

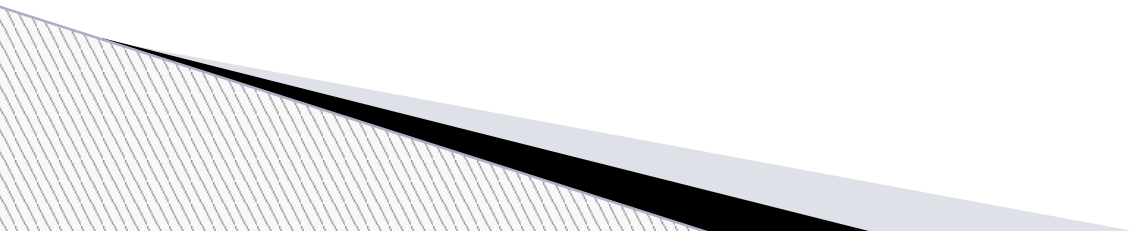
Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева
Институт радиоэлектроники и информационных технологий
Кафедра «Электроника и сети ЭВМ»

Электроника

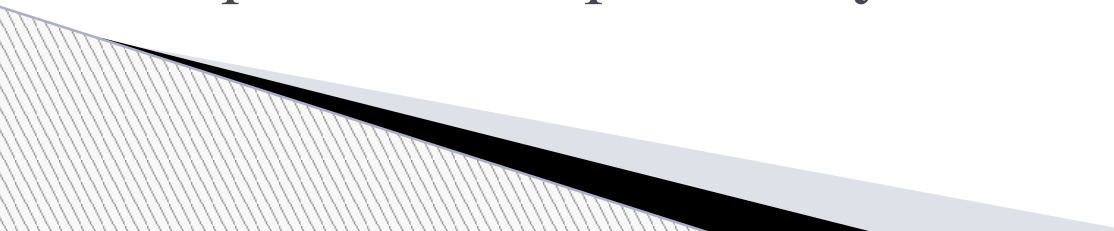
Лекции

К.т.н., доцент кафедры ЭСВМ
Калинина Н.А.
Kalinina_na@list.ru

ФИЗИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ ПОЛУПРОВОДНИКОВОЙ ЭЛЕКТРОНИКИ

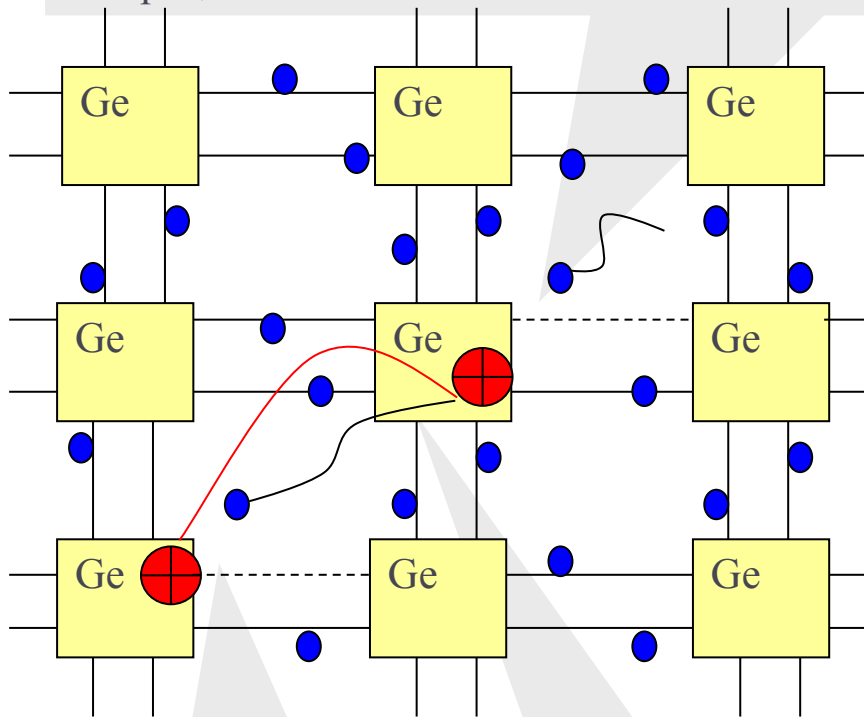


Определяющие свойства полупроводников

1. Удельное электрическое сопротивление ρ – 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

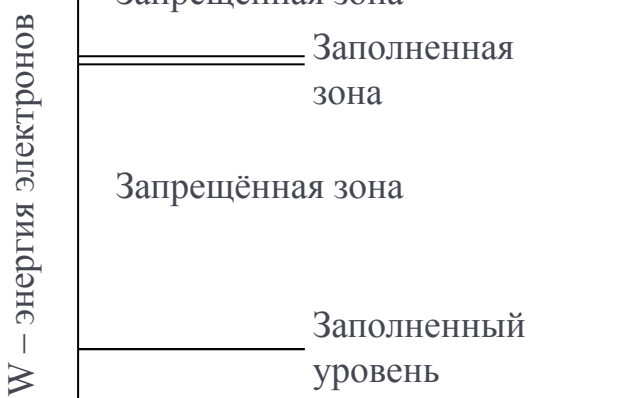
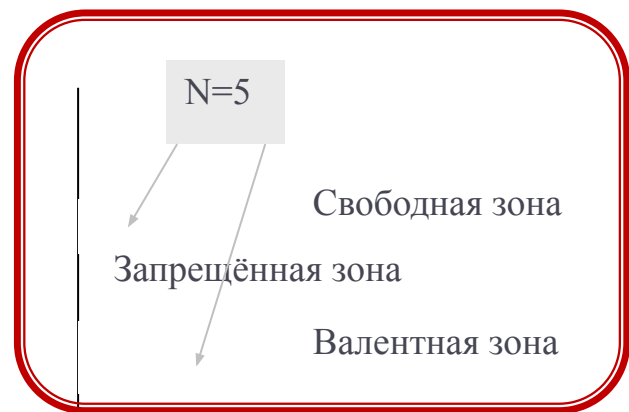


При любой постоянной температуре скорости генерации и рекомбинации равны между собой, а при температуре абсолютного нуля (0°K) равны нулю

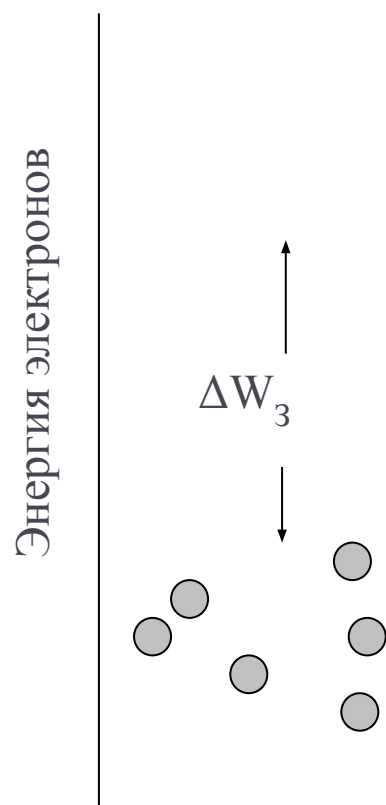
3. Рекомбинация пары электрон -дырка

2. Образование новой пары электрон -дырка

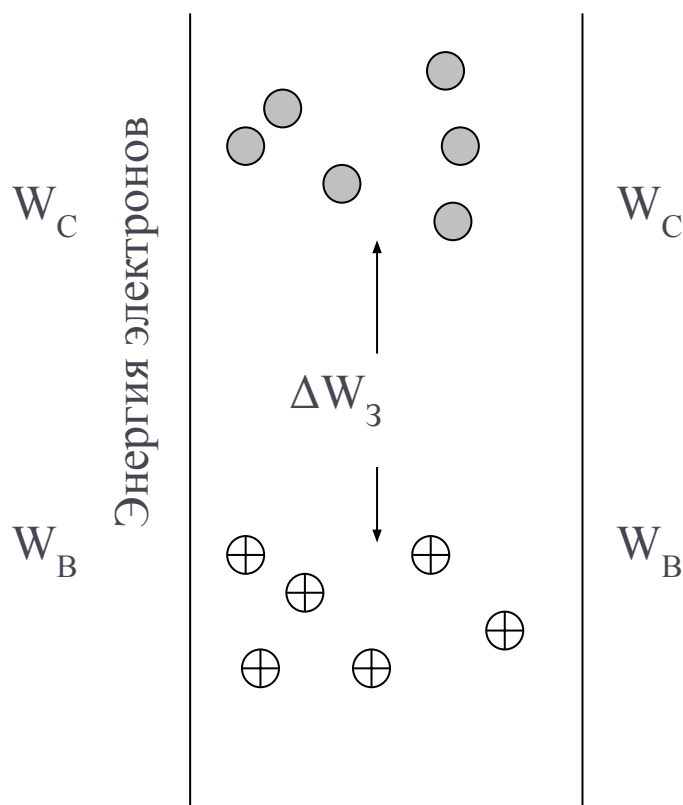
Энергетические диаграммы полупроводников



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

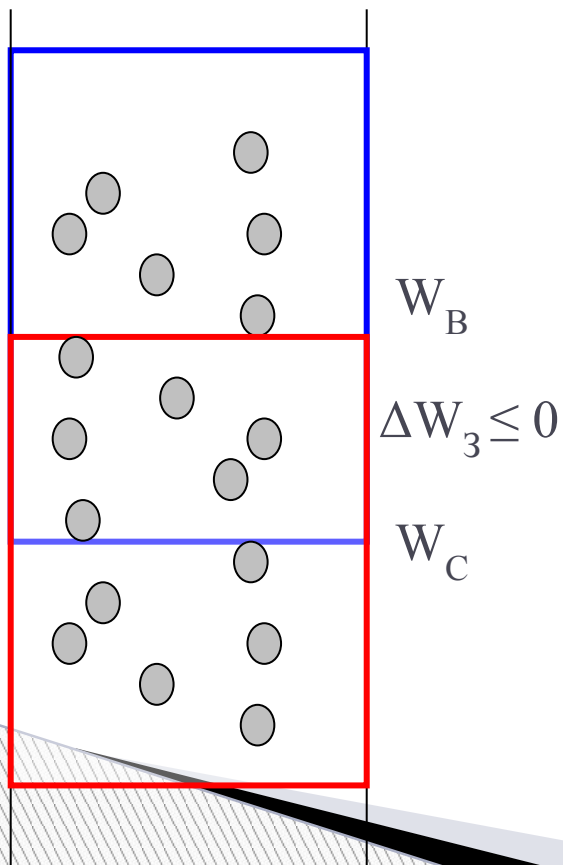


$T = 300 \text{ }^\circ\text{K} = +27 \text{ }^\circ\text{C}$

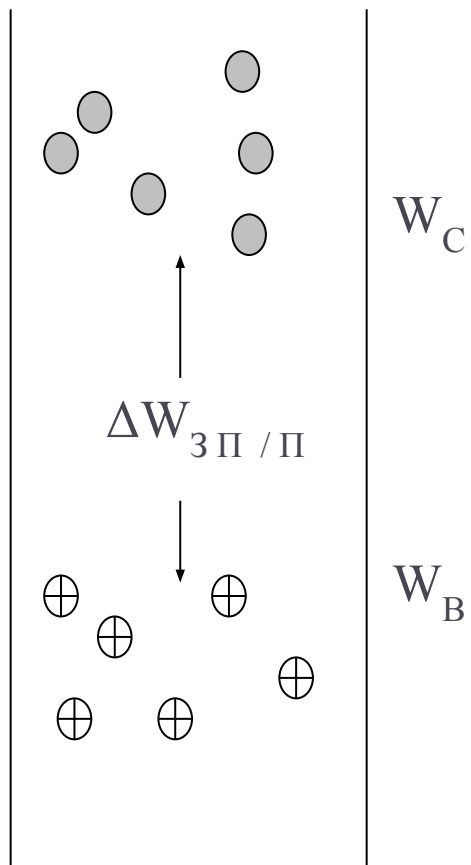


Энергетические диаграммы полупроводников, проводников и диэлектриков

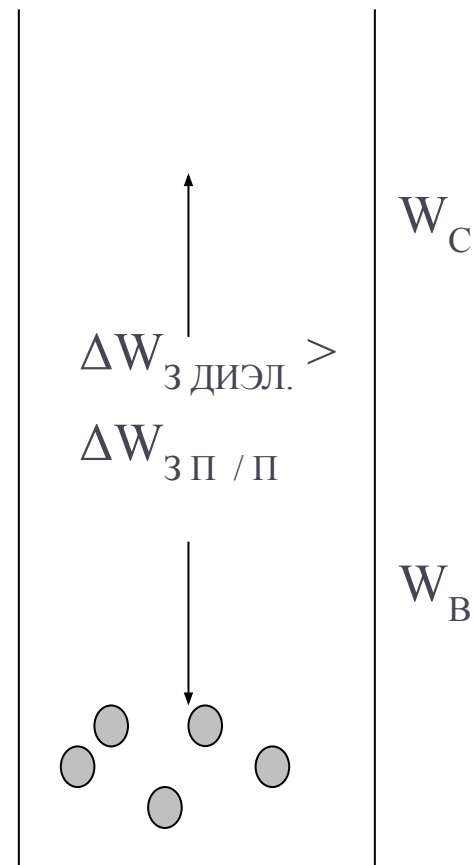
Проводник
(метал)



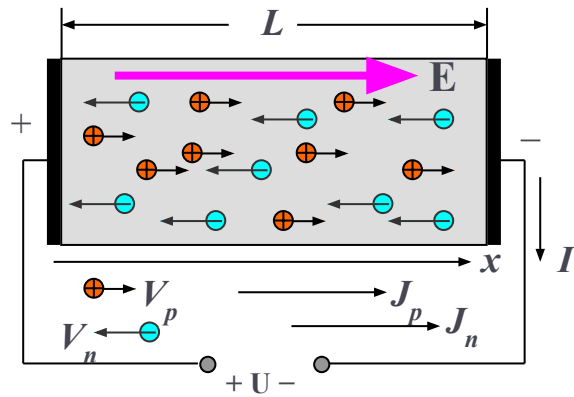
Полупроводник



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

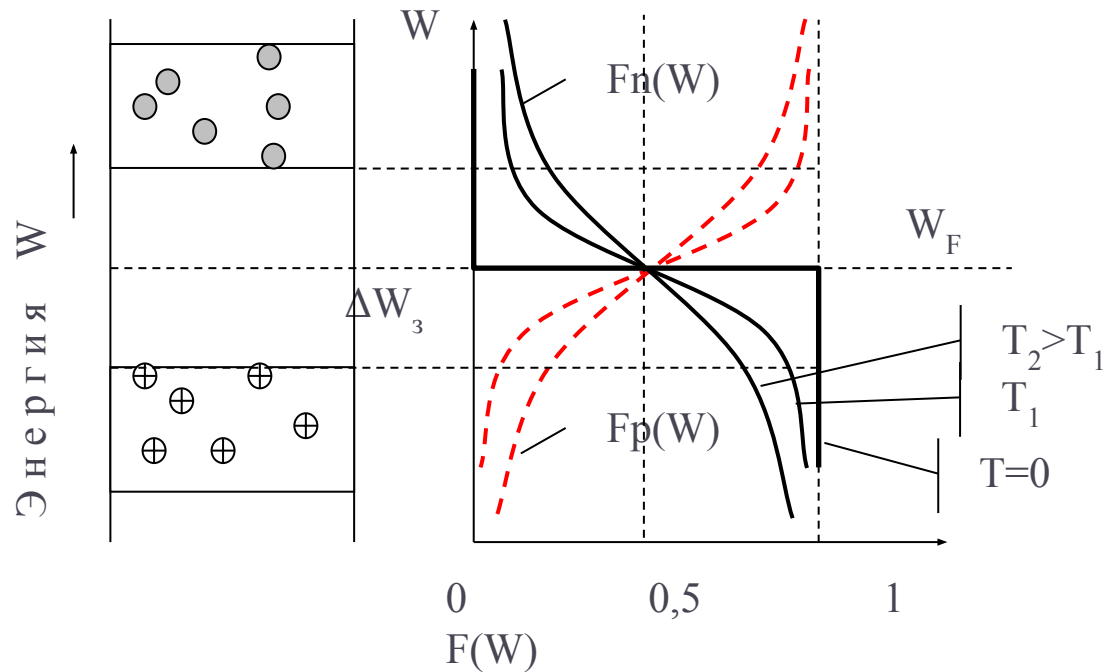
$$n_i = p_i, \text{ то:}$$

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

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 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 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

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

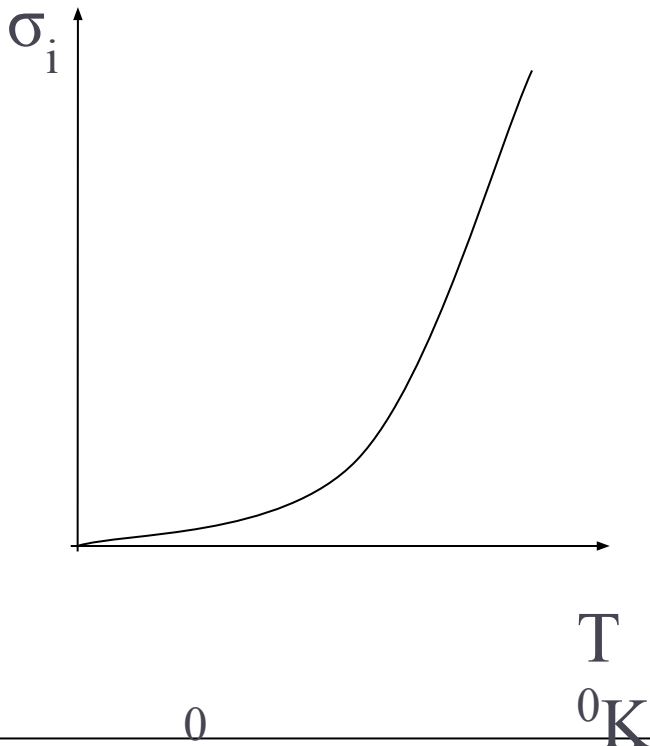
$$\sigma_0 = 2 \cdot q \cdot \left(\frac{2 \cdot \pi \cdot m \cdot k}{h^2} \right)^{3/2} \cdot T^{3/2} \cdot (\mu_n + \mu_p)$$

- ▣ $\Delta W_3 \gg k \cdot T$.
- ▣ Подвижности зарядов μ_n и μ_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

$$\sigma_0 = const.$$

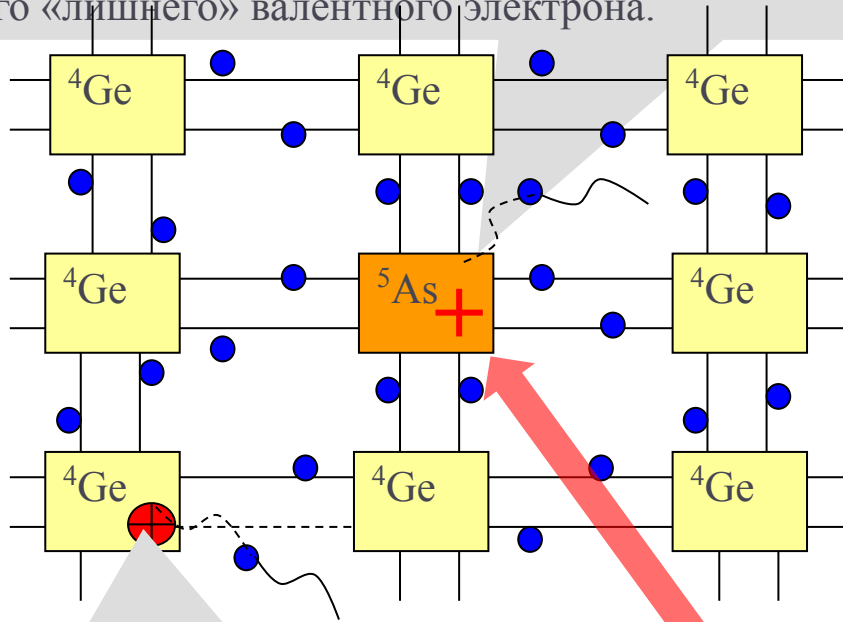
- ▣ Зависимость удельной проводимости собственного полупроводника от температуры носит сугубо **нелинейный характер** и близка к **экспоненциальной**.



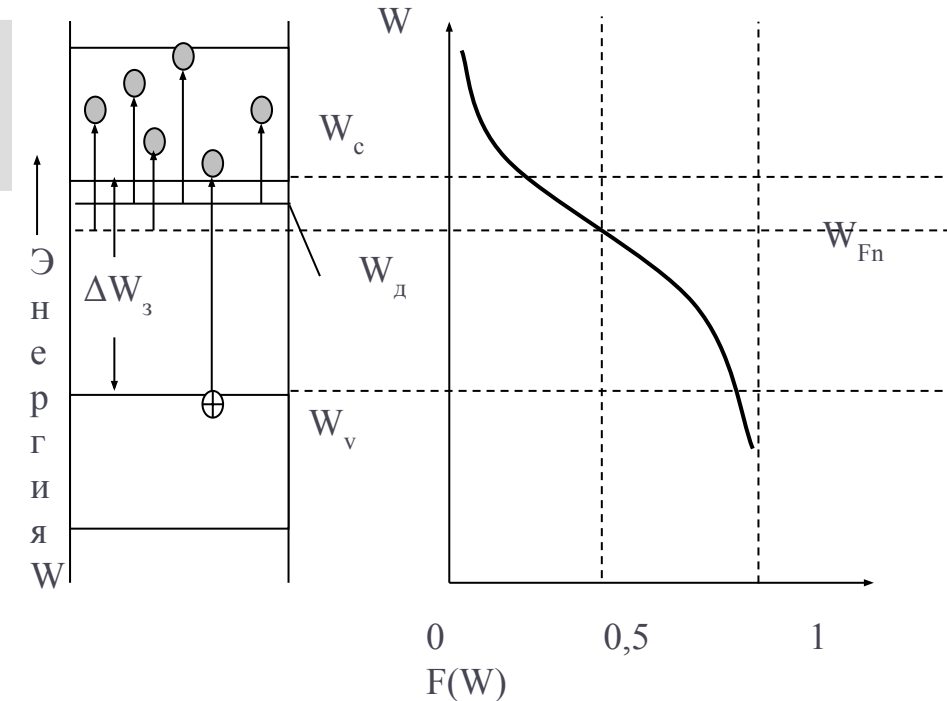
Полупроводник типа – n или электронного типа

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:

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

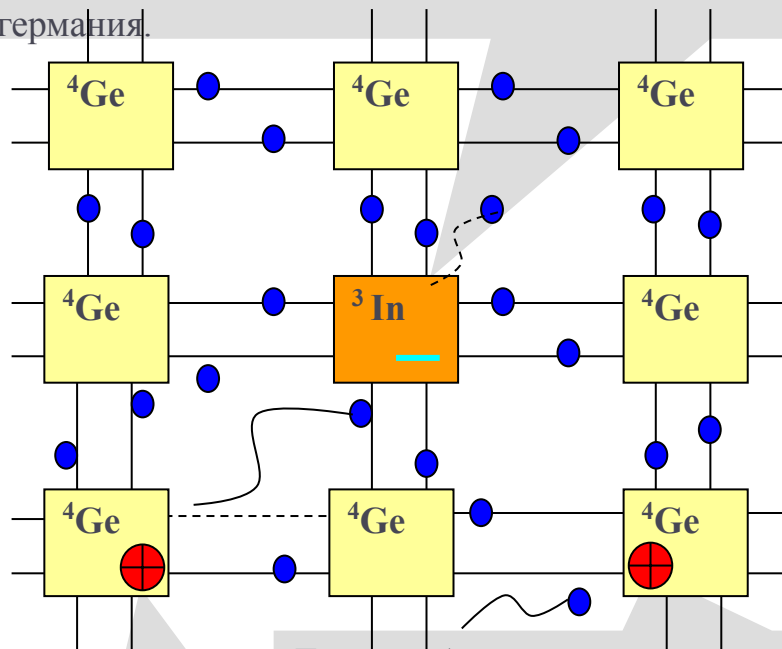
- Уравнение полупроводника:

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

Полупроводник типа – р, или

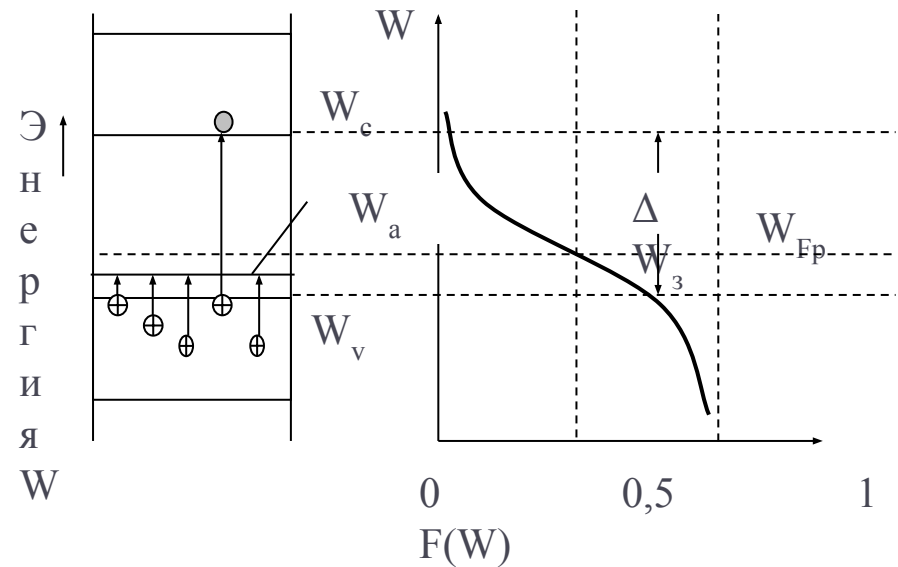
дырочного типа

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 р-полупроводника

- Концентрации электронов и дырок в полупроводнике типа р 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 р, 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 р 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:

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

- φ_{Fi} – потенциал Ферми в (вольтах) собственного полупроводника,

- φ_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)

- Заменим потенциал Ферми в собственном полупроводнике – φ_{Fi} потенциалом середины запрещённой зоны примесного полупроводника – φ_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

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

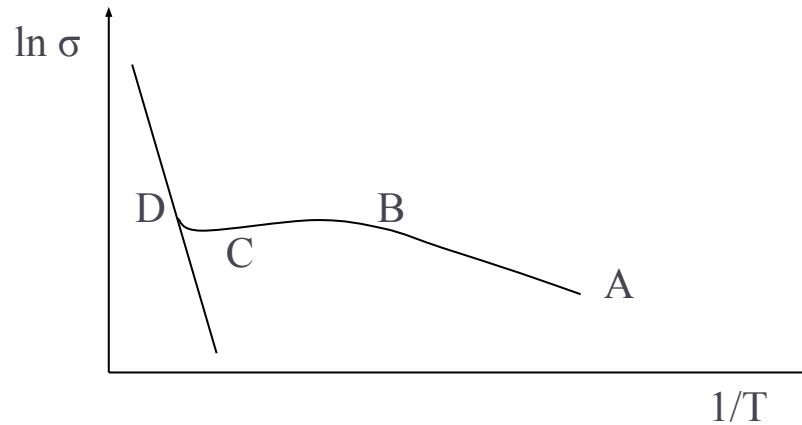
□ в электронном полупроводнике $n \gg p$,

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

□ 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 :

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