

# 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

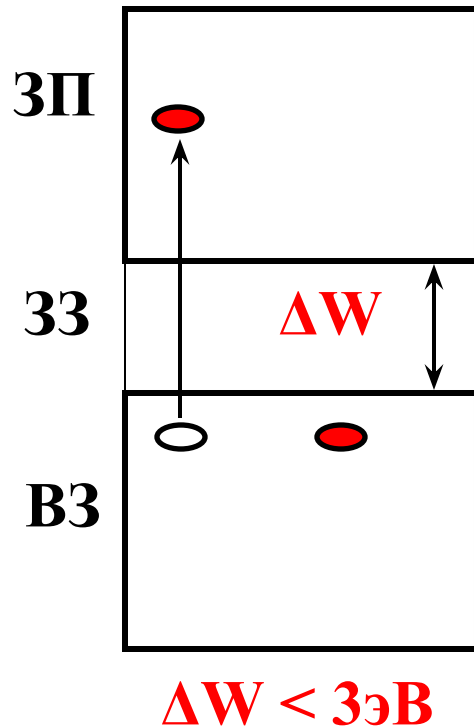
#### Донорные

с.н.з. –  
электроны

#### Акцепторные

с.н.з. –дырки

## 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.);

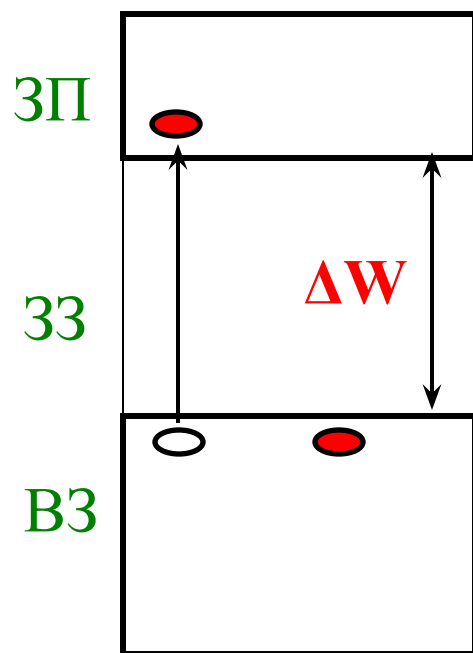
$A^I B^{VIII} C^{VI}$  (CuFeSe<sub>2</sub> и др.);

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

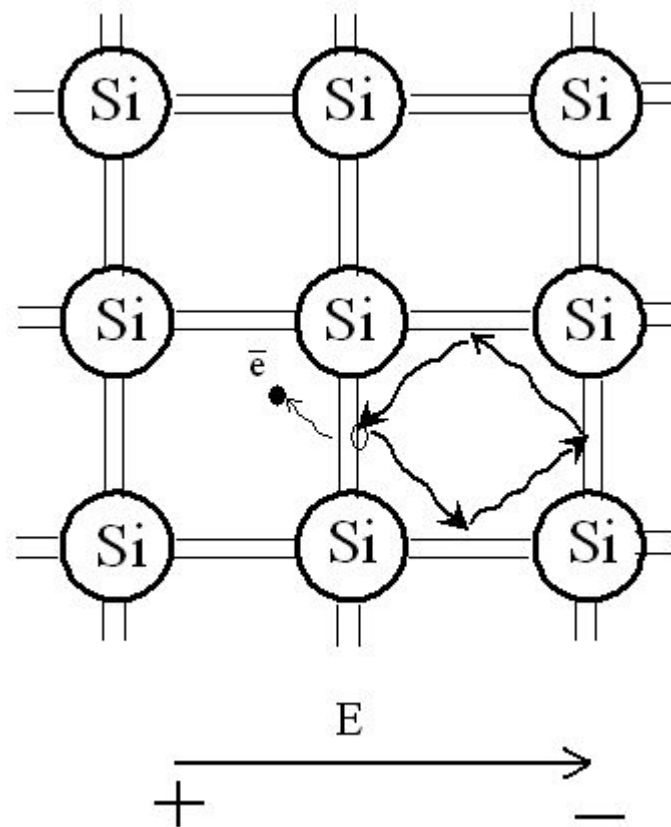
$A^{IV} B^V C^{VI}$

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

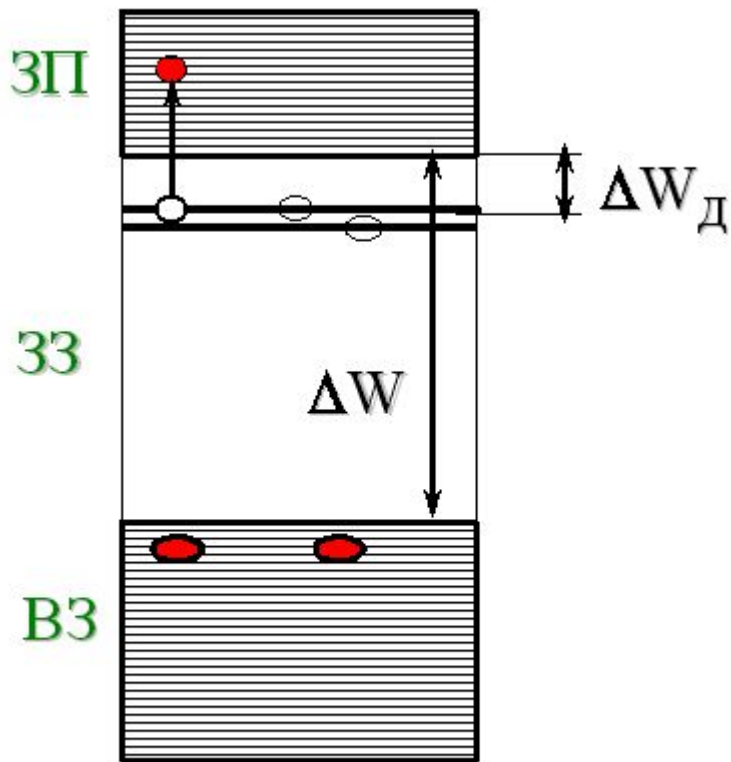
# ЭЛЕКТРОПРОВОДНОСТЬ СОБСТВЕННЫХ ПОЛУПРОВОДНИКОВ



$$\Delta W < 3\epsilon B$$



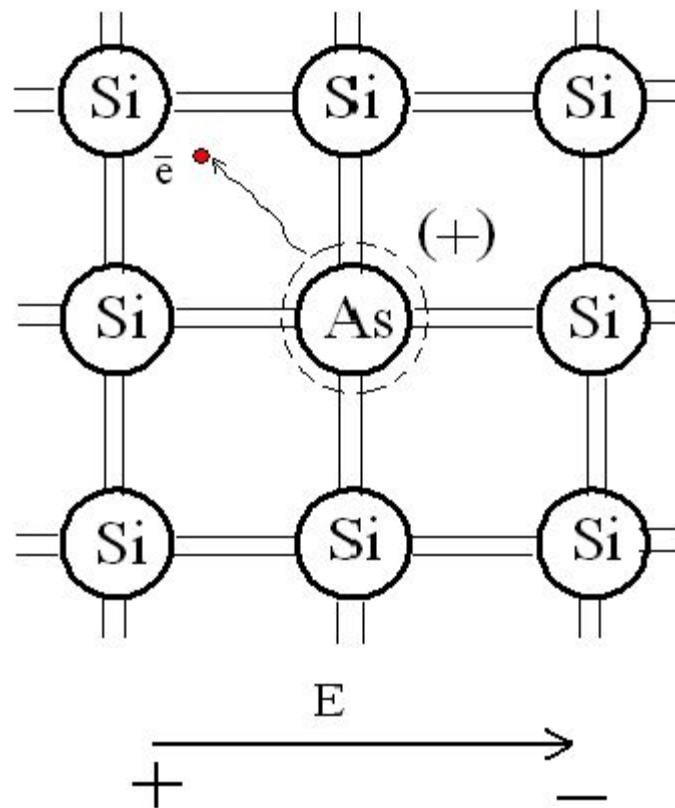
# ЭЛЕКТРОПРОВОДНОСТЬ ДОНОРНЫХ ПОЛУПРОВОДНИКОВ



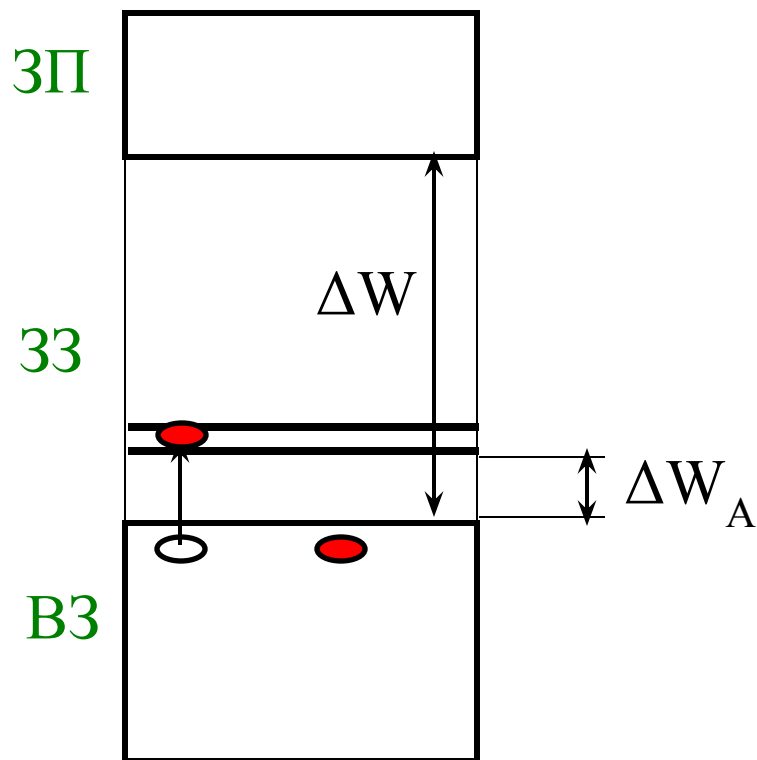
$\Delta W$  до 3эВ

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

$\Delta W_д \sim 0,01$  эВ



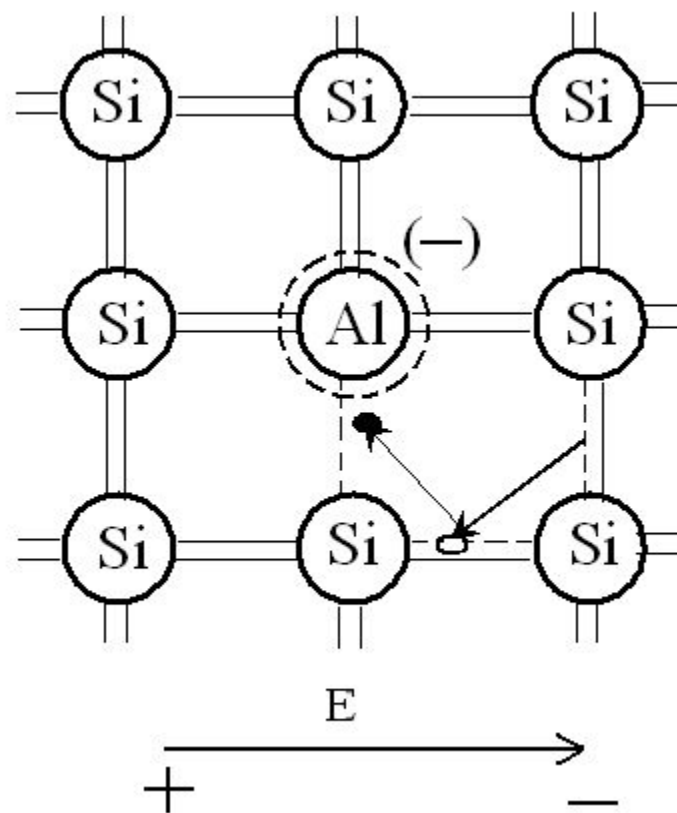
# ЭЛЕКТРОПРОВОДНОСТЬ АКЦЕПТОРНЫХ ПОЛУПРОВОДНИКОВ



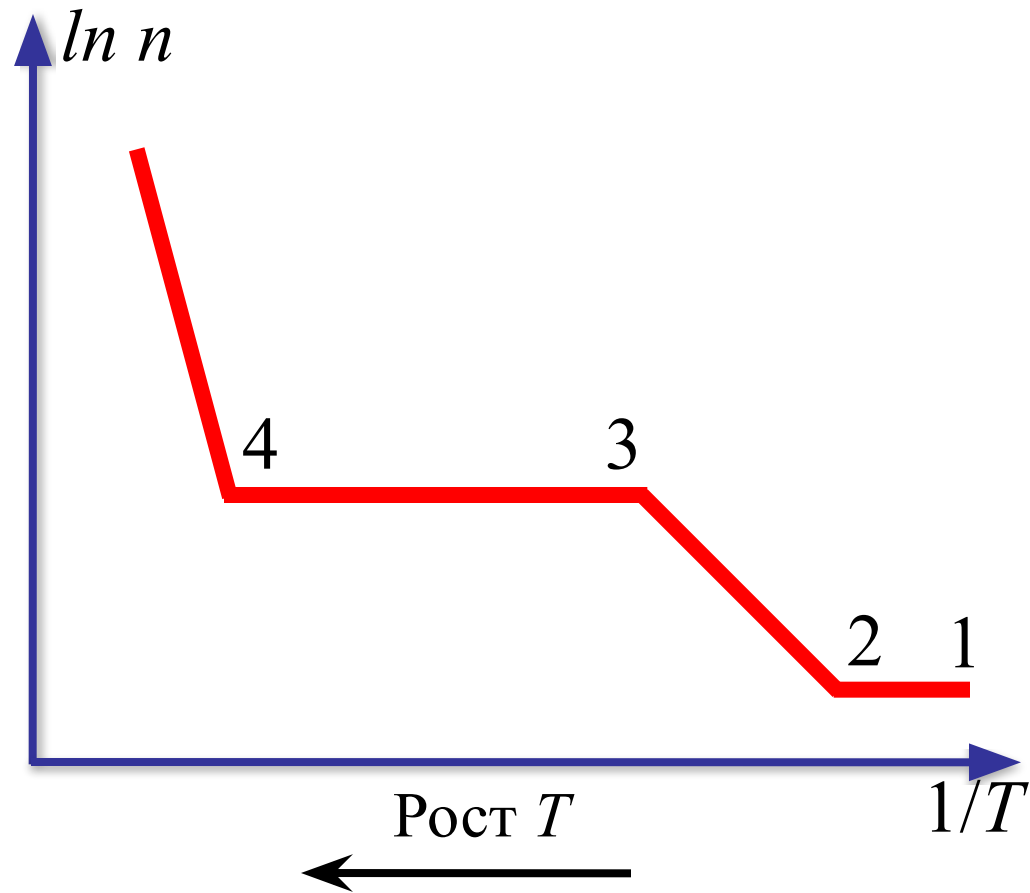
$\Delta W$  до 3эВ

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

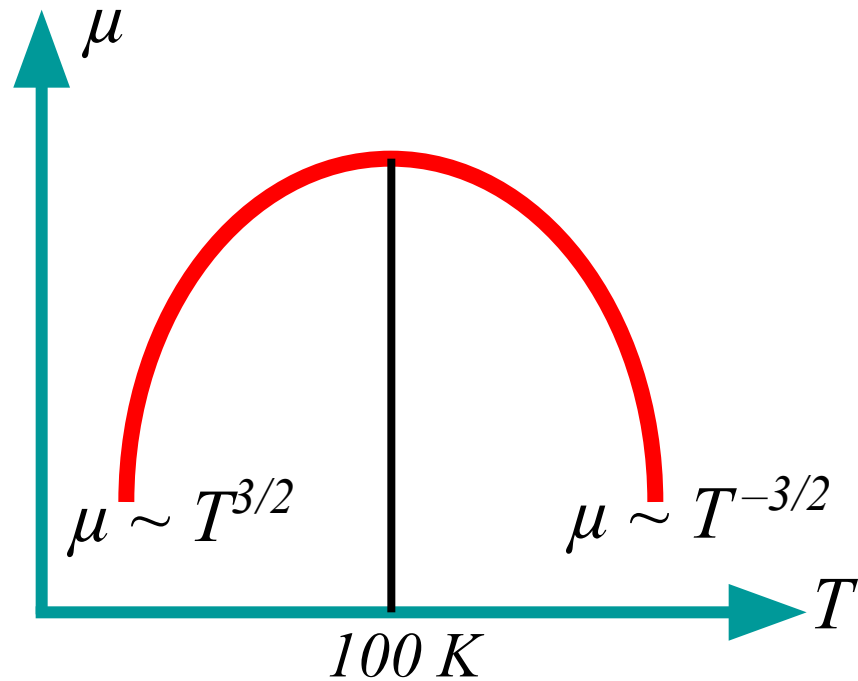
$\Delta W_A \sim 0,01$  эВ



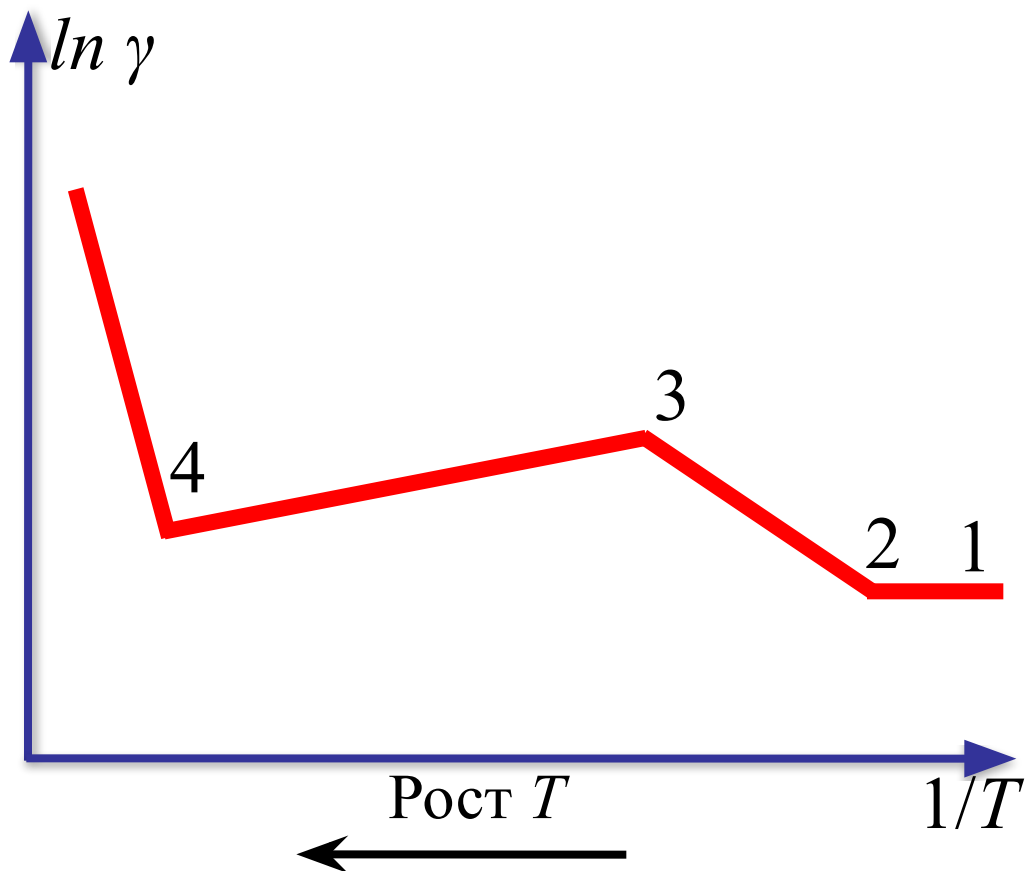
# Температурная зависимость концентрации $n$ с.н.з. в примесном полупроводнике



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



# ВЛИЯНИЕ ТЕМПЕРАТУРЫ НА ЭЛЕКТРОПРОВОДНОСТЬ $\gamma$ ПОЛУПРОВОДНИКОВ





$$\gamma = n e \mu_n + p e \mu_p \quad \text{и} \quad n = A e^{-\Delta E / 2kT} \quad \Rightarrow$$

$$\gamma = \gamma_0 e^{-\Delta E / 2kT} \quad \text{и} \quad R_T = R_0 e^{-B/T}, \quad \text{где}$$

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

$B$  – коэфф. температурной чувствительности.

Температурный коэффициент удельного сопротивления:

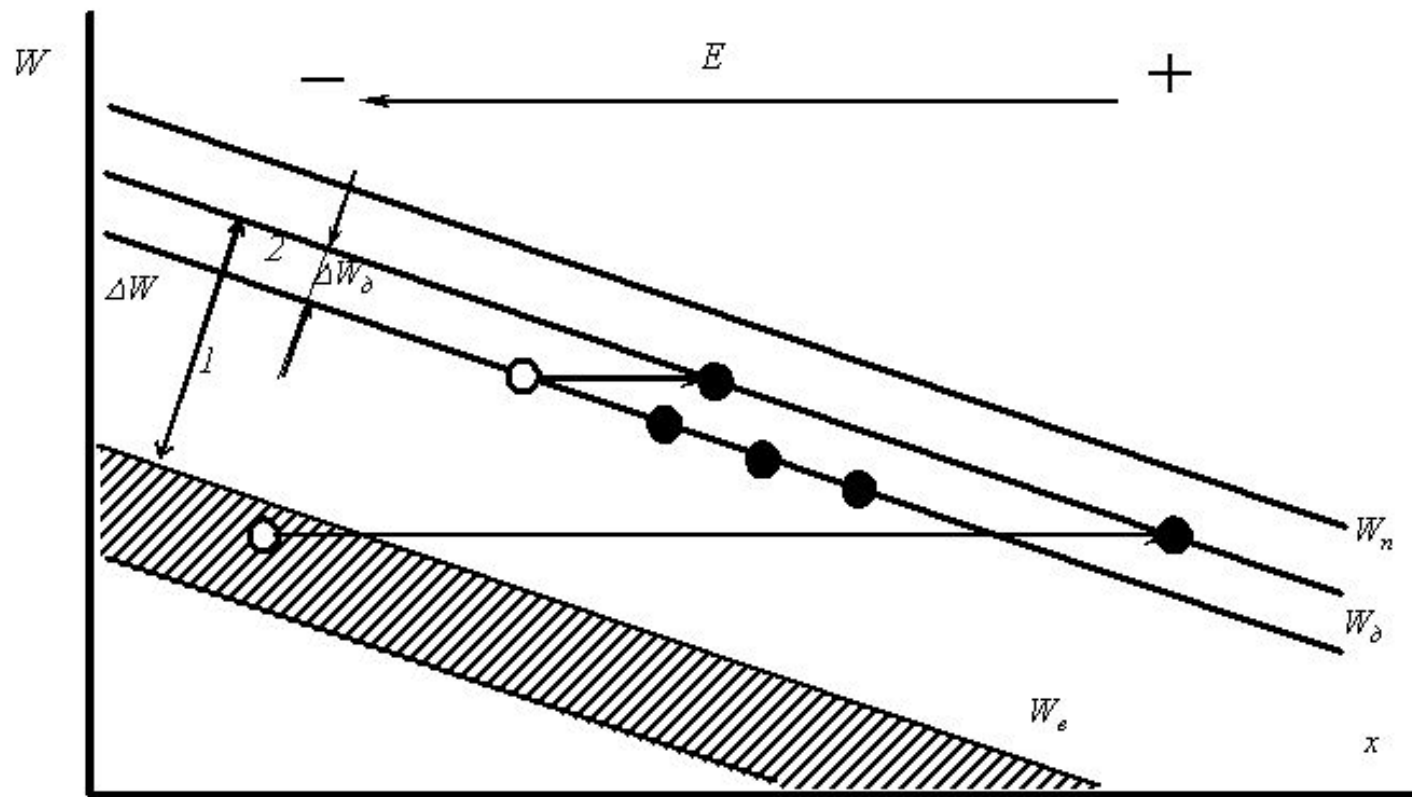
$$\text{TK}_\rho = \frac{1}{\rho} \frac{d\rho}{dT} = -B/T^2$$

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

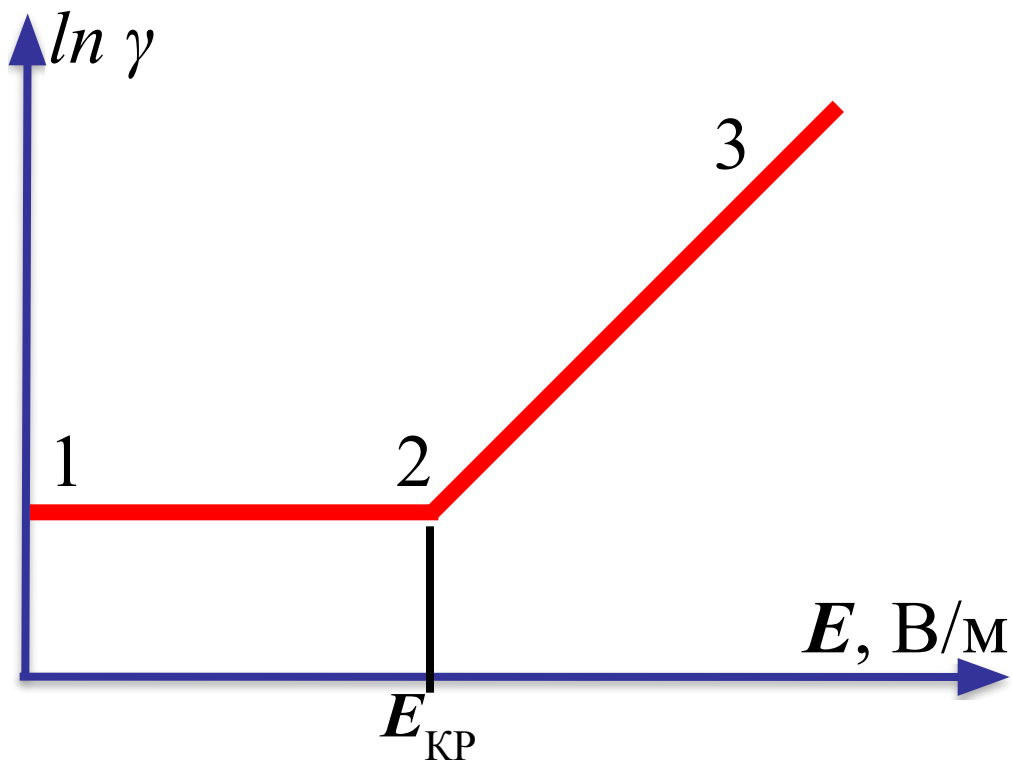
**ТЕРМОРЕЗИСТОРЫ:**

- 1. Кобальто-марганцевые**
- 2. Медно-марганцевые**
- 3. Медно-кобальто-марганцевые**

# ВЛИЯНИЕ НАПРЯЖЕННОСТИ ВНЕШНЕГО ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ПОЛЯ НА ЭЛЕКТРОПРОВОДНОСТЬ ПОЛУПРОВОДНИКОВ



**ЭЛЕКТРОСТАТИЧЕСКАЯ ИОНИЗАЦИЯ**



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

$$\gamma = \gamma_0 \exp(\beta \sqrt{E}) \quad ; \quad R = R_0 \exp(-\beta \sqrt{E})$$

Полупроводниковый прибор, действие которого основано на использовании зависимости электропроводности (сопротивления)  $n/n$  от напряженности электрического поля называется

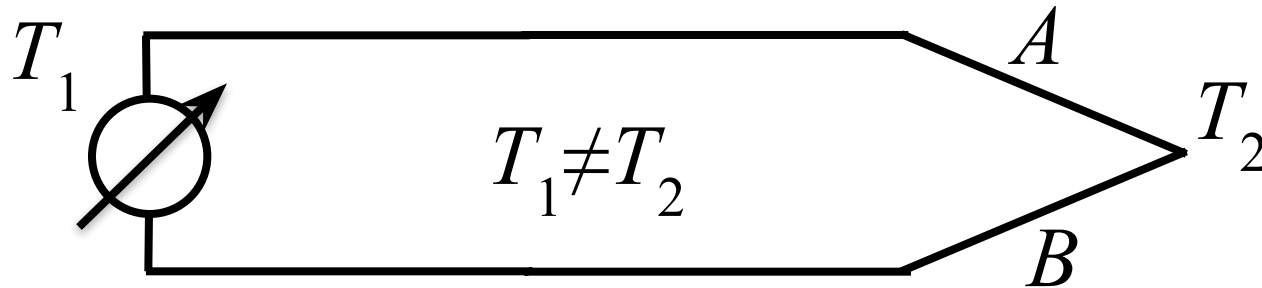
## ВАРИСТОРОМ

В качестве материалов для изготовления варисторов используют:

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

# ТЕРМОЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ ЭФФЕКТЫ В ПОЛУПРОВОДНИКАХ

Эффекты Зеебека, Пельтье и Томсона.



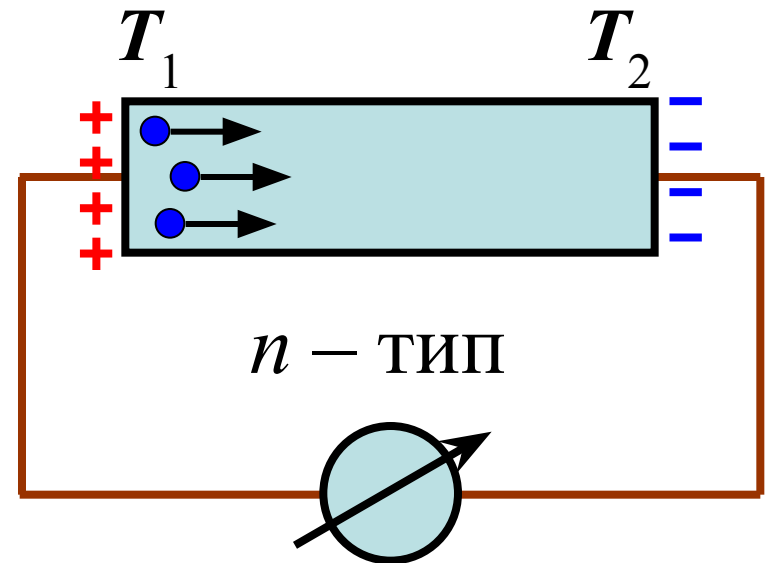
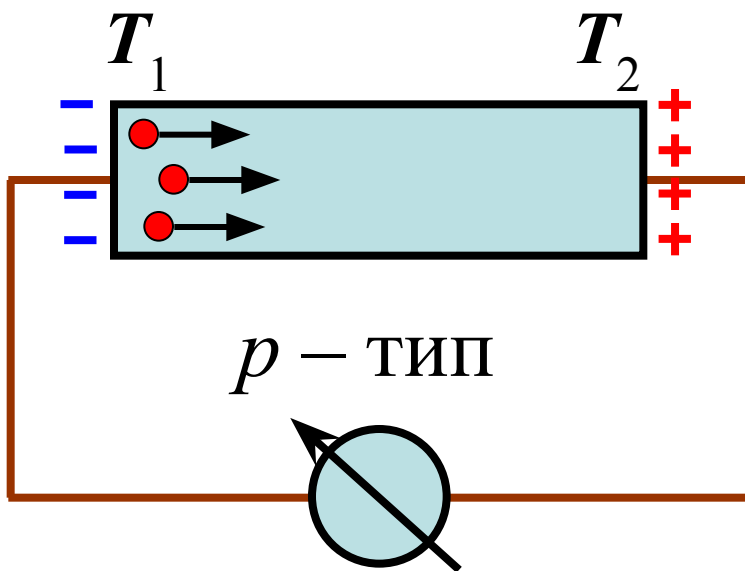
Эффект Зеебека: если в замкнутой электрической цепи, состоящей из последовательно соединенных разнородных полупроводников, на спаях создана разность температур  $\Delta T \neq 0$ , то в цепи возникает термоЭДС:

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

$\alpha$  – коэффициент термоЭДС, который зависит от материалов термопары и интервала температур

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

$$T_1 > T_2$$



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

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

$\Pi$  – коэффициент Пельтье

$I$  – величина тока, протекающего через контакт

$t$  – время прохождения тока

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



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.

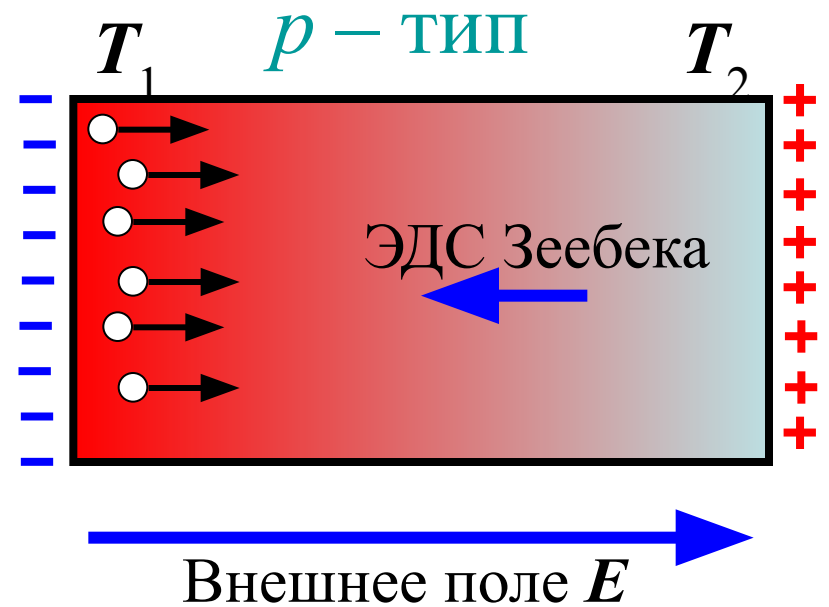
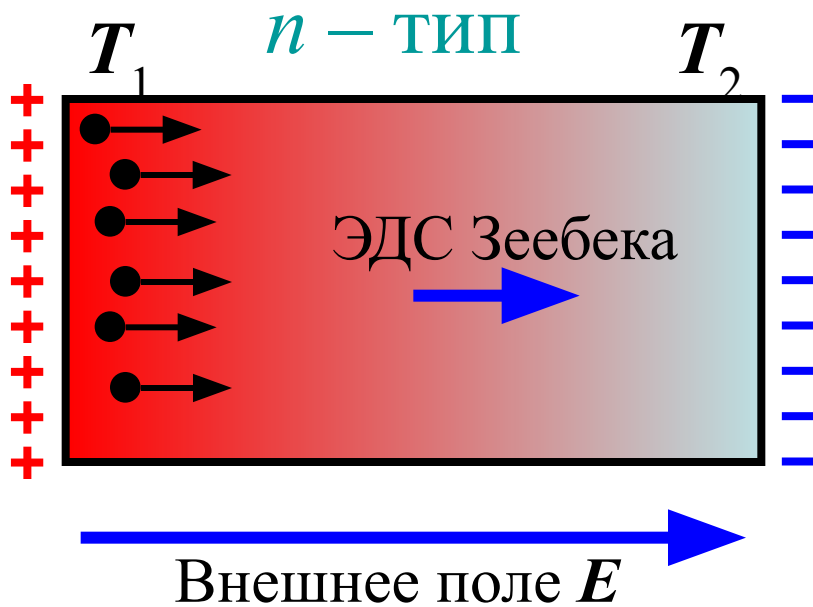
Теплота Томсона:  $Q_T = \tau \cdot \Delta T \cdot I \cdot t$

$\tau$  — коэффициент Томсона

Между всеми термоэлектрическими явлениями существует связь.

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

# Механизм возникновения эффекта Томсона. $T_1 > T_2$



# Гальваномагнитный эффект Холла

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

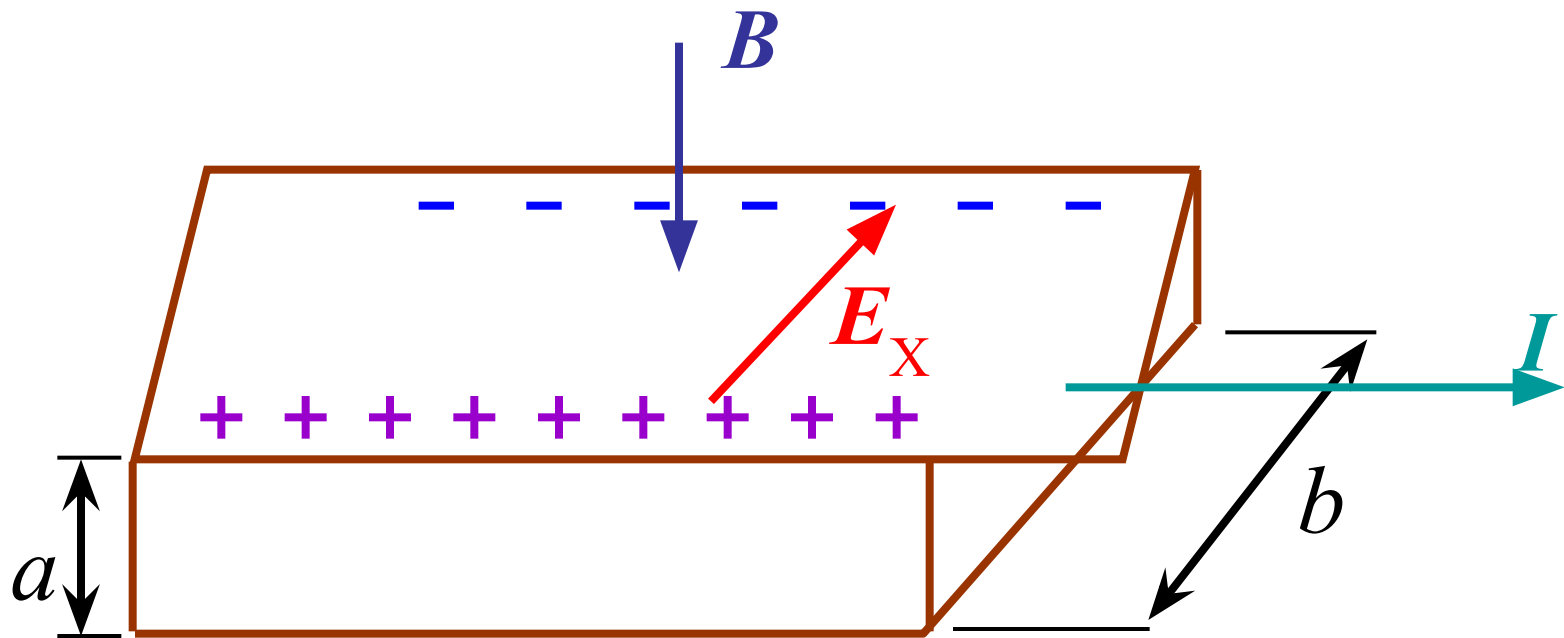


Схема возникновения ЭДС Холла  $U_x$

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

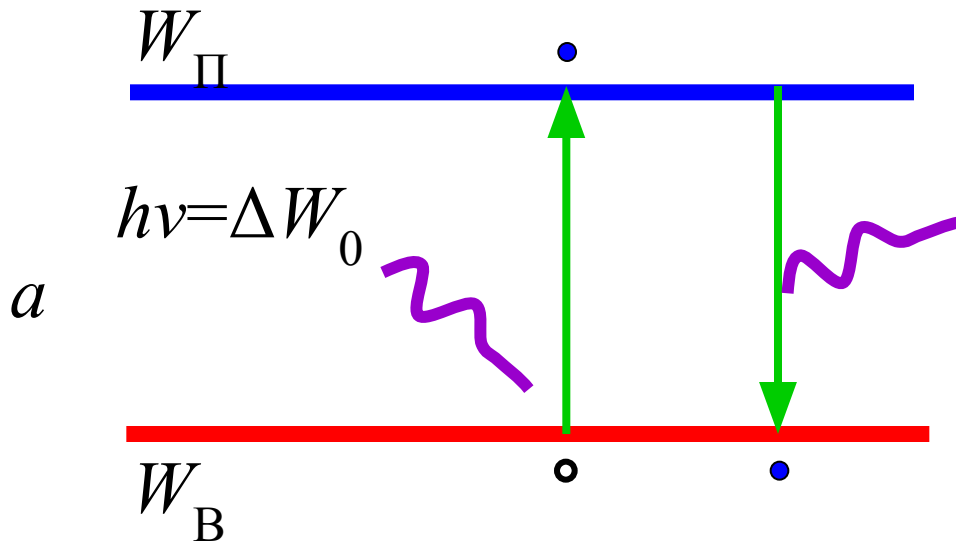
Для полупроводника  $n$ -типа:  $R_X = \frac{-1}{en}$

Для полупроводника  $p$ -типа:  $R_X = \frac{1}{ep}$

Для собственного  
полупроводника:

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

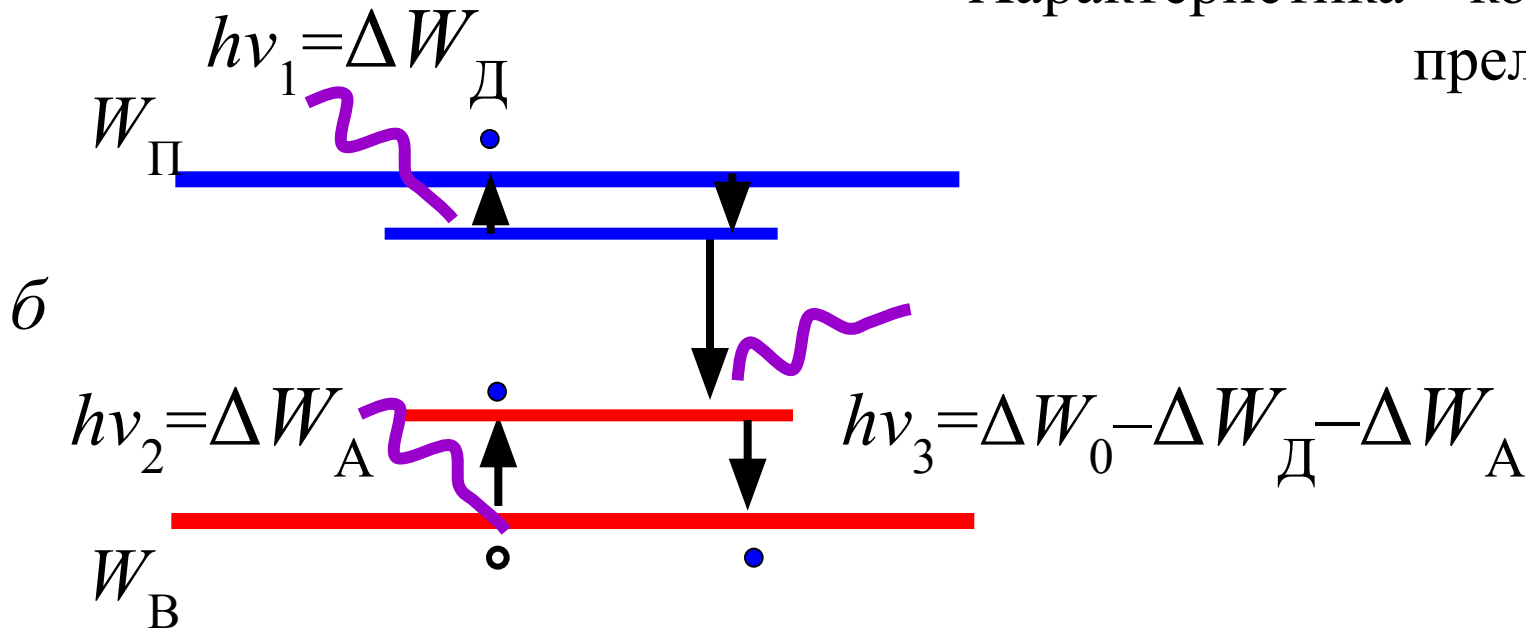
# Оптические и фотоэлектрические явления в полупроводниках



Оптика:

преломление, отражение, рассеяние.

Характеристика – коэффициент преломления  $n$ .



# 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*.



# 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 колебаниями кристаллической решётки.

В разных интервалах спектра преобладают различные

# Фотопроводимость

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

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

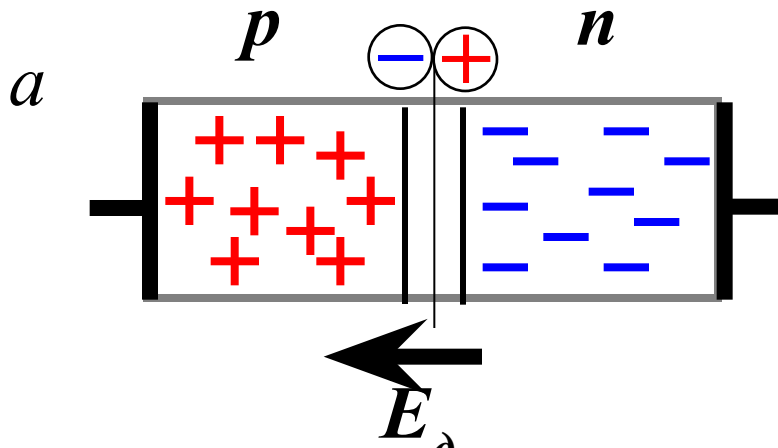
$\gamma_0$  – удельная проводимость полупроводника в отсутствие освещения;

$\gamma$  – удельная проводимость освещенного полупроводника;

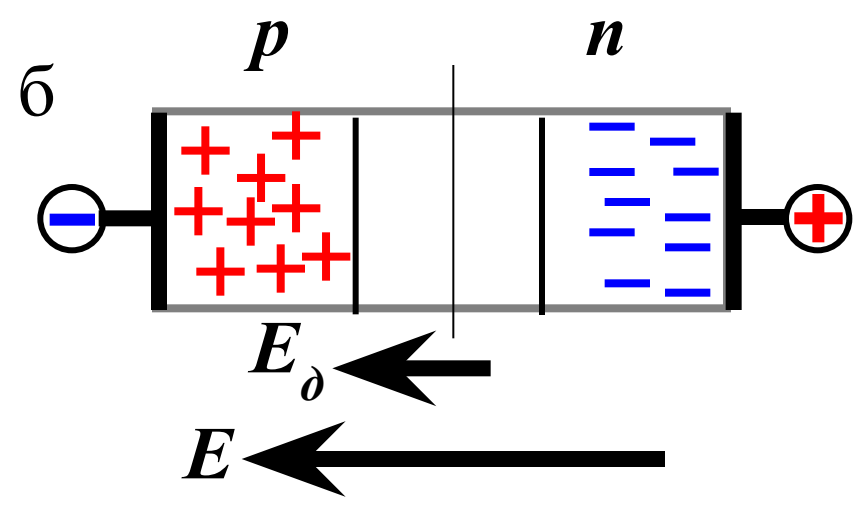
$\Delta n$  и  $\Delta p$  – концентрация неравновесных с.н.з., возбужденных светом

# р-п переход

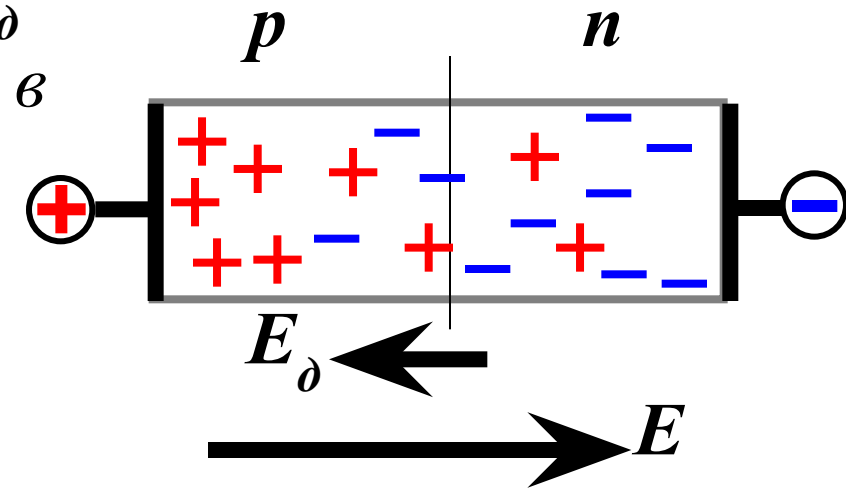
Электронно-дырочные переходы получают вводя в полупроводник донорные и акцепторные примеси так, чтобы одна часть полупроводника обладала электронной, а другая дырочной электропроводностью.



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



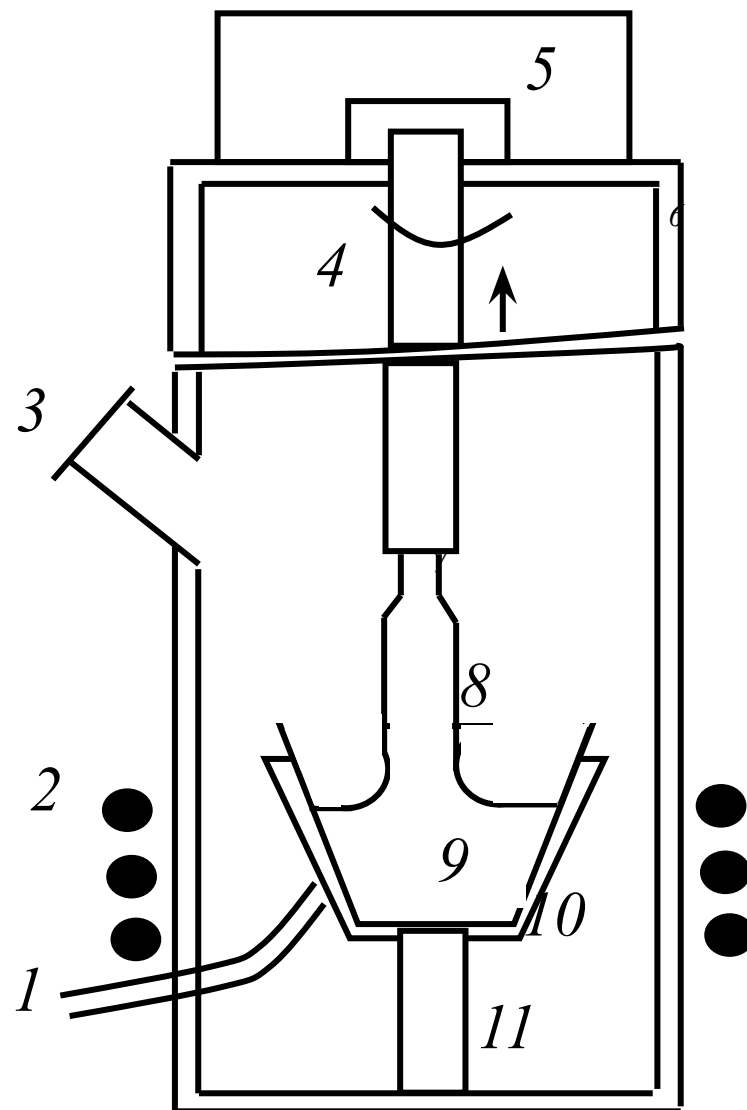
(б) Направление  $E$  совпадает с  $E_\delta$  и переход «заперт».



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

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.



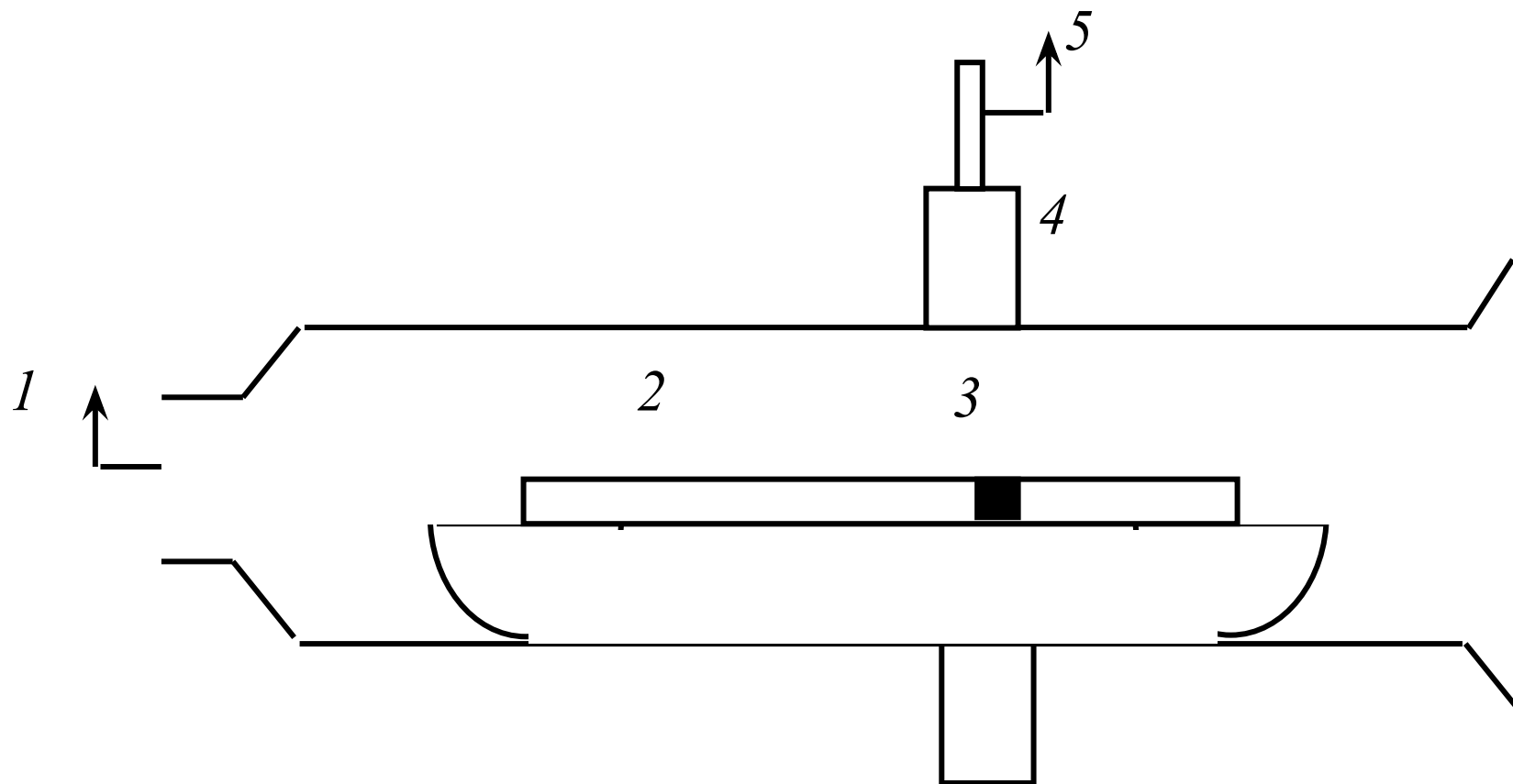


Схема установки для проведения зонной перекристаллизации:  
 1 – откачка на вакуум; 2 – образец в тигле; 3 – расплавленная зона; 4 – перемещаемый нагреватель; 5 – к устройству, перемещающему зону.

$$K_{з.п.} = C_{ж.ф.} / C_{т.ф.} > 1$$