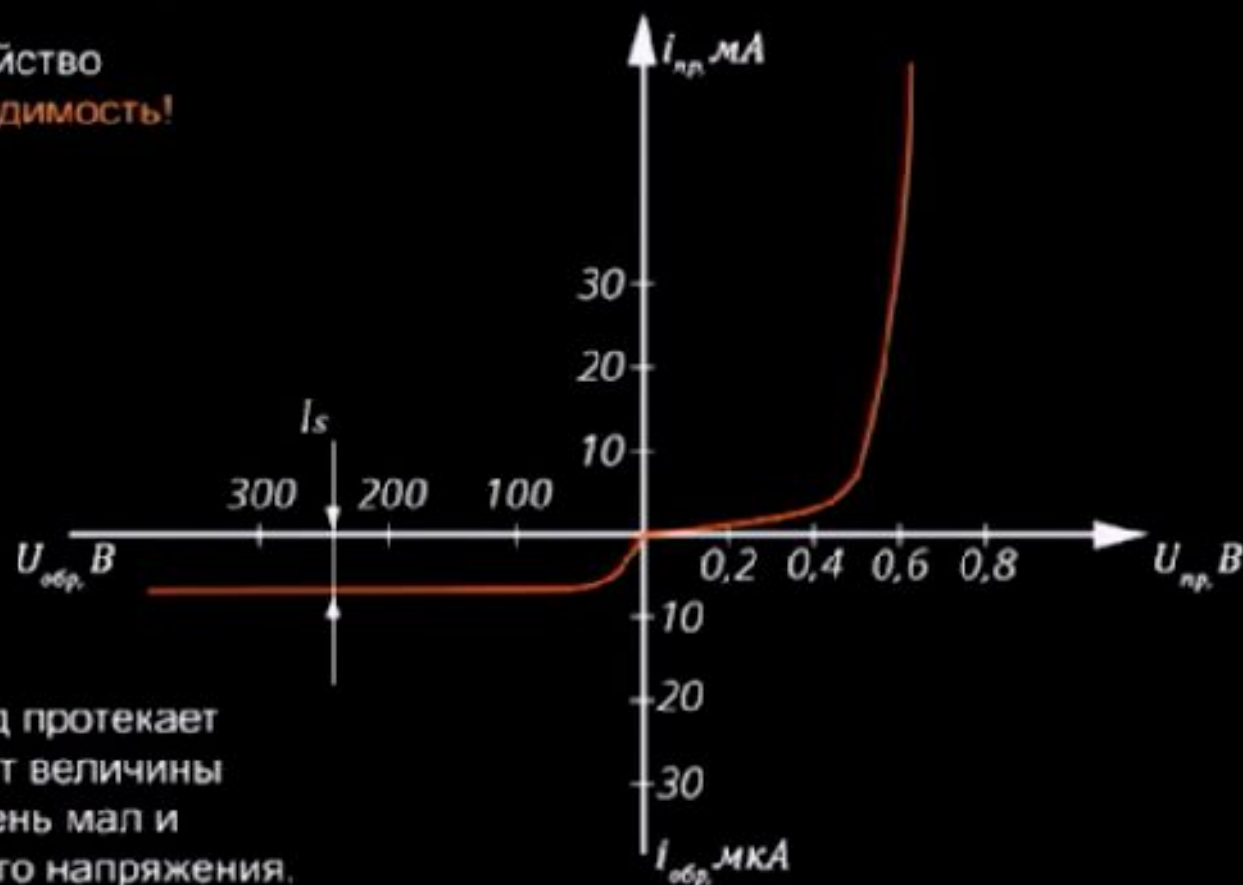
Прямое напряжение берется со знаком «+», обратное – со знаком «-».

Из анализа ВАХ следует основное свойство $p - n$ перехода – **односторонняя проводимость!**

$i_{np} = f(U_{np})$ – прямая ветвь

$i_{обр} = f(U_{обр})$ – обратная ветвь

I_s – обратный ток насыщения.



При прямом напряжении через переход протекает значительный ток, сильно зависящий от величины U_{np} . При обратном напряжении ток очень мал и практически не зависит от приложенного напряжения.

Пробой p-n-перехода

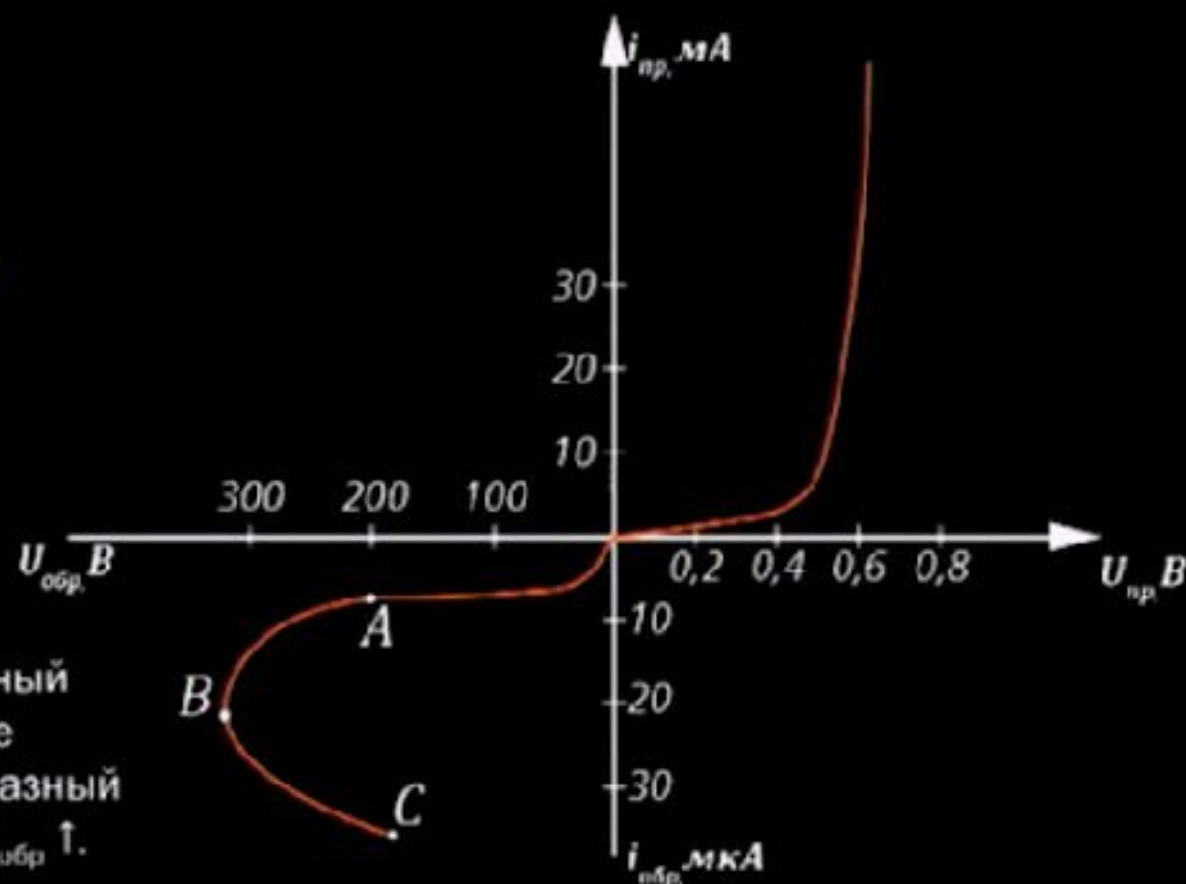
Пробоем называется резкий рост обратного тока через p-n-переход, вызванный большим обратным напряжением.

Различают два вида пробоя:

- **электрический** (участок *AB*)
- **тепловой** (участок *BC*)

Электрический пробой бывает **лавинным** и **туннельным**.

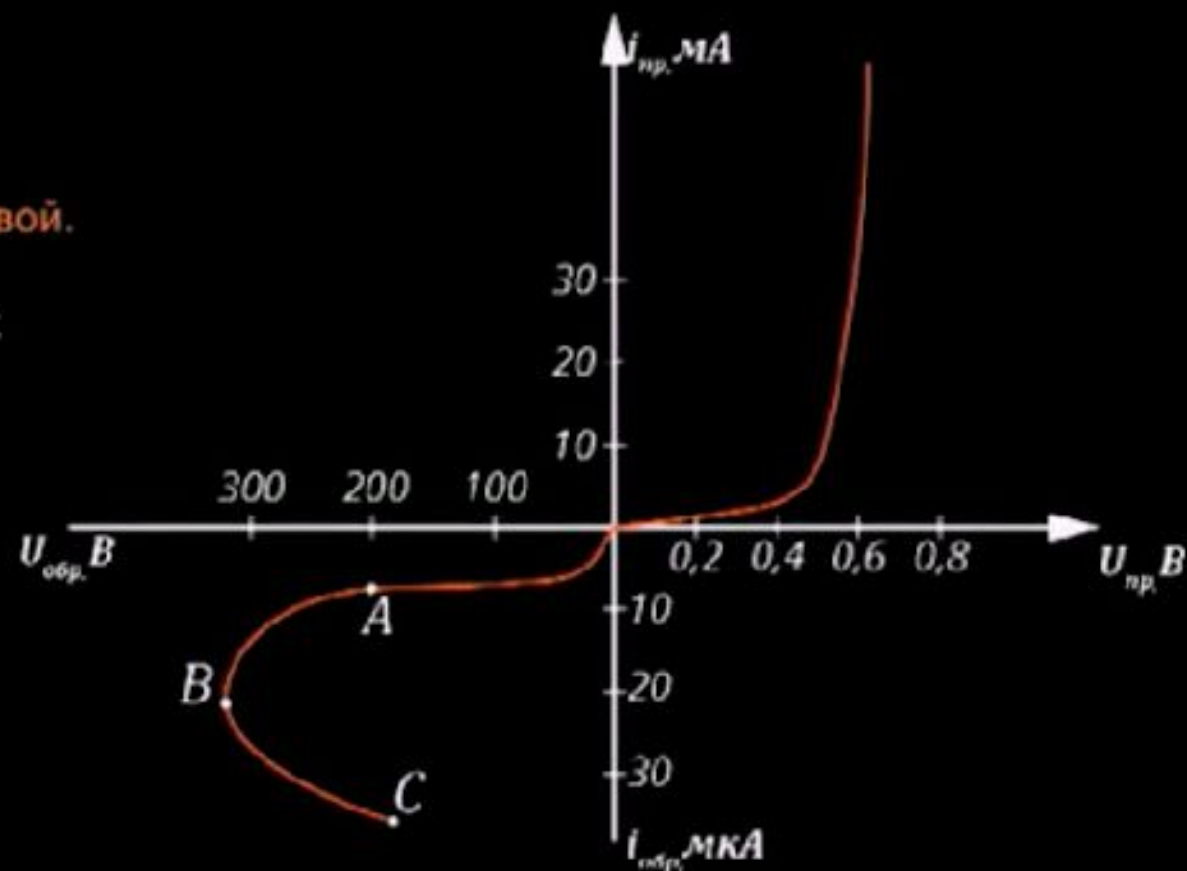
При лавинном пробое электрон, ускоренный большим $U_{обр}$, выбивает из атомов другие электроны и т. д. Развивается лавинообразный процесс увеличения числа электронов, $i_{обр} \uparrow$.



Туннельный пробой обусловлен туннельным эффектом: прохождением электронов через потенциальный барьер. Он возникает в сильнолегированных тонких $p-n$ переходах.

Электрический пробой обратим!
(не разрушает $p-n$ переход)

Если не ограничивать обратный ток, то электрический пробой переходит в **тепловой**. За счет разогрева $p-n$ перехода увеличивается концентрация неосновных носителей, $\uparrow i_{обр}$, $\uparrow T$ и т. д. $p-n$ переход выходит из строя. **Тепловой пробой необратим!**



Ёмкость p-n-перехода

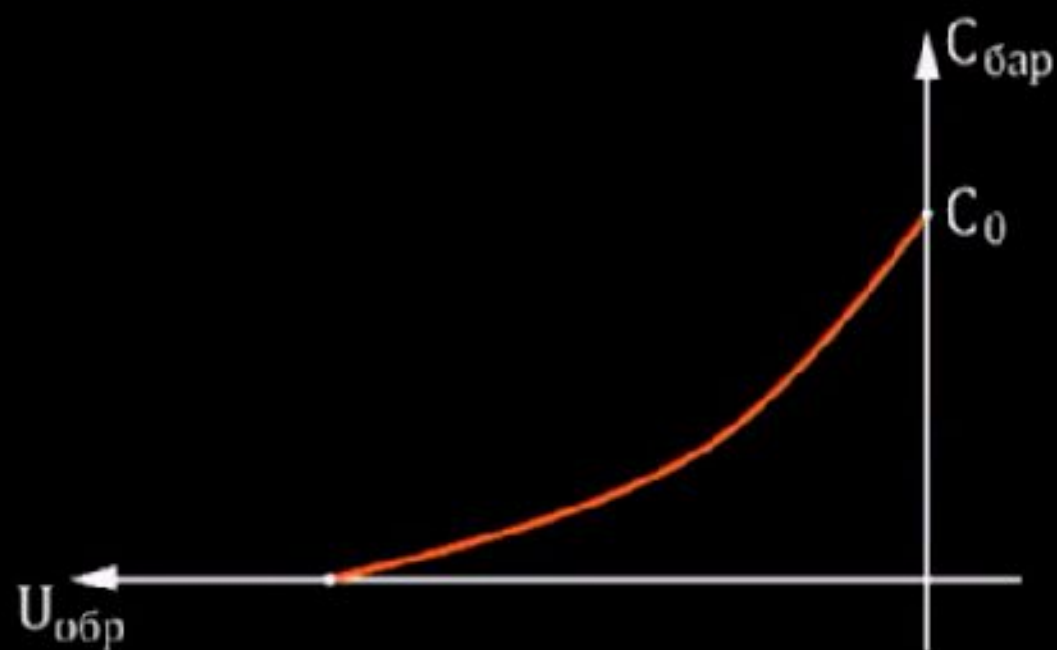
Наличие в $p - n$ переходе зарядов: ионов, электронов и дырок, свидетельствует о том, что он обладает электрической емкостью.

Различают барьерную и диффузионную емкости.

Барьерная емкость обусловлена наличием в обедненном слое зарядов противоположного знака. Два слоя ионов примеси соответствуют двум заряженным пластинам конденсатора. Барьерная емкость играет основную роль при обратном напряжении. При увеличении $U_{обр}$ емкость уменьшается.

Зависимость $C_{\text{бар}}(U_{\text{обр}})$ – вольт-фарадная характеристика.

$$C_{\text{бар}} = \frac{C_0}{\left(1 + \frac{U_{\text{обр}}}{U_{\text{к}}}\right)^\lambda}$$



C_0 – начальное значение емкости (при $U_{\text{обр}} = 0$)

λ – коэффициент ($\frac{1}{3} \dots \frac{1}{2}$)

$U_{\text{к}}$ – контактная разность потенциалов

Диффузионная емкость C_d характеризует накопление неравновесного заряда, обусловленного диффузией электронов и дырок вглубь п/п за область $p - n$ перехода. По обе стороны $p - n$ перехода накапливается дополнительный объемный заряд.

Диффузионная емкость играет ведущую роль при прямом напряжении. Ее значение прямо пропорционально прямому току через переход:

$$C_d = k_d i_{пр}$$

k_d — коэффициент, зависящий от свойств перехода.