

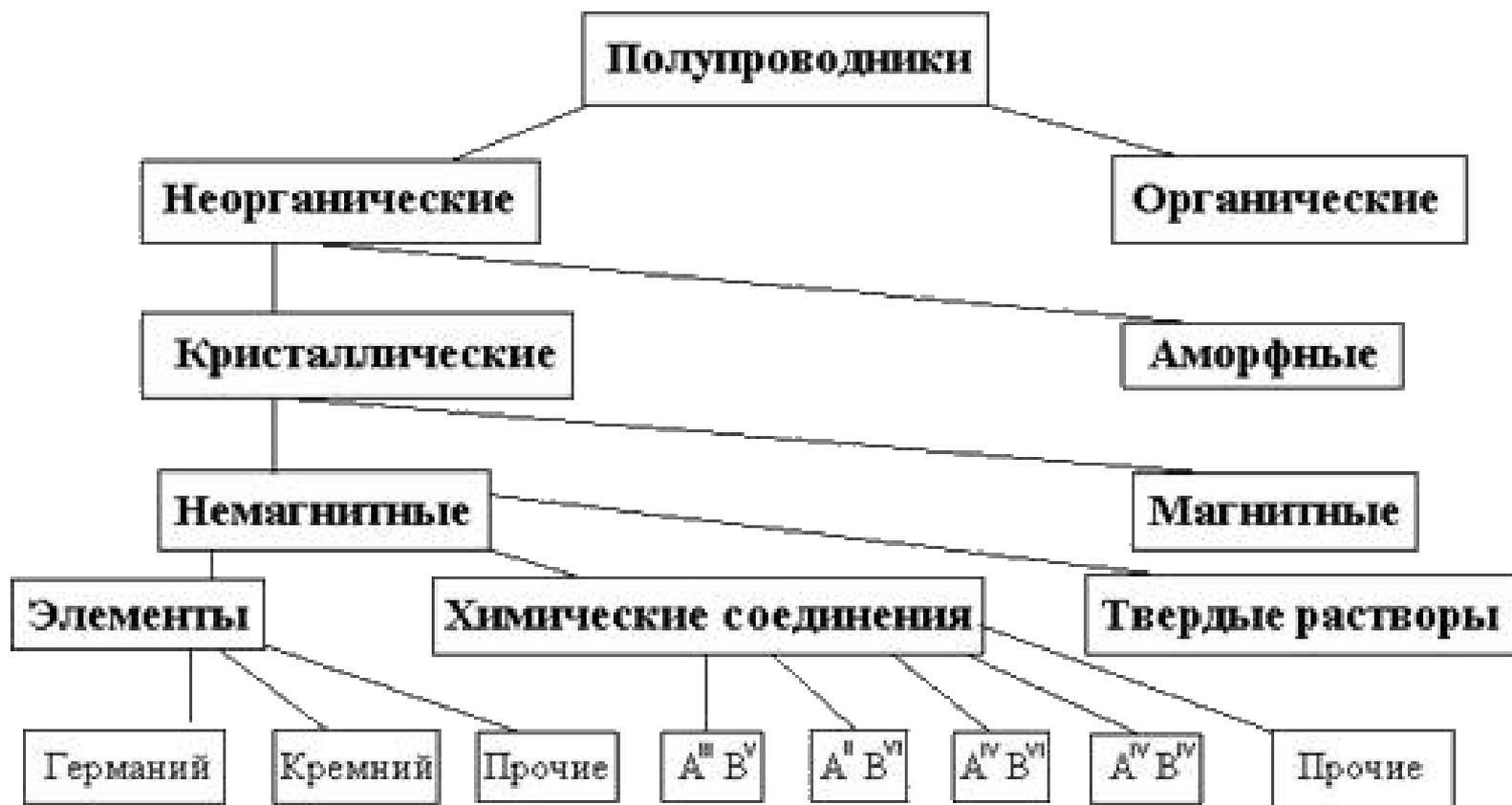
# ЭЛЕКТРОТЕХНИЧЕСКОЕ МАТЕРИАЛОВЕДЕНИЕ



© 2022 Томский политехнический университет, ОЭЭ ИШЭ

Лектор: к.т.н., доцент Васильева Ольга Владимировна

# Полупроводниковые материалы



# **ПОЛУПРОВОДНИКОВЫЕ МАТЕРИАЛЫ -**

**вещества, основным свойством которых  
является сильная зависимость  
электропроводности от внешних факторов**

## **По типу электропроводности**

### **Собственные**

**с.н.з. – электроны и дырки**

**12 простых веществ**

**B, C, Si, P, S, Ge, As, Sn (серое  
олово), Sb, Te, Y, Se.**

### **Примесные**

#### **Донорные**

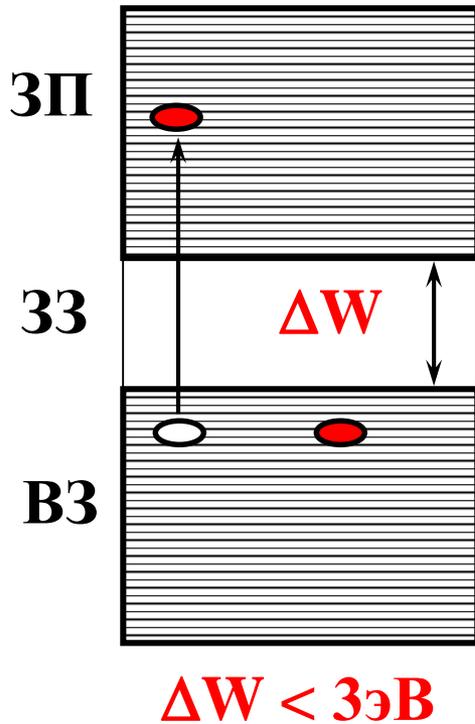
**с.н.з. –  
электроны**

#### **Акцепторные**

**с.н.з. –дырки**

Si – кремний, As – мышьяк, Sb – сурьма, Y – иттрий, Se – селен.

## полупроводники



$$\rho_V \sim 10^{-4} \div 10^9 \text{ Ом}\cdot\text{м}$$

$A^I B^{VII}$  (AgCl, CaBr и др.),

$A^{II} B^{VI}$  (CdS, CdSe и др.),

$A^{III} B^V$  (GaP, GaAs и др.),

$A^{IV} B^{IV}$  (PbS, GeO<sub>2</sub> и др.),

$A^I B^{VI}$  (CuS и др.)

$A^I B^{VII} C^{VI}$  (CuAlS<sub>2</sub>, CuJnS<sub>2</sub> и др.);

$A^I B^V C^{VI}$  (CuSbS<sub>2</sub>, CaAsS<sub>2</sub> и др.);

$A^I B^{VIII} C^{VI}$  (CuFeSe<sub>2</sub> и др.);

$A^{II} B^{IV} C^V$  (ZnSiAs<sub>2</sub>, ZnGeAs и др.);

$A^{IV} B^V C^{VI}$

**Энергия активации ( $\Delta W$ )** – минимальная энергия,  
необходимая для перевода электрона в зону  
проводимости

Общее число атомов:

$$n = \rho \frac{N_A}{M}$$

$\rho$  – плотность элемента [кг/м<sup>3</sup>];

$N_A = 6,022 \cdot 10^{23}$  – постоянная Авогадро [моль<sup>-1</sup>];

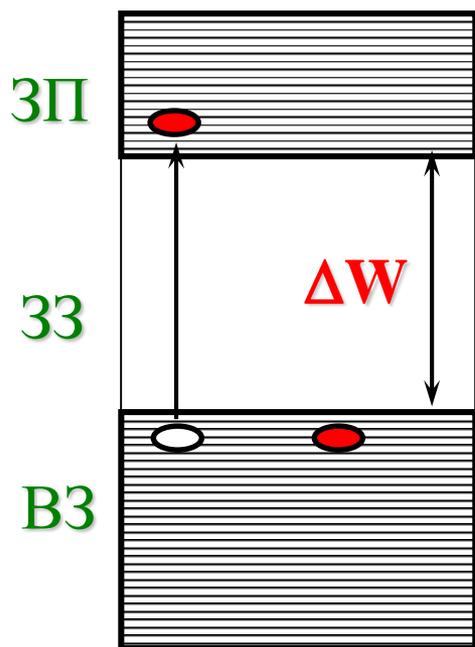
$M$  – молярная масса элемента [кг/моль].

## Область применения:

- для выпрямления тока (*диоды*);
- усиления и генерации электромагнитных колебаний (*транзисторы*);
- преобразования тепловой энергии и энергии излучения в электрическую (*термоэлементы и фотоэлементы*);
- для измерения температуры (*терморезисторы*);
- исследования магнитных полей (*датчики Холла*) и т.д.

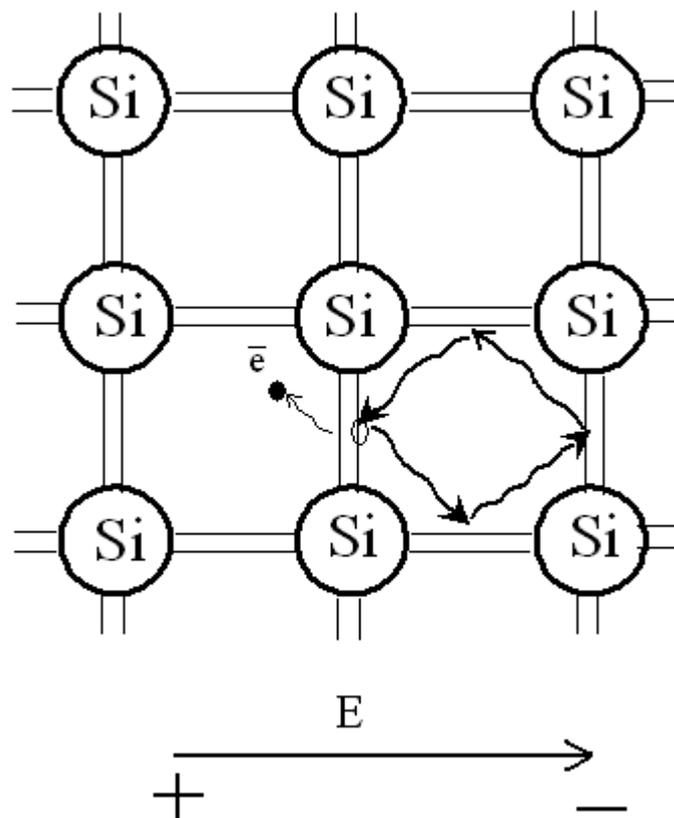
# ЭЛЕКТРОПРОВОДНОСТЬ СОБСТВЕННЫХ ПОЛУПРОВОДНИКОВ

Основы электроники – образование собственных и примесных п/п-в.



$$\Delta W < 3 \text{ эВ}$$

Для Si  
 $\Delta W = 1,2 \text{ эВ}$



Энергетическая зонная диаграмма  
собственного полупроводника

Плоская модель кристаллической  
решетки Si (кремний)

## Механизм образования свободных (собственных) носителей зарядов:

- Атом Si имеет на внешней электронной оболочке 4 валентных электрона, который *связан парно-электронными* ковалентными *связями* с 4-мя соседними атомами.
- При  $T \rightarrow 0\text{K}$  свободные носители зарядов *отсутствуют* (п/проводник по  $\gamma$  как диэлектрик).
- При  $T$  отличной от 0K (и др. воздействиях) может произойти *разрыв парно-электронной связи*.

## Механизм образования свободных (собственных) носителей зарядов:

- При этом образуется *свободный электрон* в ЗП и незавершенная парно-электронная связь-«дырка» в ВЗ.
- *Разрыв* одной парно-электронной связи приводит к образованию в полупроводнике *двух свободных носителей зарядов*: отрицательно заряженного *электрона* и положительно заряженной «дырки».

Электрон образует непрерывную проводимость, дырка – прыжковую (дискретную).

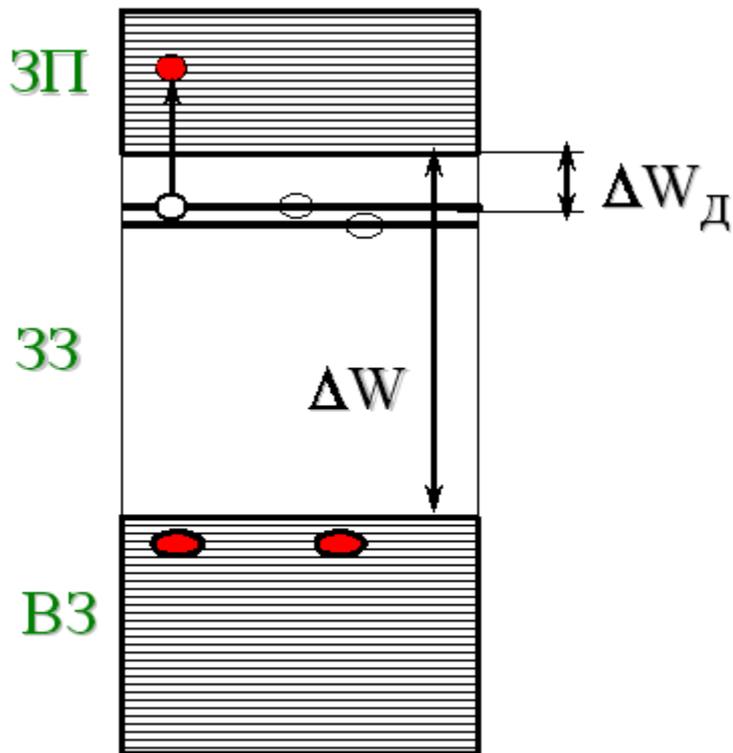
## Механизм образования свободных (собственных) носителей зарядов:

- При приложении *внешнего эл. поля свободные электроны* и «дырки» будут двигаться упорядоченно, т.е. создавать *эл. ток*.
- Если в кристалле имеются *дефекты*, то эл. поле, создаваемое ими, может *захватить электрон*.
- Такой локализованный *близ дефекта* электрон имеет энергию, попадающую как раз в ЗЗ (появляется *спектр локальных уровней*).
- Эти *локальные уровни* возникают *только* в местах расположения *дефектов*.

## Дефекты решетки:

- *Дефект решетки*, в котором в невозбужденном состоянии локальный уровень занят, а *при возбуждении* способен **отдать электрон в ЗП**, называется **донором** (*донорная примесь*).
- *Дефект решетки*, в котором в невозбужденном состоянии локальный уровень занят, а *при возбуждении* способен **захватить электрон из ВЗ**, называется **акцептором** (*акцепторная примесь*).

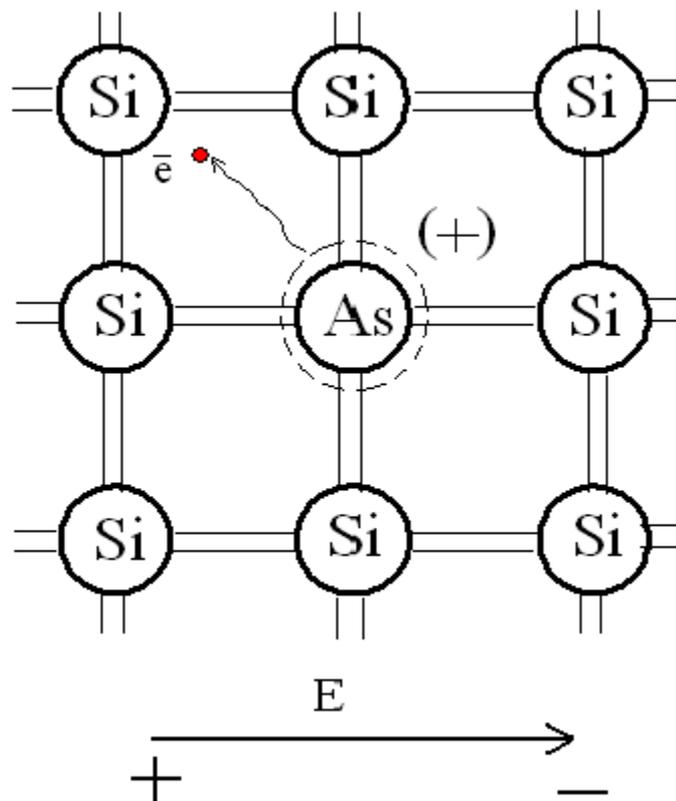
# ЭЛЕКТРОПРОВОДНОСТЬ ДОНОРНЫХ ПОЛУПРОВОДНИКОВ



$\Delta W$  до 3эВ

$\Delta W_д$  МНОГО МЕНЬШЕ  $\Delta W$

$\Delta W_д \sim 0,01$  эВ



As – мышьяк

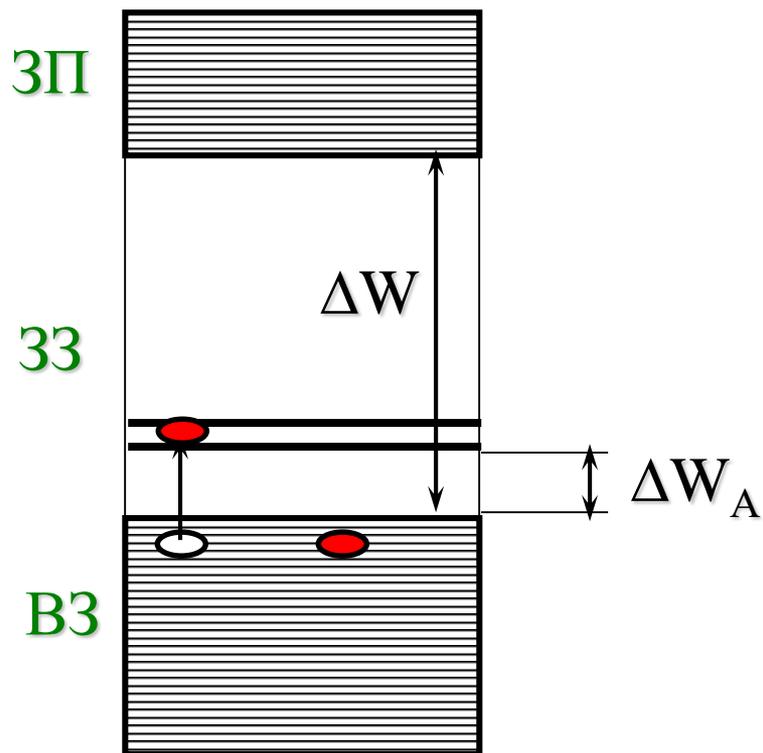
## Механизм образования свободных (примесных) носителей зарядов:

- Предположим, что *один из узлов* кристаллической решетки Si (*4-х валентного*) *замещен* атомом As, имеющим *5 валентных электронов*.
- *4 из них* будут участвовать в образовании *парно-электронных связей* с ближайшими соседними атомами Si. 5-й электрон, *не принимая участия* в образовании парно-электронных связей, будет связан со своим атомом (ядерными силами). *Энергия* этой связи *невелика*.

## Механизм образования свободных (примесных) носителей зарядов:

- Чтобы *ионизировать примесные атомы* мышьяка (т.е. оторвать электрон от атома и превратить его в *свободного носителя заряда*) требуется значительно меньшее количество энергии, чем для высвобождения электрона Si из ВЗ.
- А это означает, что *локальные уровни* должны располагаться в ЗЗ вблизи ЗП.
- Образ. в донорном п/п-ке *положительные ионы* примеси As принимать участие в электропроводности *не могут* – **структурный эл-т.**

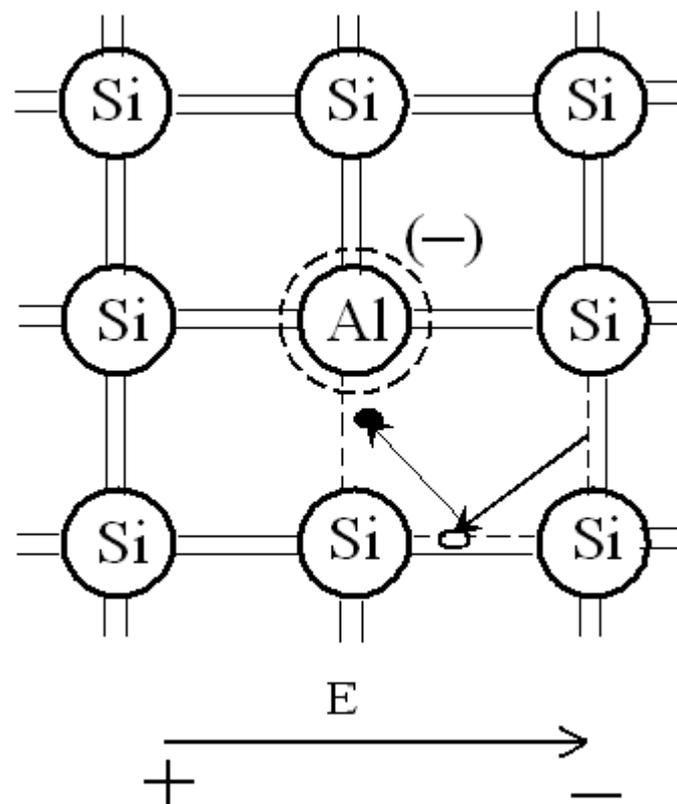
# ЭЛЕКТРОПРОВОДНОСТЬ АКЦЕПТОРНЫХ ПОЛУПРОВОДНИКОВ



$\Delta W$  до 3эВ

$\Delta W_A$  МНОГО МЕНЬШЕ  $\Delta W$

$\Delta W_A \sim 0,01$  эВ



Al – алюминий

## Механизм образования свободных (примесных) носителей зарядов:

- Предположим, что *один из узлов* кристаллической решетки Si (*4-х валентного*) *замещен* атомом Al, имеющим *3 валентных электрона*.
- У примесного атома *не хватает 1-го электрона* для образования *парно-электронной связи* с одним из атомов Si. При наличии *энергетических воздействий* может произойти возбуждение 1-го из эл-в атома Si и он будет способен перейти на свободную связь атома Al и в ВЗ появиться *«дырка»*.

Дырка прыгает с места на место.

## Механизм образования свободных (примесных) носителей зарядов:

- Т.к. переход эл-в из валентных связей Si к атому Al требует незначительных энергетических воздействий, то при введении атома Al в решетку Si приводит к появлению *локальных уровней* в ЗЗ вблизи потолка ВЗ.
- *Локальный уровень* может быть заполнен *электроном* из ВЗ, в которой появится соответствующее число *дырок*.
- Образ. в акцепторном п/п-ке *отрицательные ионы* примеси Al принимать участие в электропр-ти *не могут* – **структурный эл-т.**

## В полупроводниках с донорными и (или) акцепторными примесями в области низких T:

- в п/п-ке с *донорной примесью* концентрация *свободных электронов* будет *больше* концентрации *свободных дырок* ( $n \gg p$ ), и *электропроводность* называется *электронной* электропроводностью, а п/п-к – *полупроводником n-типа*:

$$\gamma_n = q \cdot n \cdot \mu_n.$$

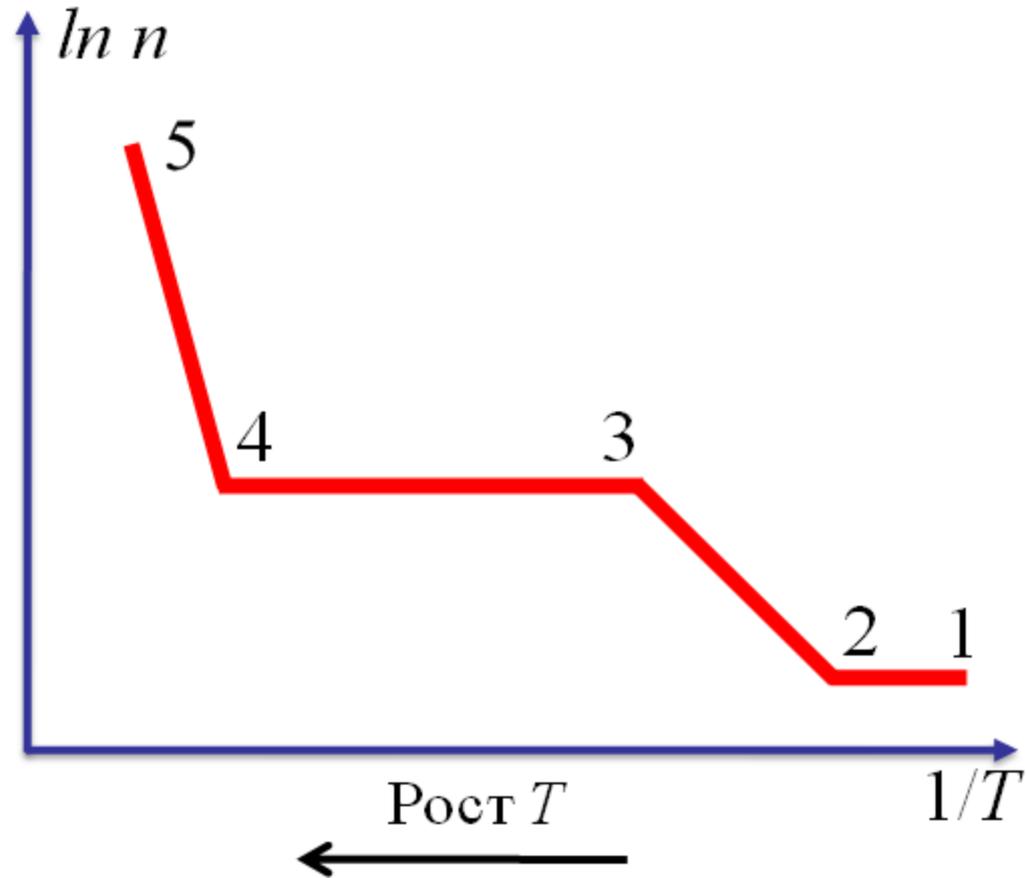
## В полупроводниках с донорными и (или) акцепторными примесями в области низких T:

- в п/п-ке с **акцепторной примесью** концентрация **свободных дырок** преобладает над концентрацией **свободных электронов** ( $p \gg n$ ) и **электропроводность** называется **дырочной** электропроводностью, а п/п-к – **полупроводником p-типа**:

$$\gamma_p = q \cdot p \cdot \mu_p.$$

Например, при изменении концентрации примеси в Ge в 30 раз примесная электропроводность меняется в  $10^7$  раз.

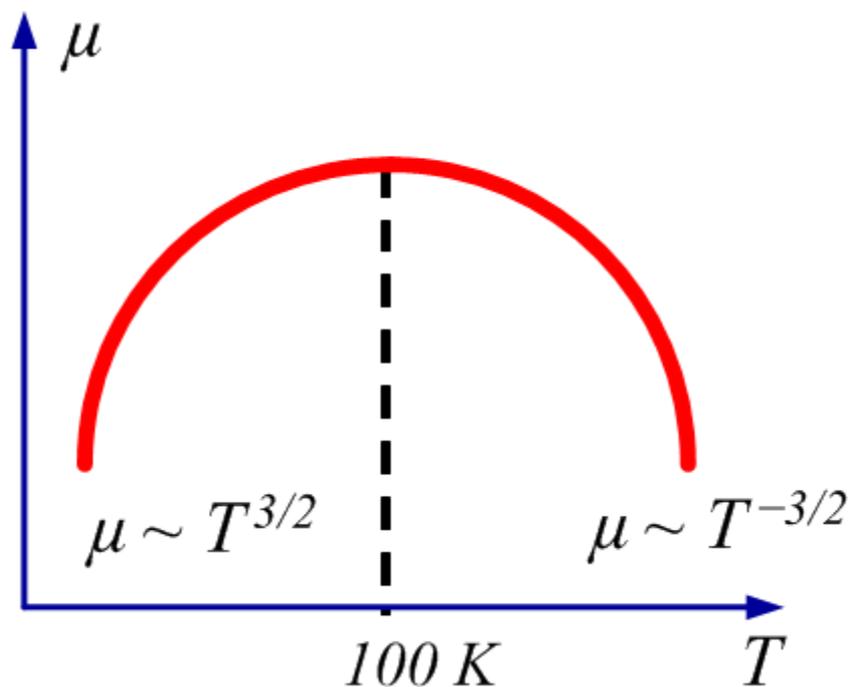
# Температурная зависимость концентрации $n$ с.н.з. в примесном полупроводнике



- При  $T \rightarrow 0\text{K}$  **концентрация** свободных носителей заряда определяется **фоновыми носителями**, имеющимися в п/п-ке за счет несовершенства технологии, нарушениями кристаллической структуры и неконтролируемыми примесями (участок 1-2).
- При повышении  $T$  п/п-ка **электроны с донорных уровней** (в случае донорного п/п-ка) переходят **в ЗП** или **из ВЗ на акцепторные уровни** (в случае акцепторного п/п-ка), и чем выше  $T$ , тем большее число примесных атомов будет активировано (участок 2-3).
- Когда энергии теплового поля станет достаточно для **полной активации примесей** (точка 3), произойдет **истощение примесных уровней**.

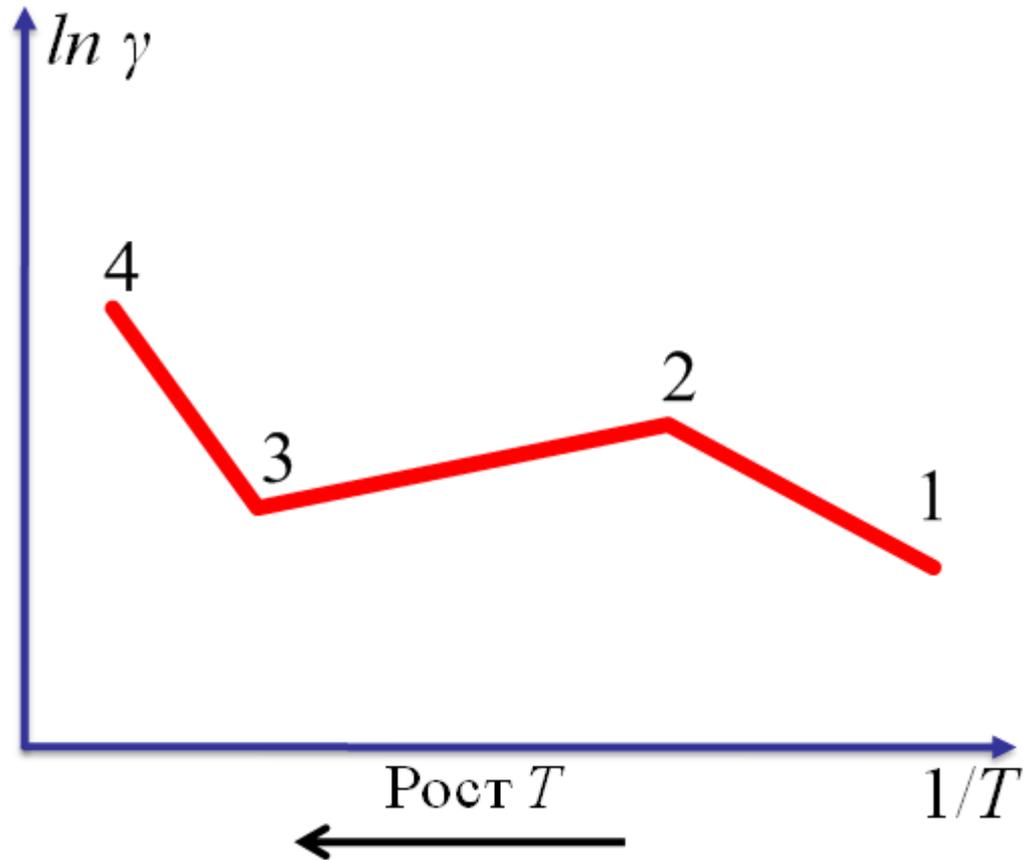
- Все *электроны донорной примеси* перейдут в ЗП, а все *атомы акцепторной примеси* захватят из ВЗ максимально возможное количество *электронов*.
- При дальнейшем повышении  $T$  *концентрация* свободных носителей заряда будет оставаться *постоянной* (область насыщения 3-4), т.к. *примесные уровни истощены*, а энергии теплового поля ( $kT$ ) *недостаточно* для активации собственных носителей заряда.
- В точке 4 *энергии теплового поля* становится *достаточной* для активации собственных носителей заряда в п/п-ке.
- Начинаются *переходы электронов* из ВЗ в ЗП и чем выше  $T$ , тем *больше актов активации собственных носителей* заряда (участок 4-5).

# Температурная зависимость подвижности $\mu$ с.н.з. в примесном полупроводнике



- *Увеличение подвижности* носителей зарядов на *первом участке* объясняется тем, что *рассеяние* на тепловых колебаниях узлов кристаллич. решетки *незначительно* из-за малой амплитуды колебаний в этой области температур. Тепловой эн-и *не достаточно*, чтобы раскачать узел кристаллич. решетки (ион), т.к. масса эл-на меньше массы иона, движутся свободные носители заряда, подвижность увеличится.
- Преобладающим является *уменьшение времени* нахождения носителей зарядов в поле иона примеси.
- На *втором участке* наоборот, *преобладающим* является *увеличение рассеяния* на тепловых колебаниях, *подвижность уменьшается*. Тепловой эн-и *достаточно*, чтобы раскачать узел кристаллической решетки (ион).

# Температурная зависимость электропроводности $\gamma$ с.н.з. в примесном полупроводнике



- Отрезок прямой (1-2) в *области низких  $T$*  характеризует *примесную электропроводность*, если собственный п/п-к – этого уч-ка не будет.
- На «переходном» участке (2-3) *примеси «истощены»*, а небольшое сниж-е электропр-ти обусловлено *рассеянием свободных носителей зарядов* на тепловых колеб. узлов кристаллич. решетки, (.) 2 – донорная примесь отдала все эл-ны, акцепторная – забрала все эл-ны; тепл. эн-и еще не достаточно для активации собственной электропр-ти.
- В *области высоких  $T$*  (участок 3-4) проявляется *собственная электропроводность*.
- *Возрастание электропроводности* п/п-в с повышением  $T$  происходит вследствие того, что *рост числа свободных носителей* зарядов оказывает на *электропроводность* большее влияние, чем в *уменьшение их подвижности*.

$$\gamma = nq\mu_n + pq\mu_p \quad \text{и} \quad n = Ae^{-\Delta W/2kT} \quad \Rightarrow$$

$$\gamma = \gamma_0 e^{-\Delta W/2kT} \quad \text{и} \quad \rho_T = \rho_0 e^{B/T}, \quad \text{где}$$

$$B = \Delta W/2k$$

$B$  – коэфф. температурной чувствительности.

Температурный коэффициент удельного сопротивления:

$$\text{TK}_\rho = \frac{1}{\rho} \frac{d\rho}{dT} = -B/T^2$$

$A$  – постоянная, зависящая от свойств полупроводника;  $k$  – постоянная Больцмана.

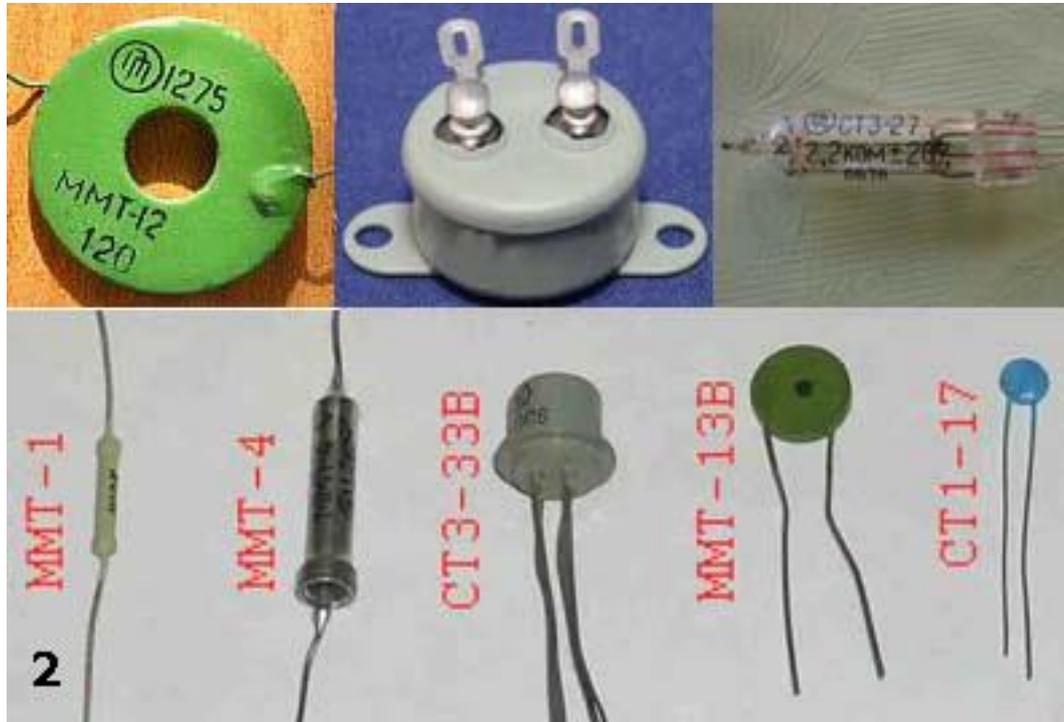
**ТЕРМОРЕЗИСТОР** – полупроводниковый прибор, действие которого основано на использовании зависимости электрического сопротивления от температуры

### **ТЕРМОРЕЗИСТОРЫ:**

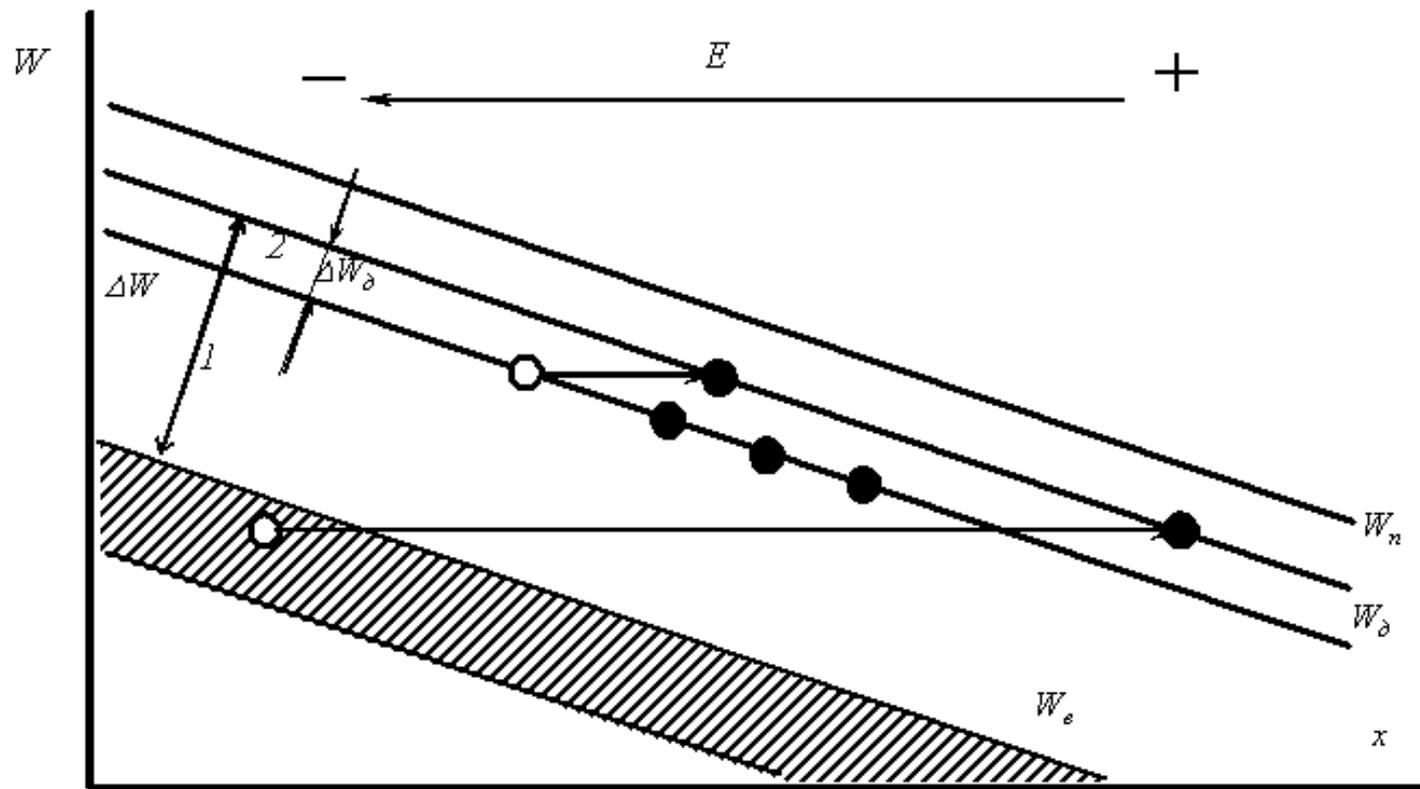
- 1. Кобальто-марганцевые (КМТ и СТ1)**
- 2. Медно-марганцевые (ММТ и СТ2)**
- 3. Медно-кобальто-марганцевые (СТ3)**

**СТ3:** СТ – термочувствительное сопротивление; 3 (цифра) – медно-кобальто-марганцевые.

- **Терморезистор** представляет собой объемное нелинейное полупроводниковое сопротивление с большим отрицательным температурным коэффициентом.
- **Материалами** для изготовления термисторов служат смеси окислов различных металлов: *Cu, Mn, Zn, Co, Ti, Ni* и др.



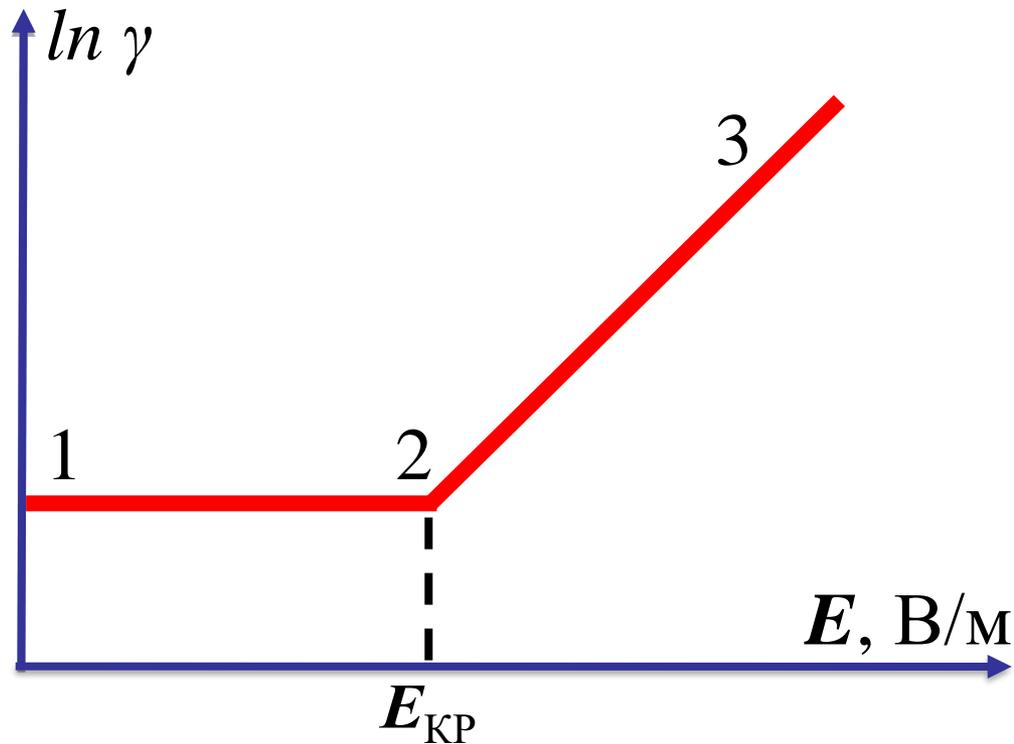
# ВЛИЯНИЕ НАПРЯЖЕННОСТИ ВНЕШНЕГО ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ПОЛЯ НА ЭЛЕКТРОПРОВОДНОСТЬ ПОЛУПРОВОДНИКОВ



**ЭЛЕКТРОСТАТИЧЕСКАЯ ИОНИЗАЦИЯ**

- Источником энергии, способствующим *образованию свободных носителей зарядов* в п/п-ке, может быть и *ионизация под действием эл. поля*.
- До некоторой величины напряженности эл. поля *концентрация* и *подвижность* носителей заряда *не зависят* от  $E$ . Т.о., *электропроводность* п/п-в в этом случае *не зависит* от напряженности эл. поля (**слабые поля**, если *зависят* – **сильные поля**).
- Величина *критической напряженности эл. поля* (min напр-ть, при которой сильная завис-ть подвижности и концентрации,  $E_k$  в пределах  $10^6$  В/м) *зависит от природы* п/п-ка,  $T$  и *концентрации примесей*.
- *Подвижность* свободных носителей зарядов *изменяется слабо*, а *концентрация* – *значительно*, подчиняется з. Френкеля.

- С точки зрения *зонной теории*: под действием  $E$  энергетические *зоны* становятся *наклонными*, т.к. электрон  $e$  *приобретает дополнительную энергию*, равную:  $W = -e \cdot E \cdot x$ , где  $x$  - координата нахождения электрона.
- В *сильном эл. поле* больше  $10^9$  В/м при наклоне зон возможен переход электрона путем *туннельного просачивания* электронов через ЗЗ (горизонтальные переходы 1 и 2).
- Механизм увеличения концентрации под действием сильного эл. поля – *электростатическая ионизация*.
- Если свободный электрон под действием внешнего эл. поля приобретает эн-ю, достаточную для перехода электрона из ВЗ в ЗП или с локальных уровней в ЗП, то возможна *ударная ионизация*.

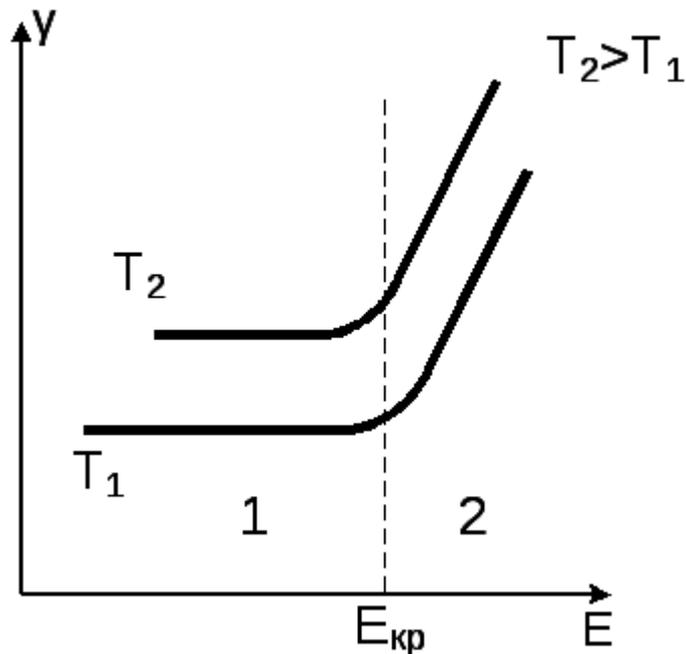


$E_{кр}$  – критическая напряженность электрического поля: минимальная напряженность при которой начинается сильная зависимость концентрации и подвижности с.н.з. от  $E$ . Закон Френкеля:

$$\gamma = \gamma_0 \exp(\beta \sqrt{E}) \quad ; \quad \rho = \rho_0 \exp(-\beta \sqrt{E})$$

$\gamma_0, \rho_0$  – проводимость и сопротивление при  $E \leq E_{кр}$ ,  $\beta$  – коэффициент нелинейности.

- Участок 1-2 соответствует *выполнению закона Ома* (внешнее электрическое поле *не вызывает изменения концентрации* носителей зарядов).
- Участок 2-3 соответствует *выполнению закона Френкеля*, (внешнее электрическое поле *характеризует увеличение концентрации* свободных носителей заряда).



При  $E_{кр}$  происходит искажение энергетических зон, происходит туннелирование эл-в — электростатическая ионизация (участок 2-3).

**ВАРИСТОР** – полупроводниковый прибор,  
действие которого основано на зависимости  
электропроводности (сопротивления) от  
напряженности электрического поля

В качестве материалов для изготовления  
*варисторов* используют:

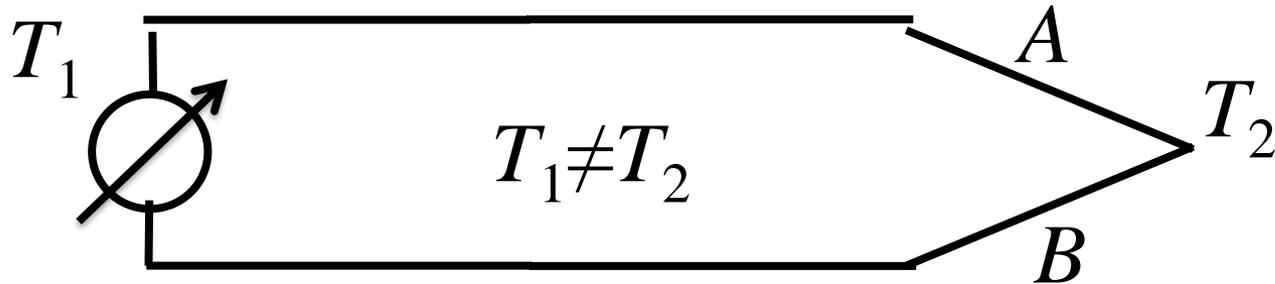
- а) карбид кремния (СН1);
- б) селен (СН2).

- **Варисторы** представляют собой нелинейные полупроводниковые сопротивления (резисторы).
- Они получили **широкое применение** в технике: защита элементов маломощной низковольтной и высоковольтной аппаратуры от перенапряжений, стабилизация напряжения, преобразование частоты и т.д.



# ТЕРМОЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ ЭФФЕКТЫ В ПОЛУПРОВОДНИКАХ

## Эффекты Зеебека, Пельтье и Томсона.



**Эффект Зеебека**: если в *замкнутой* электрической цепи, состоящей из *последовательно* соединенных *разнородных* полупроводников, на спаях создана **разность температур**  $\Delta T \neq 0$ , то в цепи возникает **термоЭДС**:

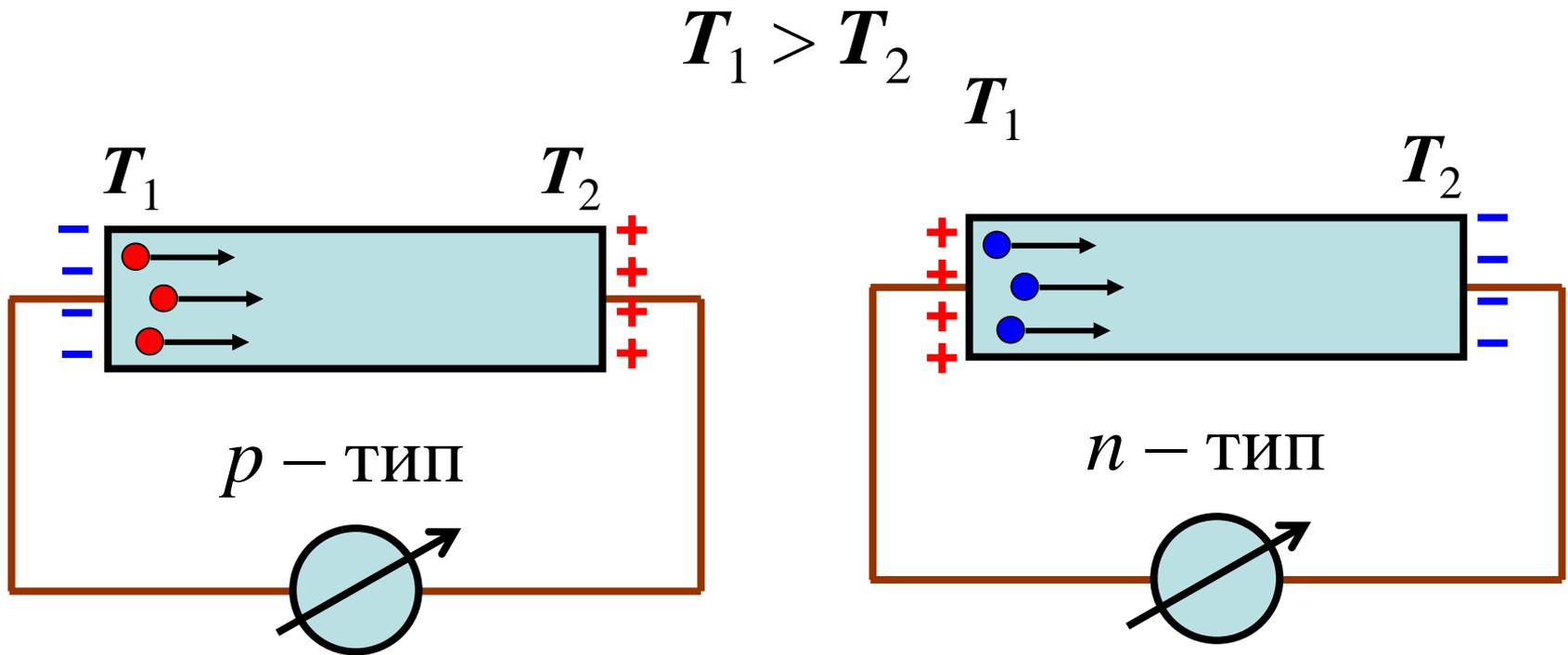
$$U_T = \alpha \cdot \Delta T$$

$\alpha$  – коэффициент термоЭДС, который зависит от материалов термопары и интервала температур (вплоть до изменения знака)

## *Механизм образования термоЭДС:*

- Один из концов однородного п/п-ка *нагрет больше*, чем второй.
- Свободные носители заряда у *горячего конца* будут иметь *более высокие энергии, скорости, концентрацию*.
- *Состояние равновесия* наступит при *равенстве* потока свободных носителей заряда, обусловленного *градиентом температур*, потоку, обусловленному действием *эл. поля*, возникшего в результате *разделения зарядов*.

# Определение типа с.н.з. с помощью эффекта Зеебека



Если концентрации свободных эл-в и дырок в п/п-ке (или их подвижности) неодинаковы, то концы п/п-ка окажутся противоположно заряженными. В п/п-ке *n*-типа, поток эл-в от горячего конца к холодному будет больше, чем от холодного к горячему. В результате, на холодном конце накопится избыточный отрицательный заряд.

## Определение типа с.н.з.:

- У **электронного  $n/p$ -ка** на холодном конце возникает избыточный **отриц. заряд**. На горячем конце останется не скомпенсированный **положит. заряд**, образованный ионами донорной примеси. Возникшее **эл. поле** будет вызывать **поток эл-в** от холодного конца к горячему.
- **Состояние равновесия** наступит при равенстве потока свободных носителей заряда, обусловленного градиентом температур, потоку, обусловленному действием эл. поля, возникшего в результате разделения зарядов.
- У **дырочного  $n/p$ -ка** на холодном конце возникает избыточный **полож. заряд**. Т.о., по знаку термоЭДС можно судить о типе электропроводности  $n/p$ -ка (“+” у  $n$ -типа и “-” у  $p$ -типа).

Данное явление используется для термоэлектрических генераторов – на космических станциях, одна часть освещенная, другая – в тени, создается градиент тем-р.

**Дифференциальная термоЭДС** (первое слагаемое характеризует вклад, вносимый электронами, а второе – дырками):

$$\alpha = \frac{k}{e} \cdot \frac{I}{n\mu_n + p\mu_p} \left\{ n\mu_n \left[ 2 + \ln \frac{2(2\pi \cdot m_e^* kT)^{3/2}}{h^3 n} \right] - p\mu_p \left[ 2 + \ln \frac{2(2\pi \cdot m_p^* kT)^{3/2}}{h^3 p} \right] \right\},$$

где  $k$  – постоянная Больцмана;  $e$  – заряд электрона;  $n$  и  $p$  – концентрация электронов и дырок;  $\mu_n$  и  $\mu_p$  – подвижность электронов и дырок;  $m_e^*$  и  $m_p^*$  – эффективные массы электронов и дырок;  $h$  – постоянная Планка. В этом выражении учитывается вклад, вносимый в термоЭДС электронами и дырками.

**Эффект Пельтье**: при прохождении *тока* через *контакт* двух *последовательно* соединенных *разнородных* полупроводников, *место соединения* *нагревается* или *охлаждается* в зависимости от *направления тока*.

Количество теплоты:  $Q_{\text{П}} = \pm \Pi \cdot I \cdot t$

$\Pi$  – коэффициент Пельтье

$I$  – величина тока, протекающего через контакт

$t$  – время прохождения тока

Томсон установил связь:  $\alpha = \Pi/T$

«+» – количество тепла выделяется; «-» – поглощается.

## **Причина возникновения эффекта:**

- Внешнее *эл. поле* переносит *эл-ны* или *дырки* из одного материала в другой, причём *равновесная энергия эл-в* или *дырок* в обоих материалах различна и *эл-ны*, пришедшие из одного материала через спай, имеют *избыток* или *недостаток энергии* по сравнению с остальными *эл-ми*.
- Этот *избыток* (или *недостаток*) энергии *отдаётся решетке* (или *пополняется за счёт решетки*), в результате чего *темп-ра* спая *растёт* (или *падает*).

Н-р, ток течет от «-» (электроны) к «+» (дырки), происходит рекомбинация, система отдает избыток энергии (нагревается).

Термохолодильники (автомобильные), если перепутать полярность, будет печка.

Эффект Томсона: при прохождении *тока* через *полупроводник*, вдоль которого есть *градиент температуры*, в дополнении к теплоте Джоуля, в зависимости от *направления тока*, *выделяется* или *поглощается* некоторое количество тепла.

Теплота Томсона:  $Q_T = \tau \cdot \Delta T \cdot I \cdot t$

$\tau$  — коэффициент Томсона

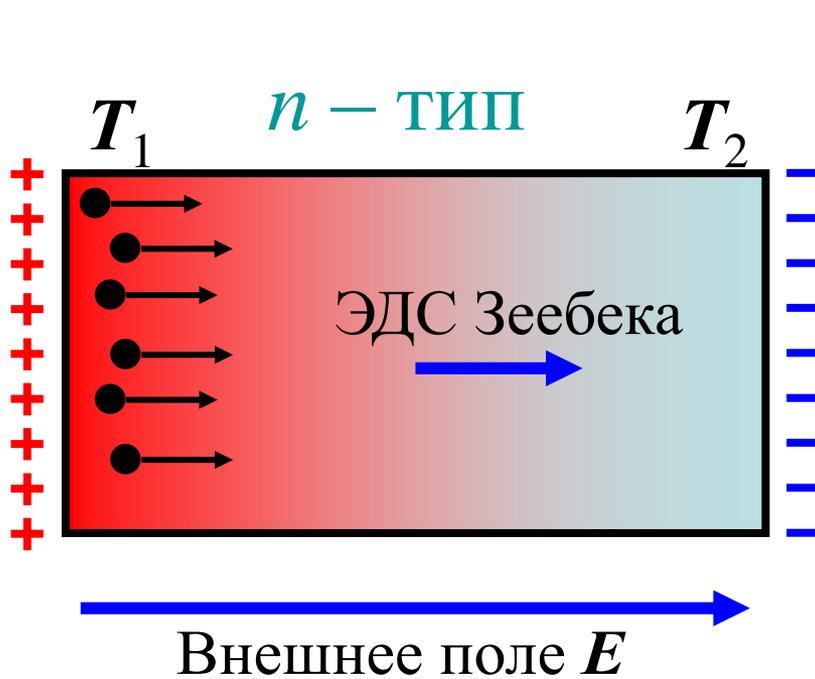
Между всеми *термоэлектрическими явлениями* существует *связь*:

$$\alpha = d\Pi/dT + (\tau_1 - \tau_2)$$

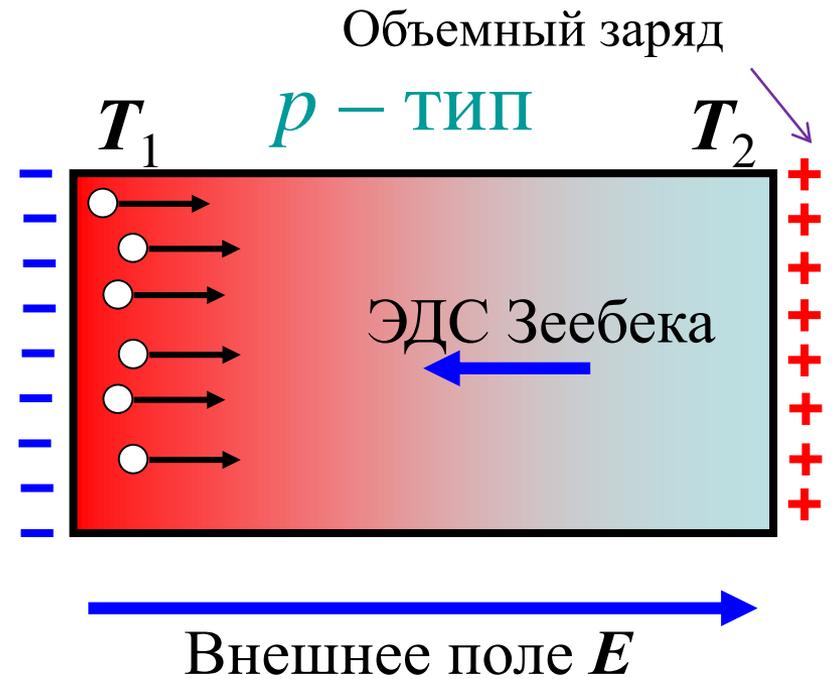
## *Причина возникновения эффекта:*

- При наличии в п/п-ке *градиента температуры*, в нём возникает *термоЭДС*. Если направление  *$E$  возникшего эл. поля* совпадает с направлением  *$E$  внешнего поля*, то не вся энергия, поддерживающая ток, обеспечивается внешним источником.
- Часть работы совершается за счёт *тепловой энергии* самого п/п-ка, в результате чего он *охлаждается*. При смене направления  *$E$  внешнего поля*, оно будет совершать дополнительную работу, что приведёт к *выделению тепла*, дополнительного к *теплоте Джоуля*.

# Механизм возникновения эффекта Томсона. $T_1 > T_2$



ЭДС Зеебека будет помогать передвиж. осн.н.з.



ЭДС Зеебека будет препятств. передвиж. осн.н.з.

- *П/п-вый прибор*, основанный на использовании *эфффектов Зеебека* или *Плетье* и предназначенный для непосредственного *преобразования теплоты в электрическую энергию и обратно*, называется *п/п-вым термоэлементом*.
- *П/п-вые термоэлементы* используются в устройстве *термоэлектрических генераторов (ТЭГ)* и *холодильников*.



# Гальваномагнитный эффект Холла

Если *пластину полупроводника*, вдоль которой течёт *электрический ток  $I$* , поместить в *магнитное поле  $H$* , направленное *перпендикулярно* направлению *тока*, то в полупроводнике возникнет *поперечное электрическое поле  $E$* , направленное *перпендикулярно току и магнитному полю*.

## **Гальваномагнитный эффект Холла:**

- связан с действием *магнитного поля  $H$*  на *эл. свойства* п/п-ков и металлов, по которым протекает *эл. ток*.
- *Движущиеся эл-ны*, создающие ток  $I$  вдоль п/п-ка отклоняются *силой Лоренца* (по правилу левой руки) *к задней грани* п/п-ка (определ-ся тип п/п-ка  $\Rightarrow$   $n$  – тип «-»).
- У *передней грани* останутся *не скомпенсированные ионы* донорной примеси. Появ-ся *поперечное эл. поле*, которое *препятствует* дальнейшему отклонению эл-в *к задней грани* пластины.
- *Состояние равновесия* уст-ся при *равенстве силы*, действ. на эл-ны *со стороны поперечного поля  $E_x$* , *силе Лоренца*.

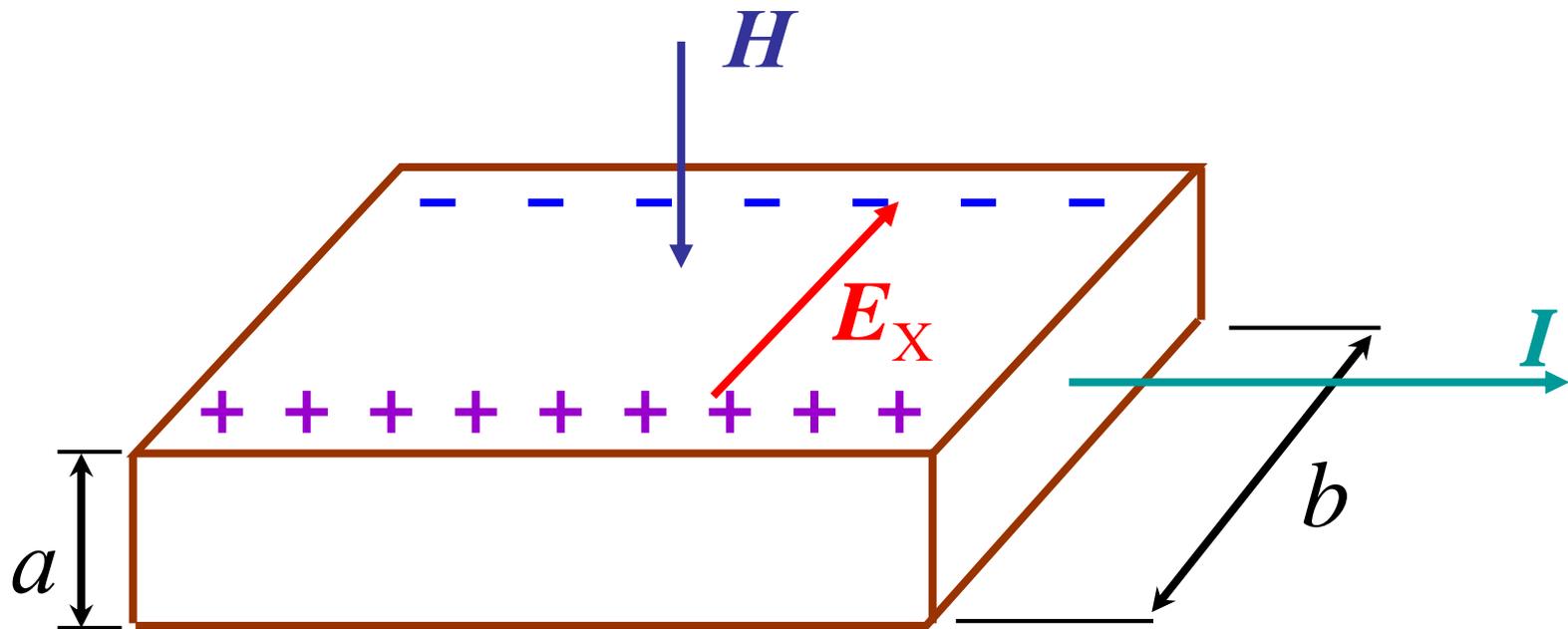


Схема возникновения ЭДС Холла  $U_x$

$$U_x = R_x \frac{I \cdot H}{a} [B]$$

$R_x$  – коэффициент Холла [мЗ/Кл];  $E_x$  – напряженность поперечного эл. поля.

*Для полупроводника n-типа:*

$$R_x = \frac{-1}{en}$$

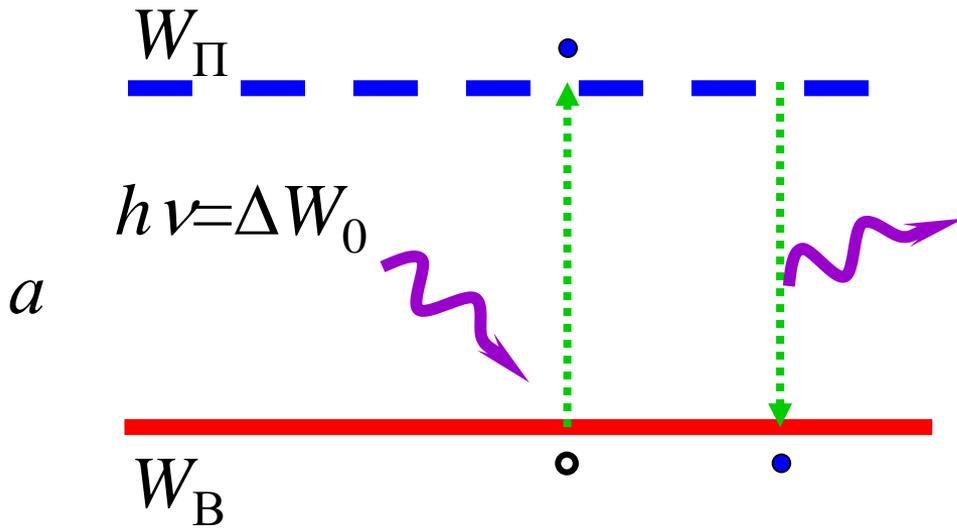
*Для полупроводника p-типа:*

$$R_x = \frac{1}{ep}$$

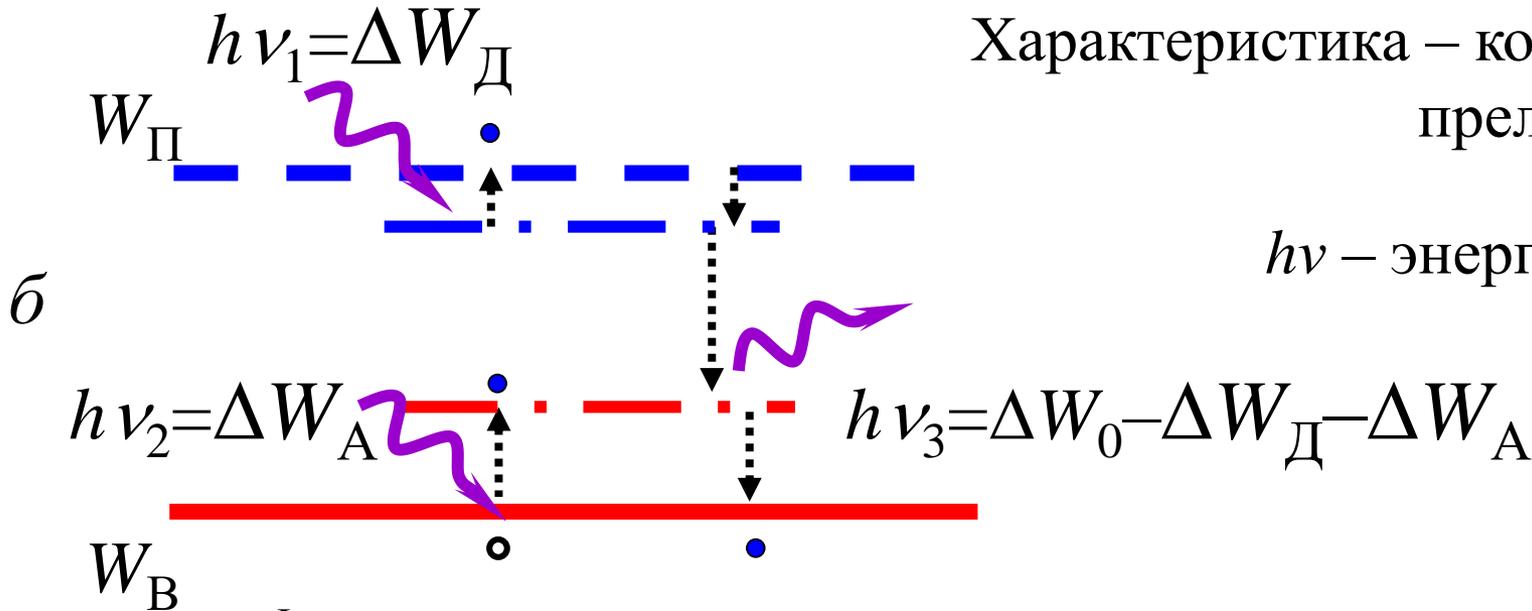
*Для собственного  
полупроводника:*

$$R_x = \frac{1}{en} \cdot \frac{\mu_p - \mu_n}{\mu_p + \mu_n}$$

# Оптические и фотоэлектрические явления в полупроводниках



Оптика:  
 преломление, отражение, рассеяние.  
 Характеристика – коэффициент преломления  $n$ .



$h\nu$  – энергия фотона.

Фотоны – квазичастицы, могут поглощаться или испускаться в процессе оптического поглощения.

## *Оптические и фотоэлектрические явления в п/п-х:*

Взаимодействие света с веществом п/п-ка можно разделить на два типа:

- *с сохранением энергии кванта света* (преломление (пропускание), отражение, рассеяние света – *оптика*);
- *с передачей части (или всей) энергии кванта веществу* (*эл. явления* – эмиссия электронов с поверхности п/п-ка, генерация свободных эл-в и дырок; *явления не связанные с заряженными частицами* – *фотолюминесценция* (свечение, возбужд. в среде светом разной длиной волны), нагревание вещества и т.д.).



## Фотоэлектрические явления:

- эмиссия электронов с поверхности,
- генерация свободных электронов и дырок,
- фотолюминесценция,
- нагревание,
- образование экситонов, то есть связанных электрически нейтральных пар электрон-дырка

Фотоэлектрические явления происходят в результате *поглощения энергии фотонов полупроводником.*

# Поглощение света полупроводниками.

Закон *Бугера-Ламберта*:

$$I = I_0(1 - R)\exp(-\alpha x),$$

$I_0$  – интенсивность падающего монохроматического излучения;

$I$  – интенсивность прошедшего (или отраженного) излучения;

$R$  – коэффициент отражения;

$x$  – текущая координата от поверхности вдоль луча;

$\alpha$  – толщина образца, на которой интенсивность уменьшается в  $e$  раз (коэффициент поглощения).

Зависимости  $\alpha(\lambda)$  (или  $\alpha(h\nu)$ ) называют *спектром поглощения*, а  $R(\lambda)$  (или  $R(h\nu)$ ) – *спектром отражения*.

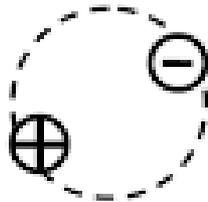
## *Оптические и фотоэлектрические явления в п/п-х:*

- *Поглощение света* п/п-м может быть связано с различными процессами: возбуждением электронов из ВЗ в ЗП, изменением колебательной энергии атомов решетки и др.
- Каждому из этих процессов будет соответствовать поглощение света п/п-м в *определенной области спектра*.
- При переходе из ВЗ в ЗП за *счет энергии кванта излучения* – энергия фотона  $h\nu$  больше ширины ЗЗ  $\Delta W$  (*собственное поглощение*).
- При  $h\nu < \Delta W$  *поглощения быть не может* (материал прозрачен в этой области *длин волн*), поэтому край поглощения должен быть очень резким, что наблюдается у *очень чистых монокристаллов*.

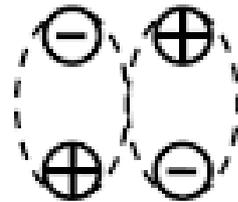
Чем меньше энергия фотонов – тем больше длина волны.

## Оптические и фотоэлектрические явления в п/п-х:

- У ряда п/п-в за счет *поглощения кванта света* возможно такое *возбуждение электрона* ВЗ, которое не сопровождается переходом его в ЗП, а образуется *связанная система электрон-дырка*, перемещающаяся в пределах кристалла, как единое целое. Эту систему называют *экситоном*.
- *Движение экситона* представляет собой *движение возбужденного состояния* (спектр поглощения экситона может быть водородоподобным).



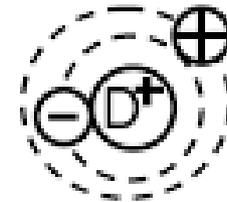
экситон



бихекситон  
(экситонная  
молекула)



трион  
(экситонный  
ион)



связанный  
экситон  
(на доноре)

## *Оптические и фотоэлектрические явления в п/п-х:*

- Когда эл-ны ЗП и эл-ны не полностью заполненной ВЗ за счет света переходят внутри зоны с одного уровня на другой, происходит *поглощение света свободными носителями заряда*.
- Оптическое *поглощение* п/п-ка, обусловленное взаимодействием излучения с колебательным движением кристаллической решетки, называют *решеточным*.
- При наличии в п/п-ке *примеси* его оптическое поглощение может быть связано с *ионизацией примеси* или *возбуждением электрона* нейтральной примеси в кристалле (*примесное поглощение*).

# Механизмы поглощения света:

- *собственное поглощение*: переходы из валентной зоны в зону проводимости;
- *экситонное поглощение*: переходы с участием ЭКСИТОННЫХ СОСТОЯНИЙ;
- *поглощение свободными носителями заряда*: переходы электронов и дырок внутри разрешённых зон;
- *примесное поглощение*: переходы с участием примесных состояний;
- *решёточное и фононное поглощение*: поглощение энергии фотонов (световой волны) колебаниями кристаллической решётки.

В разных интервалах спектра преобладают различные механизмы поглощения.

# Фотопроводимость

*удельная фотопроводимость  $\gamma_{\Phi}$ :*

$$\gamma_{\Phi} = \gamma - \gamma_0 = e(\Delta n \mu_n + \Delta p \mu_p)$$

$\gamma_0$  – удельная проводимость полупроводника в отсутствие освещения;

$\gamma$  – удельная проводимость освещенного полупроводника;

$\Delta n$  и  $\Delta p$  – концентрация неравновесных с.н.з., возбужденных светом

## *Удельная фотопроводимость:*

- *Избыточная (неравновесная) удельная проводимость*, равная *разности удельных электрических проводимостей* п/п-ка при освещении  $\gamma$  и в отсутствие освещения  $\gamma_0$ , называется *удельной фотопроводимостью*  $\gamma_{\text{ф}}$ .
- *Освещение* п/п-ка светом не приводит к бесконечному росту *концентрации неравновесных носителей заряда*, так как по мере роста концентрации свободных носителей и числа свободных мест на примесных уровнях *растет вероятность рекомбинации*.
- Наступает момент, когда *рекомбинация уравнивает процесс генерации* свободных носителей.

## *Люминесценция полупроводников:*

- При рассмотрении *поглощения света* п/п-ми было показано, что при освещении п/п-ка электроны могут переходить из состояний с *меньшей энергией* в состояния с *большей энергией*.
- При обратном переходе электрона *из верхнего состояния* в *нижнее*, освободившаяся энергия при определенных условиях также может быть выделена *в виде кванта света*.
- Такое *свечение* вещества *не является тепловым* (равновесным).

Проходили в другом курсе «Основы электроники».

## *Люминесценция полупроводников:*

- *Люминесценция* есть избыток над температурным излучением тела в том случае, если это избыточное излучение обладает *длительностью*, значительно *превышающей период световых колебаний*.
- В зависимости от способа возбуждения вещества различают: *фотолюминесценцию* (возбуждение светом), *катодолюминесценцию* (при бомбардировке вещества электронами), *электролюминесценцию* (свечение под действием электрического поля) и др.
- Явления люминесценции делятся на *спонтанные*, *метастабильные* и *рекомбинационные*.

## *Люминесценция полупроводников:*

- Если излучение п/п-ка возникает в результате непосредственной *рекомбинации электрона с дыркой* или *рекомбинации через локальный центр*, то излучение называют *рекомбинационным*.
- Вещества, обнаруживающие *рекомбинационную люминесценцию*, называют *кристаллофорами* или просто *фосфорами*. Практически все типичные фосфоры являются п/п-ми.



## *Почему фосфор светится:*

- Светиться в темноте может только *белый фосфор*, соединяясь на воздухе он образует оксид состава  $P_4O_6$ . В интервале температуры 20–50 град. фосфористый ангидрид *окисляется кислородом воздуха*:  $P_4O_6 + 2O_2 = P_4O_{10}$ .
- Что сопровождается *хемилюминесценцией* (свечение тел, вызванное химическим воздействием) и является причиной свечения белого фосфора.

Белый фосфор *медленно окисляется кислородом воздуха* уже при комнатной температуре и светится (бледно-зелёное свечение).

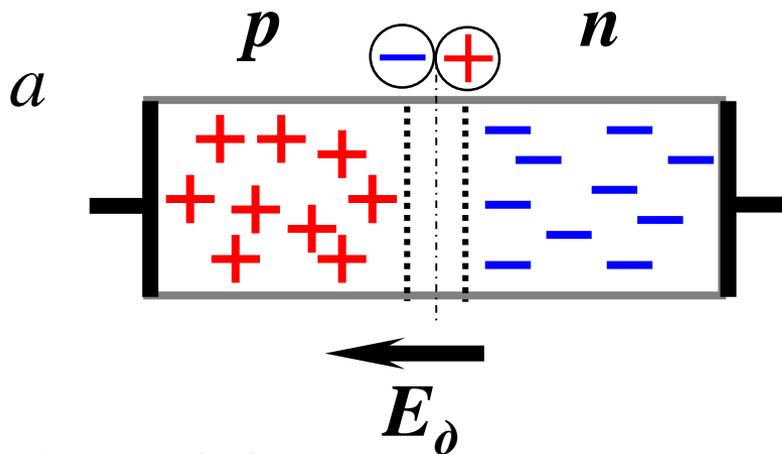


# р-п переход

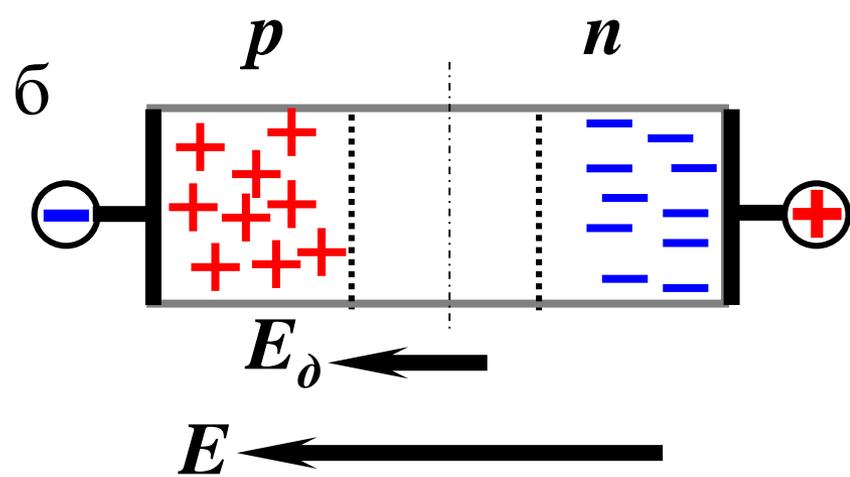
*Электронно-дырочные переходы* получают вводя в полупроводник *донорные* и *акцепторные примеси* так, чтобы одна часть полупроводника обладала *электронной*, а другая *дырочной электропроводностью*.

## *p-n переход:*

- Создать *p-n* переход *механическим путем* соприкосновения двух п/п-в с различным типом электропроводности *невозможно*.
- *Модель n/n-ка*: полупроводниковая пластина, граница м/у областями *p* и *n* получила название (*p-n*) – перехода, запирающий слой показан пунктиром.
- После контактирования часть эл-в *под влиянием тепловой диффузии* переходит из *n*-области в *p*-область (так же с дырками).
- В приграничной области возникает *диффузионное поле*  $E_d$ , которое *будет препятствовать* дальнейшему перемещению зарядов.



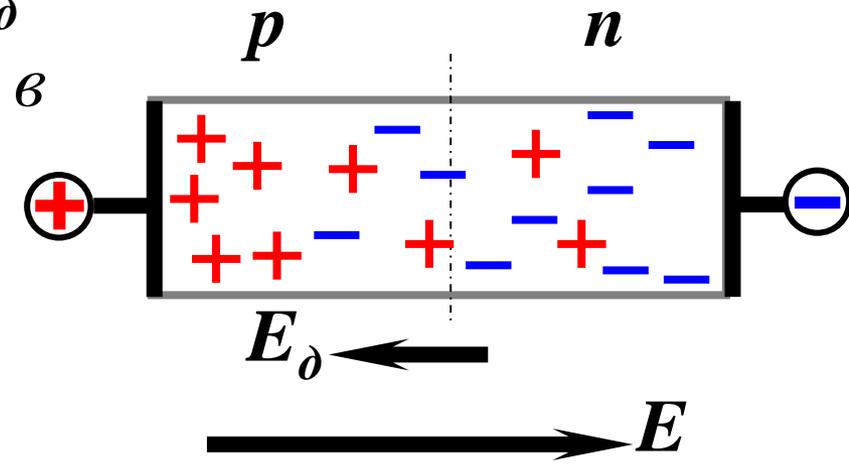
(а) Диффузионное поле  $E_\delta$  возникает из-за диффузии с.н.з. Образуется запирающий слой толщиной  $d \sim 10^{-5}$  см.



Принцип действия п/п-го выпрямителя

Протекает большой прямой ток

(б) Направление  $E$  совпадает с  $E_\delta$  и переход «заперт».



(в)  $E$  направлено против  $E_\delta$ , запирающий слой насыщается с.н.з., и переход «открыт».

## *p-n переход:*

- *В реальных системах* всегда имеется незначительное количество *неосновных носителей зарядов*: в *p*-области – электронов, а в *n*-области – некоторое количество дырок.
- И через такую систему *при запертом переходе* будет протекать *небольшой* по величине *«обратный ток»* за счет неосновных носителей зарядов.

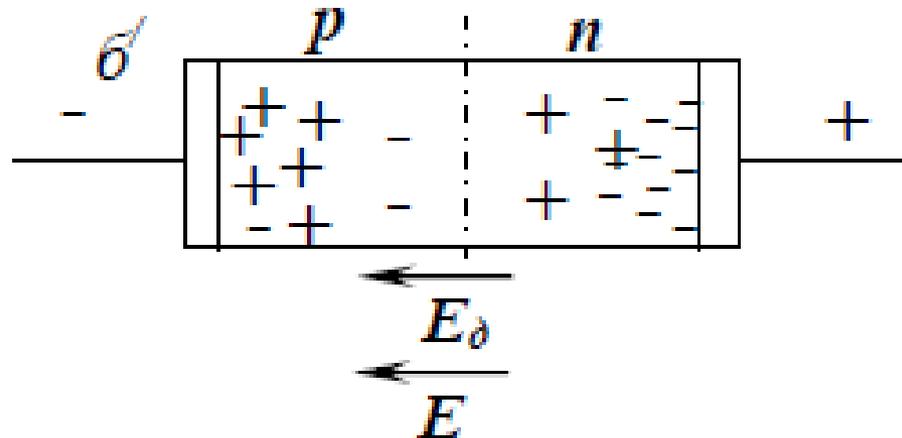
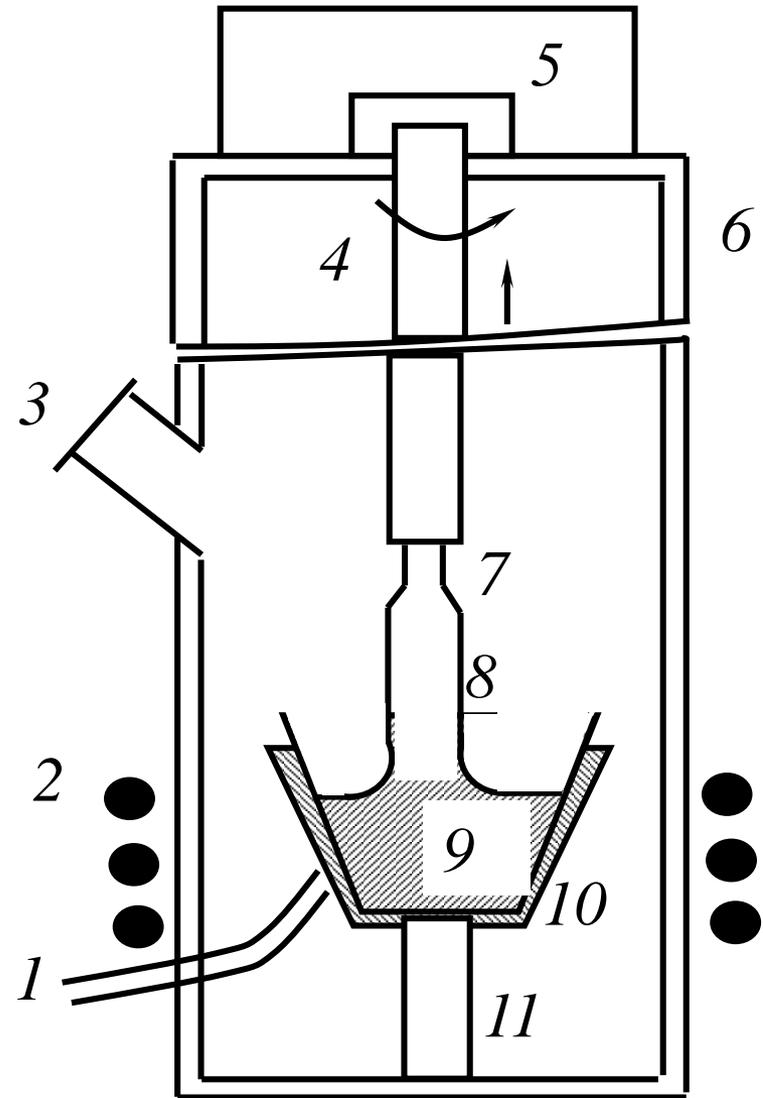


Схема установки для  
*выращивания монокристаллов*

по методу Чохральского:

- 1 – термопара;
- 2 – индукционная печь;
- 3 – окно для визуального контроля;
- 4 – ось вращения;
- 5 – устройство для вращения;
- 6 – водяная рубашка;
- 7 – монокристаллическая затравка;
- 8 – выращиваемый кристалл;
- 9 – расплав;
- 10 – графитовый нагреватель;
- 11 – теплоизоляционная подложка.



В некоторых п/п-х приборах, н-р, транзисторах и интегральных микросхемах – не должно быть практически примесей.

## ***Технология получения полупроводниковых материалов:***

- При изготовлении большинства п/п-ых приборов применяют ***монокристаллические материалы***, т.к. в ***поликристаллическом материале ниже подвижность и время жизни своб.н.з., большая неоднородность св-в.***
- ***Процент выхода*** годных п/п-ых приборов, их характеристики зависят от ***степени очистки, однородности*** исходного материала, ***степени его легирования*** и др.
- ***Метод Чохральского*** обеспечивает ***высокие скорости выращивания*** и получение ***больших по размеру кристаллов.***

## *Метод Чохральского:*

- Создают *вакуум*  $10^{-5}$  мм рт.ст.
- В тигель с расплавлен. материалом *опускают монокристаллич. затравку*, затем ее *медленно поднимают*.
- При вытягивании кристалла затравку или тигель *вращают* (30-40 об/мин), чтобы *примеси равномерно распределились*.
- *Чистота* п/п-ка ( $10^{-3}$  –  $10^{-4}$ ) %, грязный материал, не пригоден, разработан *метод зонной перекристаллизации (плавки)*, как один из эффективных методов *очистки* п/п-ых материалов от примесей.

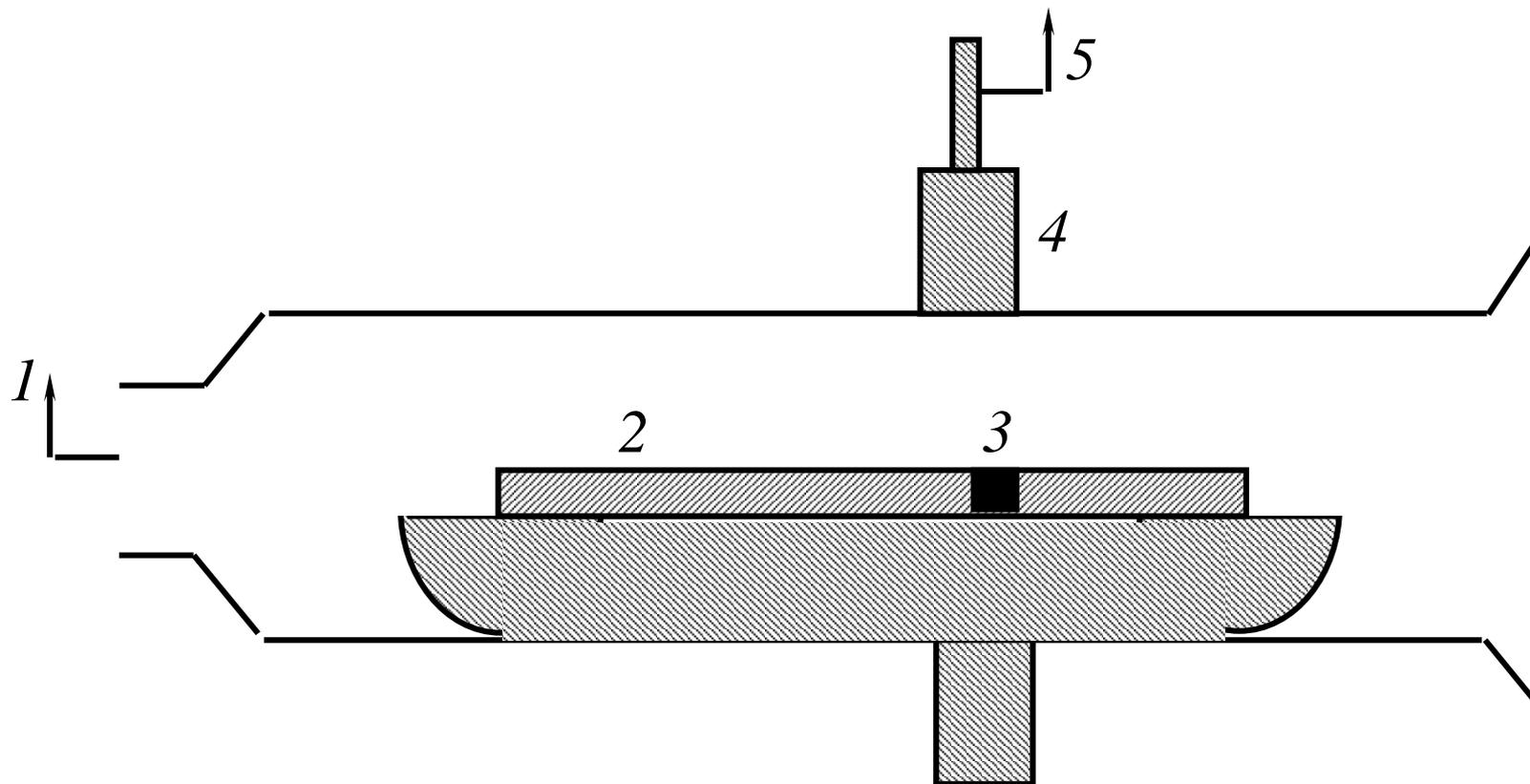


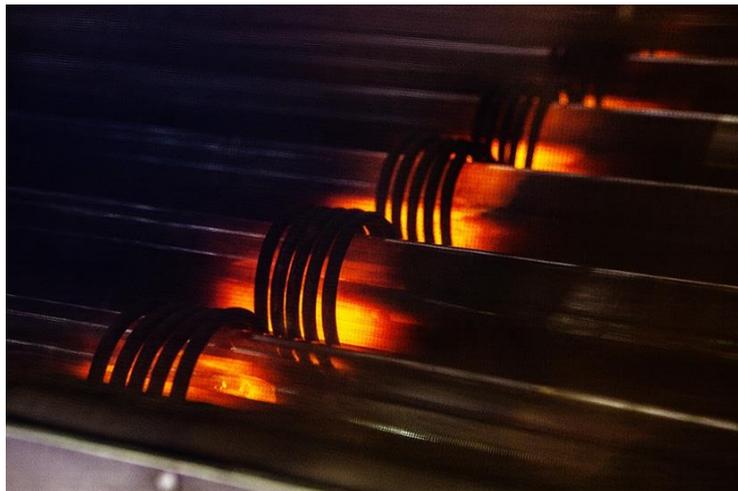
Схема установки для проведения *зонной перекристаллизации*:  
 1 – откачка на вакуум; 2 – образец в тигле; 3 – расплавленная зона; 4 – перемещаемый нагреватель; 5 – к устройству, перемещающему зону.

$$K_{з.п.} = C_{ж.ф} / C_{т.ф} > 1 \quad \text{В России /Америке}$$

В Японии/ Кореи наоборот формула и  $K_{з.п.} < 1$ .

## *Метод зонной перекристаллизации:*

- Принцип очистки: коэф-т растворимости *в жидкой фазе* > чем в *твердой фазе* (наиболее распространено).
- *Расплавленная зона при движении* будет захватывать *примесь* и *переносить ее в конец* слитка (таких операций несколько сотен раз, чтобы добиться чистоты  $\Rightarrow$  кол-во операций устанавливается опытным путем).
- Затем *конец слитка* с примесями *обрезается*.



Зонная очистка германия.