

#### Практическое занятие 4. Собственные и примесные полупроводники.

**Задача 1.** Найти положение уровня Ферми в собственном германии при 300 К, если известно, что ширина его запрещенной зоны  $\Delta W = 0.665$  эВ, а эффективные массы плотности состояний для дырок валентной зоны и для электронов зоны проводимости соответственно равны:  $m_v = 0,388 m_0$ ;  $m_c = 0,55 m_0$ , где  $m_0$  - масса свободного электрона.

#### Решение

Положение уровня Ферми в собственном полупроводнике определяется выражением

$$W_F = \frac{W_c + W_v}{2} + \frac{RT}{2} \ln \frac{N_v}{N_c} = W_i + \frac{RT}{2} \ln \frac{N_v}{N_c}$$
, где  $W_i$  -уровень, соответствующий середине запрещенной зоны;

$$N_v = \frac{2(2\pi m_v RT)^{3/2}}{h^3}; \quad N_c = \frac{2(2\pi m_c RT)^{3/2}}{h^3}$$

-эффективная плотность состояний для дырок валентной зоны и для электронов зоны проводимости соответственно. В данном случае

$$N_v = \frac{2(2 \cdot 3,14 \cdot 0,388 \cdot 9,1 \cdot 10^{-31} \cdot 1,38 \cdot 10^{-23} \cdot 300)^{3/2}}{(6,62 \cdot 10^{-34})^3} = 6,04 \cdot 10^{24} \text{ м}^{-3}.$$

$$N_c = \frac{2(2 \cdot 3,14 \cdot 0,55 \cdot 9,1 \cdot 10^{-31} \cdot 1,38 \cdot 10^{-23} \cdot 300)^{3/2}}{(6,62 \cdot 10^{-34})^3} = 1,02 \cdot 10^{25} \text{ м}^{-3}.$$

т. е. уровень Ферми в собственном германии при комнатной температуре расположен на 6,78 мэВ ниже середины запрещенной зоны, но на 326 мэВ выше потолка валентной зоны. Результаты расчета показывают, что с ростом температуры уровень Ферми приближается к той зоне, которая имеет меньшую плотность состояний и поэтому заполняется быстрее.

**Задача 2.** Вычислить собственную концентрацию носителей заряда в кремнии при  $T=300$  К, если ширина его запрещенной зоны  $\Delta W = 1,12$  эВ, а эффективные массы плотности состояний  $m_v = 0,56 m_0$ ;  $m_c = 1,05 m_0$ .

**Решение**

Собственная концентрация носителей заряда

$$n_i = \sqrt{N_c N_v} \exp\left(-\frac{\Delta W}{2RT}\right)$$

Эффективная плотность состояний ( $m^{-3}$ ) для электронов в зоне проводимости (см. решение задачи 3.1.12)

$$N_c = \frac{2(2 \cdot 3,14 \cdot 1,05 \cdot 9,1 \cdot 10^{-31} \cdot 1,38 \cdot 10^{-23} \cdot T)^{3/2}}{(6,62 \cdot 10^{-34})^3} = 2,69 \cdot 10^{25} \left(\frac{T}{300}\right)^{3/2}.$$

Эффективная плотность состояний ( $m^{-3}$ ) для дырок в валентной зоне

$$N_v = \frac{2(2 \cdot 3,14 \cdot 0,56 \cdot 9,1 \cdot 10^{-31} \cdot 1,38 \cdot 10^{-23} \cdot T)^{3/2}}{(6,62 \cdot 10^{-34})^3} = 1,05 \cdot 10^{25} \left(\frac{T}{300}\right)^{3/2}.$$

Отсюда следует, что при  $T=300$  К собственная концентрация

$$n_i = 10^{25} \sqrt{2,69 \cdot 1,05} \exp\left(-\frac{\Delta 1,12}{2 \cdot 8,625 \cdot 10^{-5} \cdot 300}\right) \approx 7 \cdot 10^{15} m^{-3}.$$

**Задача 3.** Кристалл арсенида индия легирован серой так, что избыточная концентрация доноров  $N_d - N_a = 10^{22} m^{-3}$ . Можно ли считать, что при температуре  $T=300^\circ\text{C}$  электрические параметры этого полупроводника близки параметрам собственного арсенида индия, если эффективные массы плотности состояний

для электронов  $m_c = 0,023 m_0$ , для дырок  $m_v = 0,43 m_0$ ; , а ширина запрещенной зоны (эВ) InAs изменяется с температурой по закону  $0,462 - 3,5 \cdot 10^{-4} T$ .

## Решение

Ширина запрещенной зоны  $\Delta W$  арсенида индия при температуре  $T=573$  К равна  $0,26$  эВ. Собственная концентрация носителей заряда при этой температуре

$$n_i = 2 \left( \frac{2\pi RT}{h^2} \right)^{3/2} (m_c m_v) \exp \left( - \frac{\Delta W}{2RT} \right) = 2 \frac{(2\pi \cdot 1,38 \cdot 10^{-23} \cdot 573)^{3/2}}{(6,62 \cdot 10^{-34})^3} \cdot (0,023 \cdot 0,43)^{3/4} \cdot (9,1 \cdot 10^{-31})^{3/2} \cdot \exp \left( - \frac{0,26}{2 \cdot 8,625 \cdot 10^{-5} \cdot 573} \right) = 1,5 \cdot 10^{23} \text{ м}^{-3}.$$

Отсюда следует, что при  $T=573$  К собственная концентрация носителей заряда  $n_i \gg (N_D - N_A)$ , т. е. полупроводник по свойствам близок собственному.

**Задача 4.** Вычислить положение Ферми при  $T=300$ К в кристаллах германия, содержащих  $2 \cdot 10^{22} \text{ м}^{-3}$  атомов мышьяка и  $10^{22} \text{ м}^{-3}$  атомов галлия.

## Решение

Так как  $N_D > N_A$ , то такой частично компенсированный полупроводник проявляет электропроводность n-типа. При этом избыточная концентрация доноров  $N'_D = N_D - N_A$ . При комнатной температуре все примеси ионизированы, поэтому  $n \approx N'_D$ . Из выражения  $n = N_C \exp[-(W_C - W_F)/kT]$  находим положение уровня Ферми относительно дна зоны проводимости:

$$W_C - W_F = kT \ln \frac{N_C}{N'_D} = 8,625 \cdot 10^{-5} \cdot 300 \ln \frac{1,02 \cdot 10^{25}}{10^{22}} = 0,179 \text{ эВ}.$$