

Министерство науки и высшего образования Российской Федерации
Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение
высшего образования

ТОМСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ СИСТЕМ
УПРАВЛЕНИЯ И РАДИОЭЛЕКТРОНИКИ (ТУСУР)

Кафедра промышленной электроники (ПрЭ)

Физика конденсированного состояния

ОТЧЕТ

по лабораторной работе №2 Вариант №5

по дисциплине «Физика конденсированного состояния»

Студент гр № 3-511П12-5

Д. Р. Хисматуллин

«23» марта 2023 г

Томск 2023

Задание

Пусть дан образец кремния (Si), легированного бором (B). Данный полупроводник имеет удельное сопротивление 5 Ом см и линейные размеры $a=1 \text{ мм}$, $d=1 \text{ мм}$, $l=10 \text{ мм}$ и нагрет с одной стороны до 300 К , а с другой стороны до 350 К .

Решение

Для кремния бор является донорной примесью, следовательно, данный образец — полупроводник n-типа.

Среднюю концентрацию носителей заряда (n_{cp}) определим из электропроводности полупроводника:

$$\sigma = n_{cp} * q * \mu_n$$

где σ — электропроводность полупроводника, $(\text{Ом} * \text{м})^{-1}$; q — заряд электрона, $1,6 * 10^{-19} \text{ Кл}$; μ_n — подвижность носителей заряда (в данном случае, электронов), $\text{м}^2 / (\text{В} * \text{с})$

Электропроводность полупроводника рассчитаем по формуле:

$$\sigma = \frac{1}{\rho}$$

где ρ — удельное сопротивление полупроводника, $\rho = 5 \text{ Ом} * \text{см}$

Температурная зависимость подвижности электронов (μ) изменяется по закону:

$$\left\{ \frac{1}{\mu_{n1}} = \alpha T_1^{-\frac{3}{2}} + \beta T_1^{\frac{3}{2}} \right\} \left\{ \frac{1}{\mu_{n2}} = \alpha T_2^{-\frac{3}{2}} + \beta T_2^{\frac{3}{2}} \right\}$$

где μ_{n1} — подвижность электронов при T_1 ; μ_{n2} — подвижность электронов при T_2 ; α, β — некоторые параметры полупроводника.

Слагаемое $\alpha T_{\square}^{-\frac{3}{2}}$ соответствует области низких температур, где преобладает рассеяние носителей заряда на ионах примеси. Слагаемое $\beta T_{\square}^{\frac{3}{2}}$ соответствует области высоких температур, где преобладает рассеяние носителей заряда тепловых колебаний решетки (фононах).

Для заданного диапазона температур (300 - 350 К) можно пренебречь рассеянием носителей заряда на ионах примеси и учитывать только второе слагаемое в формуле — $\beta T_{\square}^{\frac{3}{2}}$. Тогда выражение можно записать следующим образом:

∩∩

$$\frac{\mu_{n2}}{\mu_{n1}} = \left(\frac{T_1}{T_2} \right)^{3/2}$$

Таким образом, подвижность электронов (μ_2) при T_2 :

$$\mu_{n2} = \mu_{n1} \left(\frac{T_1}{T_2} \right)^{3/2}$$

где μ_{n1} — подвижность электронов при $T_1 = 300$ К, для Si
 $\mu_{n1} = 0.15 \text{ м}^2 / \text{В} \cdot \text{с}$

Среднюю концентрацию и подвижность носителей заряда найдем при средней температуре (T_{cp}):

$$T_{cp} = \frac{T_1 + T_2}{2}$$

В данном случае T_{cp} будет равна:

$$T_{cp} = \frac{300 + 350}{2} = 325 \text{ К}.$$

Подвижность носителей заряда (μ_{cp}) при T_{cp} равна:

$$\mu_{cp} = \mu_{n1} \left(\frac{T_1}{T_{cp}} \right)^{3/2} = 0,15 \left(\frac{300}{325} \right)^{3/2} = 0,133 \frac{\text{М}^2}{\text{В} * \text{с}}$$

Запишем выражение для n_{cp} :

$$n_{cp} = \frac{1}{\rho * \mu_{cp} * q}$$

$$n_{cp} = \frac{1}{5 * 10^{-2} * 0,133 * 1,6 * 10^{-19}} = 9,938 * 10^{20} \text{ м}^{-3}$$

Разность потенциалов на концах образца полупроводника (ΔU) можно определить по формуле:

$$\Delta U = \alpha (T_2 - T_1)$$

где α — дифференциальная термо-ЭДС, В/К.

Дифференциальная термо-ЭДС α) для полупроводника n-типа определяется выражением:

$$\alpha_n = \frac{-K_B}{q} \left(2 + r + \ln \frac{N_c}{n} \right)$$

Где K_B — постоянная Больцмана, $1,38 * 10^{-23} \text{ Дж/К}$; r — фактор рассеяния, определяемый механизмом рассеяния носителей заряда, в диапазоне температур (300-350)К рассеяние происходит на акустических колебания кристаллической решетки, поэтому $r = 0$; N_c — эффективная плотность состояний в зоне проводимости, м^{-3}

Эффективная плотность состояний (N_c) рассчитывается по формуле:

$$N_c = 2 * \left(\frac{2 \pi m_n k_B T}{h^2} \right)^{3/2}$$

Где m_n — эффективная масса электронов, для Si $m_n = 0,92 m_0$; m_0 — масса электрона в состоянии покоя, $m_0 = 9,1 * 10^{-31} \text{ кг}$; h — постоянная Планка, $h = 6,62 * 10^{-34} \text{ Дж} * \text{с}$.

Рассчитаем N_c при T_{cp} :

$$N_c = 2 * \left(\frac{2 \pi m_n k_B T_{cp}}{h^2} \right)^{\frac{3}{2}} = 2 * \dots$$

Рассчитаем α_n :

$$\alpha_n = \frac{-1,38 * 10^{-23}}{1,6 * 10^{-19}} \left(2 + 0 + \ln \frac{1.249 * 10^{25}}{9.938 * 10^{20}} \right) = -9.866 * 10^{-4} \frac{B}{K}$$

Рассчитаем ΔU :

$$\Delta U = -9.866 * 10^{-4} * (350 - 300) = -0,049 B$$

Диффузионная плотность тока (j_{diff}) для полупроводника n-типа определяется выражением:

$$j_{diff} = q * D_n * grad(n)$$

где D_n — коэффициент диффузии электронов, m^2/c ; $grad(n)$ — градиент концентрации электронов, m^{-4} .

Коэффициент диффузии (D_n) определяется из соотношения Эйнштейна:

$$D_n = \mu_n \frac{k_B T}{q}$$

Рассчитаем D_n при T_{cp} :

$$D_n = 0.133 \frac{1,38 * 10^{-23} * 325}{1,6 * 10^{-19}} = 3.728 * 10^{-3} \frac{m^2}{c}$$

Градиент концентрации $grad(n)$ определяется по формуле:

$$grad(n) = \frac{n_2(T_2) - n_1(T_1)}{l}$$

где $n_2(T_2)$ — концентрация электронов при T_2 ; $n_1(T_1)$ — концентрация электронов при T_1 ; l — длина образца полупроводника, м.

Рассчитаем μ_2 при T_2 :

$$\mu_{n2} = \mu_{n1} \left(\frac{T_1}{T_2} \right)^{3/2} = 0.15 \left(\frac{300}{350} \right)^{3/2} = 0.119 \frac{\text{м}^2}{\text{В} \cdot \text{с}}$$

Рассчитаем n_1 и n_2 при T_1 и T_2 :

$$n_1 = \frac{1}{5 \cdot 10^{-2} \cdot 0.15 \cdot 1,6 \cdot 10^{-19}} = 8.333 \cdot 10^{20} \text{ м}^{-3}$$

$$n_2 = \frac{1}{5 \cdot 10^{-2} \cdot 0.119 \cdot 1,6 \cdot 10^{-19}} = 1.05 \cdot 10^{21} \text{ м}^{-3}$$

Рассчитаем $\text{grad}(n)$:

$$\text{grad}(n) = \frac{1.05 \cdot 10^{21} - 8.333 \cdot 10^{20}}{10^{-2}} = 2.167 \cdot 10^{22} \text{ м}^{-4}$$

Рассчитаем $j_{\text{диф}}$:

$$j_{\text{диф}} = 1,6 \cdot 10^{-19} \cdot 3.728 \cdot 10^{-3} \cdot 2.167 \cdot 10^{22} = 12.926 \frac{\text{А}}{\text{м}^2}$$

Диффузионный ток ($I_{\text{диф}}$) определяется как:

$$I_{\text{диф}} = j_{\text{диф}} \cdot S$$

где S — площадь образца полупроводника, $S = a \cdot d = 10^{-6} \text{ м}^2$.

$$I_{\text{диф}} = 12.926 \cdot 10^{-6} \text{ А} = 12.926 \text{ мкА}$$

Дрейфовая плотность тока ($j_{\text{др}}$) полупроводника n -типа определяется выражением:

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

где ε — напряженность электрического поля, В/м.

Напряженность электрического поля ε определяется по формуле:

$$\varepsilon = \frac{\Delta U}{l} = \frac{-0,049}{10^{-2}} = 4.9 \text{ В/м}$$

Рассчитаем j_{op} при T_{cp} :

$$j_{op} = 1,6 * 10^{-19} * 9.938 * 10^{20} * 0.133 * 4.9 = -103.626 \frac{A}{M^2}$$

Рассчитаем I_{op} :

$$I_{op} = j_{op} * S = -103.626 * 10^{-6} A = -103.626 \text{ мкА}$$

Коэффициент Холла (R_H) для полупроводника n-типа рассчитывается по формуле:

$$R_H = \frac{r_H}{q * n}$$

где r_H — Холл-фактор, который определяется механизмом рассеяния носителей заряда, в диапазоне температур (300 - 350) К рассеяние происходит на акустических колебаниях кристаллической решетки, поэтому $r_H = 1,18$.

Рассчитаем R_H при T_{cp} :

$$R_H = \frac{1.18}{1,6 * 10^{-19} * 9.938 * 10^{20}} = 7.421 * 10^3 \frac{M^3}{Kл}$$

Коэффициент Пельтье (Π) для полупроводника n-типа рассчитывается по формуле:

$$\Pi = \alpha_T T_{cp} = -9.866 * 10^{-4} * 325 = -0.321 \text{ В}$$

Ответы на контрольные вопросы

Что такое полупроводник?

Полупроводники – это вещества, находящиеся по своей удельной проводимости между проводниками и диэлектриками. В определенных условиях они приобретают свойства проводника и переносят в кристаллической решетке электрические заряды, в иных случаях – блокируют заряженные частицы предельно высоким сопротивлением.

Как вычисляется диффузионная плотность тока?

$$j_{\text{диф}} = q * D_n * \text{grad}(n)$$

где D_n — коэффициент диффузии электронов, $\text{м}^2/\text{с}$; $\text{grad}(n)$ — градиент концентрации электронов, м^{-4} .

Как вычисляется дрейфовая плотность тока?

$$j_{\text{др}} = q * n * \mu_n * \varepsilon$$

где ε — напряженность электрического поля, В/м

В чем заключается эффект Холла?

При помещении в магнитное поле пластины-проводника или полупроводника под 90° к направлению силовых линий магнитного потока произойдет перемещение электронов по поперечине пластины под действием силы Лоренца. Их направление зависит от того, в какую сторону идет сила тока и силовые линии магнитного потока. Иначе говоря, эффект Холла – это частный случай действия силы Лоренца, то есть действия магнитного поля на заряженную частицу.

Как вычисляется градиент концентрации?

$$\text{grad}(n) = \frac{n_2(T_2) - n_1(T_1)}{l}$$

где $n_2(T_2)$ — концентрация электронов при T_2 ; $n_1(T_1)$ — концентрация электронов при T_1 ; l — длина образца полупроводника, м.

