

# Медицинская электроника

Полупроводники. Зонная теория полупроводников.  
Электронно-дырочный переход. Основное уравнение диода.  
Пробой  $p$ - $n$ -перехода. Полупроводниковые диоды.

к.ф.-м.н., доцент, Малахов Дмитрий Валерьевич



Российский  
национальный  
исследовательский  
медицинский

Кафедра физики МБФ

Москва



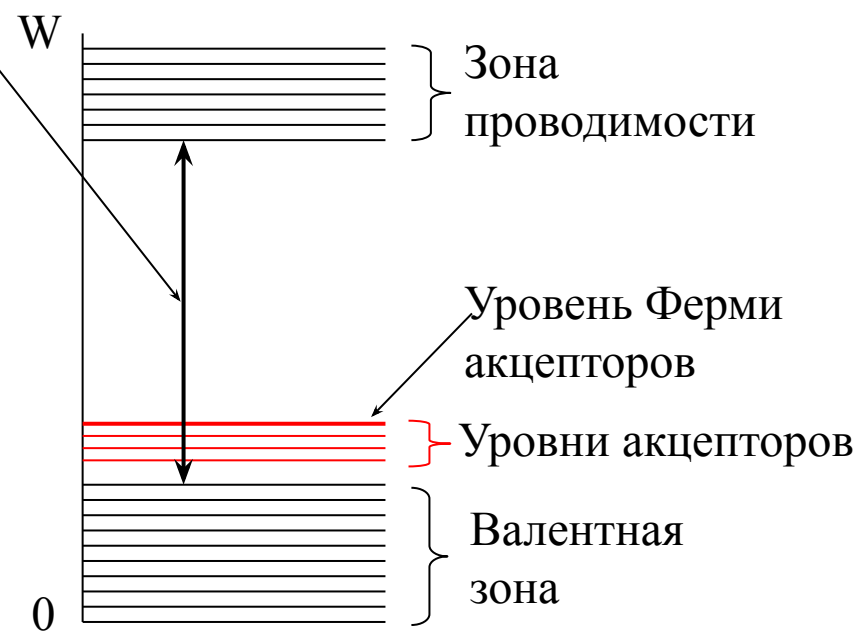
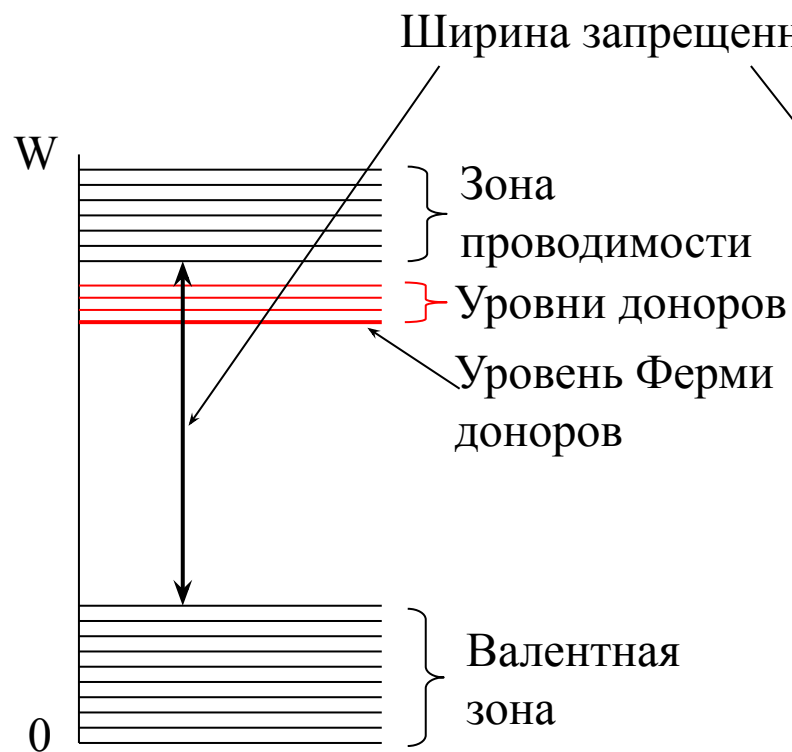
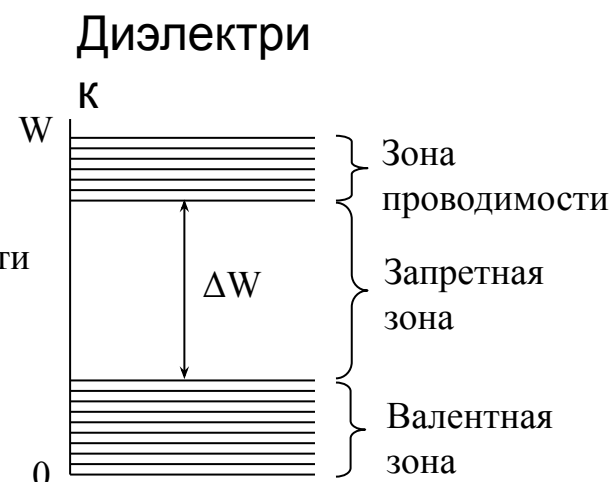
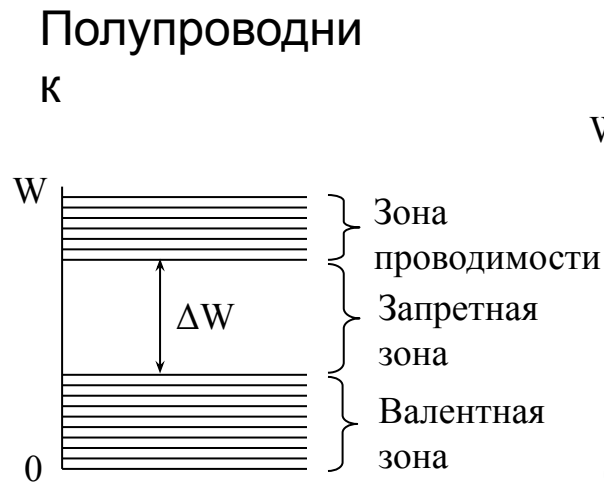
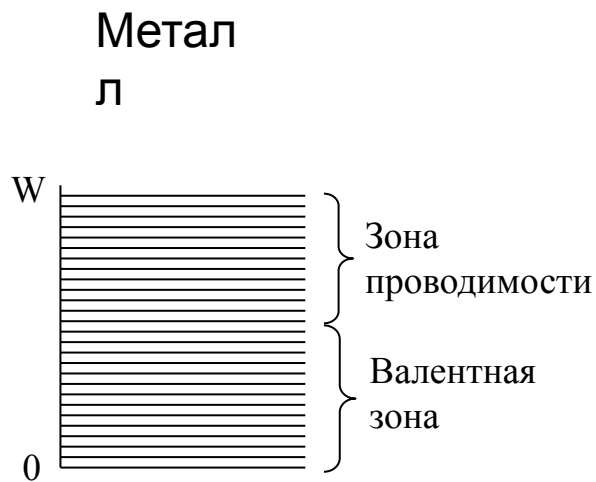
ИОФ РАН

# Медицинская электроника

Полупроводники. Зонная теория полупроводников.

**Электронно-дырочный переход.** Основное уравнение диода.

Пробой  $p$ - $n$ -перехода. Полупроводниковые диоды.



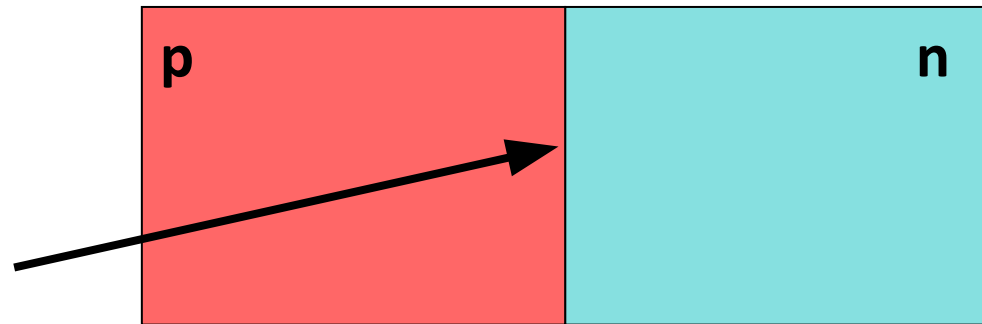
**Зонная диаграмма полупроводника n-типа**

**Зонная диаграмма полупроводника p-типа**

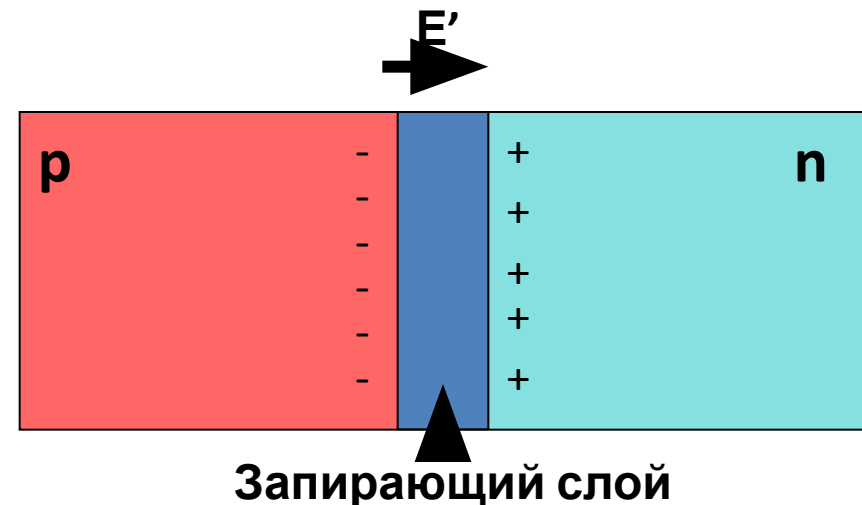
# Электронно-дырочный переход

p-n-переход, или электронно-дырочный переход — область соприкосновения двух полупроводников p- и n-типа, в которой происходит переход от одного типа проводимости к другому. Электрические процессы в p-n-переходах являются основой работы полупроводниковых диодов, транзисторов и других электронных полупроводниковых приборов с нелинейной вольт-амперной характеристикой.

При сплаве двух полупроводников разного типа на их границе возникает электронно-дырочный переход (p-n – переход)

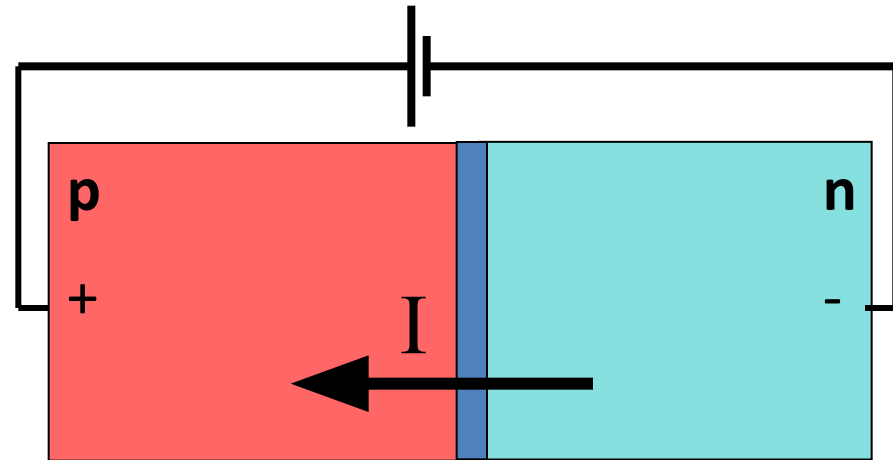


При отсутствии напряжения на краях полупроводника в месте перехода существует собственное поле  $E'$ , зона перехода обеднена носителями заряда и имеет большое сопротивление

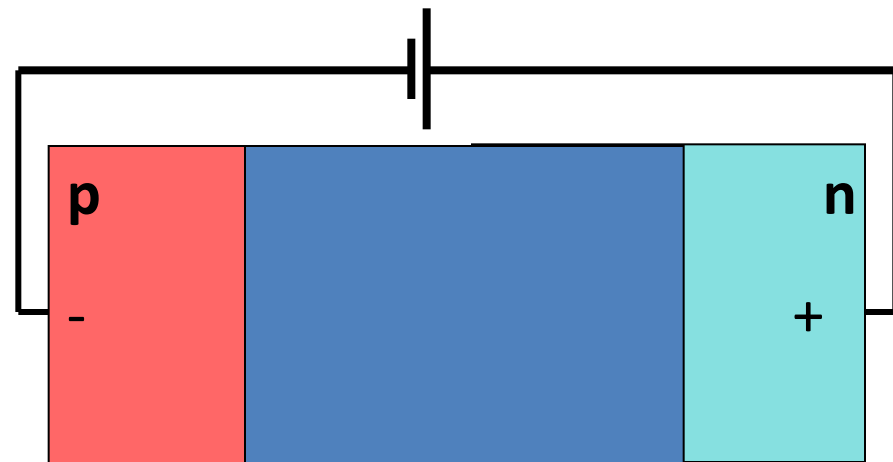


# Электронно-дырочный переход

При подключении к краям полупроводника напряжения таким образом (прямое подключение), через зону перехода течет ток, она сужается и ее сопротивление резко падает. Через полупроводник идет большой ток.



При обратном включении внешнее поле усиливает поле запирающего слоя, запирающий слой увеличивается в размерах. Через полупроводник ток почти не идет.

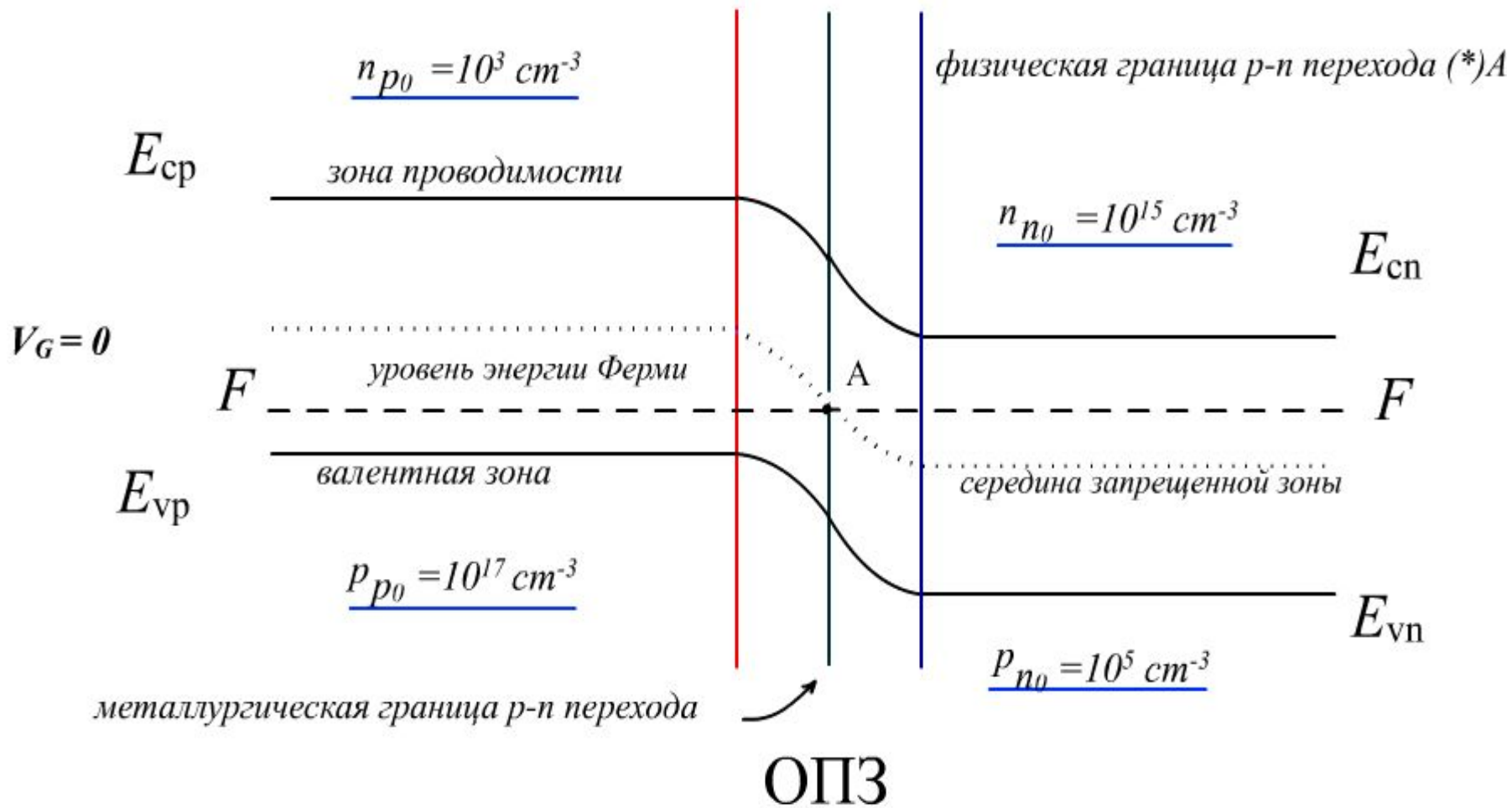


**Пространственный заряд** — распределённый нескомпенсированный электрический заряд одного знака. Пространственные заряды возникают в вакуумных и газоразрядных лампах в пространстве между электродами, а также в неоднородных областях полупроводниковых приборов, и сильно влияют на прохождение тока через эти области, приводя к нелинейным вольт-амперным характеристикам таких приборов.

### **Области пространственного заряда (ОПЗ)**

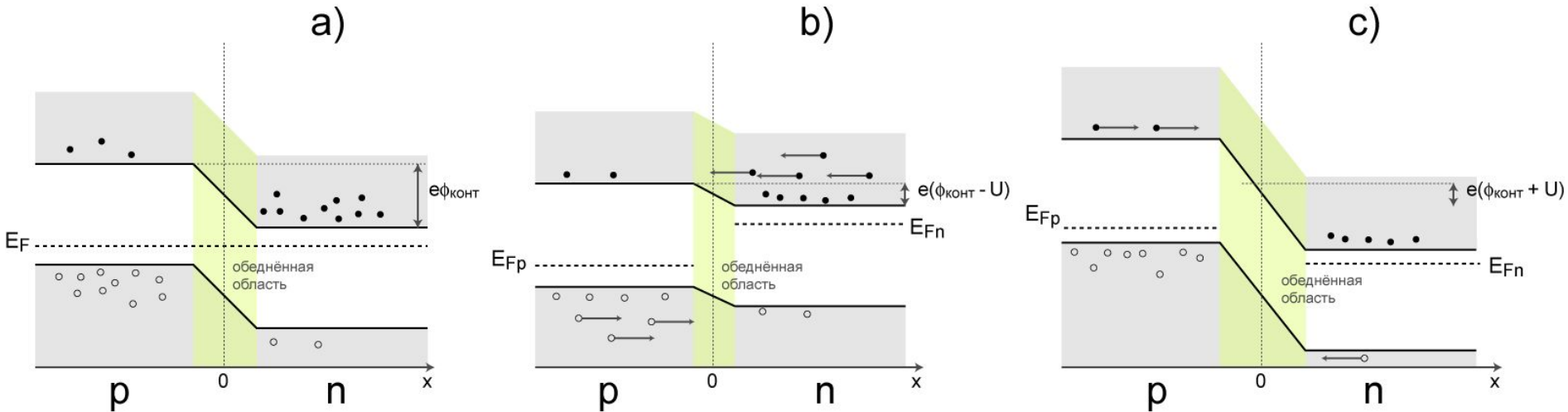
В полупроводнике р-типа концентрация дырок намного превышает концентрацию электронов. В полупроводнике n-типа концентрация электронов намного превышает концентрацию дырок. Если между двумя такими полупроводниками установить контакт, то возникнет диффузионный ток — носители заряда, хаотично двигаясь, перетекают из той области, где их больше, в ту область, где их меньше. При такой диффузии электроны и дырки переносят с собой заряд. Как следствие, области вблизи границы р-n перехода приобретают пространственный заряд. Область в полупроводнике р-типа, которая примыкает к границе раздела, получает дополнительный отрицательный заряд, приносимый электронами, а пограничная область в полупроводнике n-типа получает положительный заряд, приносимый дырками (точнее, уносимый электронами отрицательный заряд). Таким образом, на границе раздела образуются два слоя пространственного заряда противоположного знака.

Слои пространственного заряда порождают в переходе Электрическое поле, это поле вызывает дрейфовый ток в направлении, противоположном диффузионному току. В конце концов, между диффузионным и дрейфовым токами



p – n переход – это металлургическая граница двух типов легирования одного кристалла. Термин «металлургическая» означает, что получена граница высокотемпературными способами, а также то, что физической границы в кристалле между двумя по-разному легированными областями нет, кристалл структурно однороден.

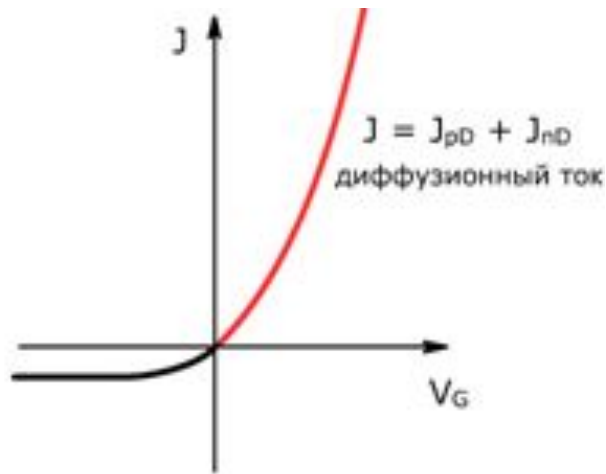
# Энергетическая диаграмма р-n-перехода.



- a) Состояние равновесия;
- b) При приложенном прямом напряжении;
- c) При приложенном обратном напряжении.



# р-n переходы прямое смещение



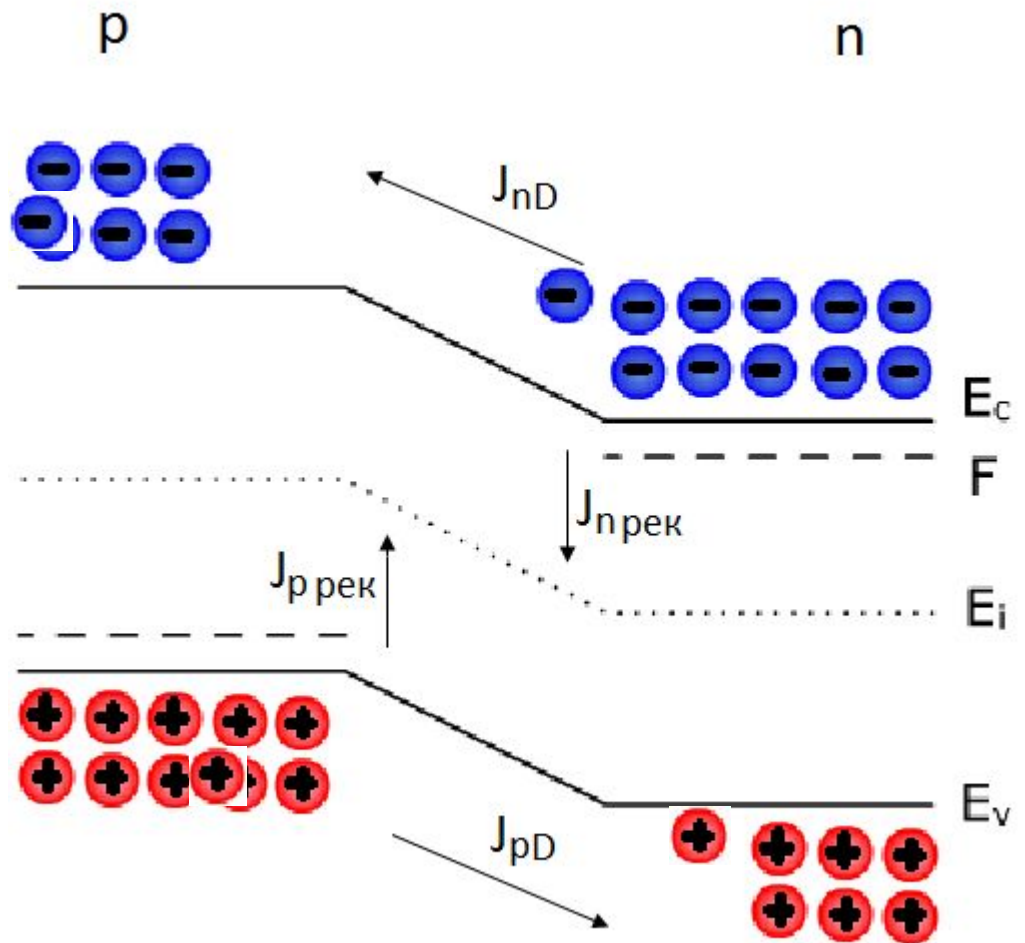
$J_{nD}$  – диффузионная компонента электронного тока

электронного тока

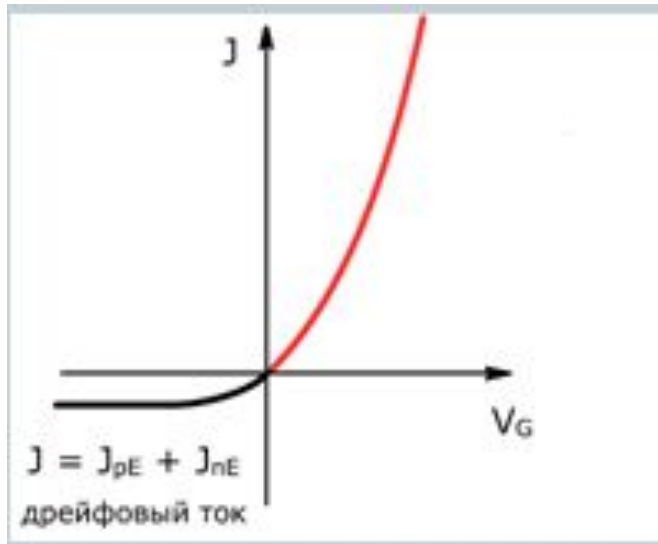
$J_{pD}$  – диффузионная компонента дырочного тока

дырочного тока

$J_{рек}$  – рекомбинационный ток



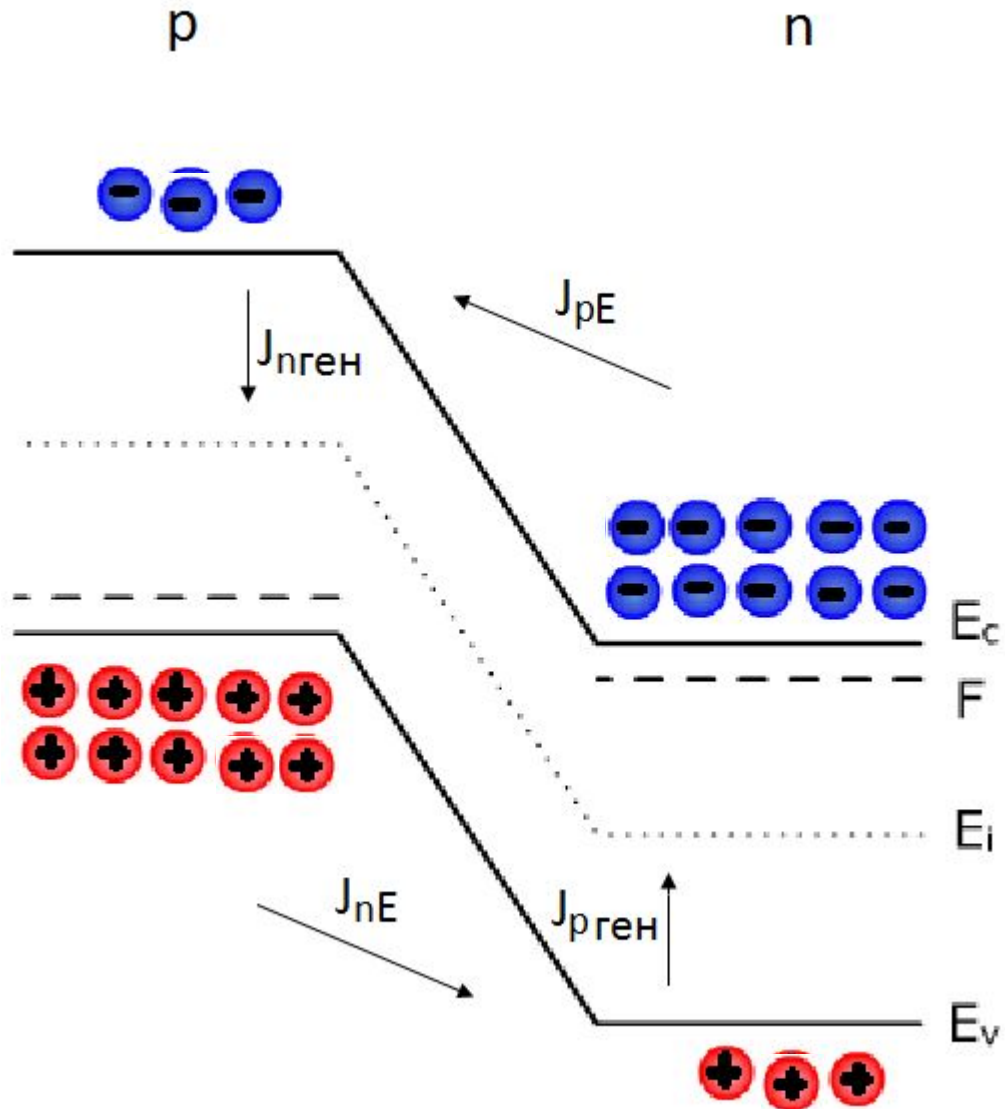
# р-п переходы обратное смещение



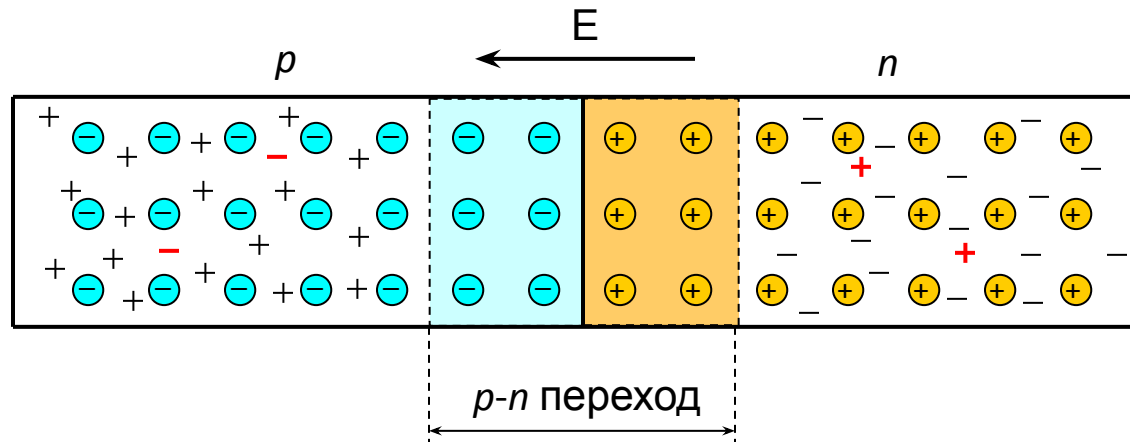
$J_{nE}$  – дрейфовая  
компонента  
электронного тока

$J_{pE}$  – дрейфовая  
компонента  
дырочного тока

$J_{ген}$  – генерационный ток



## Структура $p$ - $n$ перехода



Дырки диффундируют из слоя  $p$  в слой  $n$  (их концентрация в слое  $p$  значительно выше, чем в слое  $n$ ).

Электроны диффундируют из слоя  $n$  в слой  $p$  (их концентрация в слое  $n$  значительно выше, чем в слое  $p$ ).

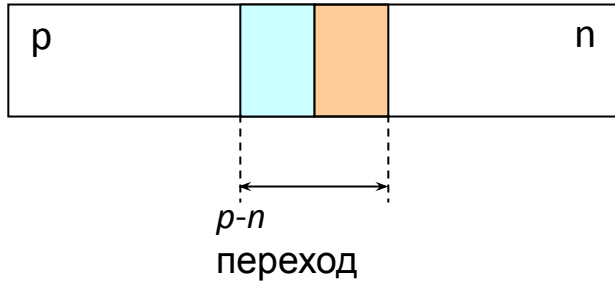
В приграничных областях слоёв  $p$  и  $n$  возникает слой, обеднённый подвижными носителями заряда. Возникает электрическое поле с напряжённостью  $E$ . Это поле препятствует переходу дырок из слоя  $p$  в слой  $n$  и переходу электронов из слоя  $n$  в слой  $p$ . Зато помогает переходу дырок из слоя  $n$  в слой  $p$  и переходу электронов из слоя  $p$  в слой  $n$  (возникает дрейфовый ток). В установившемся режиме дрейфовый ток равен диффузионному току.

Возникает потенциальный барьер.

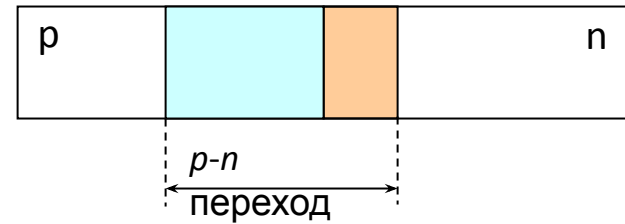
Для кремния  $\phi \approx 0,75$  В.

Для германия  $\phi \approx 0,2$  В.

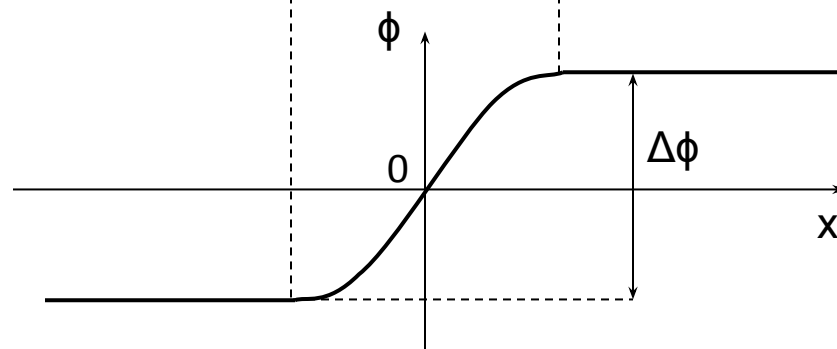
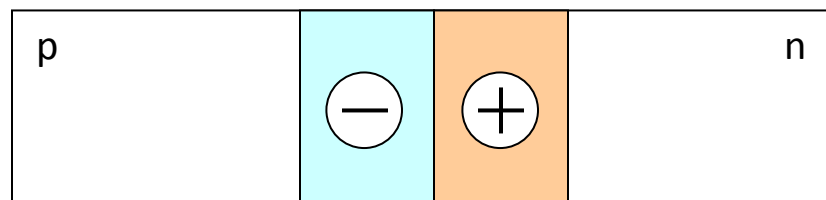
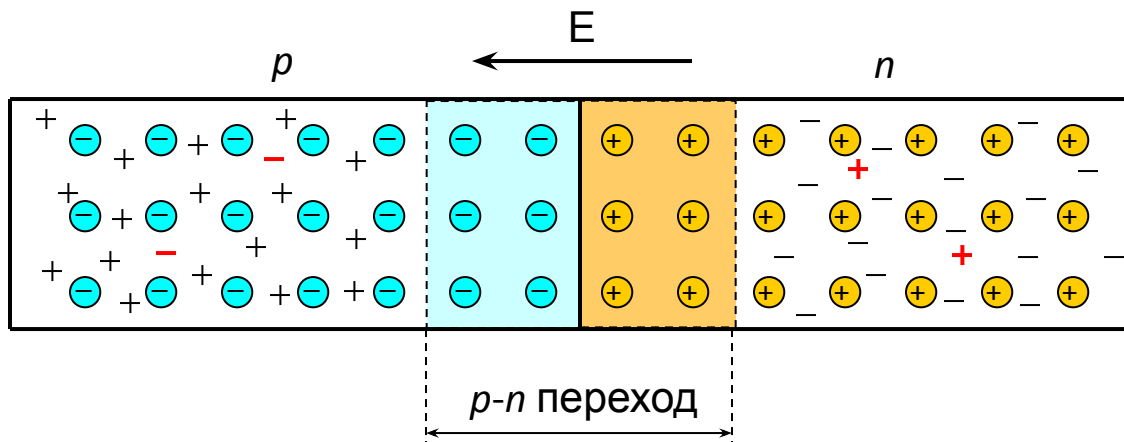
## Симметричный $p$ - $n$ переход



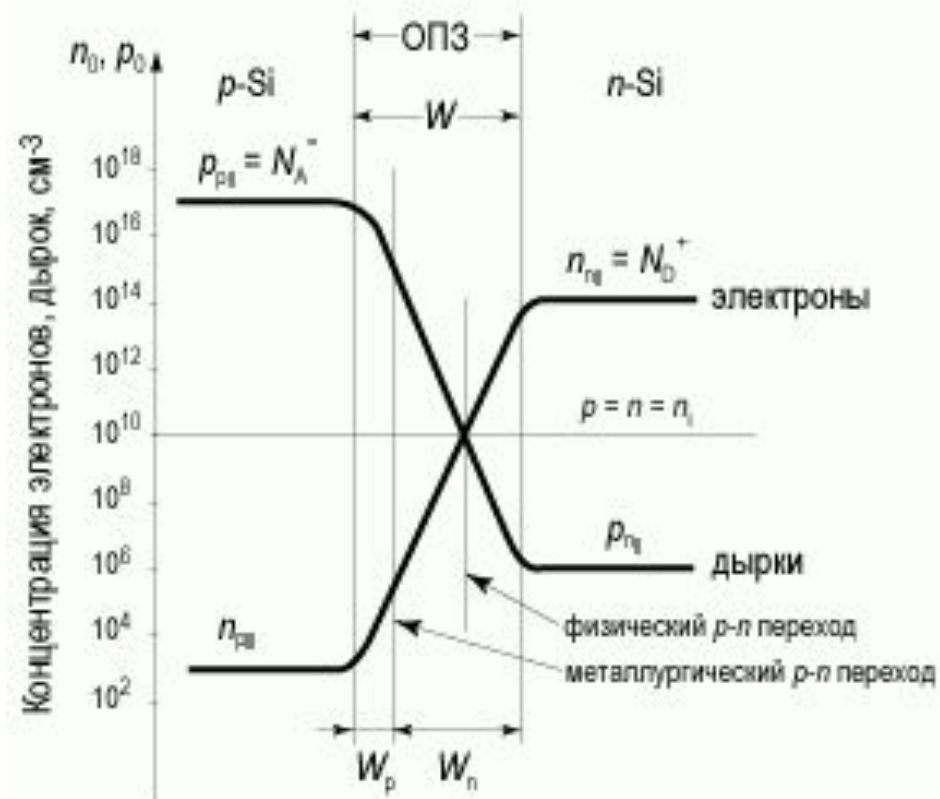
## Несимметричный $p$ - $n$ переход



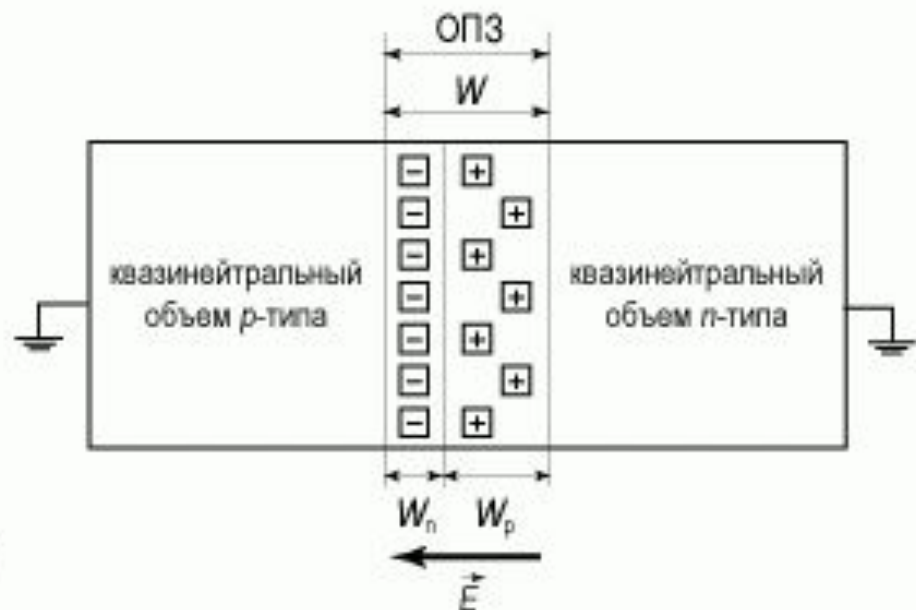
Различают симметричные и несимметричные  $p$ - $n$ -переходы. В симметричных переходах концентрация электронов в полупроводнике  $n$ -типа  $n_n$  и концентрация дырок в полупроводнике  $p$ -типа  $p_p$  равны, т.е.  $n_n = p_p$ . Другими словами, концентрация основных носителей зарядов по обе стороны симметричного  $p$ - $n$ -перехода равны. На практике используются, как правило, несимметричные переходы, в которых концентрация, например, электронов в полупроводнике  $n$ -типа больше концентрации дырок в полупроводнике  $p$ -типа, т.е.  $n_n > p_p$ , при этом различие в концентрациях может составлять 100-1000 раз. Низкоомная область, сильно легированная примесями (например  $n$ -область в случае  $n_n > p_p$ ), называется эмиттером; высокоомная, слаболегированная ( $p$ -область в случае перехода  $n_n > p_p$ ), - базой. Для случая когда концентрации электронов в полупроводнике  $p$ -типа больше концентрации электронов в полупроводнике  $n$ -типа, т.е.  $p_p > n_n$ , эмиттером будет  $p$ -область, а базой  $n$ -область.



Возникает потенциальный барьер.  
 Для кремния  $\phi \approx 0,75$  В.  
 Для германия  $\phi \approx 0,2$  В.

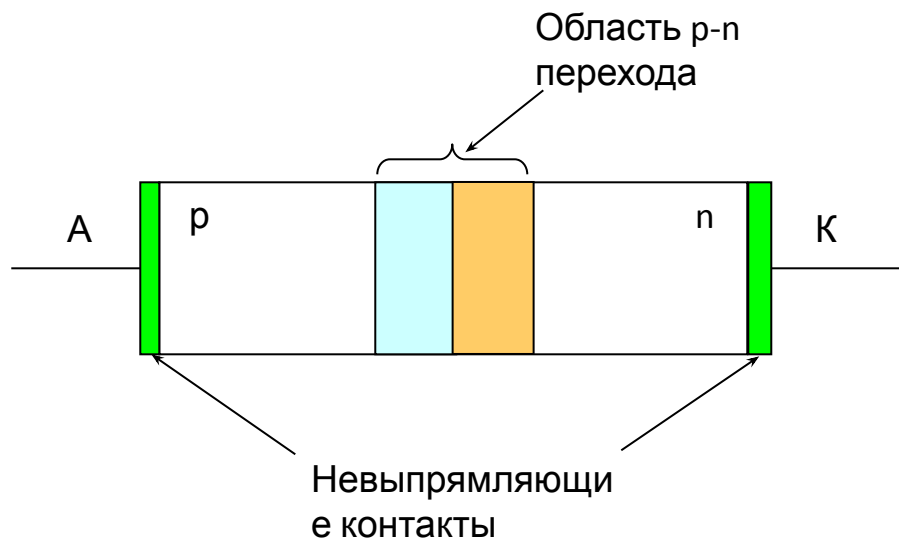


а



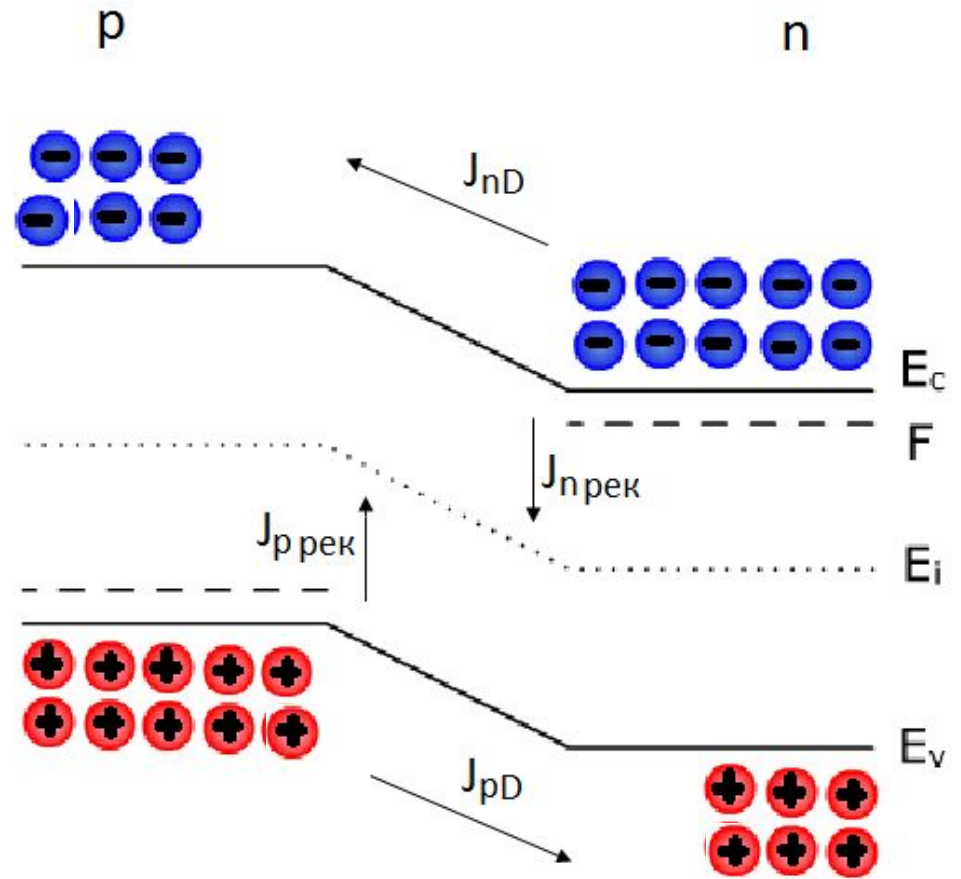
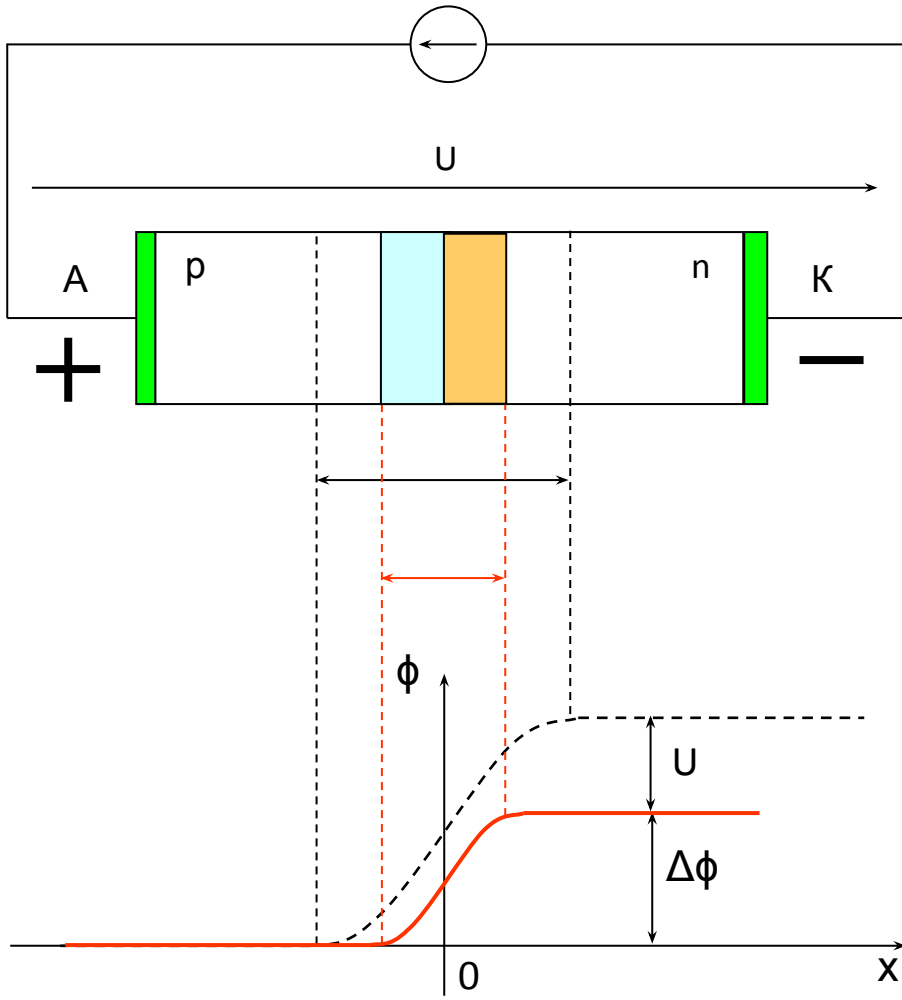
б

## ***p-n* переход под внешним напряжением**



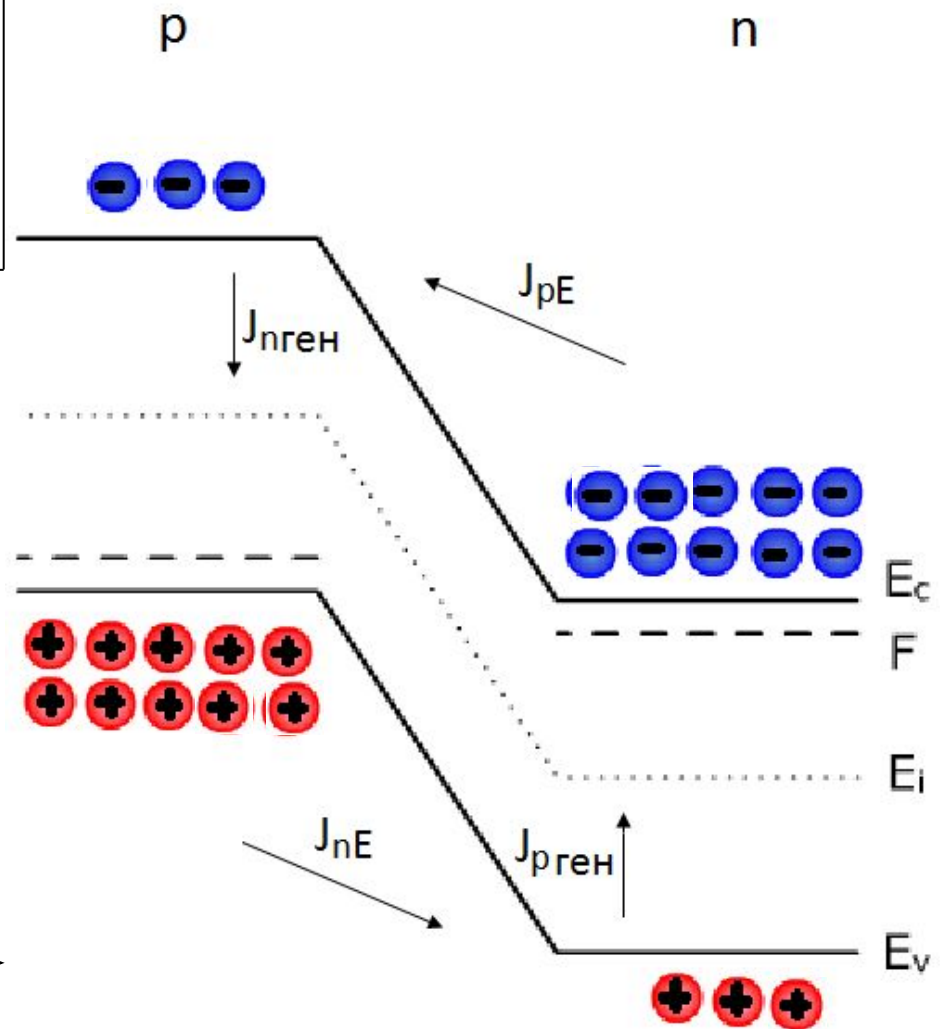
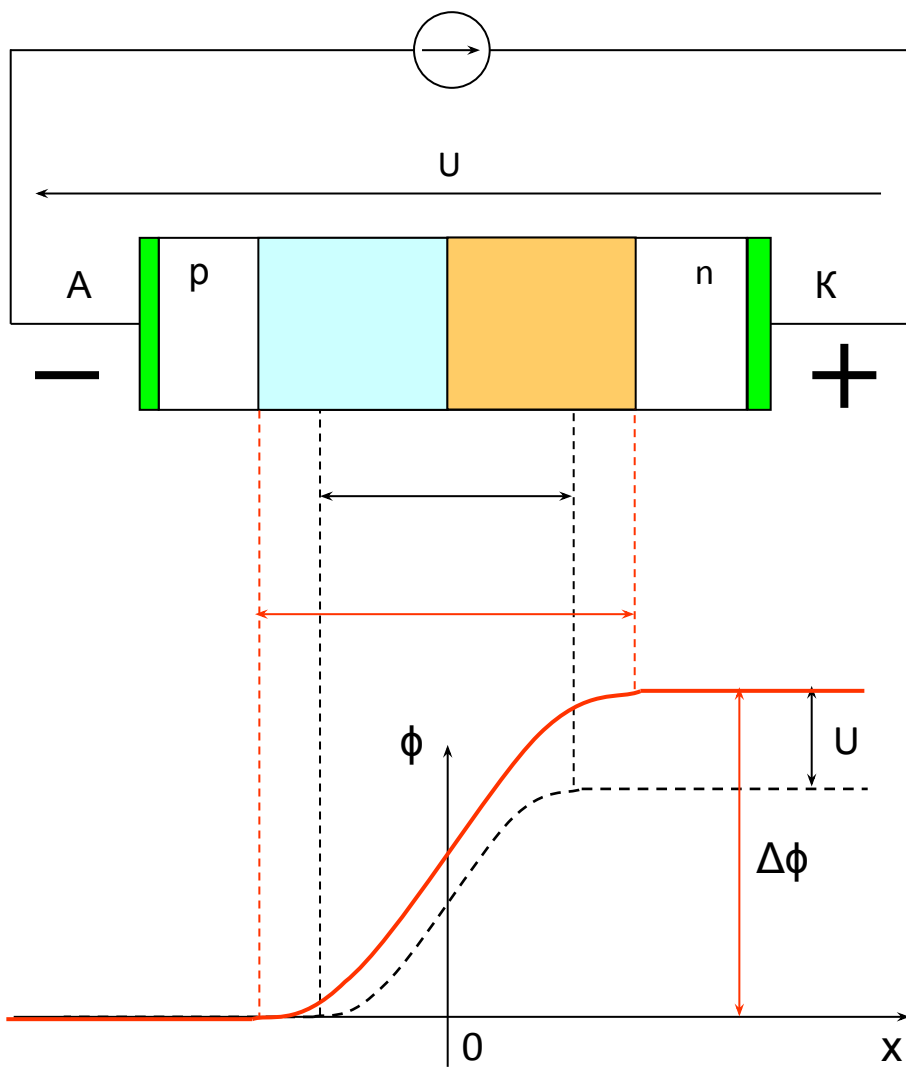
**Невыпрямляющий (омический) контакт** используется практически во всех полупроводниковых приборах для формирования внешних выводов от полупроводниковых областей; для него характерны близкая к линейной ВАХ и малое сопротивление. Для получения омического контакта между металлом и полупроводником n- типа проводимости разность работ выхода  $j_{\text{мп}} < 0$  (т. е. работа выхода электронов из металла,  $j_{\text{м}}$ , должна быть меньше работы выхода из полупроводника,  $j_{\text{п}}$ ), а между металлом и полупроводником p-типа проводимости разность работ выхода  $j_{\text{мп}} > 0$  (т. е.  $j_{\text{м}} > j_{\text{п}}$ ).

# Прямое включение





# Обратное включение



# Медицинская электроника

Полупроводники. Зонная теория полупроводников.

Электронно-дырочный переход. **Основное уравнение диода.**

Пробой  $p$ - $n$ -перехода. Полупроводниковые диоды.

## Для идеального $p$ - $n$ перехода

$$i = i_s \cdot \left( e^{\frac{u}{\phi_T}} - 1 \right)$$

$$\phi_T = \frac{kT}{q} \quad \text{- температурный потенциал,}$$

при температуре 20°C (эта температура называется комнатной в отечественной литературе)  $\phi_T = 0,025$  В, при температуре 27°C (эта температура называется комнатной в зарубежной литературе)  $\phi_T = 0,026$  В,

$i_s$  - ток насыщения (тепловой ток), индекс  $s$  от английского *saturation current*, для кремниевых  $p$ - $n$  переходов обычно

$$i_s = 10^{-15} \dots 10^{-13} \text{ А};$$

$k$  - постоянная Больцмана,

$T$  - абсолютная температура, К

$q$  - элементарный заряд,  $q = 1,6 \cdot 10^{-19}$  Кл.

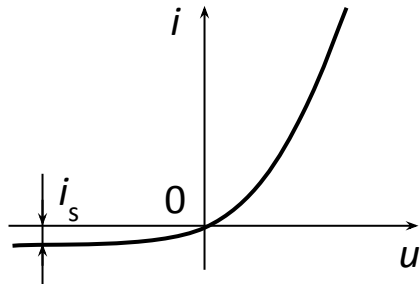
ВАХ  $p$ - $n$  перехода имеет вид:

$$J = J_s (e^{\beta V_G} - 1)$$

Плотность тока насыщения  $J_s$  равна:

$$J_s = \frac{qD_n n_{p0}}{L_n} + \frac{qD_p p_{n0}}{L_p} = \frac{qL_n n_{p0}}{\tau_n} + \frac{qL_p p_{n0}}{\tau_p}$$

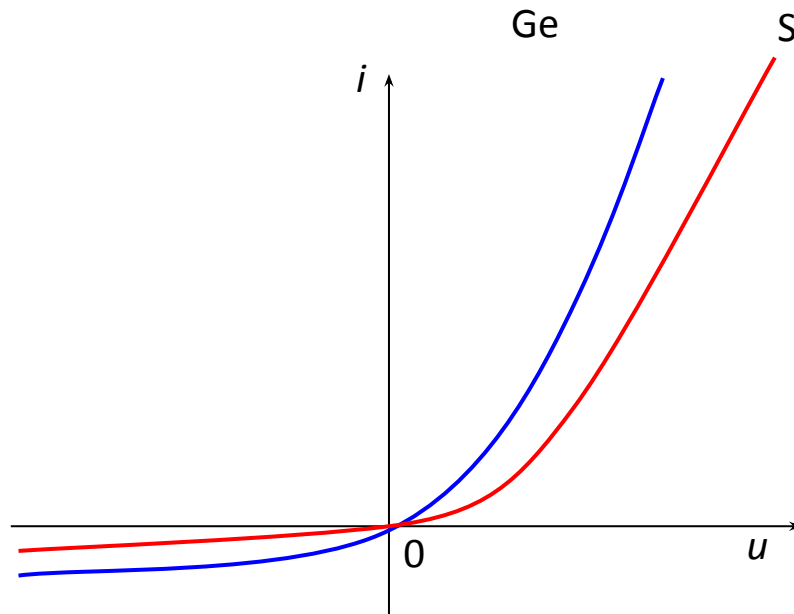
$$k = 1,38 \cdot 10^{-23} \frac{\text{Дж}}{\text{К}} = 8,62 \cdot 10^{-5} \frac{\text{эВ}}{\text{К}}$$



$$i = i_s \cdot (e^{\frac{u}{\varphi_T}} - 1)$$

Полезно отметить, что, как следует из приведённого выражения, чем меньше ток  $i_s$ , тем больше напряжение  $u$  при заданном прямом токе.

У кремния ток  $i_s$  меньше, чем у германия.



$$i = i_s \cdot \left( e^{\frac{u}{\phi_T}} - 1 \right)$$

# Медицинская электроника

Полупроводники. Зонная теория полупроводников.

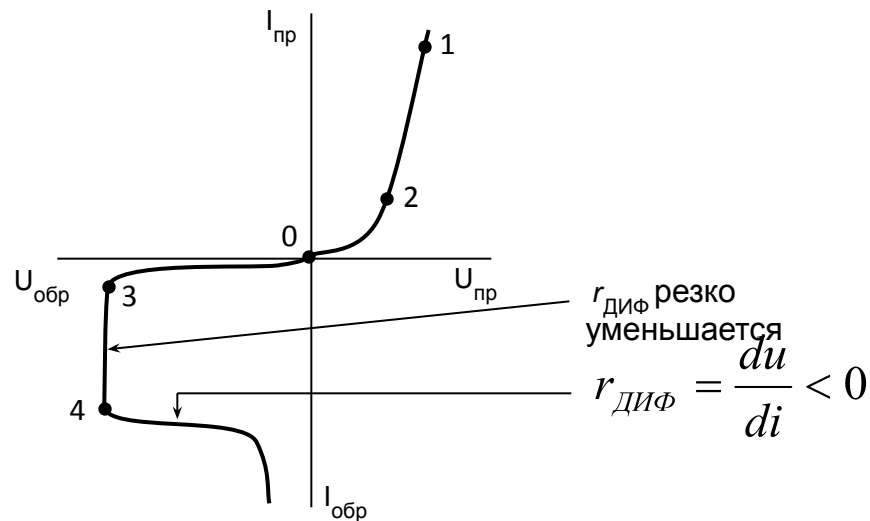
Электронно-дырочный переход. Основное уравнение диода.

Пробой *p-n*-перехода. Полупроводниковые диоды.

## Пробой $p$ - $n$ перехода

Пробой это резкое изменение режима работы перехода находящегося под обратным напряжением. Резко уменьшается дифференциальное сопротивление.

$$r_{\text{ДИФ}} = \frac{du}{di}$$



В основе пробоя лежат три физических явления

1. туннельный эффект;
2. лавинный пробой;
3. тепловой пробой.

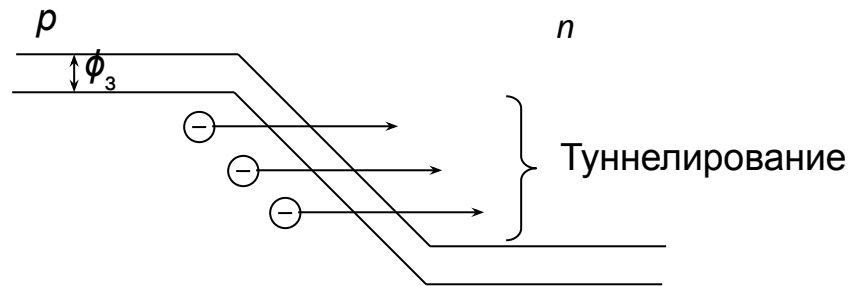
Туннельный пробой – электрический пробой

Лавинный пробой – тоже электрический пробой.

Тепловой пробой – пробой, **разрушающий переход.**



## Туннельный пробой



## Лавинный пробой

После электрического пробоя p-n переход не изменяет своих свойств.

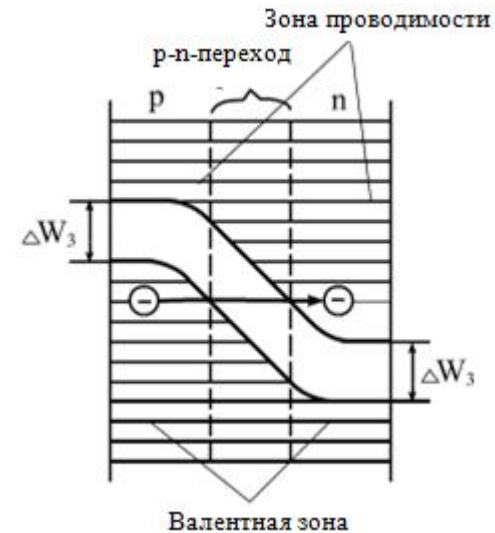
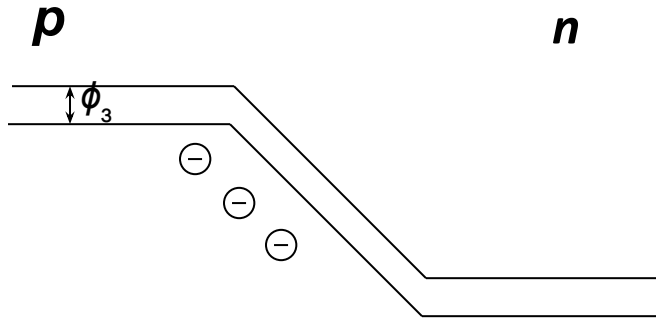
---

## Тепловой пробой

Тепловой пробой носит деструктивный характер!

## Туннельный пробой (эффект Зенера)

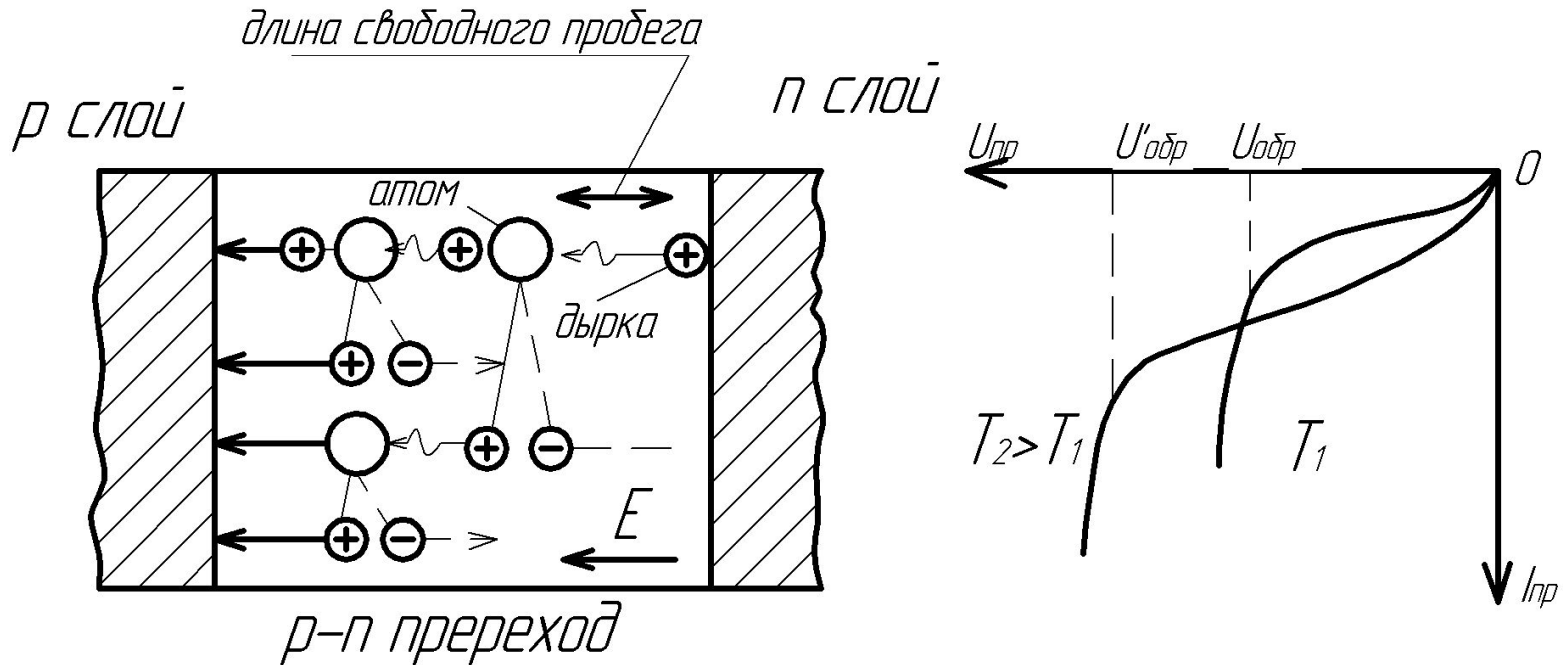
Туннельный пробой – это электрический пробой p-n-перехода, вызванный туннельным эффектом. Он происходит в результате непосредственного отрыва валентных электронов от атомов кристаллической решетки полупроводника сильным электрическим полем.



Туннельный пробой возникает обычно в приборах с узким p-n-переходом, где при сравнительно невысоком обратном напряжении (до 7 В) создается большая напряженность электрического поля. При этом возможен туннельный эффект, заключающийся в переходе электронов валентной зоны p-области непосредственно в зону проводимости n-области. Объясняется такое явление тем, что при большой напряженности электрического поля на границе двух областей с разными типами электропроводности энергетические зоны искривляются так, что энергия валентных электронов p-области становится такой же, как энергия свободных электронов n-области.

Лавинный пробой — электрический пробой в диэлектриках и полупроводниках, обусловленный тем, что, разгоняясь в сильном электрическом поле на расстоянии свободного пробега, носители заряда могут приобретать кинетическую энергию, достаточную для ударной ионизации атомов или молекул материала при соударениях с ними.

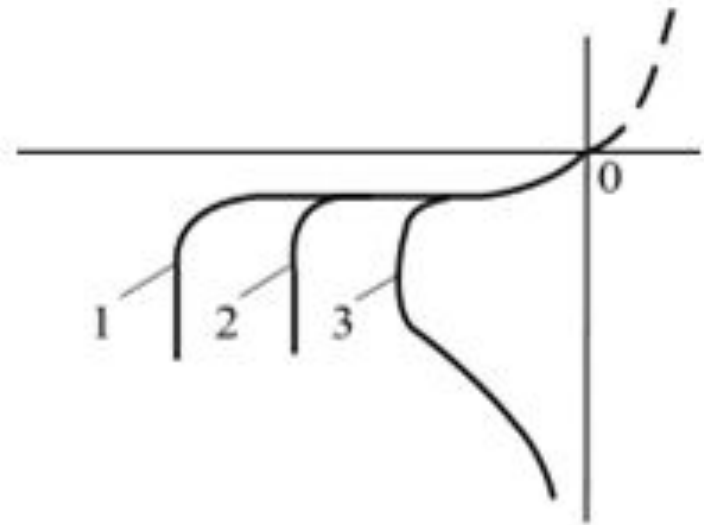
В результате каждого такого столкновения с достаточной для ионизации энергией возникает пара противоположно заряженных частиц, одна или обе из которых также начинают разгоняться электрическим полем и могут далее участвовать в ударной ионизации. При этом нарастание числа участвующих в ударной ионизации носителей заряда происходит лавинообразно, отсюда произошло название пробоя.



Тепловой пробой вызывается недопустимым перегревом р-n-перехода, когда отводимое от перехода в единицу времени тепло меньше выделяемого в нем тепла при протекании большого обратного тока, в результате чего происходит интенсивная генерация пар носителей заряда. Этот процесс развивается лавинообразно, поскольку увеличение обратного тока за счет перегрева приводит к еще большему разогреву и дальнейшему росту обратного тока.

Виды пробоя р-n-перехода:

- 1 – лавинный;
- 2 – туннельный;
- 3 – тепловой



Тепловой пробой носит обычно локальный характер: из-за неоднородности р-n-перехода может перегреться отдельный его участок, который при лавинообразном процессе будет еще сильнее разогреваться проходящим через него большим обратным током. В результате данный участок р-n-перехода расплавляется; прибор приходит в негодность. Участок теплового пробоя на вольт-амперной характеристике соответствует росту обратного тока при одновременном уменьшении падения напряжения на р-n-переходе.

# Медицинская электроника

Полупроводники. Зонная теория полупроводников.

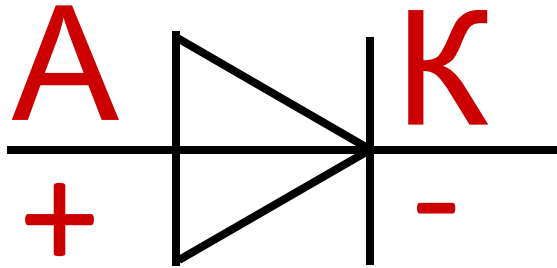
Электронно-дырочный переход. Основное уравнение диода.

Пробой  $p$ - $n$ -перехода. **Полупроводниковые диоды.**

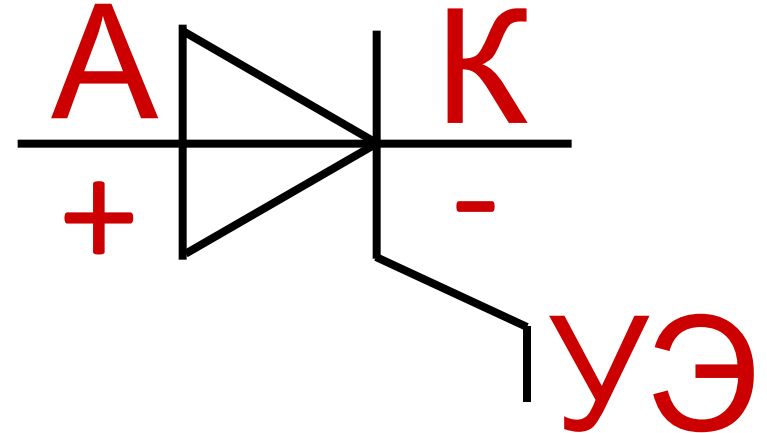
- Способность  $n$ – $p$ -перехода пропускать ток практически только в одном направлении используется в приборах, которые называются *полупроводниковыми диодами*.
- Полупроводниковые диоды изготавливаются из кристаллов кремния или германия.
- При их изготовлении в кристалл с каким-либо типом проводимости вплавляют примесь, обеспечивающую другой тип проводимости.

# Обозначения полупроводниковых приборов на принципиальных электрических схемах

Диод



Тиристор



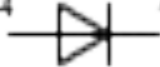
«А» - Анод

«К» - Катод

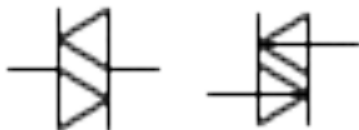
«УЭ» - Управляющий Электрод

## Условные обозначения

Анод Катод



а



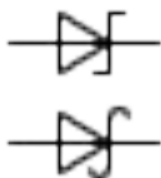
б



в



г



д



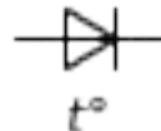
е



ж



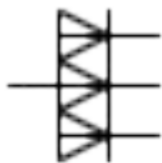
з



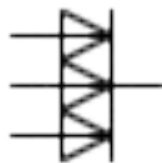
и



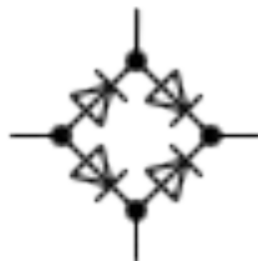
к



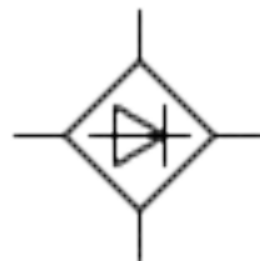
л



м



н

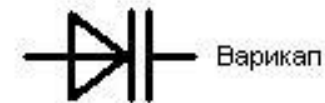
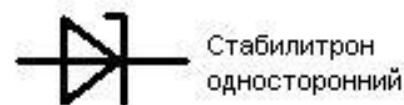
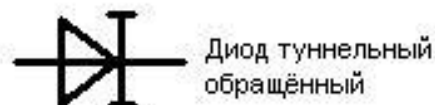
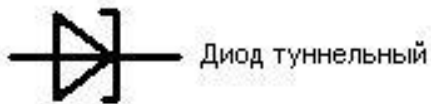
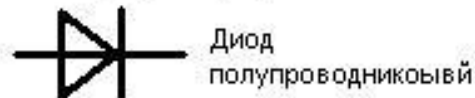


о

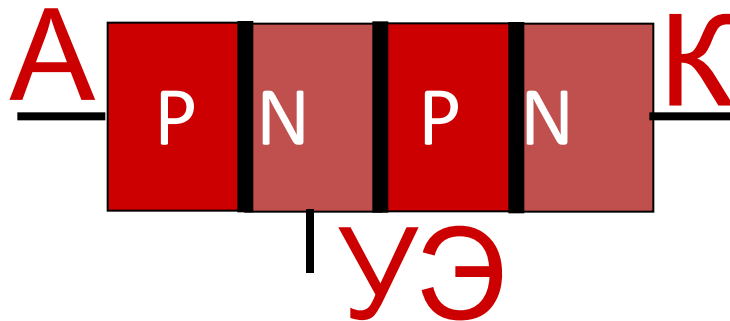
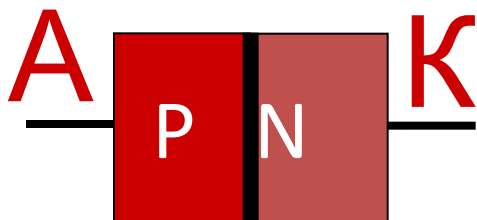
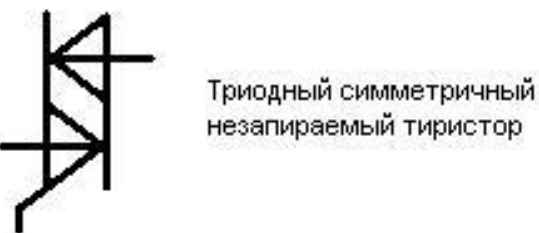
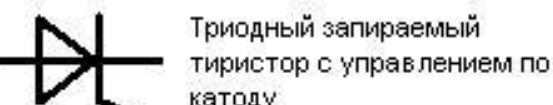
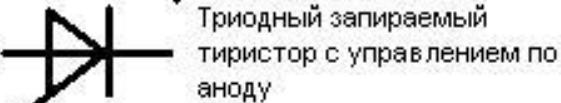
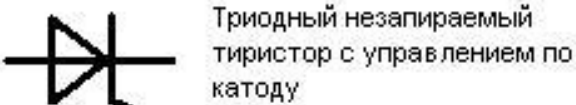
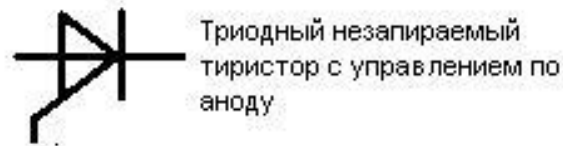
В зависимости от внутренней структуры, типа, количества и уровня легирования внутренних элементов диода и ВАХ различают: а) общее обозначение, б) симметричный, в) туннельный, г) обращённый, д) диод Шоттки; е, ж) стабилитроны; з) варикап; и) термодиод; к) выпрямительный столбик; л, м) диодные сборки; н, о) выпрямительный мост.



## Диоды



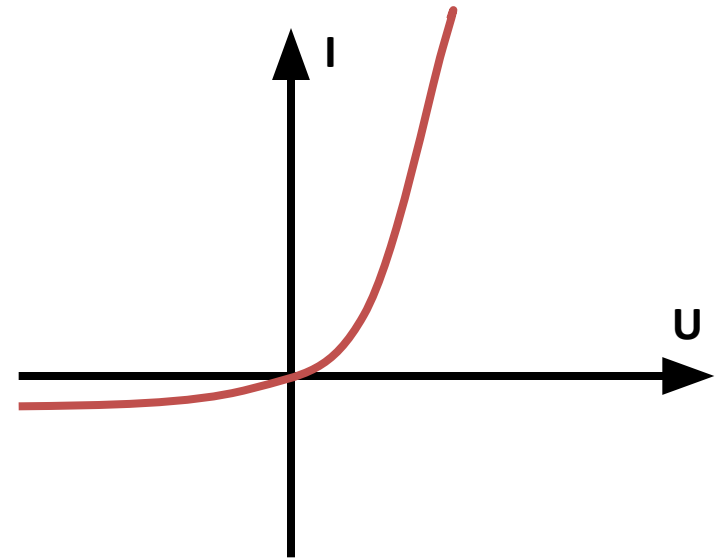
## Тиристоры



# Односторонняя проводимость p-n - перехода

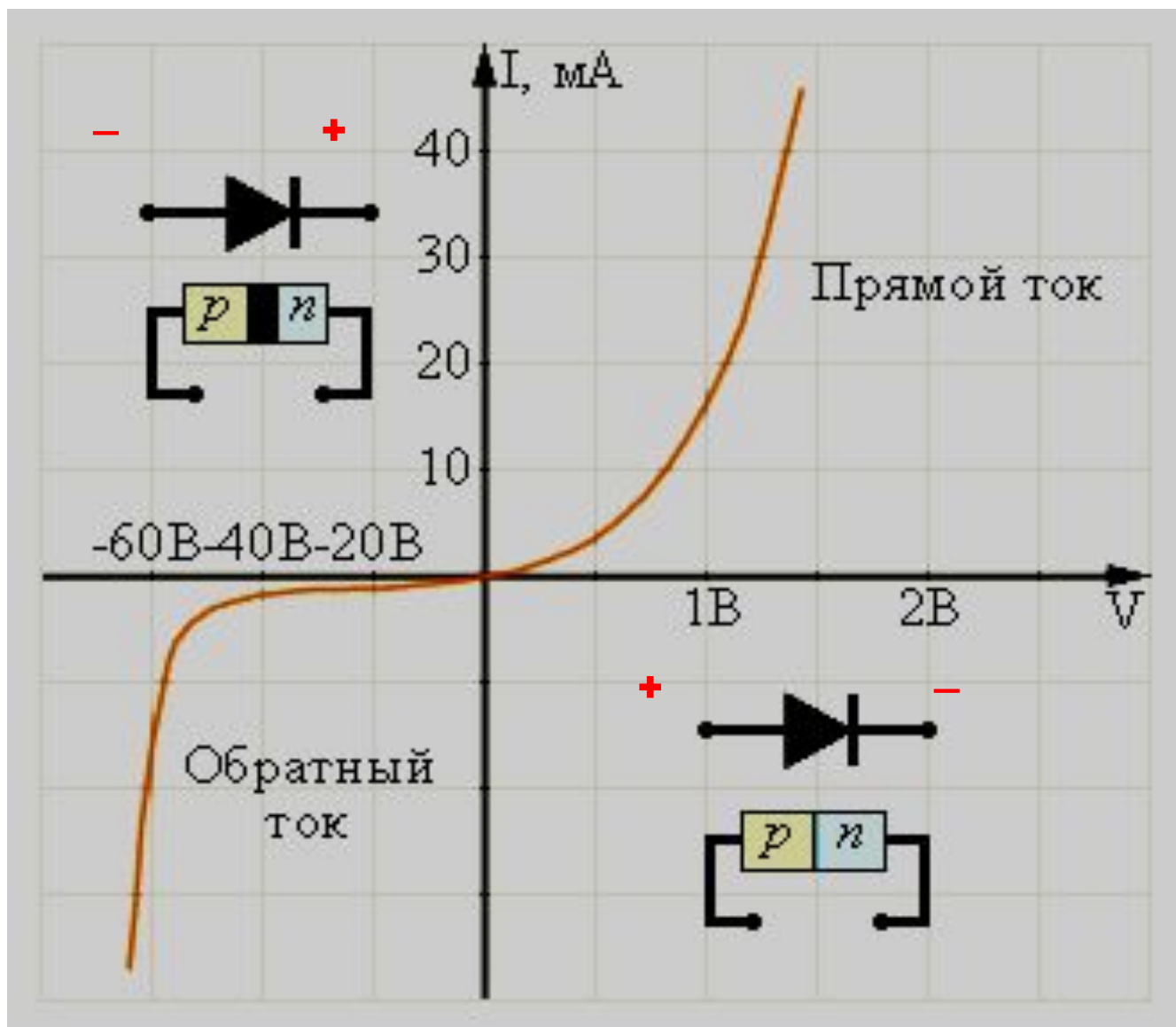
Как видно, p-n – переход проводит ток только в одном – прямом направлении.

Это свойство перехода лежит в основе полупроводниковых диодов – устройств, проводящих ток только в одном направлении.



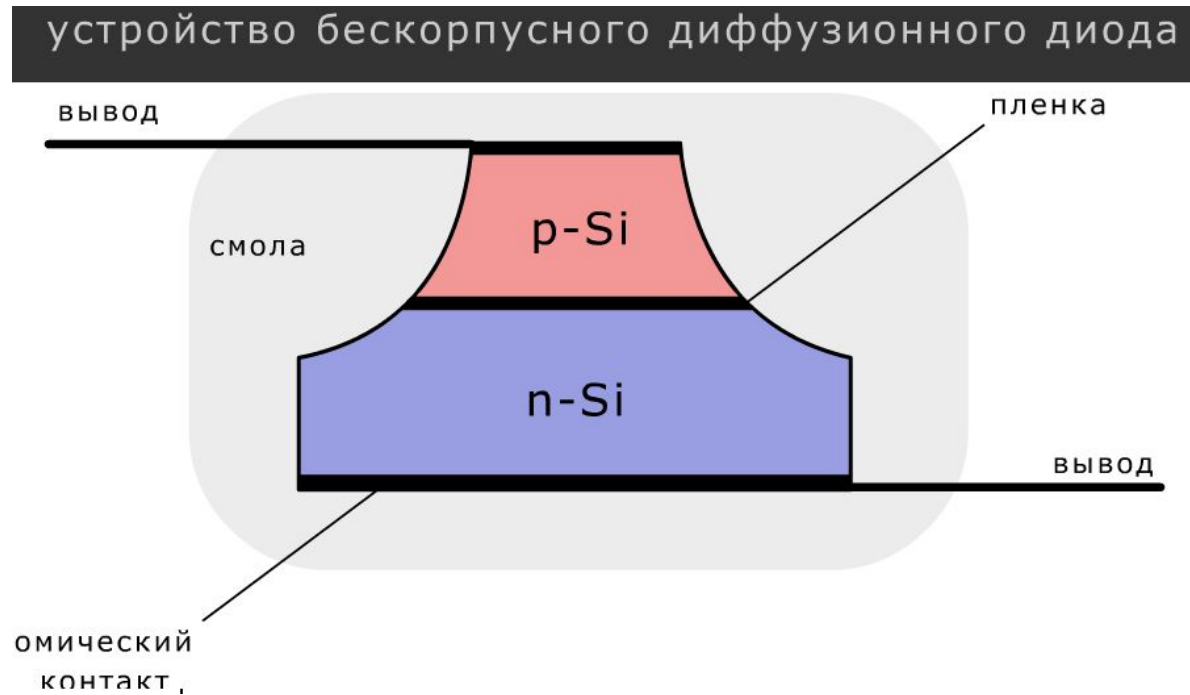
Вольт-амперная характеристика  
полупроводникового диода

# Типичная вольт-амперная характеристика кремниевых диода



# Полупроводниковый диод

*Полупроводниковым диодом* называют нелинейный электронный прибор с двумя выводами.



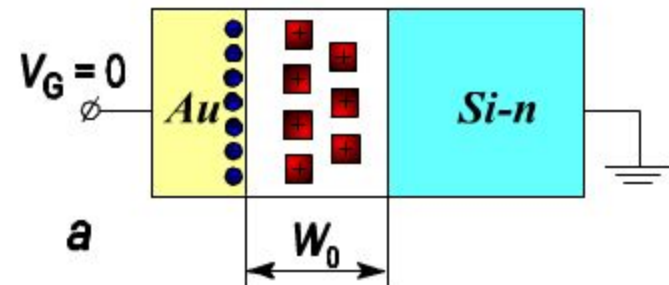
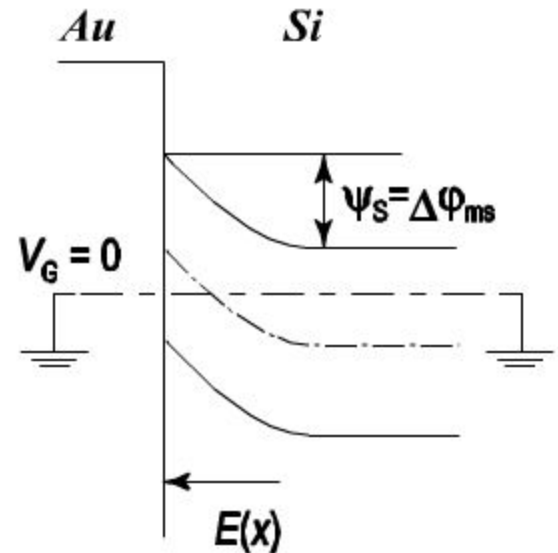
# Барьер Шоттки

Рассмотрим контакт металл–полупроводник (на примере контакта Au-Si n-типа) при условии

$$\Phi_{\text{Me}} > \Phi_{\text{п/п}}; \quad j_{\text{Me}} < j_{\text{п/п}}$$

Зонная диаграмма при различных значениях напряжения  $V_G$  на затворе:

- а)  $V_G = 0$ ;
- б)  $V_G > 0$ , прямое смещение;
- в)  $V_G < 0$ , обратное смещение



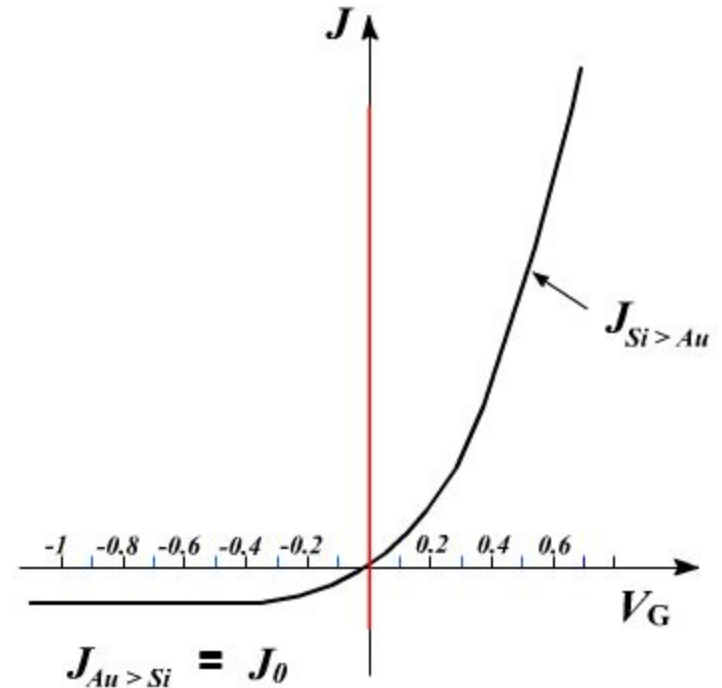
# Барьер Шоттки

Вольт-амперная характеристика барьера Шоттки

В условиях равновесия  $V_G = 0$  ток из полупроводника в металл уравнивается током из металла в полупроводник. При приложении напряжения этот баланс нарушается и общий ток будет равен сумме этих

токов.

$$J = J_{n/n \rightarrow M} - J_{M \rightarrow n/n} = \frac{1}{4} q n_s v_0 (e^{\beta V_G} - 1)$$



# Диод Шоттки

*Диод Шоттки* — полупроводниковый диод с малым падением напряжения при прямом включении.

Диоды на основе барьера Шоттки являются быстродействующими приборами, так как в них отсутствуют рекомбинационные и диффузионные процессы. Это свойство используется в интегральных микросхемах, где диодами Шоттки шунтируются переходы транзисторов логических элементов. В силовой электронике малое время восстановления позволяет строить выпрямители на частоты в сотни кГц и выше.

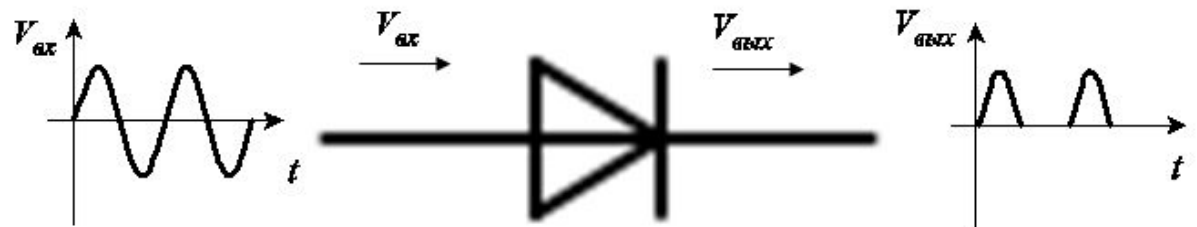
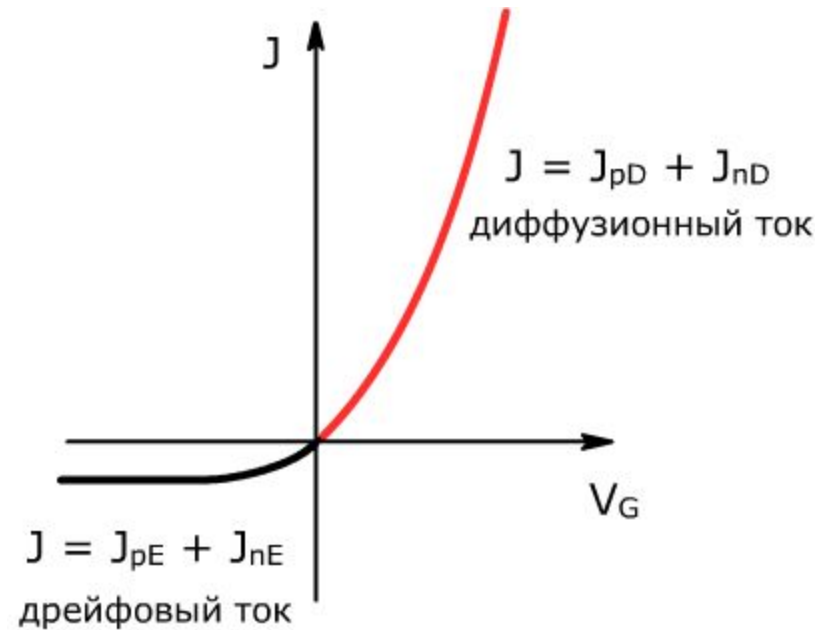
Выпрямляющий эффект границы Ме-полупроводник был обнаружен ещё в 19 веке, практически использован в начале 20 (купроксные и селеновые диодные приборы массово выпускались до 60-х годов), точечные контактные диоды – детекторы – и сейчас используются. Сейчас важны два типа контакта Ме-полупроводник:

- выпрямляющие (диоды с барьером Шоттки);
- омические (т.е. подчиненные закону Ома) – не выпрямляющие – необходимые для контакта полупроводниковые приборы с проводами (коммутацией), подвода и отвода управляемых токов и напряжений;

Если вероятность заполнения некоторого энергетического уровня в полупроводнике меньше, чем в металле, то при соприкосновении (контакте) часть электронов Ме перейдет в полупроводник. Это характерно для полупроводника «р». В результате в полупроводнике у границы число дырок уменьшится, обнажатся заряженные ионы «А-» и возникшее на контакте поле притормозит следующие электроны. Это похоже на поле в n-p переходе, но возникший потенциал поменьше, заряженный слой тоньше.

# Выпрямительные диоды

Основа – электронно-дырочный переход  
ВАХ имеет ярко выраженную нелинейность





# Выпрямительные диоды

Выпрямление в диоде происходит при больших амплитудных значениях

$$U_{\text{вх}} > 0,1 \text{ В} \quad |V_{\text{г}}| \gg kT/q$$

$V_{\text{Г}}, \text{ В}$	$\pm 0,01$	0,025	$\pm 0,1$	0,25	$\pm 1$
$K, \text{ отн. ед.}$	1,0	1,1	55	$2,3 \cdot 10^4$	$2,8 \cdot 10^{20}$

$$K = \frac{J^+}{J^-} = \frac{e^{\beta V_{\text{Г}}} - 1}{e^{-\beta V_{\text{Г}}} - 1}$$

Учтем, что величина  $\beta^{-1}$  при комнатной температуре составляет  $\beta^{-1} = 0,025 \text{ В}$ .

# Характеристическое сопротивление

- Дифференциальное сопротивление:

$$r_D = \frac{dU}{dI} = \left[ \frac{dI}{dU} \right]^{-1} = \frac{kT/q}{I + I_s}$$

- Сопротивление по постоянному току:

$$R_D = \frac{U}{I} = \left[ \frac{I}{U} \right]^{-1} = \frac{U}{I_0 (e^{\beta U} - 1)}$$

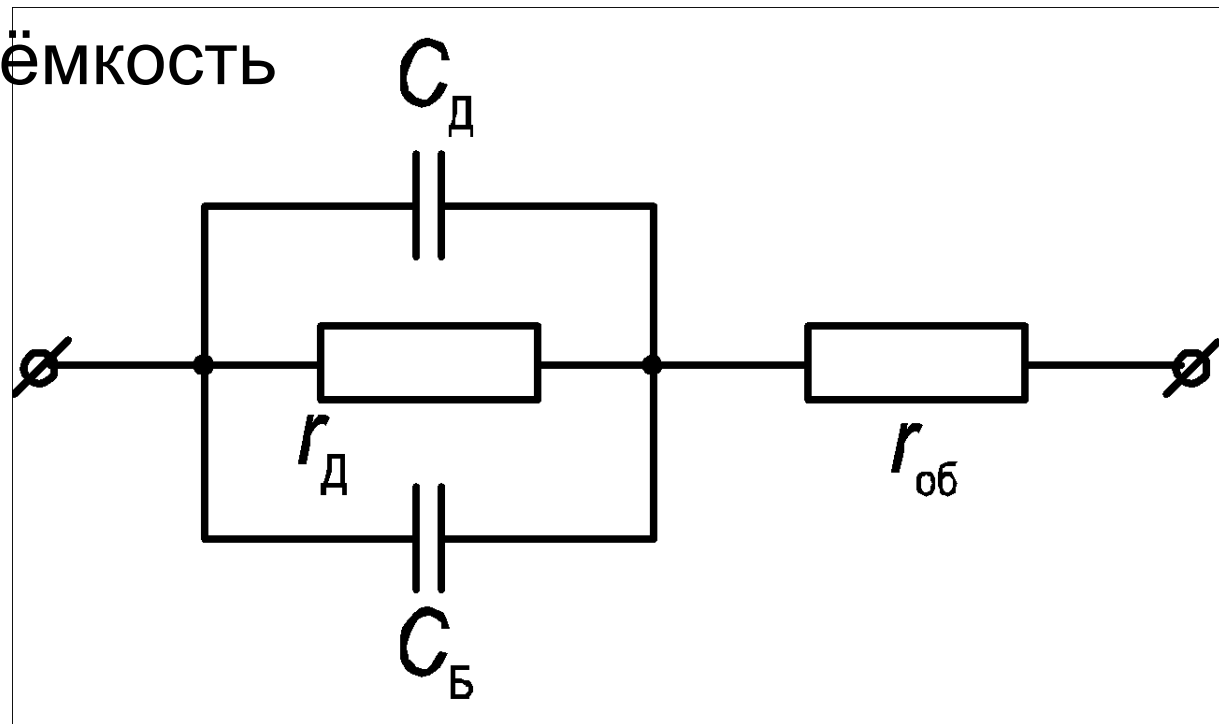
- На прямом участке ВАХ сопротивление по постоянному току больше, чем дифференциальное сопротивление  $R_D > r_D$ , а на обратном участке – меньше  $R_D < r_D$ .

- Вблизи нулевого значения  $V_G \ll kT/q$

$$R_D = \frac{kT}{q} \frac{1}{I_0} = r_D$$

# Эквивалентная малосигнальная схема диода для низких частот

- $r_{об}$  – омическое сопротивление базы диода
- $r_{д}$  – дифференциальное сопротивление
- $C_{д}$  – диффузионная ёмкость
- $C_{б}$  – барьерная ёмкость



# Варикап

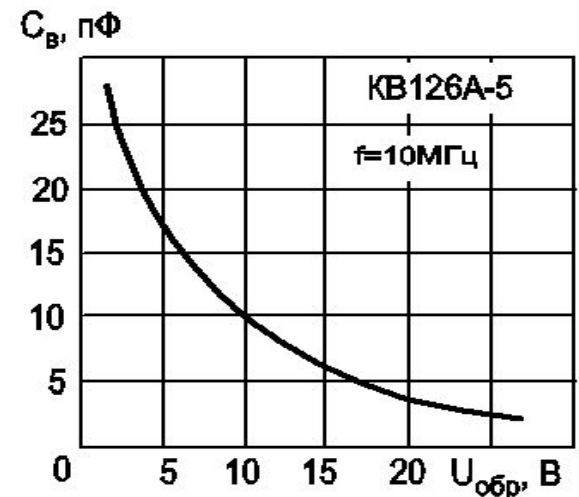
*Варикап – это полупроводниковый диод реализующий зависимость барьерной емкости от напряжения обратного смещения.*

Максимальное значение емкости варикапа имеет при  $V_G=0$

Емкость варикапа определяется шириной обедненной зоны.

В случае однородного легирования

$$C_B \sim \frac{1}{\sqrt{V_G}}$$



# Стабилитрон

*Стабилитроном* называется полупроводниковый диод, вольт-амперная характеристика которого имеет область резкой зависимости тока от напряжения на обратном участке вольт-амперной характеристики.

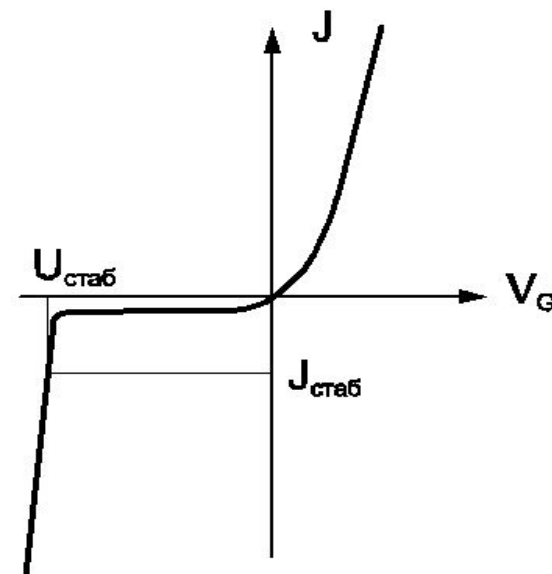
Основное назначение – стабилизация напряжения на нагрузке при изменяющемся напряжении во внешней цепи

При  $U < U_{\text{стаб}}$   $R_{\text{диф}} \rightarrow 0$

Стабилитрон также называют опорным диодом

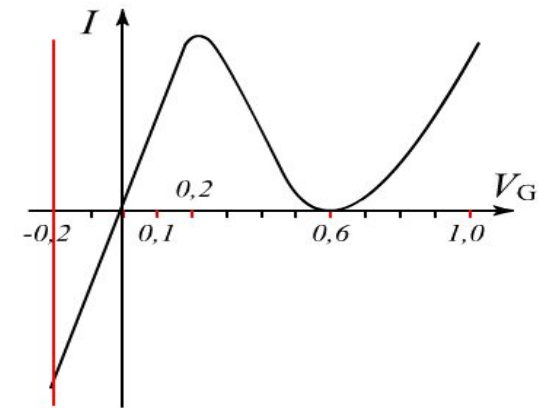
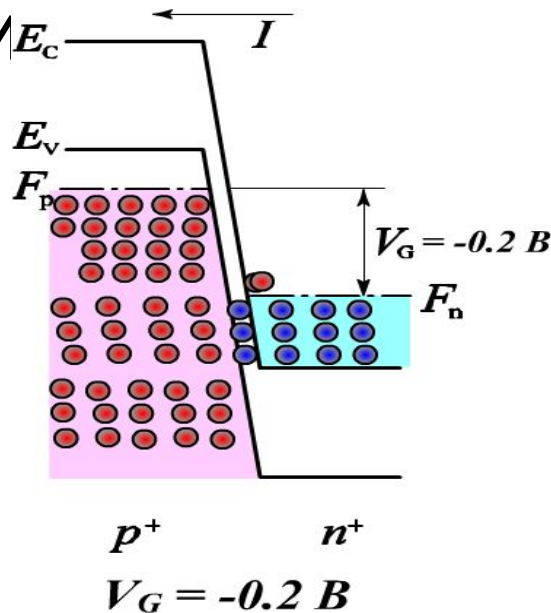
Два механизма:

- лавинный пробой;
- туннельный пробой



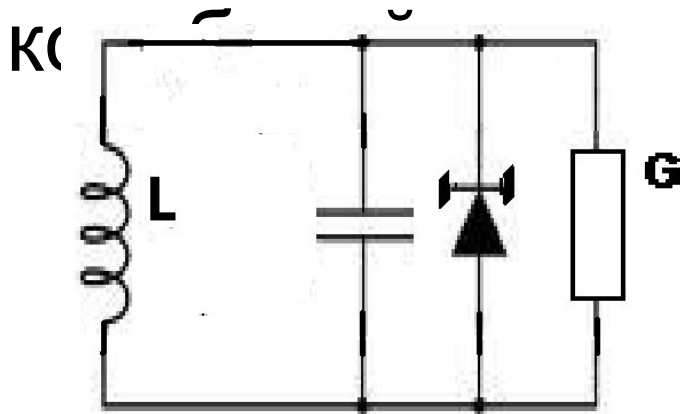
# Туннельный диод

Туннельным диодом называют полупроводниковый диод на основе  $p^+ - n^+$  перехода с сильнолегированными областями, на прямом участке вольт-амперной характеристики которого наблюдается  $N$ -образная зависимость тока от напряжения



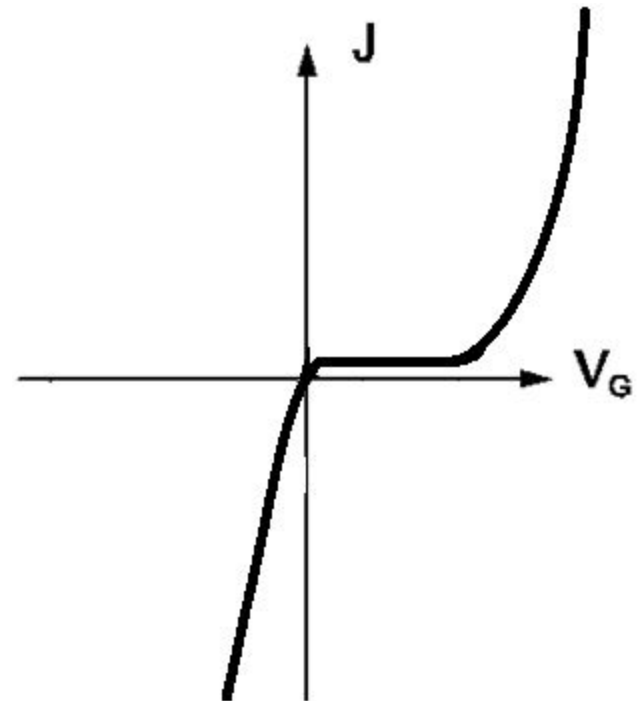
# Туннельный диод

Один из методов применения туннельного диода: в качестве активного нелинейного элемента в схемах генераторов



# Обращённый диод

- *Обращенный диод* – это туннельный диод без участка с ОДС. Высокая нелинейность ВАХ при малых напряжениях вблизи нуля позволяет использовать этот диод для детектирования слабых сигналов в СВЧ-диапазоне.
- ВАХ такого диода при обратном смещении такая же, как и у туннельного.

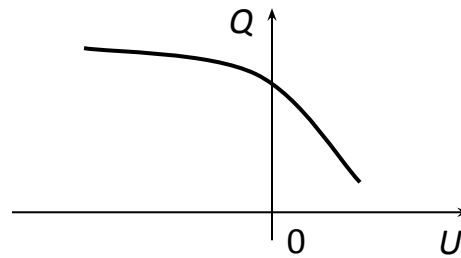
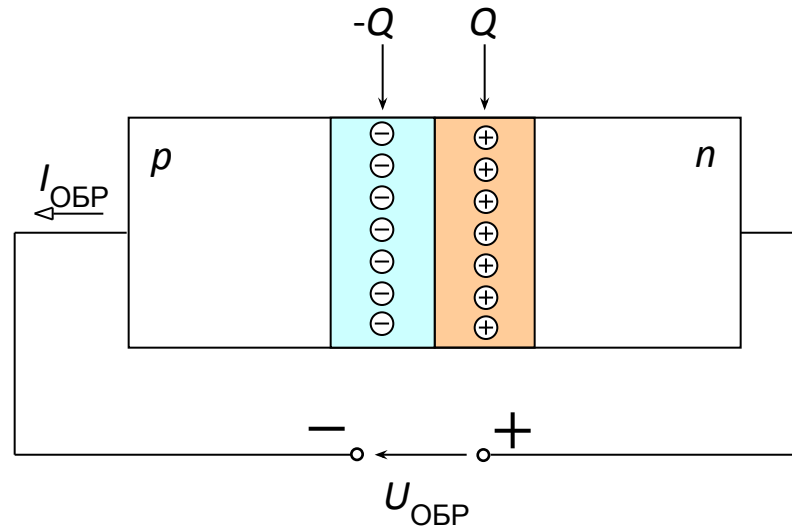




# Ёмкость $p$ - $n$

## перехода

Барьерная ёмкость

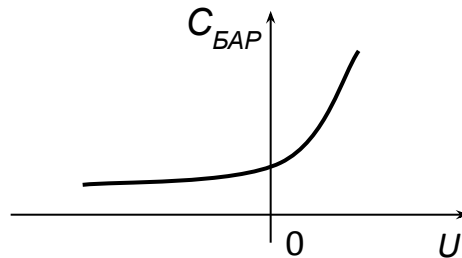


На постоянном токе

$$C_{\text{БАР}} = \frac{Q}{U}$$

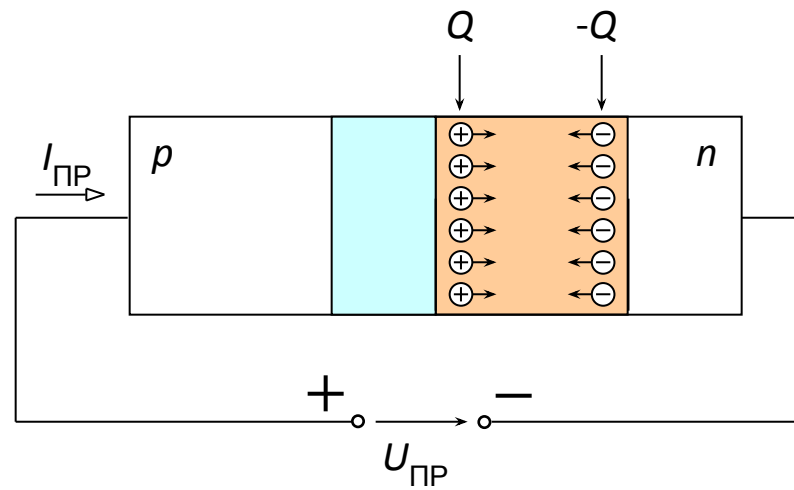
На переменном токе

$$C_{\text{БАР}} = \frac{dQ}{dU}$$



Барьерная ёмкость вредно влияет на выпрямление переменного тока (особенно на высоких частотах), так как шунтирует диод.

## Диффузионная ёмкость



$$C_{\text{ДИФ}} = \frac{dQ}{dU}$$

Ёмкость называют диффузионной, так как рассматриваемый заряд  $Q$  лежит в основе диффузии носителей в базе.  $C_{\text{диф}}$  удобно и принято описывать не как функцию напряжения  $U$ , а как функцию тока перехода.

Сам заряд  $Q$  прямо пропорционален току  $I$ . Тогда 
$$I = I_s \cdot \left( e^{\frac{U}{\varphi_T}} - 1 \right)$$

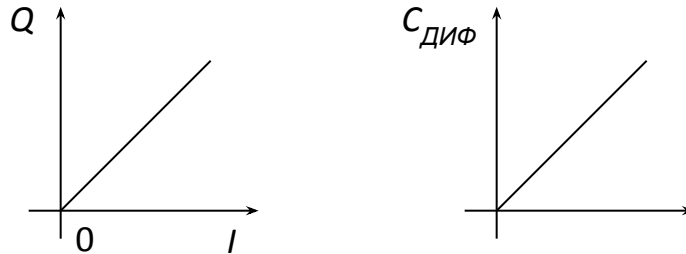
экспоненциально зависит от напряжения  $U$ : . Поэтому производная также прямо пропорциональна току. Отсюда следует, что ёмкость  $C_{\text{диф}}$  прямо пропорциональна току  $I$

$$\frac{dI}{dU}$$

$$C_{\text{диф}} = \frac{I \cdot \tau}{\varphi_T}$$

$$C_{\text{диф}} = \frac{I \cdot \tau}{\varphi_T}$$

$\tau$  - среднее время пролёта (для тонкой базы), или время жизни (для толстой базы).



Среднее время пролёта – это время, за которое инжектируемые носители заряда проходят базу. Время жизни – это время от инжекции носителя заряда в базу до рекомбинации.

Диффузионная ёмкость значительно больше барьерной, но использовать её не удаётся, так как она зашунтирована малым прямым сопротивлением самого диода.

## Общая ёмкость *p-n* перехода

$$C_{ПЕР} = C_{БАР} + C_{ДИФ}$$

При обратном смещении перехода ( $U < 0$ ) диффузионная ёмкость практически равна нулю. При прямом смещении обычно

$$C_{ДИФ} > C_{БАР}$$

# Температурные свойства

У германиевых  $p-n$ -переходов обратный ток увеличивается в 2 раза на каждые  $10^\circ \text{C}$ . Это можно выразить формулой

$$I_{\text{ОБР}} = I_{\text{ОБР}(20^\circ \text{C})} \cdot 2^{\frac{t-20}{10}}$$

Например, если температура перехода возросла с  $20^\circ \text{C}$  до  $70^\circ \text{C}$ , то обратный ток возрастёт в  $2^5$ , т.е. в 32 раза.

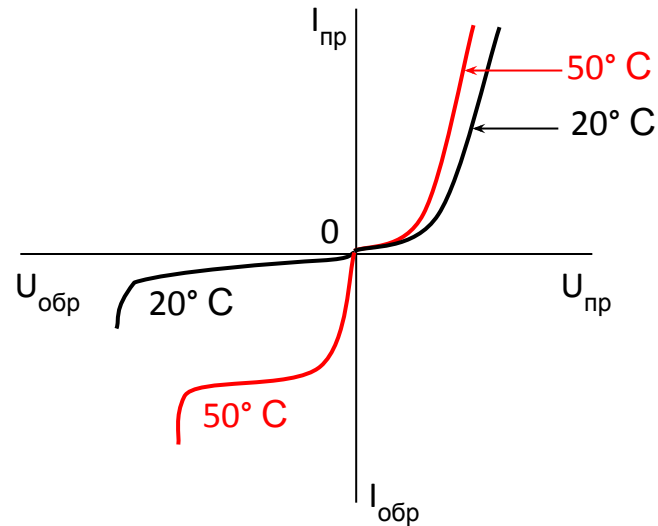
Кроме того у германиевых переходов снижается напряжение электрического пробоя.



У кремниевых  $p-n$ -переходов обратный ток увеличивается в 2,5 раза на каждые  $10^\circ \text{C}$ .

$$I_{\text{ОБР}} = I_{\text{ОБР}(20^\circ \text{C})} \cdot 2,5^{\frac{t-20}{10}}$$

У кремниевых  $p-n$ -переходов напряжение электрического пробоя при повышении температуры сначала несколько возрастает, а затем уменьшается.



С повышением температуры как у германиевых, так и у кремниевых *p-n*-переходов несколько возрастает барьерная ёмкость.

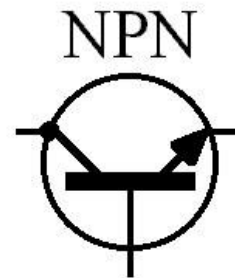
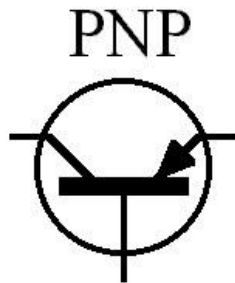
$$TKE = 10^{-4} \dots 10^{-3} K^{-1}$$



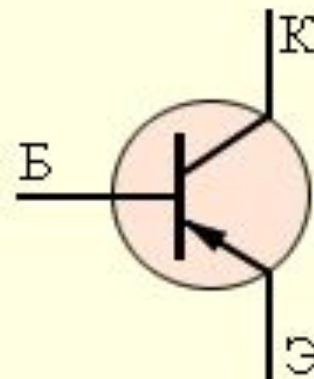
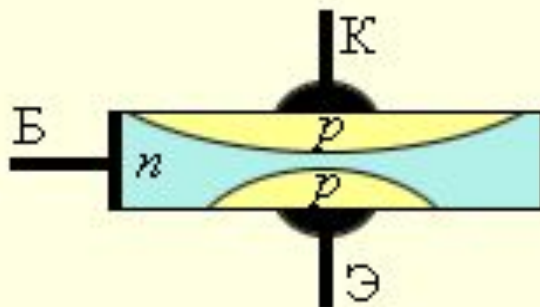
## Электронно-дырочный переход. Транзистор

- Полупроводниковые приборы не с одним, а с двумя  $n$ - $p$ -переходами называются *транзисторами*.
- Транзисторы бывают двух типов:  $p$ - $n$ - $p$ -транзисторы и  $n$ - $p$ - $n$ -транзисторы.

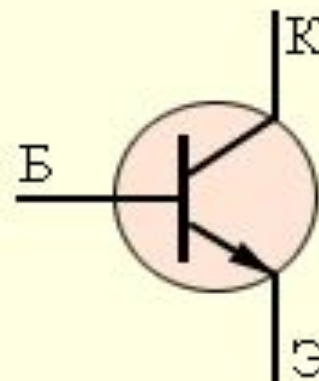
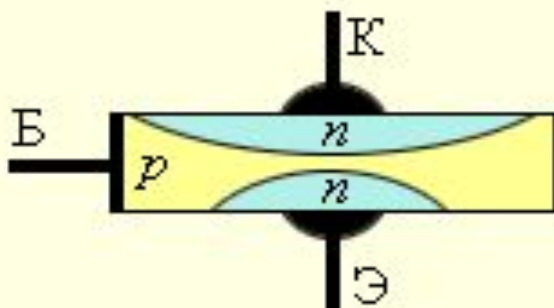
### БИПОЛЯРНЫЕ ТРАНЗИСТОРЫ.



## Электронно-дырочный переход. Транзистор



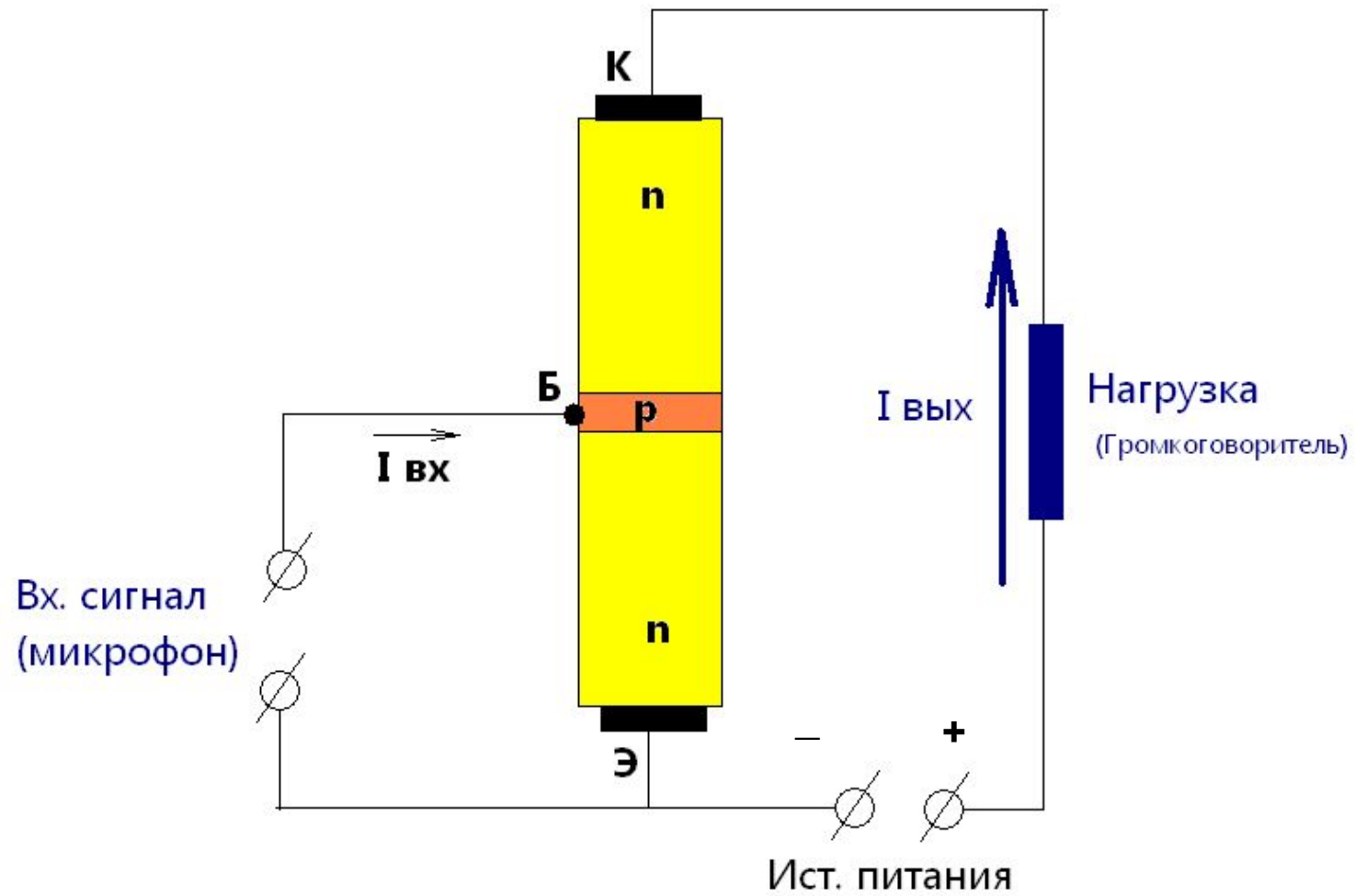
*Небольшая пластинка из германия с донорной примесью, т. е. из полупроводника n-типа. В этой пластинке создаются две области с акцепторной примесью, т. е. области с дырочной проводимостью.*



Основная пластинка обладает проводимостью p-типа, а созданные на ней две области - проводимостью n-типа.

## Электронно-дырочный переход. Транзистор

- Пластинку транзистора называют *базой (Б)*, одну из областей с противоположным типом проводимости - *коллектором (К)*, а вторую - *эмиттером (Э)*.



Принцип работы: один из двух электронно-дырочных переходов включен в прямом направлении (эмиттерный), а второй - в обратном (коллекторный). Переходы разделены областью базы. Толщина базы измеряется десятками долями микрометра.



Эмиттер впрыскивает (инжектирует) в базу неосновные носители тока, а коллектор «отделяет» их от основных. Так эмиттерный переход управляет током через коллекторный переход.