








Полупроводникови свойства на материалите

Материалознание

Въпроси 10, 11, 12

Съдържание

-  Собствени полупроводници
-  Разпределение на Ферми
-  Примесни полупроводници
-  Собствена и примесна проводимост
-  Ефект на Хол

1. Собствени полупроводници

1.1. Основни свойства

Полупроводниците (ПП) имат тясна забранена зона $\Delta W < 3 \text{ eV}$.

Съгласно зонната теория свойствата на полупроводниковите материали зависят от енергетичното им състояние и могат да се проявяват като проводници и диелектрици.

Полупроводниците имат кристална структура, изградена с ковалентна химическа връзка – **ковалентни кристали**.

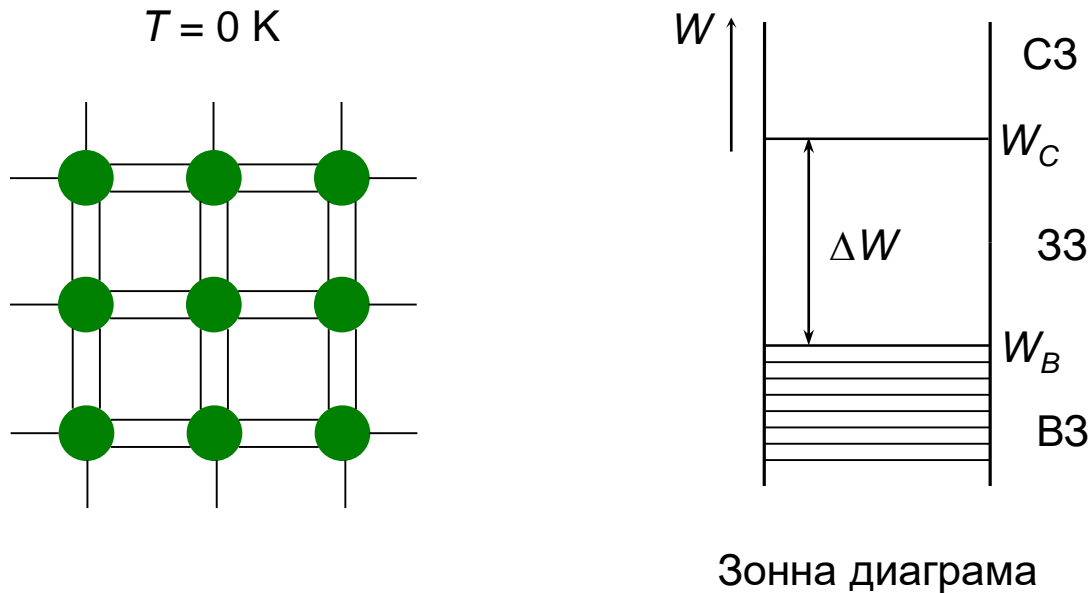
Собствени полупроводници са кристали, които нямат примеси и дефекти в кристалната решетка.

Чистотата на полупроводниковите материали се измерва с брой на примесните атоми на единица обем.

Собствени полупроводници са елементите от IV валентна група на Менделеевата таблица – **силиции** (Si) и германий (Ge).

1. Собствени полупроводници

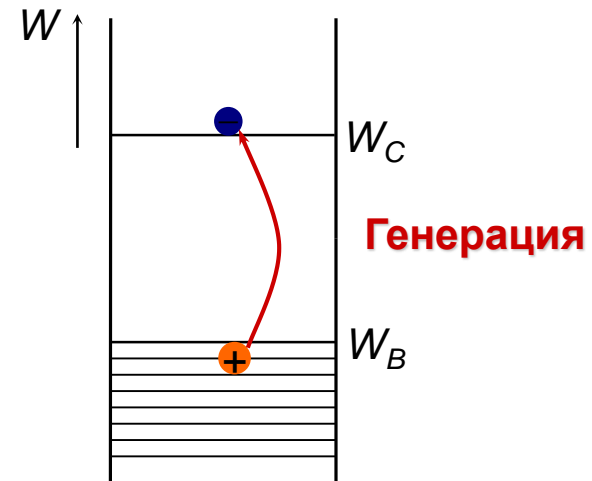
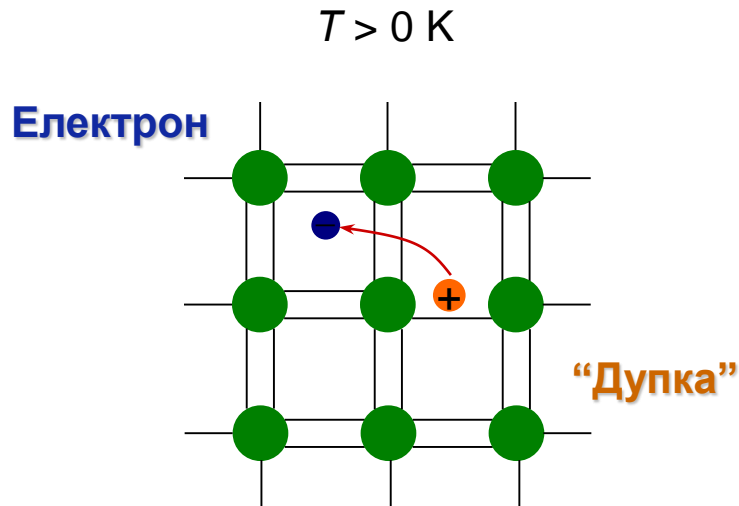
1.1. Основни свойства



В чистия полупроводников кристал при температура $T = 0 \text{ K}$ няма свободни токоносители.

1. Собствени полупроводници

1.1. Основни свойства



Зонна диаграма

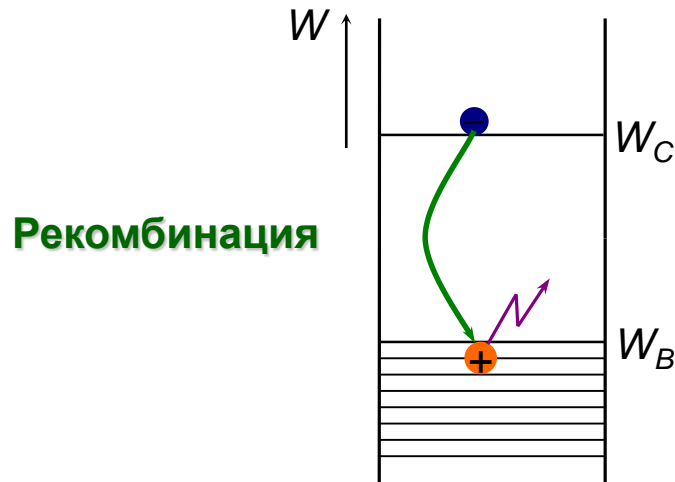
Когато енергията на валентния електрон е достатъчна, за да напусне ковалентната връзка на кристала (да преодолее забранената зона) той става свободен електрон.

Електронна “дупка” – некомпенсиран положителен заряд, получен при напускане на ковалентната връзка от електрона, чийто носител е ядрото на атома.

Генерация – получаване на двойка токоносители.

1. Собствени полупроводници

1.1. Основни свойства



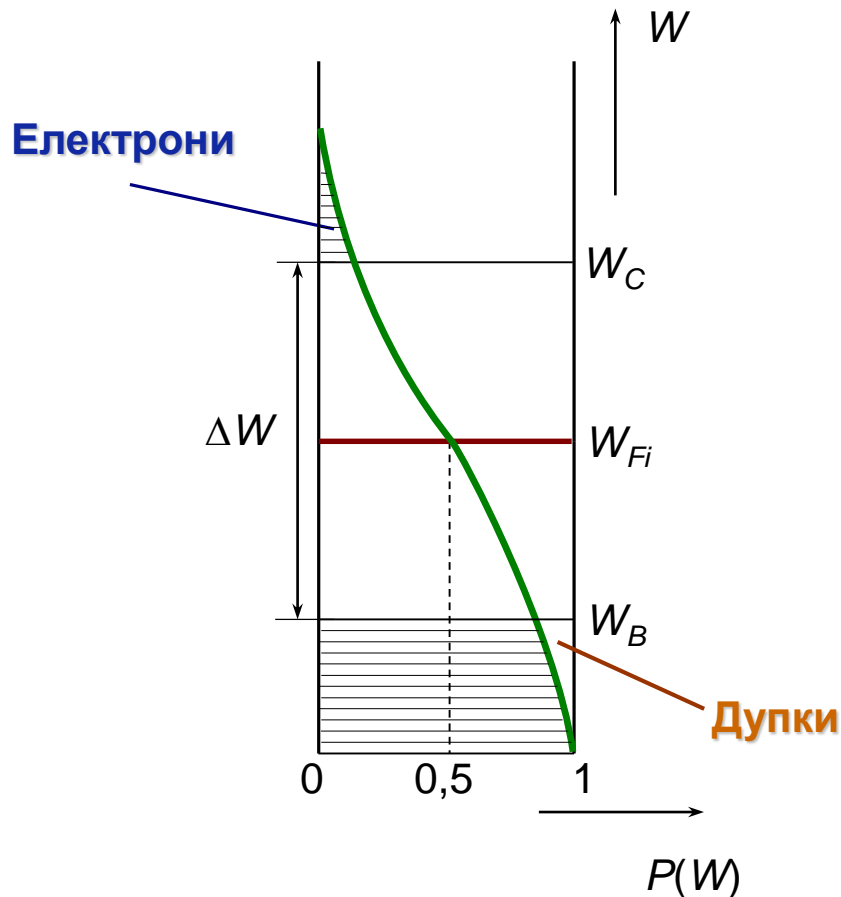
Зонна диаграма

Рекомбинация – заемане на "дупка" от свободен електрон.

Освободената енергия се излъчва като фонон (топлина) или фотон (светлина).

1. Собствени полупроводници

1.2. Разпределение на Ферми и брой на токоносителите



Вероятността за получаване на свободни електрони се описва от разпределението на Ферми:

$$P(W) = \frac{1}{1 + \exp\left(\frac{W - W_F}{kT}\right)}$$

Разпределението на Ферми е симетрично спрямо нивото на Ферми (което се намира в средата на забранената зона), което означава че броят на свободните електрони n_i е равен на броят на дупките p_i или

$$n_i = p_i$$

1. Собствени полупроводници

1.2. Разпределение на Ферми и брой на токоносителите

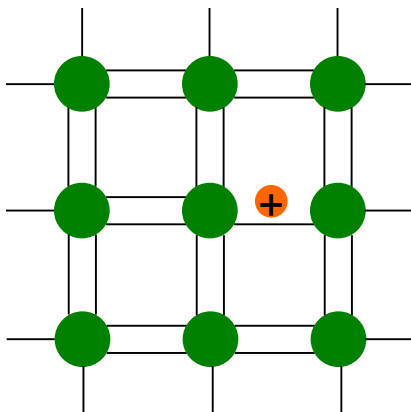
Концентрацията на свободните електрони n_i (или дупки p_i) при собствените полупроводници се изчислява по изрази:

$$n_i = p_i = \sqrt{N_B N_C} \exp\left(-\frac{\Delta W}{2kT}\right)$$

където N_C е плътност на енергийните състояния в свободната зона; N_B – плътност на енергийните състояния във валентната зона.

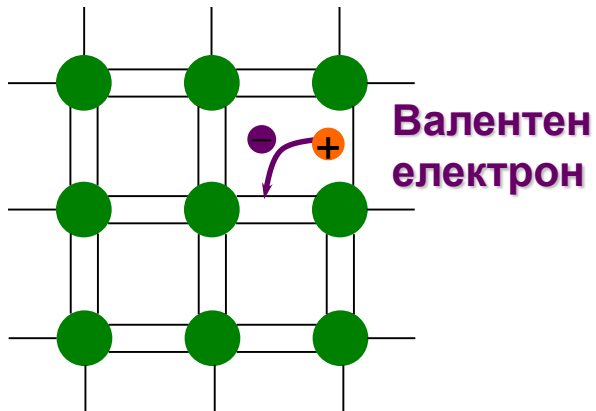
1. Собствени полупроводници

1.3. Собствена проводимост



1. Собствени полупроводници

1.3. Собствена проводимост



N-проводимост – насочено движение на свободни електрони.

P-проводимост – насочено движение на дупки.

Насоченото движение на дупките в полупроводниковия кристал физически се осъществява чрез движение на валентните електрони от съседни ковалентни връзки.

$$\sigma_i = n_i e \mu_n + p_i e \mu_p = n_i e (\mu_n + \mu_p)$$

където μ_n е подвижност на електроните, μ_p – подвижност на дупките.

Проводимост, получена от светлинно облъчване, се нарича *фотопроводимост*.

2. Примесни полупроводници

2.1. Основни свойства и видове

Примесни полупроводници – материали със значително количество строго контролирани примеси (като количесво и чистота).

В тях се проявя примесна проводимост.

Ако примесните атоми заместват собствен атом във възела на кристалната решетка, те се наричат примеси на заместване.

Ако се разполагат между възлите – примеси на внедряване.

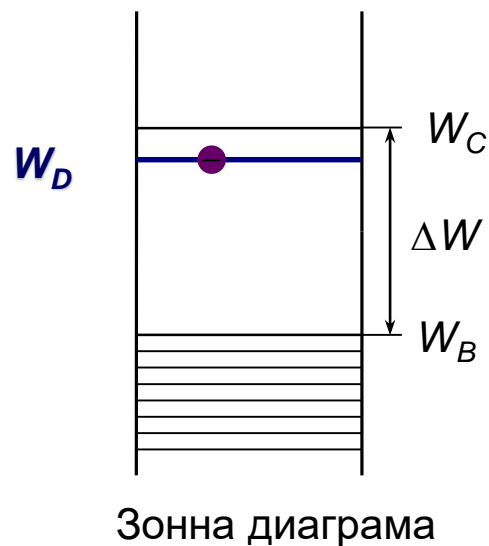
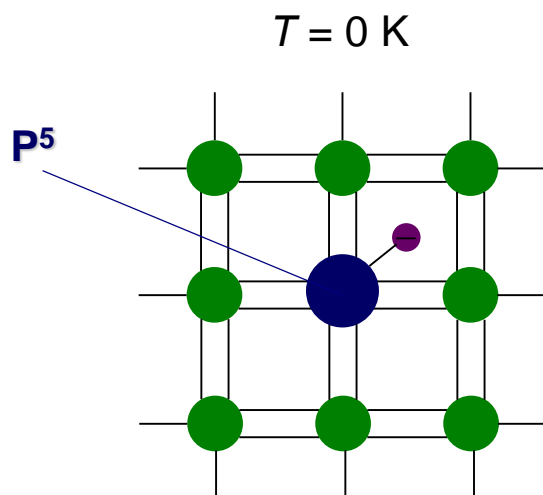
Примесите се разделят на **донорни** и **акцепторни** в зависимост от валенността на примесния елемент.

2. Примесни полупроводници

2.1.1. Донорни полупроводници

Донорни примеси – увеличават електроните в свободната зона.

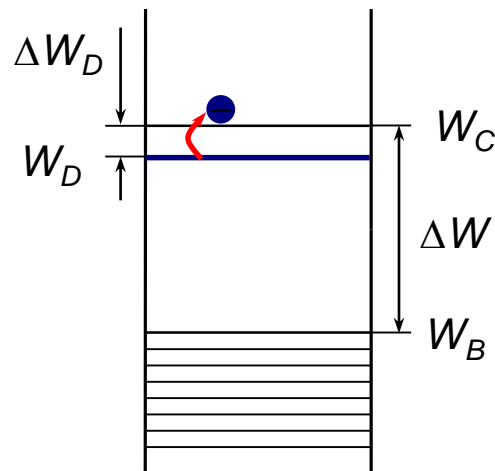
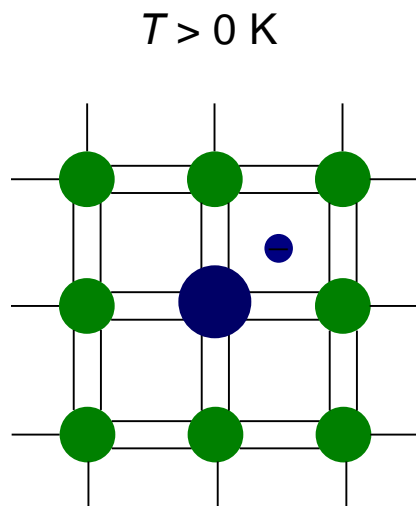
За полупроводник от IV валентност (Si или Ge) да се превърне в донорен полупроводник, то примесният елемент трябва да е от V валентност (P, As и др.).



Донорното ниво W_D , заето от петия електрон на донорните атоми, е разположено в забранената зона, близо до свободната.

2. Примесни полупроводници

2.1.1. Донорни полупроводници



Зонна диаграма

ΔW_D – енергия за
йонизация на
донорните примеси

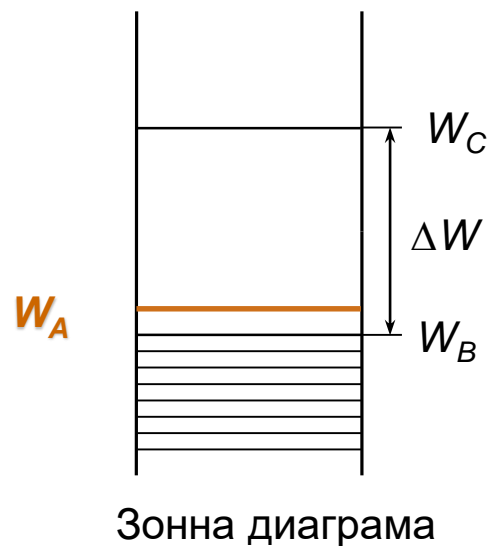
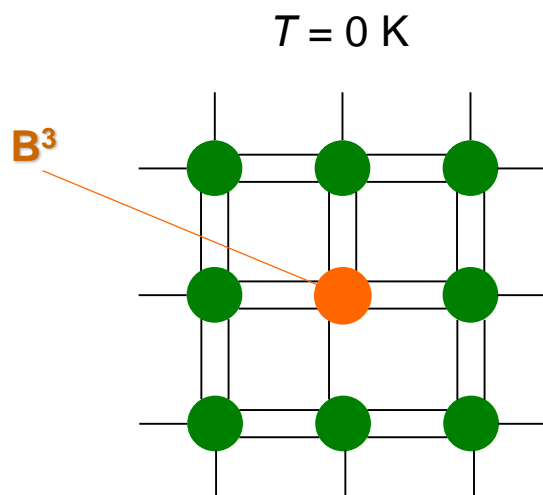
Тъй като $\Delta W_D < \Delta W$, то повечето свободни електрони са от донорните нива, а не от нивата във валентната зона.

$n > p \Rightarrow$ N-тип полупроводници

2. Примесни полупроводници

2.1.2. Акцепторни полупроводници

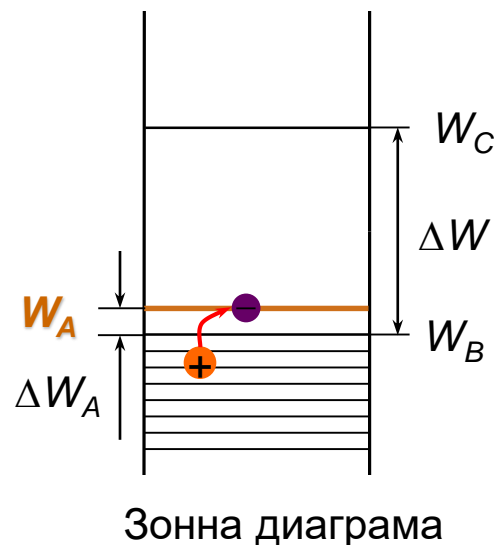
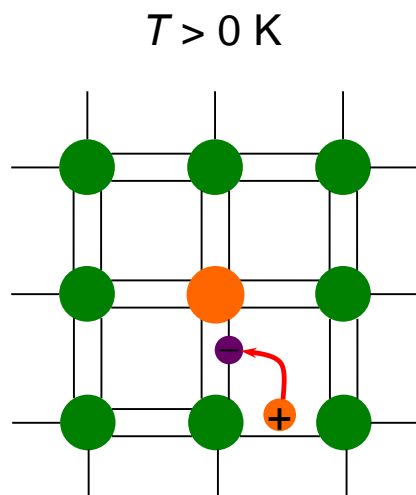
За полупроводник от IV валентност (Si или Ge) да се превърне в акцепторен полупроводник, то примесният елемент трябва да е от III валентност (B, Al и др.).



Акцепторното ниво W_A , получено от незапълнените ковалентни връзки на примесните атоми, е разположено близо до валентната зона.

2. Примесни полупроводници

2.1.2. Акцепторни полупроводници



ΔW_D – енергия за йонизация на акцепторните примеси

Тъй като $\Delta W_A < \Delta W$, то повечето дупки са от йонизиране на акцепторните примеси.

$p > n \Rightarrow \text{P-тип полупроводници}$

2. Примесни полупроводници

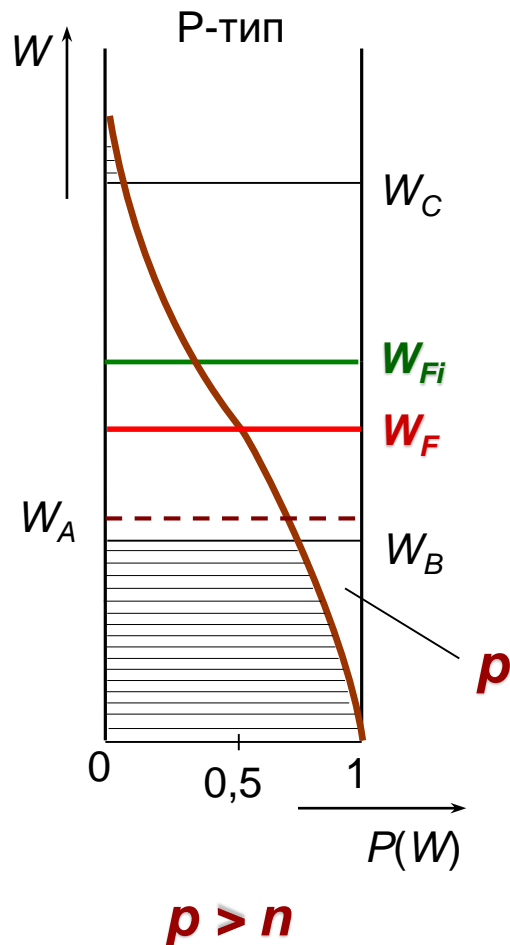
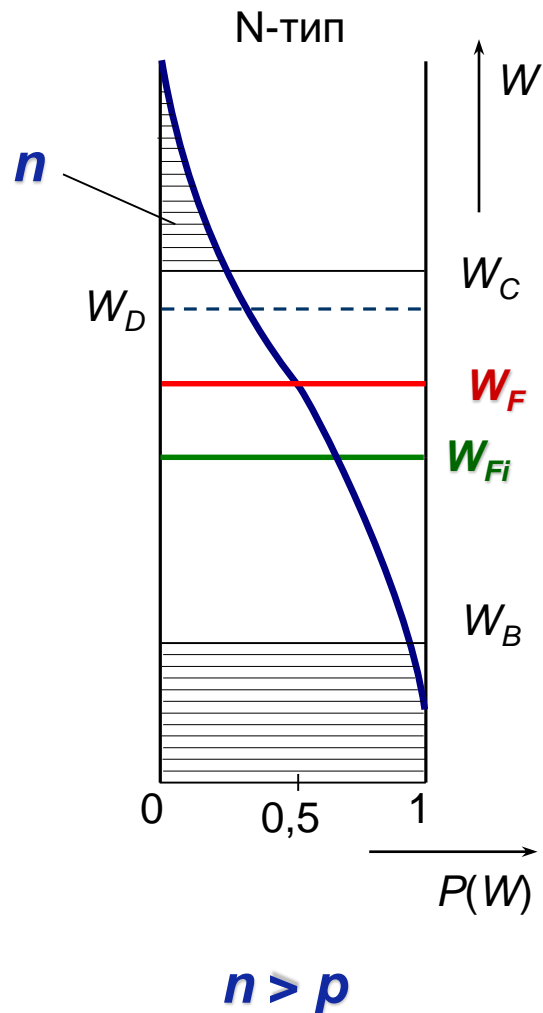
2.2. Разпределение на Ферми

Токоносителите в примесните полупроводници са от собствен и от примесен тип, при което вероятността за генериране на примесни токоносители е по-голяма от вероятността за получаване собствени токоносители.

Поради това разпределението на Ферми не е симетрично спрямо средата на забранената зона т. е. нивото на Ферми не се намира всредата на забранената зона.

2. Примесни полупроводници

2.2. Разпределение на Ферми



2. Примесни полупроводници

2.2. Разпределение на Ферми

В зависимост от концентрацията им в примесните полупроводници има основни и неосновни токоносители.

В **донорните полупроводници** основните токоносители са електроните, а неосновните са дупките.

Концентрацията на електроните е:

$$n \approx \sqrt{N_D N_C} \exp\left(-\frac{\Delta W_D}{2kT}\right)$$

където N_D е концентрация на донорните примеси.

В **акцепторните полупроводници** основните токоносители са дупките, а неосновните са електроните.

Концентрацията на дупките е:

$$p \approx \sqrt{N_A N_C} \exp\left(-\frac{\Delta W_A}{2kT}\right)$$

където N_A е концентрация на акцепторните примеси.

2. Примесни полупроводници

2.3. Температурна зависимост на примесната проводимост

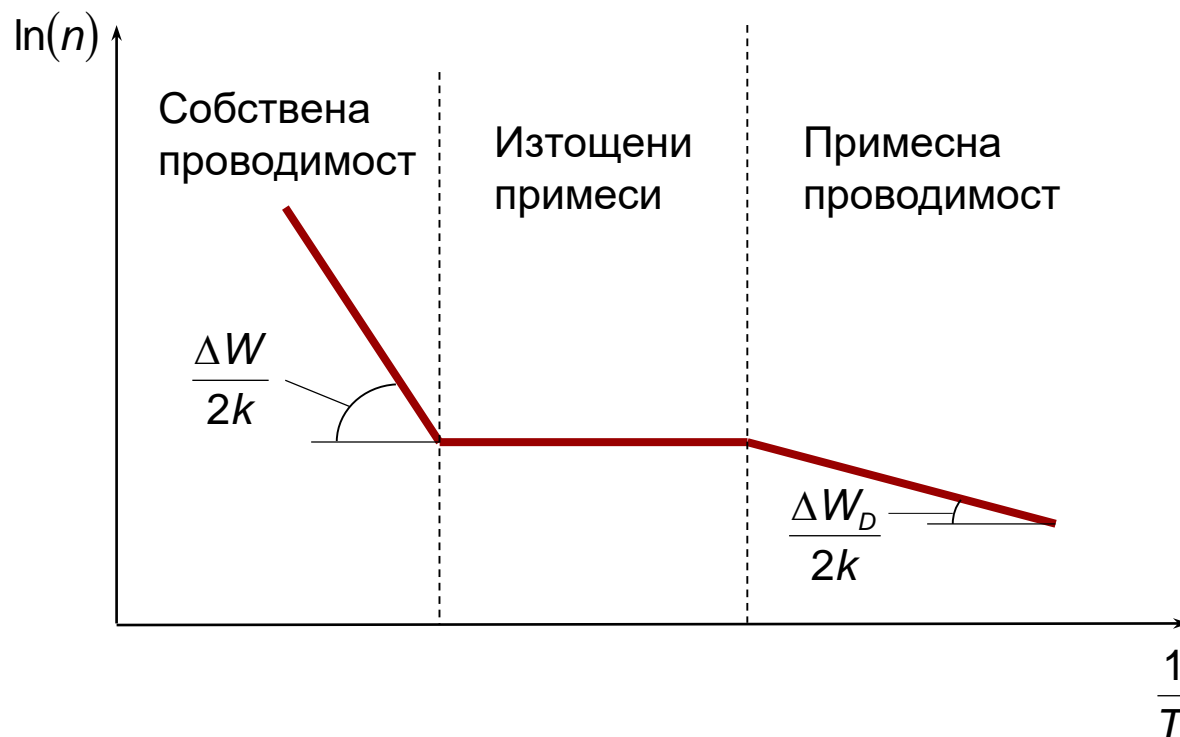
Примесна проводимост $\sigma = ne\mu_n + pe\mu_p$

За донорен полупроводник $n > p \Rightarrow \sigma \approx ne\mu_n$

2. Примесни полупроводници

2.3. Температурна зависимост на примесната проводимост

Зависимост на n от температурата



$$n \approx \sqrt{N_D N_C} \exp\left(-\frac{\Delta W_D}{2kT}\right)$$

$$\ln(n) = \ln(\sqrt{N_D N_C}) - \frac{\Delta W_D}{2k} \frac{1}{T}$$

$$n_i = \sqrt{N_B N_C} \exp\left(-\frac{\Delta W}{2kT}\right)$$

$$\ln(n_i) = \ln(\sqrt{N_B N_C}) - \frac{\Delta W}{2k} \frac{1}{T}$$

2. Примесни полупроводници

2.3. Температурна зависимост на примесната проводимост

Примесна проводимост – токоносителите се генерират за сметка на йонизация на примесите

Изтощени примеси – всички примеси са се йонизирали и n не се променя

Собствена проводимост – генериране на собствени токоносители

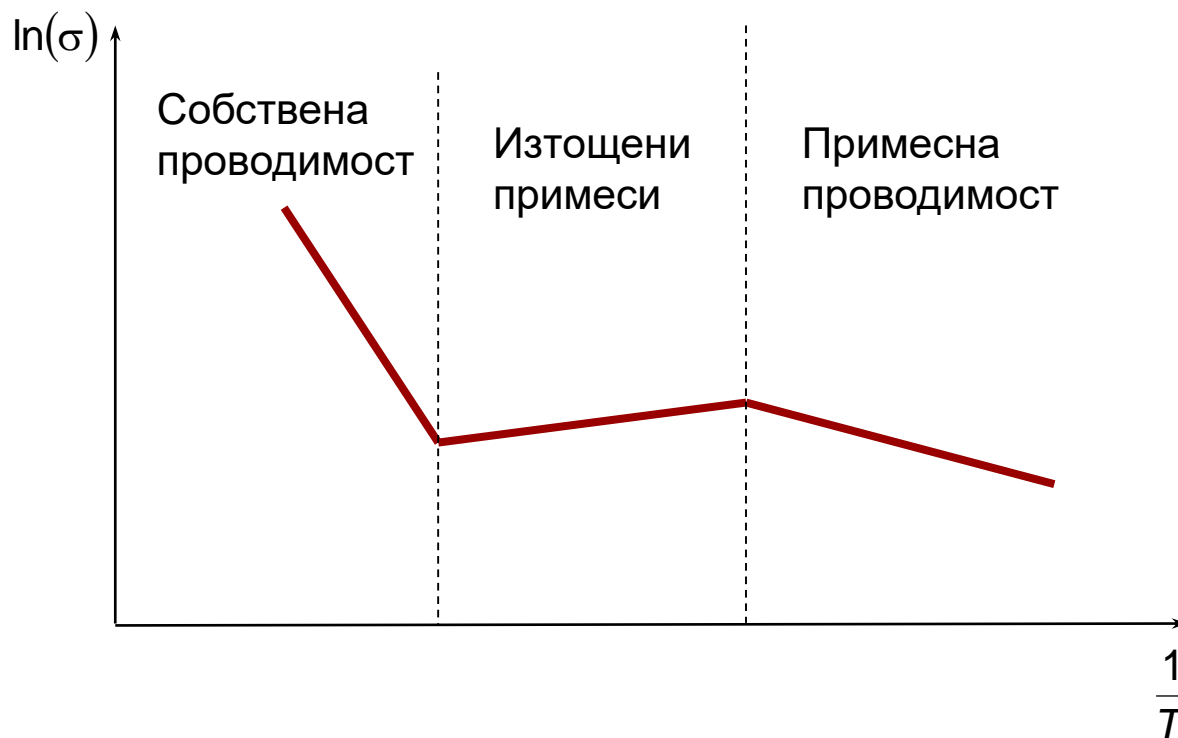
Зависимост на μ от температурата

С увеличаване на температурата μ намалява, но по степенен закон.

Следователно нейното влияние може да се наблюдава само в областта на изтощени примеси.

2. Примесни полупроводници

2.3. Температурна зависимост на примесната проводимост



2. Примесни полупроводници

2.3. Температурна зависимост на примесната проводимост

$$\sigma = \mu_n \cdot e \cdot n = \underbrace{\mu_n \cdot e \cdot \sqrt{N_D N_C}}_A \exp\left(-\underbrace{\frac{\Delta W_D}{2kT}}_b\right) = A \exp\left(-\frac{b}{T}\right)$$

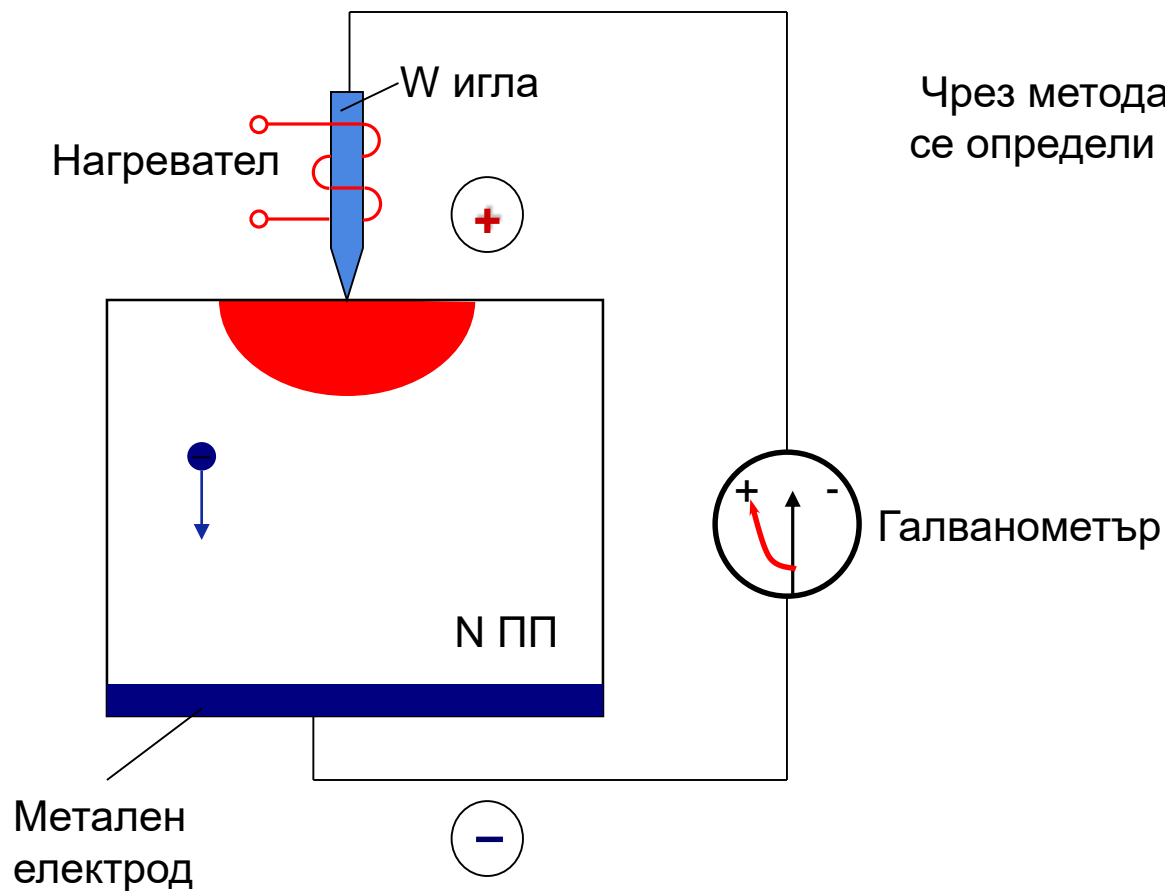
$$\rho = \frac{1}{\sigma} = A_1 \exp\left(\frac{b}{T}\right) \quad \text{където} \quad A_1 = \frac{1}{A}$$

$$\alpha_\rho = \frac{1}{\rho} \frac{d\rho}{dT} = \frac{1}{A_1 \exp\left(\frac{b}{T}\right)} \cdot A_1 \exp\left(\frac{b}{T}\right) \cdot \left(-\frac{b}{T^2}\right) = -\frac{b}{T^2}$$

Основен извод: За разлика от металите, полупроводниците имат $\alpha_\rho < 0$.

3. Определяне типа на примесната проводимост

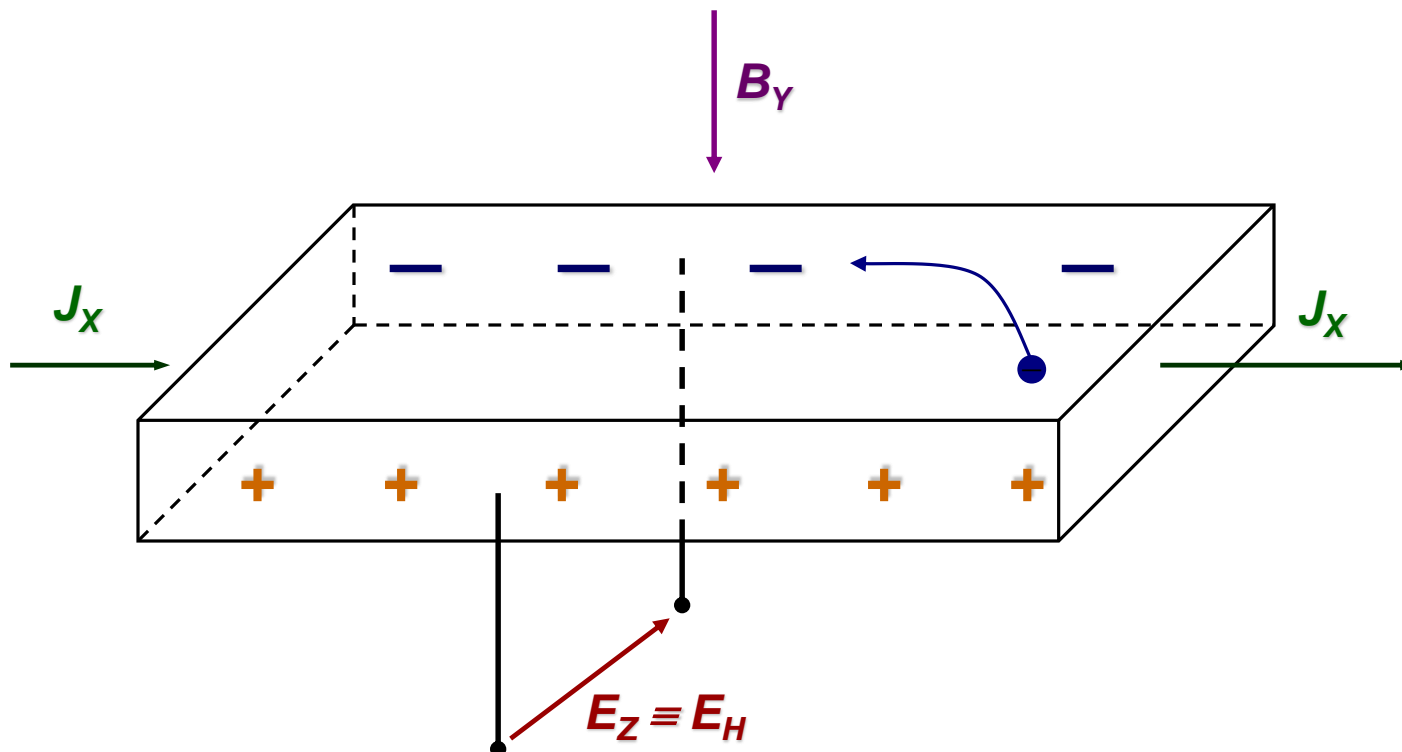
3.1. Метод на горещата сонда



Чрез метода на горещата сонда може да се определи само типа на проводимостта.

3. Определяне типа на примесната проводимост

3.2. Ефект на Хол



J_X – плътност на тока по остта X

B_Y – интензитет на магнитното поле по остта Y

3. Определяне типа на примесната проводимост

3.2. Ефект на Хол

Под влияние на магнитното поле, движещите се електрони се отклоняват към задната страна на полупроводниковия образец.

Така възниква напречно е. д. н., наречено поле на Хол с интензитет E_H

$$E_H = R_H B_Y J_X$$

Коефициентът на Хол R_H :

За N-тип $R_H = \frac{1}{ne}$

За P-тип $R_H = \frac{1}{pe}$

$$\mu_n = \frac{E_H}{B_Y E_X}$$

Чрез ефектът на Хол може да се определи типа на проводимостта, концентрацията и подвижността на токоносителите.