

Практическое занятие 5. Электропроводность полупроводников.

Задача 1. Вычислить отношение полного тока через полупроводник к току, обусловленному дырочной составляющей: а) в собственном германии; б) в германии р-типа с удельным сопротивлением $0,05 \text{ Ом}\cdot\text{м}$. Принять собственную концентрацию носителей заряда при комнатной температуре $n_i = 2,1 \cdot 10^{19} \text{ м}^{-3}$, подвижность электронов $\mu_n = 0,39 \text{ м}^2/(\text{В}\cdot\text{с})$, подвижность дырок $\mu_p = 0,19 \text{ м}^2/(\text{В}\cdot\text{с})$.

Решение

На основе закона Ома получаем выражение для отношения полного тока к его дырочной составляющей:

$$\beta_p = \frac{I}{I_p} = \frac{e(n\mu_n + p\mu_p)}{ep\mu_p} = 1 + \frac{n\mu_n}{p\mu_p},$$

где n и p – концентрации электронов и дырок соответственно.

В собственном полупроводнике $n_i = p_i$ и, следовательно,

$$\beta_i = 1 + \frac{\mu_n}{\mu_p} = 1 + \frac{0,39}{0,19} = 3,05.$$

В полупроводнике р типа с удельным сопротивлением, много меньшим собственного, вкладом электронов в электропроводность в первом приближении можно пренебречь. С учетом этого получаем концентрацию основных носителей заряда $p \approx (e\mu_p\rho)^{-1} = 6,58 \cdot 10^{20} \text{ м}^{-3}$ и концентрацию неосновных носителей заряда $n = \frac{n_i^2}{p} = 6,7 \cdot 10^{17} \text{ м}^{-3}$.

Зная концентрацию электронов, можно уточнить отношение полного тока к дырочной составляющей:

$$\beta_p = 1 + \frac{6,7 \cdot 10^{17} \cdot 0,39}{6,58 \cdot 10^{20} \cdot 0,19} = 1,002.$$

Задача 2. Образец кремния n-типа при температуре $T_1 = 300 \text{ К}$ имеет удельное сопротивление $\rho = 0,05 \text{ Ом}\cdot\text{м}$, причем концентрация электронов в нем не изменяется при нагревании до температуры $T_2 = 500 \text{ К}$. Определить на сколько изменяется концентрация неосновных носителей заряда в этом температурном диапазоне. При температуре T_1 подвижность электронов $\mu_n = 0,14 \text{ м}^2/(\text{В}\cdot\text{с})$. Значение собственной концентрации носителей заряда взять

из задачи 3.1.19. Коэффициент температурного изменения ширины запрещенной зоны $b=2,84 \cdot 10^{-4}$ эВ/К, $n_i = 7 \cdot 10^{15} \text{ м}^{-3}$

Решение

По заданным значениям ρ и μ_n находим концентрацию основных носителей заряда при температуре T_1 :

$$n = \frac{\gamma}{e\mu_n} = \frac{1}{e\mu_n \rho} = \frac{1}{1,6 \cdot 10^{-19} \cdot 0,14 \cdot 0,05} = 8,93 \cdot 10^{20} \text{ м}^{-3}.$$

Концентрацию неосновных носителей заряда (дырок) определяем из соотношения «действующих масс»:

$$p = \frac{n_i^2}{n} = \frac{(7 \cdot 10^{15})^2}{8,93 \cdot 10^{20}} = 5,5 \cdot 10^{10} \text{ м}^{-3}$$

При температуре T_2

$$N_c = 5,79 \cdot 10^{25} \text{ м}^{-3}; \quad N_v = 2,26 \cdot 10^{25} \text{ м}^{-3};$$

$$\Delta W_2 = \Delta W_1 - b(T_2 - T_1) = 1,12 - 2,84 \cdot 10^{-4} \cdot 200 = 1,063 \text{ эВ}$$

Собственная концентрация носителей заряда при температуре T_2

$$n_i = \sqrt{N_c N_v} \exp\left(-\frac{\Delta W}{2kT^2}\right) = 10^{25} \sqrt{5,79 \cdot 2,26} \exp\left(-\frac{1,063}{2 \cdot 8,625 \cdot 10^{-5} \cdot 500}\right) = 1,6 \cdot 10^{20} \text{ м}^{-3}$$

Отсюда находим концентрацию неосновных носителей заряда

$$p = (1,6 \cdot 10^{20})^2 (8,93 \cdot 10^{20}) = 2,87 \cdot 10^{19} \text{ м}^{-3}$$

Таким образом, на участке истощения доноров при повыше температуры от 300 до 500 К концентрация дырок в кремнии n-типа возрастает в $\frac{2,87 \cdot 10^{19}}{5,5 \cdot 10^{10}} = 5,2 \cdot 10^8$ раз.

Задача 3. Рассчитать концентрацию электронов и дырок в германии p-типа с удельным сопротивлением $0,05 \text{ Ом} \cdot \text{м}$ при температуре 300 К. Недостающие данные взять из условия задачи 3.2.6.

Решение

Удельное сопротивление связано с концентрацией электронов и дырок уравнением $\frac{1}{\rho} = en\mu_n + ep\mu_p = \frac{en_i^2\mu_n}{p} + ep\mu_p$.

Для концентрации дырок получаем квадратное уравнение вида

$$p^2 - \frac{p}{e\mu_p\rho} + \frac{n_i^2\mu_n}{\mu_p} = 0$$

Подставляя исходные данные, имеем

$$p^2 - 6,58 \cdot 10^{20} + 9,03 \cdot 10^{38} = 0$$

откуда $p = 6,565 \cdot 10^{20} \text{ м}^{-3}$.

Второе решение квадратного уравнения отбрасываем, так как оно соответствует полупроводнику n-типа. Концентрация неосновных носителей заряда

$$n = \frac{n_i^2}{p} = \frac{(2,1 \cdot 10^{19})^2}{6,565 \cdot 10^{20}} = 6,72 \cdot 10^{17} \text{ м}^{-3}.$$

Задача 4. На сколько увеличится удельная проводимость антимонида индия с собственной электропроводностью при изменении температуры от 20 до 21°C, если ширина запрещенной зоны $\Delta W = 0,172 \text{ эВ}$, а подвижность электронов и дырок изменяется по закону $T^{-\frac{3}{2}}$. Коэффициент температурного изменения ширины запрещенной зоны $b = -2,8 \cdot 10^{-4} \frac{\text{эВ}}{\text{К}}$

Решение

Температурное изменение собственной удельной проводимости полупроводника определяется выражением $\gamma_i = B \exp\left(-\frac{\Delta W_0}{2kT}\right)$. Отсюда следует, что $\frac{d\gamma_i}{dT} = B \exp\left(-\frac{\Delta W_0}{2kT}\right) \frac{\Delta W_0}{2kT^2} = \gamma_i \frac{\Delta W_0}{2kT^2}$ и $\frac{\Delta\gamma_i}{\gamma_i} = \frac{\Delta W_0 \Delta T}{2kT^2}$. Учитывая, что :

$$\Delta W_0 = \Delta W - bT = 0,172 + 2,8 \cdot 10^{-4} \cdot 293 = 0,254 \text{ эВ},$$

находим

$$\frac{\Delta\gamma_i}{\gamma_i} = \frac{0,254}{2 \cdot 8,625 \cdot 10^{-5} \cdot 293^2} = 1,73 \cdot 10^{-2} = 1,73\%.$$