

## ОПРЕДЕЛЕНИЕ ШИРИНЫ ЗАПРЕЩЕННОЙ ЗОНЫ ПОЛУПРОВОДНИКА

Ширина запрещенной зоны может быть найдена с помощью изменений 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:

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

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

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

где  $e$  – заряд электрона,  $n_i, \mu_n, p_i, \mu_p$  – концентрации и подвижности электронов и дырок соответственно.

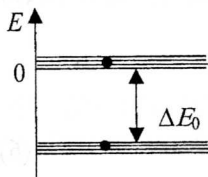


Рис. 1

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 запре-

щенной зоны равна  $\Delta E_0$ . Примем наинизший уровень зоны проводимости за начало отсчета энергии (рис. 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  $\Delta E_0$ , 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

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

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

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

где  $\tau_n$  – время свободного пробега электрона (время релаксации).

Время релаксации  $\tau_n$  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:

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

Аналогично для подвижности дырок

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

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

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

Логарифмируем (14):

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

Следовательно, изменение проводимости при изменении температуры определяется из

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

Ширину запрещенной зоны полупроводника определяем из (16):

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

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

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

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

$$\sigma_i = \frac{I}{U_{34}} \frac{l}{S}. \quad (18)$$

### Описание экспериментальной установки

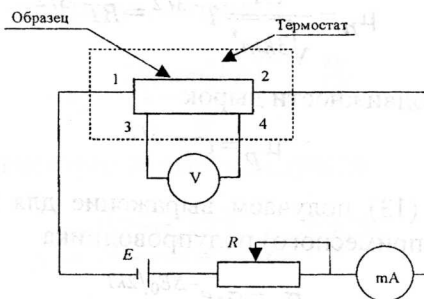


Рис. 2

Для определения температурной зависимости электропроводности полупроводника используется принципиальная схема, показанная на рис. 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 термо-ЭДС 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  $\sigma_i$  полупроводникового образца при комнатной температуре.
2. Включить электропечь и измерить зависимость электропроводности  $\sigma_i$  от температуры.
3. Вычислить среднеквадратичное отклонение электропроводности при комнатной температуре.
4. Построить график зависимости  $\ln \sigma$  от  $\frac{1}{T}$ .
5. Определить ширину запрещенной зоны  $\Delta E_0$  полупроводника графически.
6. Сравнить полученный результат с табличным.
7. Измерить зависимость проводимости металлического терморезистора от температуры.

### **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  $\frac{1}{T}$  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  $\frac{1}{T}$  для области собственной проводимости, области насыщения (истощения) и области вымораживания (области низких температур).

9. Постройте график  $\ln \sigma$  от  $\frac{1}{T}$  для областей, указанных в п. 8.

10. Как изменяется вид графика  $\ln \sigma = f\left(\frac{1}{T}\right)$  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.

13. Дать анализ зависимости проводимости и сопротивления металлов от температуры.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Епифанов Г.И. Физика твердого тела. – М.: Высш. шк., 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 : Учеб. пособие, Новосибирск: Изд-во НГТУ, 2003. Гл. 16.