

## Работа 3.9

### Исследование зависимости сопротивления металлов и полупроводников от температуры

**Оборудование:** исследуемые образцы, цифровые электронные приборы Щ4313 и М890G, термостат, двойной переключатель, соединительные провода.

#### Введение

По величине *электропроводности* все вещества можно разделить на три группы: *проводники*, *полупроводники* и *диэлектрики*. Наилучшими проводниками являются металлы и их сплавы.

*Удельная электропроводность металлов* приблизительно равна  $10^6$  —  $10^8$   $(\text{Ом}\cdot\text{м})^{-1}$ , полупроводников и диэлектриков при комнатной температуре  $10^4$  —  $10^{10}$   $(\text{Ом}\cdot\text{м})^{-1}$  и  $10^{-16}$  —  $10^{-18}$   $(\text{Ом}\cdot\text{м})^{-1}$  соответственно. Высокая электропроводность металлов обусловлена особенностями их строения.

В твердом состоянии металл является *кристаллом*. В узлах кристаллической решетки находятся *положительные ионы*, между которыми хаотически движутся *свободные электроны*, концентрация которых в металле очень велика — порядка  $10^{29}$   $\text{м}^{-3}$  — и не зависит от внешних условий (температуры, давления и др.).

В диэлектриках и полупроводниках при температурах, близких к *абсолютному нулю*, свободных электронов нет. Для создания в них электропроводности нужно оторвать электроны от атомов и сделать их свободными. Для этого необходимо сообщить им энергию, которая называется *энергией активации*. Такая энергия может быть сообщена при повышении температуры кристалла или иными внешними воздействиями: светом, сильным электрическим полем и др. Однако в диэлектриках могла бы возникнуть видимая электропроводность только при температурах, превышающих температуру их испарения. Поэтому при обычных условиях они являются *изоляторами*. В полупроводниках электропроводность наблюдается при комнатных температурах. Характерной особенностью полупроводников является сильная зависимость их электрических свойств от ряда физических факторов: температуры, освещенности, электрического поля, наличия примесей.

В данной работе исследуется зависимость сопротивления полупроводников и металлов от температуры.

Удельная электропроводность вещества зависит от концентрации носителей заряда и их подвижности. Для металлов удельная электропроводность

$$\sigma = enb_n, \quad (1)$$

где  $e$  — заряд электрона;  $n$  — концентрация электронов;  $b_n$  — их подвижность (скорость, которую получает электрон в электрическом поле напряженностью 1 В/м).

В полупроводниках (с собственной проводимостью) носителями заряда являются электроны и дырки, поэтому вместо (1) будем иметь:

$$\sigma = enb_n + enb_p, \quad (2)$$

где  $b_p$  — подвижность дырок.

Из формул (1) и (2) следует, что температурная зависимость удельной электропроводности  $\sigma(T)$  обусловлена зависимостью от температуры концентрации свободных носителей заряда  $n(T)$  и их подвижностей  $b_n(T)$  и  $b_p(T)$ .

В металлах изменение температуры не влияет на концентрацию свободных электронов, поэтому зависимость  $\sigma(T)$  определяется только температурной зависимостью подвижности электронов  $b_n(T)$ .

В полупроводниках при изменении температуры изменяются и концентрация носителей заряда и их подвижности. Величина подвижности носителей заряда в кристаллических твердых телах определяется характером их рассеяния на дефектах кристаллической решетки (в идеальной кристаллической решетке носители заряда двигались бы, не ощущая сопротивления). Дефекты кристаллической решетки могут быть вызваны разными причинами: наличием примесей, дислокациями, тепловыми колебаниями атомов относительно положения равновесия и др.

Температурная зависимость подвижности определяется тепловыми колебаниями атомов. При повышении температуры кристалла возрастает энергия тепловых колебаний, которая пропорциональна  $T$ , а следовательно и амплитуда колебаний атомов в узлах кристаллической решетки. Чем больше амплитуда колебаний атомов, тем больше отклонение от идеальности кристаллической решетки и тем меньше подвижность носителей заряда.

Зависимость подвижности от температуры имеет вид:

$$b \sim T^{-\alpha}, \quad (3)$$

где для металлов  $\alpha \approx 1$ , а для полупроводников  $\alpha = 3/2$ .

Таким образом, у металлов, где концентрация электронов не зависит от температуры, электропроводность с увеличением температуры уменьшается (сопротивление возрастает). Для чистых металлов приближенно можно считать, что зависимость сопротивления от температуры линейна:

$$R_t = R_0(1 + \alpha t), \quad (4)$$

где  $R_0$  и  $R_t$  — значения сопротивления при  $0^\circ\text{C}$  и температуре  $t$  соответственно;  $\alpha$  — температурный коэффициент сопротивления, величина которого в разных металлах разная.

Коэффициент  $\alpha$  зависит от температуры, но в интервале температуры от  $0$  до  $100^\circ\text{C}$  его можно считать постоянным. Для экспериментального определения  $\alpha$  достаточно выполнить измерения сопротивления  $R_{t_1}$  и  $R_{t_2}$  при двух разных значениях температуры  $t_1$  и  $t_2$ . В соответствии с зависимостью (4) будем иметь:

$$\frac{R_{t_1}}{R_{t_2}} = \frac{1 + \alpha t_1}{1 + \alpha t_2},$$

откуда

$$\alpha = \frac{R_{t_1} - R_{t_2}}{R_{t_1} t_2 - R_{t_2} t_1}. \quad (5)$$

В полупроводниках при изменении температуры изменяется не только подвижность, но и концентрация носителей заряда. Если повысить температуру беспримесного полупроводника, то часть атомов ионизируется, вследствие чего возникают свободные электроны и дырки в одинаковом количестве. Зависимость концентрации электронов и дырок от температуры определяется формулой:

$$n = n_0 e^{-\frac{\Delta W}{2kT}}, \quad (6)$$

где  $n_0$  — наибольшая возможная концентрация электронов проводимости в данном полупроводнике (при  $T \rightarrow \infty$ );  $\Delta W$  — энергия активации (ширина запрещенной зоны);  $k = 1,38 \cdot 10^{-23}$  Дж·К<sup>-1</sup> ( $0,86 \cdot 10^{-4}$  эВ·К<sup>-1</sup>) — постоянная Больцмана;  $T$  — абсолютная температура.

В примесном полупроводнике температурная зависимость концентрации носителей заряда, связанная с ионизацией примесей, также определяется формулой (6). Однако энергия ионизации примесей значительно меньше энергии ионизации атомов основного вещества, и поэтому примесная проводимость наблюдается при значительно более низких температурах.

В данной работе исследуется полупроводник с собственной проводимостью. В этом случае электропроводность определяется формулой (2), а так как зависимость (3) очень мала по сравнению с экспериментальной (6), то температурную зависимость электропроводности полупроводника можно выразить формулой:

$$\sigma = \sigma_0 e^{-\frac{\Delta W}{2kT}}, \quad (7)$$

где  $\sigma_0$  — постоянная величина.

На практике обычно определяют не  $\sigma$ , а удельное сопротивление:

$$\rho = \frac{1}{\sigma} = \rho_0 e^{\frac{\Delta W}{2kT}}, \quad (8)$$

где  $\rho_0 = 1/\sigma_0$ .

С учетом того, что  $R = \rho \frac{l}{S}$ , выражение (8) дает возможность определить сопротивление образца вещества при температуре  $T$ :

$$R_T = A e^{\frac{\Delta W}{2kT}}, \quad (9)$$

где  $A = \rho_0 \frac{l}{S}$  постоянная величина.

Выражение (9) может быть использовано для определения энергии активации  $\Delta W$ . После логарифмирования соотношения (9), получим:

$$\ln R_T = \ln A + \frac{\Delta W}{2k} \cdot \frac{1}{T}. \quad (10)$$

Если опытным путем определить сопротивление полупроводника  $R_T$  при разных температурах и построить график  $\ln R_T = f(1/T)$ , то по тангенсу угла наклона прямой  $\operatorname{tg} \alpha = \Delta W / 2k$  можно определить энергию активации:

$$\Delta W = 2k \operatorname{tg} \alpha. \quad (11)$$

**Описание установки.** Схема установки приведена на рис. 3.33. Исследуемые образцы (полупроводник 1 и тонкая металлическая проволока, намотанная на стеклянную трубку 2) помещены в стеклянные пробирки, заполненные маслом.

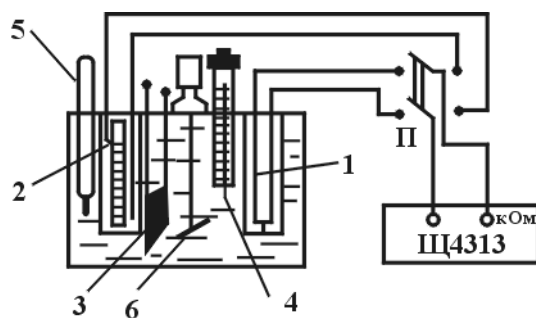


Рис. 3.33

Пробирки помещены в термостат, заполненный водой, нагреваемой с помощью электронагревателя 3, который питается от источника переменного тока. Необходимая температура поддерживается с помощью контактного термометра 4 и измеряется электронным термометром 5. Мешалка 6, приводимая в движение электромотором, перемешивает жидкость в термостате и обеспечивает равномерное нагревание образца. Сопротивление образца измеряется с помощью комбинированного цифрового устройства Щ4313. Поочередное подключение образцов к устройству Щ4313 выполняется с помощью переключателя П.

Порядок выполнения работы

1. Соберите цепь согласно рис. 3.33.
2. Подготовьте прибор Щ4313 для измерения сопротивления до 5 кОм. Подготовьте прибор М890G для измерения температуры.

3. С помощью переключателя  $П$  поочередно подключите исследуемые образцы к устройству Щ4313 и измерьте их сопротивления при комнатной температуре.

4. Пользуясь контактным термометром, выполните аналогичные измерения при других температурах в интервале до  $90\text{ }^\circ\text{C}$ , не реже, чем через каждые  $5\text{ }^\circ\text{C}$ .

5. По формуле (5) вычислите температурный коэффициент сопротивления не менее 3 — 5 раз и найдите его среднее значение (чтобы уменьшить погрешность, разность температур должна быть как можно большей). Результаты измерений и расчетов запишите в таблицу:

№ п/п	$t, \text{ }^\circ\text{C}$	$T, \text{ K}$	Металл	Полупроводник	$\frac{10^3}{T}$	$\ln R_T$	$\alpha, \text{ K}^{-1}$	$\Delta W, \text{ эВ}$
			$R_t, \text{ Ом}$	$R_t, \text{ Ом}$				

6. Постройте графики зависимостей сопротивлений образцов от температуры (на одних координатных осях).

7. Для полупроводникового образца постройте график зависимости  $\ln R_T = f(1/T)$ . По формуле (11) рассчитайте энергию активации  $\Delta W$ .



## КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. Почему сопротивление металлов возрастает с увеличением температуры?
2. Что называется температурным коэффициентом сопротивления?
3. Как зависит от температуры подвижность носителей заряда в металлах и полупроводниках?
4. При каких условиях в полупроводнике наблюдается собственная проводимость?
5. Как зависит сопротивление полупроводников от температуры?
6. Объясните принцип действия контактного термометра.
7. Для чего в термостате установлена мешалка?
8. Почему пробирки, в которых находятся образцы, заполнены маслом?
9. Как по зависимости сопротивления полупроводника от температуры определить его энергию активации?
10. Как значение энергии активации  $\Delta W$ , выраженное в джоулях (Дж), перевести в электрон-вольты (эВ)?