

Работа № 40

Определение ширины запрещенной зоны полупроводника

Ширина запрещенной зоны может быть найдена с помощью измерений электропроводности или постоянной Холла в зависимости от температуры, а также из спектрального распределения фототока полупроводника.

Цель работы

Определить ширину запрещенной зоны полупроводника по температурной зависимости электропроводности. Сравнить полученный результат с табличным.

Зависимость электропроводности от температуры

Электропроводность полупроводника равна сумме собственной и примесной электропроводности:

$$\sigma = \sigma_i + \sigma_{np} . \quad (1)$$

При высоких температурах $\sigma_i \gg \sigma_{np}$. Электропроводность собственного полупроводника

$$\sigma_i = n_i e \mu_n + p_i e \mu_p , \quad (2)$$

где e - заряд электрона, n_i, μ_n, p_i, μ_p - концентрации и подвижности электронов и дырок соответственно.

Для того чтобы найти зависимость электропроводности от температуры, необходимо выяснить, как изменяются концентрации носителей заряда и их подвижности с изменением температуры. Рассмотрим чистый полупроводник, не содержащий примесей. Пусть ширина его запрещенной зоны равна ΔE_0 . Примем наинизший уровень зоны проводимости за начало отсчета энергии (рис. 1).

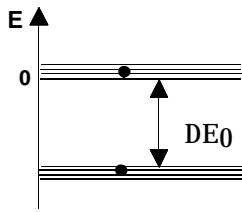


Рисунок 1

Для участия в электрическом токе валентный электрон должен перейти из связанного состояния в валентной зоне в свободное состояние в зоне проводимости. Очевидно, что минимальная энергия, необходимая для такого перехода, равна ширине запрещенной зоны ΔE_0 , называемой также энергией ионизации атома полупроводника. Эта энергия может быть сообщена электрону за счет теплового движения. Концентрация

электронов в зоне проводимости

$$n_i = \int_0^{\infty} f_F dz = \int_0^{\infty} \left(e^{\frac{E - E_F}{kT}} + 1 \right)^{-1} \frac{4\pi(2m_n^*)^{3/2}}{h^3} E^{1/2} dE, \quad (3)$$

где dz - число разрешенных состояний в интервале энергий dE ; f_F - функция Ферми, m_n^* - эффективная масса электрона, E_F - энергия Ферми.

Так как в собственных полупроводниках число электронов, переходящих в зону проводимости, обычно значительно меньше числа состояний в зоне проводимости, то лишь малая часть состояний занята электронами. (Заметим, что число разрешенных энергетических уровней в два раза меньше числа доступных квантовых состояний). В этом случае функция Ферми переходит в функцию Больцмана:

$$f_F = f_B = e^{-\frac{E_F - E}{kT}}. \quad (4)$$

Заменяя f_F в (3) и интегрируя, получаем

$$n_i = \frac{2(2\pi m_n^* kT)^{3/2}}{h^3} e^{-\frac{E_F}{kT}}. \quad (5)$$

Аналогично для концентрации дырок получаем

$$p_i = \frac{2(2\pi m_p^* kT)^{3/2}}{h^3} e^{-\frac{\Delta E_0 + E_F}{kT}} \quad (6)$$

В собственном полупроводнике $n_i = p_i$. Тогда из (5) и (6) находим

$$n_i = \sqrt{n_i p_i} = \frac{2(2\pi \sqrt{m_n^* m_p^*} kT)^{3/2}}{h^3} e^{-\frac{\Delta E_0}{2kT}} \quad (7)$$

Рассмотрим зависимость подвижности от температуры. По определению дрейфовая подвижность равна отношению дрейфовой скорости к напряженности электрического поля

$$\mu_n = \frac{v_n}{\varepsilon} = \frac{a\tau_n}{\varepsilon} = \frac{e\varepsilon\tau_n}{m_n^*\varepsilon} = \frac{e\tau_n}{m_n^*} \quad (8)$$

где τ_n - время свободного пробега электрона (время релаксации).

Время релаксации τ_n равно отношению длины свободного пробега к скорости теплового движения электрона:

$$\tau_n = \lambda/v_T \quad (9)$$

В случае рассеяния носителей заряда на колебаниях решетки (на акустических фононах)

$$\lambda = A/T \quad (10)$$

$$v_T = \sqrt{\frac{3kT}{m_n^*}} \quad (11)$$

Из (9), (10), (11) получаем выражение для подвижности электронов

$$\mu_n = \frac{eA}{\sqrt{3k m_n^*}} T^{-3/2} = BT^{-3/2} \quad (12)$$

Аналогично для подвижности дырок

$$\mu_p = CT^{-3/2} \quad . \quad (13)$$

Из (2), (7), (12), (13) получаем выражение для электропроводности собственного (беспримесного) полупроводника

$$\sigma_i = \sigma_0 e^{-\Delta E_0 / 2kT} \quad . \quad (14)$$

Логарифмируем (14):

$$\ln \sigma_i = \ln \sigma_0 - \Delta E_0 / 2kT \quad . \quad (15)$$

Следовательно, изменение проводимости при изменении температуры определяется из

$$\Delta \ln \sigma_i = -\frac{\Delta E_0}{2k} \Delta \left(\frac{1}{T} \right) \quad . \quad (16)$$

Ширину запрещенной зоны полупроводника определяем из (16):

$$\Delta E_0 = -\frac{2k \Delta \ln \sigma_i}{\Delta \left(\frac{1}{T} \right)} \quad , \quad (17)$$

где $k = 8,6 \cdot 10^{-5}$ эВ/К, $\Delta \ln \sigma_i = \ln \sigma_2 - \ln \sigma_1 = \ln \frac{\sigma_2}{\sigma_1}$,

$$\Delta(1/T) = 1/T_2 - 1/T_1 \quad .$$

Значения $\ln \sigma_1$, $\ln \sigma_2$, $1/T_1$, $1/T_2$ определяются по графику зависимости $\ln \sigma$ от $1/T$.

Вычисление электропроводности проводится по рабочей формуле

$$\sigma_i = \frac{I}{U} \frac{l}{S} \quad . \quad (18)$$

Описание экспериментальной установки

Для определения температурной зависимости электропроводности полупроводника используется принципиальная схема, показанная на рис. 2.

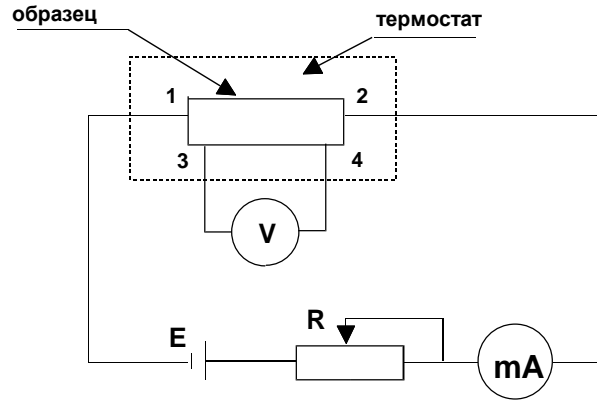


Рисунок 2

Для определения электропроводности полупроводника измеряются ток и напряжение между контактами 3 и 4. Для снятия температурной характеристики образец помещается в термостат или нагревательную печь. Температура измеряется с помощью термопары либо термометра сопротивления (терморезистора). Чтобы исключить влияние термоЭДС между контактами 3 и 4, измерения проводят при двух противоположных направлениях тока и одной и той же температуре. Значения поперечного сечения образца и расстояния между контактами 3 и 4 приведены в паспорте установки.

Задание к работе

1. Измерить электропроводность σ_i полупроводникового образца при комнатной температуре.
2. Включить электропечь и измерить зависимость электропроводности σ_i от температуры образца T .
3. Вычислить среднеквадратичное отклонение электропроводности при комнатной температуре.
4. Построить график зависимости $\ln \sigma$ от $\frac{1}{T}$.

5. Определить ширину запрещенной зоны ΔE_0 полупроводника графически.
6. Сравнить полученный результат с табличным.

Контрольные вопросы

1. Какова цель работы?
2. Как вы будете измерять напряжение между контактами 3 и 4?
3. В каких осях вы будете строить график?
4. Как по графику будете определять ширину запрещенной зоны полупроводника?
5. Получите формулу зависимости концентрации носителей заряда в собственном полупроводнике от температуры.
6. Постройте график зависимости $\ln \sigma_i$ от $1/T$ для случая рассеяния носителей заряда на акустических фононах.
7. Получите формулу зависимости электропроводности от температуры в случае собственной проводимости.
8. Постройте график зависимости $\ln n$ от $1/T$ для области собственной проводимости, области насыщения (истощения) и области вымораживания (области низких температур).
9. Постройте график $\ln \sigma$ от $1/T$ для областей, указанных в п.8.
10. Как изменяется вид графика $\ln \sigma = f(1/T)$ при увеличении концентрации примеси?
11. Как объяснить тот факт, что в области насыщения при нагревании образца электропроводность уменьшается?
12. Сравнивая полученное значение ширины запрещенной зоны с табличным значением, сделайте вывод.

Литература

1. Епифанов Г.И. Физика твердого тела. – М.: Высшая школа, 1996. – Гл.7, пп. 2-7.
2. Савельев И.В. Курс общей физики. – М.: Наука, 1982. - Т.3. §§ 51-55, 57-59, 1989, § 43.
3. Корнилович А.А. Физика в примерах. Учебное пособие НГТУ, Новосибирск, 1994, гл. 16.