

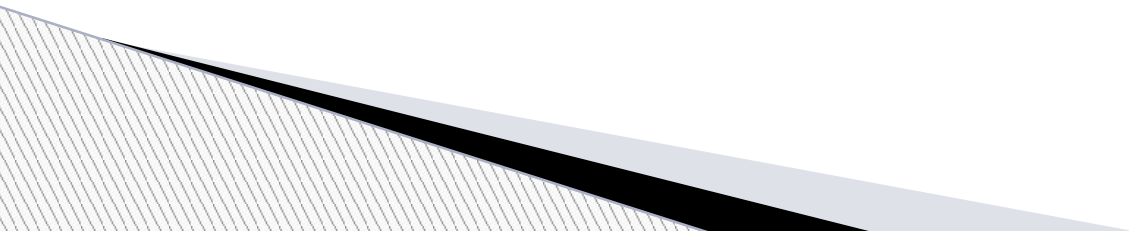
Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева  
Институт радиоэлектроники и информационных технологий  
Кафедра «Электроника и сети ЭВМ»

# Электроника

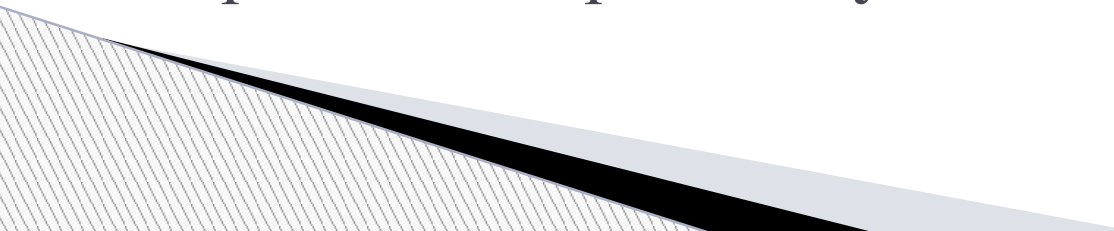
## Лекции

К.т.н., доцент кафедры ЭСВМ  
Калинина Н.А.  
[Kalinina\\_na@list.ru](mailto:Kalinina_na@list.ru)

# **ФИЗИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ ПОЛУПРОВОДНИКОВОЙ ЭЛЕКТРОНИКИ**

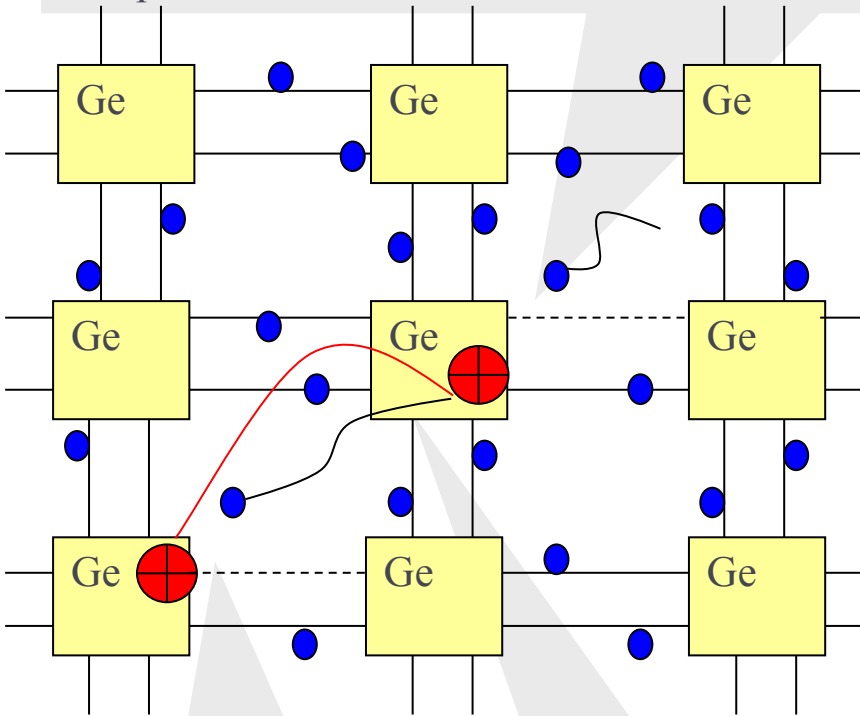


# Определяющие свойства полупроводников

1. Удельное электрическое сопротивление  $\rho$  – промежуточное положение между проводниками и диэлектриками.
  2. Высокая чувствительность их электропроводности к добавлению **примесей** других веществ даже в незначительных количествах.
  3. Сильная, нелинейная, обратная зависимость удельного сопротивления от **температуры**.
  4. Зависимость удельного сопротивления от различного рода **излучений**.
- 

# Собственные полупроводники

1. Образование свободного электрона и дырки - генерация

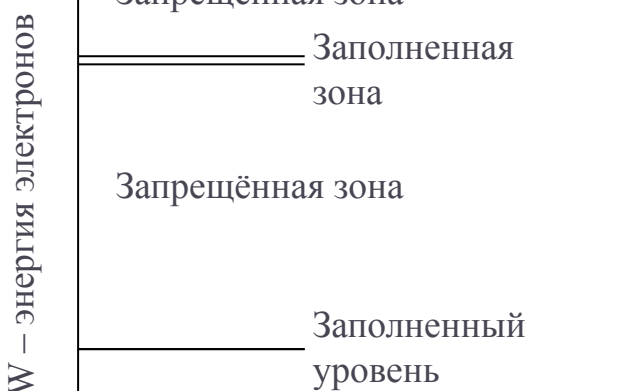
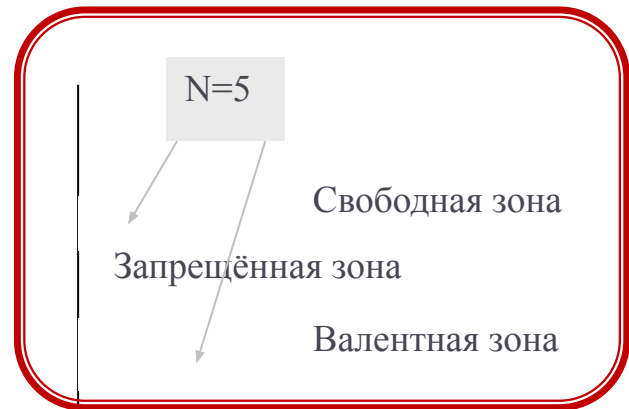


При любой постоянной температуре скорости генерации и рекомбинации равны между собой, а при температуре абсолютного нуля (0 °К) равны нулю

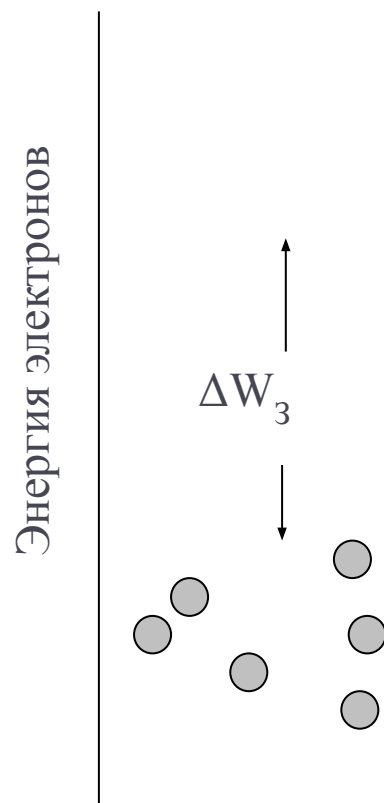
3. Рекомбинация пары электрон -дырка

2. Образование новой пары электрон -дырка

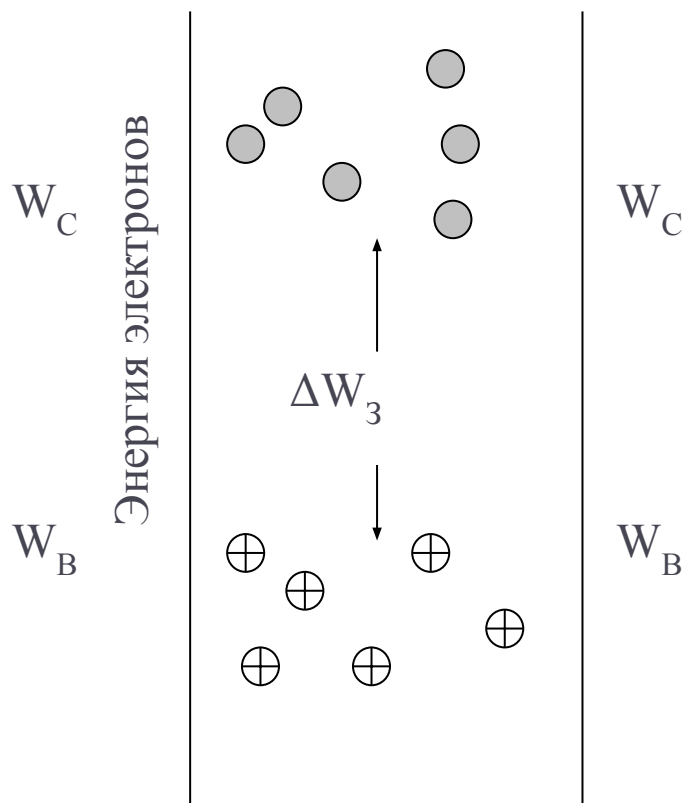
# Энергетические диаграммы полупроводников



$T = 0 \text{ }^\circ\text{K} = -273 \text{ }^\circ\text{C}$

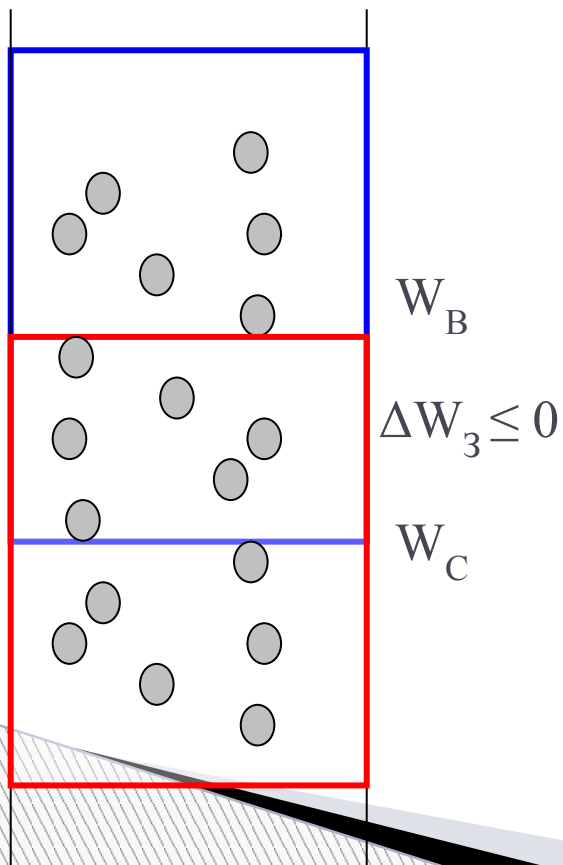


$T = 300 \text{ }^\circ\text{K} = +27 \text{ }^\circ\text{C}$

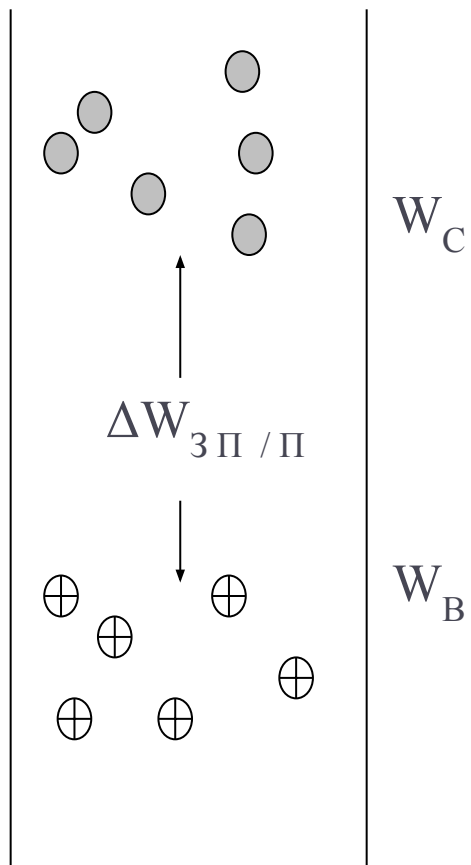


# Энергетические диаграммы полупроводников, проводников и диэлектриков

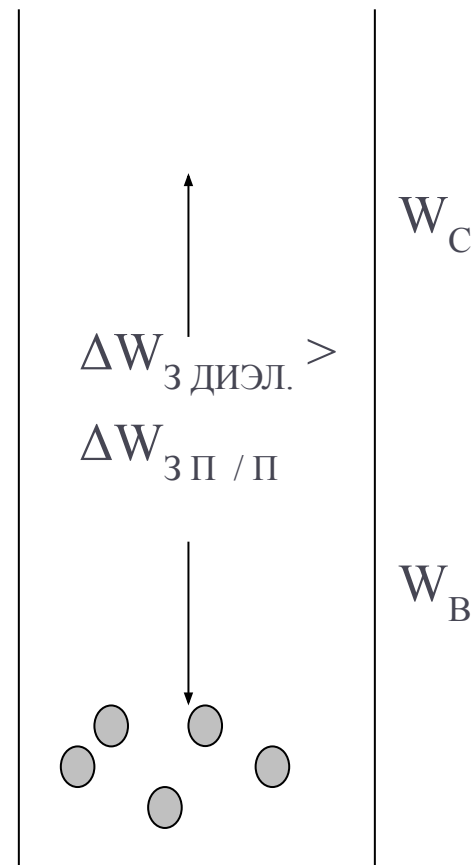
Проводник  
(метал)



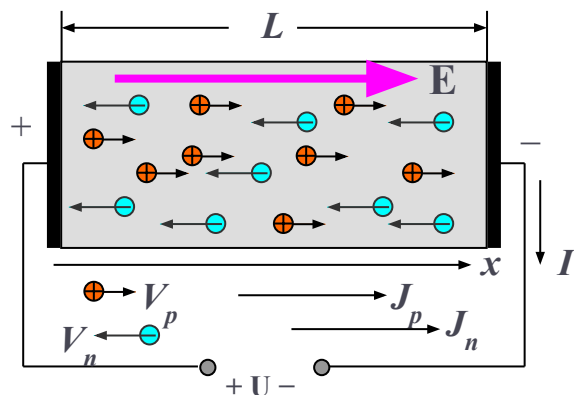
Полупроводник



Диэлектрик



# Проводимость полупроводников



$$V_n = \mu_n \cdot E$$

$$V_p = \mu_p \cdot E$$

Средняя, приобретённая скорость электронов и дырок

$$R = \frac{U}{I}$$

$$\rho = R \cdot \frac{S}{L}$$

$$\sigma = \frac{1}{\rho} = \frac{1}{R} \cdot \frac{L}{S} = \frac{I}{U} \cdot \frac{L}{S}$$



$$\frac{I}{S} = J$$

$$\frac{U}{L} = E$$

$$\sigma = \frac{J}{E}$$

$$J = \frac{I}{S} = J_p + J_n$$

$$J_p = (+q) \cdot p \cdot (+V_p)$$

$$J_n = (-q) \cdot n \cdot (-V_n)$$

плотность дырочной и электронной составляющих полного тока

$$J = J_p + J_n = (+q) \cdot p \cdot (+V_p) + (-q) \cdot n \cdot (-V_n) = q \cdot (p \cdot \mu_p + n \cdot \mu_n) \cdot E$$

$$\sigma = \frac{J}{E} = q \cdot (p \cdot \mu_p + n \cdot \mu_n)$$

# Электропроводность собственных полупроводников

□ Поскольку у собственных полупроводников

$$n_i = p_i, \text{ то:}$$

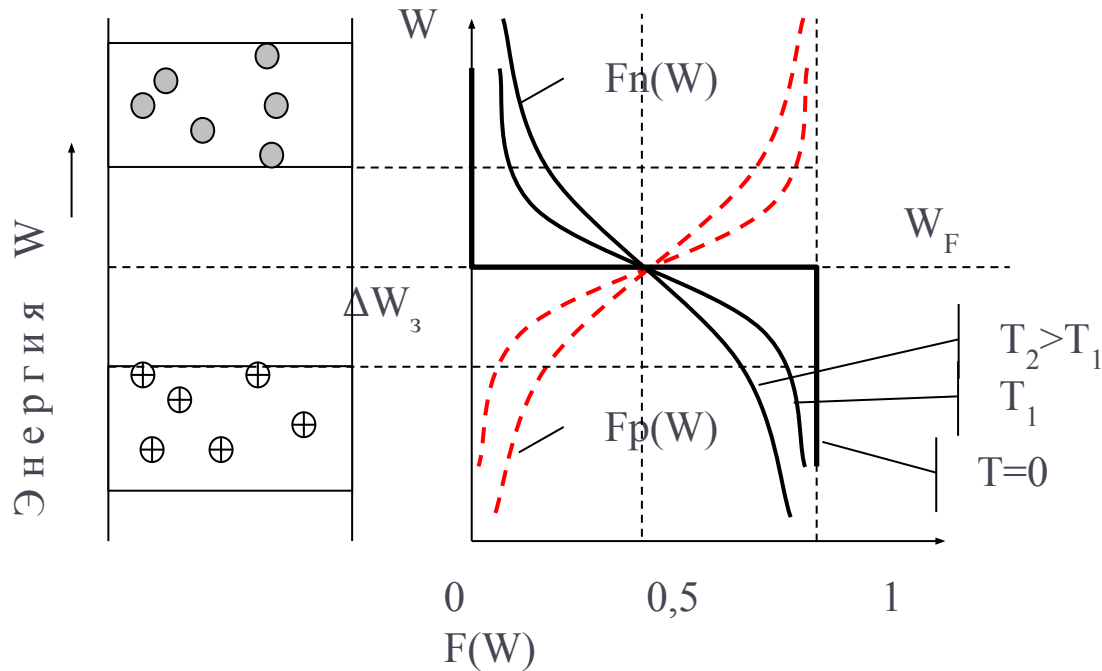
$$\sigma_i = q \cdot p_i \cdot (\mu_p + \mu_n) = q \cdot n_i \cdot (\mu_p + \mu_n)$$

Здесь и далее индекс  $i$  означает собственный полупроводник.



# Функция распределения Ферми-Дирака

Вероятность заполнения электроном энергетического уровня с энергией  $W$ , при заданной температуре  $T$ , количественно выражается функцией распределения Ферми-Дирака:  $F_n(W) = 1/(1 + \exp((W - W_F) / kT))$



$k$  – постоянная Больцмана  
 $T$  – абсолютная температура  
 $W_F$  – уровень Ферми.

$$F_n(W) + F_p(W) = 1,$$

$F_p(W)$  – вероятность нахождения дырки на энергетическом уровне  $W$ .

$$F_p(W) = 1 - F_n(W),$$

$$F_p(W) = 1/(1 + \exp((W_F - W) / kT))$$

**Уровень Ферми – энергетический уровень равновероятный как для электрона, так и для дырки.**

# Свойства функции распределения Ферми-Дирака

- При  $T=0$  функция Ферми превращается в ступенчатую.
- Для собственного полупроводника уровень Ферми лежит в середине запрещённой зоны, т.к. функция вероятности симметрична относительно него при любой фиксированной температуре.
- Функция Ферми имеет смысл только в валентной и свободной зонах, т.к. в запрещённой зоне носители заряда находиться не могут.

# Определение концентрации электронов и дырок в собственном полупроводнике

- Энергетические уровни зоны проводимости, а также и валентной зоны распределены неравномерно, т.е. их плотность зависит от энергии.
- $P(W)$  – число энергетических уровней в зоне проводимости, попадающих в единичный, бесконечно малый энергетический интервал  $dW$ . Т.е.  $P(W)$  – функция, характеризующая плотность энергетических уровней.
- $dW \cdot P(W)$  – число уровней в элементарной полосе  $dW$ .
- $F_n(W)$  – вероятностью заполнения энергетических уровней.
- Тогда количество электронов, занимающих разрешённые энергетические уровни в некоторой полосе  $dW$   
$$dn_i = P(W) \cdot F_n(W) \cdot dW.$$

# Определение концентрации электронов и дырок в собственном полупроводнике (продолжение)

- Полное число электронов, приходящихся на  $1 \text{ см}^3$  вещества и занимающих энергетические уровни в полосе энергий от  $W_1$  до  $W_2$  будет равно:

$$n_i = \int_{W_1}^{W_2} P(W) \cdot F_n(W) dW$$

- Аналогичным образом для концентрации дырок валентной зоны получим:

$$p_i = \int_{W_1}^{W_2} P(W) \cdot F_p(W) dW$$

В обоих случаях интегрирование ведётся по всей ширине зоны проводимости (conductivity) или валентной (valency) зоны.

- В результате интегрирования получим:

$$n_i = N_C \cdot e^{-\frac{W_C - W_{F_i}}{k \cdot T}} \quad p_i = N_V \cdot e^{-\frac{W_{F_i} - W_V}{k \cdot T}}$$

$$N_C = 2 \cdot \left( \frac{2 \cdot \pi \cdot m_n \cdot k \cdot T}{h^2} \right)^{\frac{3}{2}} \quad N_V = 2 \cdot \left( \frac{2 \cdot \pi \cdot m_p \cdot k \cdot T}{h^2} \right)^{\frac{3}{2}}$$

$N_C$  и  $N_V$  – эффективная плотность состояний (на  $1 \text{ см}^3$ ) в зоне проводимости и валентной зоне соответственно.

$h = 4,14 \cdot 10^{-15} \text{ эв} \cdot \text{сек}$  – постоянная Планка.

$m_n$  и  $m_p$  – эффективная масса электрона и дырки соответственно.

# Определение концентрации электронов и дырок в собственном полупроводнике (продолжение)

- В большинстве практических случаев можно считать, что  $m_n = m_p = m$  – массе электрона в состоянии покоя. Тогда:

$$N_C = N_V = 2 \cdot \left( \frac{2 \cdot \pi \cdot m \cdot k \cdot T}{h^2} \right)^{\frac{3}{2}}$$

- Положив далее, что  $\Delta W_3 = W_C - W_V$  и учитывая, что в собственном полупроводнике  $n_i = p_i$ , выражения для концентрации электронов и дырок можно привести к виду:

$$n_i = p_i = 2 \cdot \left( \frac{2 \cdot \pi \cdot m \cdot k}{h^2} \right)^{\frac{3}{2}} \cdot T^{\frac{3}{2}} \cdot e^{\frac{-\Delta W_3}{2 \cdot k \cdot T}}$$

# Определение концентрации электронов и дырок в собственном полупроводнике (продолжение)

- При этих условиях уровень Ферми лежит точно посередине запрещённой зоны, т.е.

$$W_{Fi} = (W_c - W_v) / 2.$$

- Подставляя найденное значение концентрации  $n_i$  в выражение для проводимости собственного полупроводника приходим к следующей зависимости:

$$\sigma_i = 2 \cdot q \cdot \left( \frac{2 \cdot \pi \cdot m \cdot k}{h^2} \right)^{\frac{3}{2}} \cdot T^{\frac{3}{2}} \cdot e^{\frac{-\Delta W_3}{2 \cdot k \cdot T}} \cdot (\mu_n + \mu_p)$$

$$\sigma_0 = 2 \cdot q \cdot \left( \frac{2 \cdot \pi \cdot m \cdot k}{h^2} \right)^{\frac{3}{2}} \cdot T^{\frac{3}{2}} \cdot (\mu_n + \mu_p) \quad \sigma_i = \sigma_0 \cdot e^{-\frac{\Delta W_3}{2 \cdot k \cdot T}}$$

# Зависимость удельной проводимости собственного полупроводника от температуры

$$\sigma_i = \sigma_0 \cdot e^{-\frac{\Delta W_3}{2 \cdot k \cdot T}}$$

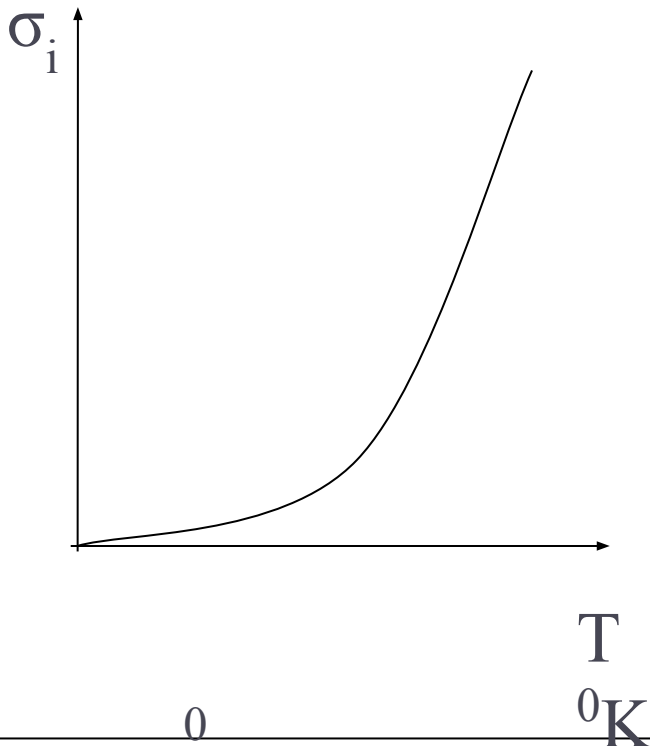
$$\sigma_0 = 2 \cdot q \cdot \left( \frac{2 \cdot \pi \cdot m \cdot k}{h^2} \right)^{3/2} \cdot T^{3/2} \cdot (\mu_n + \mu_p)$$

- ▣  $\Delta W_3 \gg k \cdot T$ .
- ▣ Подвижности зарядов  $\mu_n$  и  $\mu_p$  мало зависят от температуры.
- ▣ экспонента растёт гораздо быстрее, чем  $T^{3/2}$ .

Поэтому, с достаточной для практики точностью, можно считать, что определяющее влияние на зависимость оказывает экспонента, т.е. принять

$$\sigma_0 = const.$$

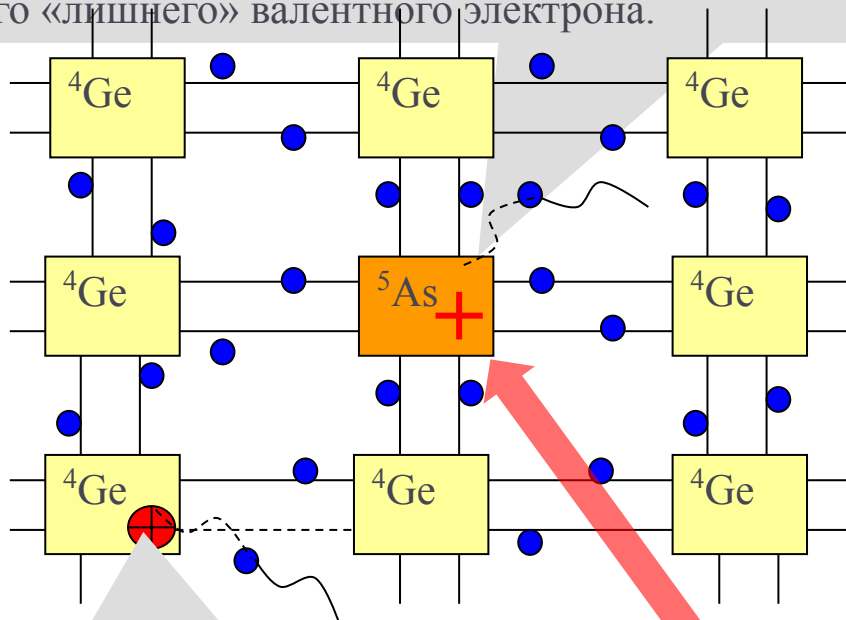
- ▣ Зависимость удельной проводимости собственного полупроводника от температуры носит сугубо **нелинейный характер** и близка к **экспоненциальной**.



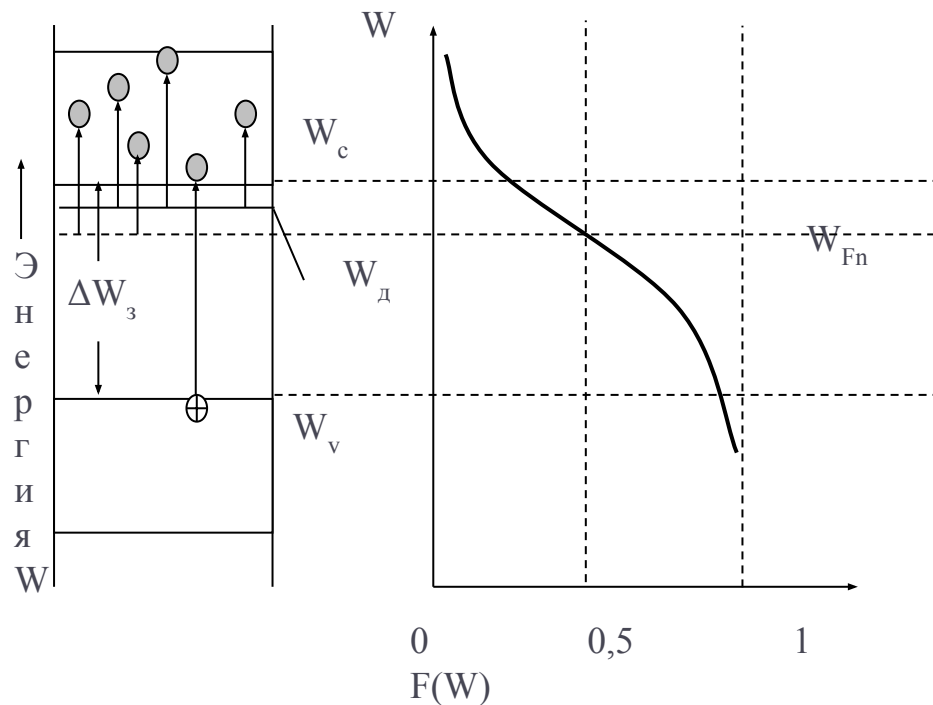
# Полупроводник типа – n или электронного типа

Процесс введения примеси в полупроводник называется *легированием*, а примесный полупроводник - *легированным*.

Неподвижный, положительный ион атома мышьяка, образованный в результате отрыва 5-го «лишнего» валентного электрона.



Дырка, образованная в результате отрыва ковалентного электрона.



Примеси отдающие лишний электрон и обуславливающие электронную проводимость называются *донорными*.

Ион примеси не является носителем заряда, он неподвижен – это не дырка.



# Уравнение n-полупроводника

- Концентрации электронов и дырок в полупроводнике типа n рассчитываются также на основе статистики Ферми-Дирака.

$$n_n = N_C \cdot e^{-\frac{W_C - W_{F_n}}{k \cdot T}} \quad p_n = N_V \cdot e^{-\frac{W_{F_n} - W_V}{k \cdot T}}$$

- где  $W_{F_n}$  – уровень Ферми в полупроводнике типа n, определяемый выражением

$$W_{F_n} = -\left( W_C + k \cdot T \cdot \ln \frac{N_D}{N_C} \right)$$

- Величина  $N_D$  представляет собой концентрацию доноров. Из выражения видно, что уровень Ферми лежит ниже уровня дна зоны проводимости. Произведение концентраций электронов и дырок равно:

$$n_n \cdot p_n = N_C \cdot N_V \cdot e^{-\frac{W_V - W_C}{k \cdot T}} = \left( 2 \cdot \left( \frac{2 \cdot \pi \cdot m \cdot k \cdot T}{h^2} \right)^{\frac{3}{2}} \cdot e^{-\frac{\Delta W_3}{2 \cdot k \cdot T}} \right)^2 = n_i^2$$

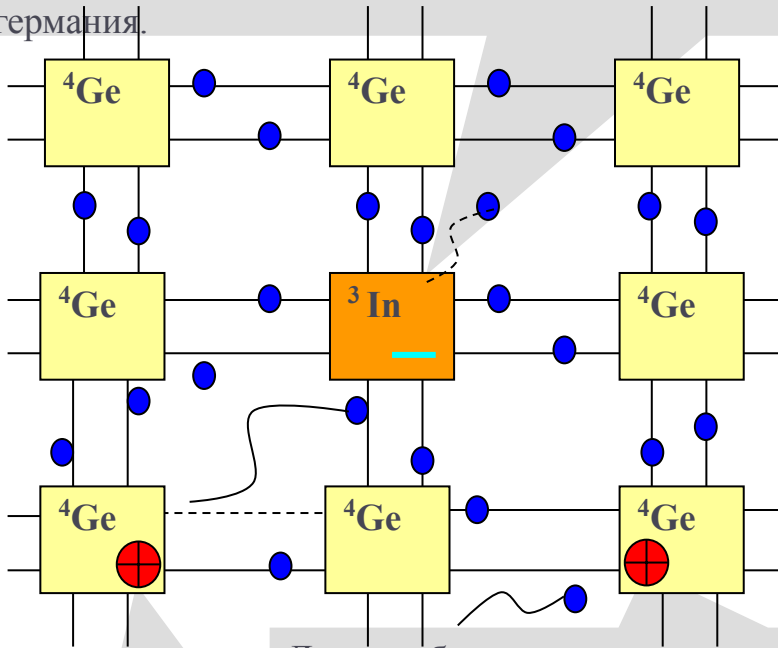
- Уравнение полупроводника:

$$n_n \cdot p_n = n_i^2$$

# Полупроводник типа – р, или

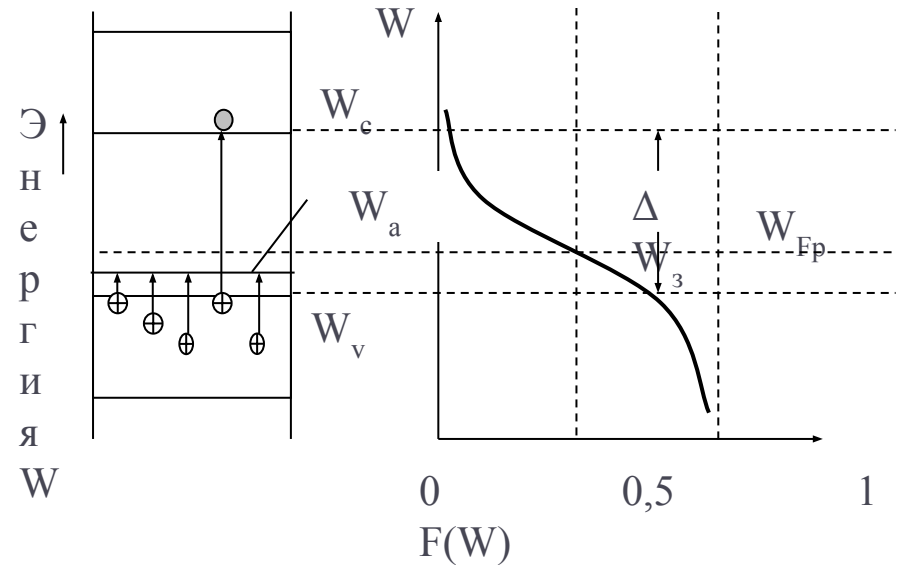
## дырочного типа

Неподвижный, отрицательный ион атома 3 – х валентного индия, образованный в результате присоединения валентного электрона атома германия.



Дырка, образованная в результате перехода электрона в свободную зону.

Дырка, образованная в результате отрыва ковалентного электрона, переданного индию.



- Примеси обуславливающие дырочную проводимость называются *акцепторными*
- Полупроводник называется *дырочным* или полупроводником р - типа.

# Уравнение p-полупроводника

- Концентрации электронов и дырок в полупроводнике типа p рассчитываются также на основе статистики Ферми-Дирака.

$$p_p = N_V \cdot e^{-\frac{W_{Fp} - W_V}{k \cdot T}} \quad n_p = N_C \cdot e^{-\frac{W_C - W_{Fp}}{k \cdot T}}$$

- где  $W_{Fp}$  – уровень Ферми в полупроводнике типа p, определяемый выражением

$$W_{Fp} = - \left( W_V + k \cdot T \cdot \ln \frac{N_a}{N_V} \right)$$

- Величина  $N_a$  представляет собой концентрацию акцепторов.
- Так же как и для n – полупроводника, для полупроводников типа p справедливо равенство:

$$n_p \cdot p_p = n_i^2$$

- Это равенство означает, что произведение концентраций электронов и дырок при данной температуре  $T$  для данного полупроводника постоянно и не зависит от характера и количества примесей.

# Следствие из уравнения полупроводника

- В силу симметрии выражений, определяющих концентрацию основных и неосновных носителей заряда в примесных полупроводниках, независимо от типа проводимости, их можно записать в следующем виде:

$$p = N_V \cdot e^{-\frac{W_F - W_V}{k \cdot T}} \quad n = N_C \cdot e^{-\frac{W_C - W_F}{k \cdot T}} \quad n \cdot p = n_i^2$$

- где  $W_F$  – уровень Ферми, определяемый для соответствующего типа полупроводника
- Поделив эти выражения друг на друга, приняв при этом  $n = n_i^2 / p$  и  $p = n_i^2 / n$ , можно привести их к следующему виду:

$$p = n_i \cdot e^{-\frac{W_{Fi} - W_F}{k \cdot T}} \quad n = n_i \cdot e^{-\frac{W_F - W_{Fi}}{k \cdot T}}$$

- где  $W_{Fi} = (W_C - W_V) / 2$  – уровень Ферми в собственном полупроводнике, а  $W_F$  – уровень Ферми в соответствующем примесном полупроводнике.

- Учитывая, что энергия электрона (дырки)  $W = q \cdot \varphi$ , последние выражения для дырок и электронов соответственно можно привести к виду:

$$p = n_i \cdot e^{-\frac{\varphi_{Fi} - \varphi_F}{\varphi_T}} \quad n = n_i \cdot e^{-\frac{\varphi_F - \varphi_{Fi}}{\varphi_T}}$$

- $\varphi_{Fi}$  – потенциал Ферми в (вольтах) собственного полупроводника,

- $\varphi_F$  – потенциал Ферми в (вольтах) соответствующего собственного полупроводника,

- $\varphi_T = k \cdot T / q$  – температурный потенциал (в вольтах). При комнатной температуре  $\varphi_T = 0,025V$ .

# Следствие из уравнения полупроводника (продолжение)

- Заменяем потенциал Ферми в собственном полупроводнике –  $\varphi_{Fi}$  потенциалом середины запрещённой зоны примесного полупроводника –  $\varphi_E$ , что практически одно и то же, т.к.  $\varphi_{Fi} \approx \varphi_E$ .

- Тогда:

$$p = n_i \cdot e^{-\frac{\varphi_F - \varphi_E}{\varphi_T}} \quad n = n_i \cdot e^{-\frac{\varphi_E - \varphi_F}{\varphi_T}}$$

- Из этих выражений непосредственно следует:
- $\varphi_{Fn} = \varphi_E + \varphi_T \cdot \ln(n / n_i)$  – для полупроводников n – типа уровень Ферми смещён от середины запрещённой зоны вверх по диаграмме к свободной зоне на величину  $\ln(n / n_i)$ .
- $\varphi_{Fp} = \varphi_E - \varphi_T \cdot \ln(p / n_i)$  – для полупроводников p – типа уровень Ферми смещён от середины запрещённой зоны вниз по диаграмме к валентной зоне на величину  $\ln(p / n_i)$ .

# Электропроводность примесных полупроводников

$$\sigma = q \cdot p \cdot \mu_p + q \cdot n \cdot \mu_n$$

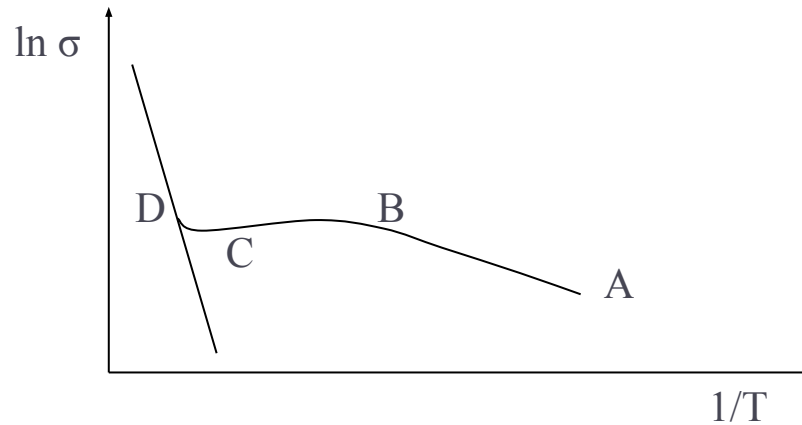
□ в электронном полупроводнике  $n \gg p$ ,

$$\sigma_n \approx q \cdot n \cdot \mu_n$$

□ в дырочном полупроводнике  $p \gg n$ ,

$$\sigma_p \approx q \cdot p \cdot \mu_p$$

# Зависимость электропроводности примесных полупроводников от температуры



- АВ — рост концентрации примесных носителей.
- ВС — истощение примеси.
- CD — собственная проводимость полупроводника

# Электрический ток в примесном полупроводнике

- Направленное перемещение под действием электрического поля – *дрейфовый ток*.

$$j_{n \text{ др}} = q \cdot n \cdot \mu_n \cdot E$$

$$j_{p \text{ др}} = q \cdot p \cdot \mu_p \cdot E$$

- Направленное перемещение носителей заряда вследствие разности концентраций зарядов в смежных областях полупроводника – *диффузионный ток*.

$$j_{n \text{ диф.}} = q \cdot D_n \cdot \text{grad } n$$

$$j_{p \text{ диф.}} = -q \cdot D_p \cdot \text{grad } p$$

- Полная плотность электронного и дырочного тока :

$$J = q \cdot n \cdot \mu_n \cdot E + q \cdot D_n \cdot \text{grad } n + q \cdot p \cdot \mu_p \cdot E - q \cdot D_p \cdot \text{grad } p$$