

Лабораторная работа № 2.4

ИССЛЕДОВАНИЕ ТЕМПЕРАТУРНОЙ ЗАВИСИМОСТИ СОПРОТИВЛЕНИЯ ПРОВОДНИКОВ ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ТОКА

Цель работы: изучение природы электропроводности вещества; исследование зависимости сопротивления металлов и полупроводников от температуры.

Оборудование: измерительный блок, термостат с исследуемыми образцами проводников.

Общие сведения

Вещество обладает **электропроводностью** – способностью проводить электрический ток. Степень электропроводности определяется значением удельного сопротивления. По закону Ома в дифференциальной форме плотность тока

$$\vec{j} = \frac{\vec{E}}{\rho}, \quad (2.4.1)$$

где \vec{E} – напряженность электрического поля; ρ – удельное сопротивление. Чем меньше удельное сопротивление, тем больше плотность тока при данном значении напряженности поля, т.е. тем выше электропроводность.

Наилучшими проводниками тока являются металлы, обладающие малым удельным сопротивлением ($10^{-8} \div 10^{-6}$) Ом·м. Диэлектрики практически не проводят ток, так как их удельное сопротивление очень велико: ($10^8 \div 10^{18}$) Ом·м. Промежуточное положение по электропроводности занимают полупроводники. Их удельное сопротивление ($10^{-6} \div 10^8$) Ом·м.

Металлы и полупроводники обладают разной температурной зависимостью удельного сопротивления. У металлов с ростом температуры удельное сопротивление увеличивается, а у полупроводников – уменьшается.

Металлы. Рассмотрим основные положения теории электропроводности металлов. Электрический ток – это направленное дви-

жение заряженных частиц. Для его существования необходимо наличие носителей тока, т.е. частиц, которые могли бы свободно перемещаться под действием электрического поля. В металлах носителями тока являются свободные электроны. Так называют электроны, которые отрываются от атомов и могут относительно свободно перемещаться по всему объему металла.

При отсутствии внешнего электрического поля свободные электроны движутся хаотично, сталкиваясь с нарушениями кристаллической решетки металла. Это движение можно характеризовать средней скоростью теплового движения $\langle v_t \rangle$. Если создать электрическое поле в металле, то одновременно с тепловым движением возникнет также направленное движение свободных электронов (дрейф). Направленное движение характеризуют средней скоростью дрейфа $\langle v_{др} \rangle$. Этому движению препятствуют столкновения с нарушениями кристаллической решетки. Чем больше напряженность электрического поля, тем больше скорость дрейфа:

$$\langle \vec{v}_{др} \rangle = \beta \vec{E}, \quad (2.4.2)$$

где β – коэффициент пропорциональности, называемый подвижностью.

Как известно, плотность тока \vec{j} может быть выражена через параметры носителей тока:

$$\vec{j} = en \langle \vec{v}_{др} \rangle, \quad (2.4.3)$$

где e – заряд носителей; n – концентрация носителей тока.

Используя (2.4.2), получим для плотности тока выражение

$$\vec{j} = en \beta \vec{E}. \quad (2.4.4)$$

Это выражение есть не что иное, как закон Ома в дифференциальной форме (2.4.1). Следовательно, удельное сопротивление металла

$$\rho = \frac{1}{en\beta}. \quad (2.4.5)$$

Объяснение температурной зависимости сопротивления металлов дала квантовая теория электропроводности. Согласно этой теории, подвижность

$$\beta = \frac{e \langle \lambda_{\phi} \rangle}{m \langle v_{тф} \rangle}, \quad (2.4.6)$$

где $\langle \lambda_{\text{ф}} \rangle$ – средняя длина свободного пробега электрона, обладающего энергией Ферми; m – масса электрона; $\langle v_{\text{тф}} \rangle$ – средняя скорость теплового движения электрона, обладающего энергией Ферми. Подставив (2.4.6) в (2.4.5), получим

$$\rho = \frac{m \langle v_{\text{тф}} \rangle}{e^2 n \langle \lambda_{\text{ф}} \rangle}. \quad (2.4.7)$$

Из всех величин в правой части этой формулы от температуры зависит только $\langle \lambda_{\text{ф}} \rangle$, т.е. среднее расстояние, проходимое электроном между столкновениями. Чем выше температура, тем больше амплитуда колебаний ионов кристаллической решетки, следовательно, меньше длина свободного пробега. Поэтому $\langle \lambda_{\text{ф}} \rangle$ обратно пропорциональна термодинамической температуре, т.е. $\langle \lambda_{\text{ф}} \rangle \sim \frac{1}{T}$, а удельное сопротивление прямо пропорционально температуре $\rho \sim T$. Если использовать шкалу Цельсия, то зависимость удельного сопротивления от температуры принимает вид

$$\rho = \rho_0 (1 + \alpha t), \quad (2.4.8)$$

где ρ – удельное сопротивление при температуре t ; ρ_0 – удельное сопротивление при температуре 0°C ; α – температурный коэффициент сопротивления. Взяв производную по температуре от выражения (2.4.8), можно показать, что

$$\alpha = \frac{1}{\rho_0} \frac{d\rho}{dt},$$

т.е. α характеризует быстроту изменения удельного сопротивления при изменении температуры. Можно определить α как величину, равную относительному приращению удельного сопротивления при нагревании на один $^\circ\text{C}$.

Для всех чистых металлов температурный коэффициент сопротивления близок к величине, равной $\frac{1}{273} \approx 3,67 \cdot 10^{-3} (^\circ\text{C})^{-1}$. Например, в интервале температур $(0 \div 100)^\circ\text{C}$ среднее значение α равно:

у серебра $4 \cdot 10^{-3} (^\circ\text{C})^{-1}$, у меди $4,3 \cdot 10^{-3} (^\circ\text{C})^{-1}$, у алюминия $3,8 \cdot 10^{-3} (^\circ\text{C})^{-1}$, у цинка $3,7 \cdot 10^{-3} (^\circ\text{C})^{-1}$, у олова $4,5 \cdot 10^{-3} (^\circ\text{C})^{-1}$.

Линейная зависимость сопротивления металлов от температуры экспериментально подтверждается в довольно широком интервале температур. Но при низких температурах, близких к абсолютному нулю, такая зависимость нарушается. У большинства металлов удельное сопротивление выходит на уровень так называемого остаточного сопротивления $\rho_{\text{ост}}$. У некоторых металлов, называемых сверхпроводниками, при низких температурах удельное сопротивление становится равным нулю.

Полупроводники. При температуре абсолютного нуля чистый полупроводник не проводит электрический ток, так как в нем нет носителей тока. Это означает, что все электроны связаны со своими атомами. При $T \neq 0$ часть электронов отрывается от атомов и приобретает возможность перемещаться по всему объему полупроводника. С точки зрения зонной теории такой отрыв электронов рассматривается как переход их из валентной зоны в зону проводимости (рис. 2.4.1). На освободившиеся уровни в валентной зоне могут переходить электроны с более низких энергетических уровней. Направленное движение электронов, находящихся в валентной зоне, можно рассматривать как движение квазичастиц «дырок». «Дырке» приписывают положительный элементарный заряд $+e$. Таким образом, электрический ток в полупроводнике имеет две составляющие: электронную и дырочную.

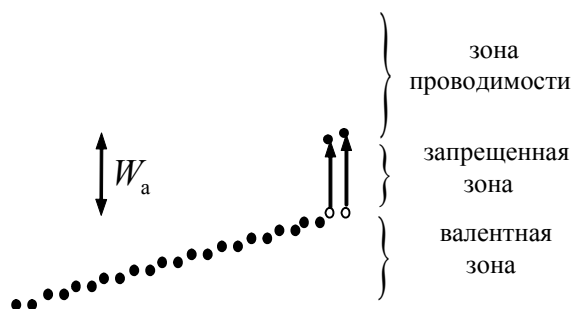


Рис. 2.4.1

Для перехода из валентной зоны в зону проводимости электрон должен преодолеть запрещенную зону шириной W_a . Эту энергию называют также энергией активации. Вероятность таких переходов

пропорциональна $e^{-\frac{W_a}{2kT}}$, где e – основание натурального логарифма; $k = 1,38 \cdot 10^{-23}$ Дж/К – постоянная Больцмана; T – термодинамическая температура.

Удельное сопротивление полупроводника описывается выражением, подобным выражению для удельного сопротивления металла (2.4.5), но с учетом наличия в полупроводнике двух видов носителей тока – электронов и дырок:

$$\rho = \frac{1}{e(n_+\beta_+ + n_-\beta_-)}, \quad (2.4.9)$$

где n_+, n_- – концентрации дырок и электронов, соответственно; β_+, β_- – их подвижности. Зависимость подвижности носителей тока в полупроводниках от температуры аналогична температурной зависимости подвижности электронов в металлах. Но в полупроводниках концентрация носителей тока также зависит от температуры. И n_+ , и n_- определяются вероятностью переходов электронов из валентной зоны в зону проводимости. Следовательно, они пропорциональны $e^{-\frac{W_a}{2kT}}$. Зависимость концентрации от температуры оказывается более резкой, чем температурная зависимость подвижности. Поэтому удельное сопротивление полупроводника зависит от температуры по экспоненциальному закону:

$$\rho = \rho_\infty e^{\frac{W_a}{2kT}}, \quad (2.4.10)$$

где ρ_∞ – постоянная для данного полупроводника величина, формально равная удельному сопротивлению при бесконечно большой температуре.

Энергия активации для чистых полупроводников равна десятым долям – единицам эВ. Например, для олова Sn $W_a = 0,1$ эВ, для сурьмы Sb $W_a = 0,36$ эВ, для германия Ge $W_a = 0,72$ эВ, для кремния Si $W_a = 1,1$ эВ, для селена Se $W_a = 2,5$ эВ.

Описание установки и метода измерений

Лабораторная установка состоит из измерительного блока 1 и термостата 2 (рис. 2.4.2), внутри которого расположены нагреватель и исследуемые образцы проводников. Измерительный блок состоит

из электронного термометра 3 и омметра 4. Включение измерительного блока производится тумблером 5.

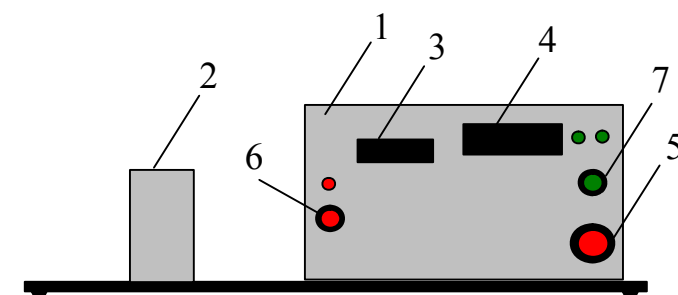


Рис. 2.4.2

Для включения нагревателя на блоке имеется кнопка 6. О том, что нагреватель включен, сигнализирует светодиод над кнопкой 6. Для выключения нагревателя необходимо повторно нажать кнопку 6.

Кнопка 7 служит для поочередного подключения исследуемых образцов к омметру. Над ней расположены два светодиода, которые сигнализируют о том, какой из образцов подключен к омметру, металлический или полупроводниковый. Подключение образцов производится повторными нажатиями кнопки 7.

Измерительный блок соединен с термостатом при помощи проводов, проложенных под основанием лабораторной установки (на рисунке не показаны).

В данной работе исследуются температурные зависимости сопротивления металла и полупроводника. Как известно, сопротивление однородного проводника постоянного поперечного сечения равно

$$R = \rho \frac{l}{S}, \quad (2.4.11)$$

где ρ — удельное сопротивление; l — длина проводника; S — площадь поперечного сечения проводника. Как видим, сопротивление пропорционально удельному сопротивлению. Температурная зависимость сопротивления будет такой же, как зависимость удельного сопротивления от температуры. Поэтому для металла

$$R = R_0 (1 + \alpha t), \quad (2.4.12)$$

а для полупроводника

$$R = R_\infty e^{\frac{W_a}{2kT}}. \quad (2.4.13)$$

Зная сопротивление при разных температурах, можно рассчитать температурный коэффициент сопротивления для металла и энергию активации для полупроводника.

Металл. Запишем выражение (2.4.12) для двух значений температуры:

$$\begin{cases} R_1 = R_0 (1 + \alpha t_1); \\ R_2 = R_0 (1 + \alpha t_2). \end{cases}$$

Решая эту систему уравнений относительно α , получим

$$\alpha = \frac{R_2 - R_1}{R_1 t_2 - R_2 t_1}. \quad (2.4.14)$$

Полупроводник. Представим выражение (2.4.13) в виде

$$\frac{R}{R_\infty} = e^{\frac{W_a}{2kT}}$$

и прологарифмируем его:

$$\ln \frac{R}{R_\infty} = \frac{W_a}{2kT}. \quad (2.4.15)$$

Запишем выражение (2.4.15) для двух значений температуры:

$$\begin{cases} \ln \frac{R_1}{R_\infty} = \frac{W_a}{2kT_1}; \\ \ln \frac{R_2}{R_\infty} = \frac{W_a}{2kT_2}. \end{cases}$$

Вычтем из первого уравнения второе:

$$\ln \frac{R_1}{R_\infty} - \ln \frac{R_2}{R_\infty} = \ln \frac{R_1}{R_2} = \frac{W_a}{2k} \left(\frac{1}{T_1} - \frac{1}{T_2} \right).$$

Тогда энергия активации

$$W_a = 2k \frac{\ln \frac{R_1}{R_2}}{\left(\frac{1}{T_1} - \frac{1}{T_2} \right)} = 2k \frac{T_1 T_2}{T_2 - T_1} \ln \frac{R_1}{R_2}. \quad (2.4.16)$$

Порядок выполнения измерений

1. Получить у преподавателя допуск к выполнению работы.
2. Ознакомиться с органами управления измерительного блока.
3. Включить питание измерительного блока. Измерить сопротивление исследуемых образцов при комнатной температуре. Результат записать в табл. 2.4.1.
4. Включить нагреватель термостата. Измерить сопротивление образцов при нагревании с интервалом (8–10) °С. Результаты записать в таблицу.
5. Выключить питание измерительного блока. Результаты измерений предъявить преподавателю.

Таблица 2.4.1

№ изм.	Металл		Полупроводник		
	$t, ^\circ\text{C}$	$R, \text{Ом}$	$t, ^\circ\text{C}$	T, K	$R, \text{Ом}$
1					
2					
3					
4					
5					
6					
7					
8					
9					
10					

Обработка результатов измерений

1. Для каждого значения сопротивления полупроводника вычислить температуру по шкале Кельвина $T = t + 273$. Результаты вычислений занести в табл. 2.4.1.
2. Построить графики зависимостей $R(t)$ для металла и $R(T)$ для полупроводника. При построении графиков масштабы по осям выбрать так, чтобы графики охватывали всю отведенную для них площадь.
3. Используя формулу (2.4.14), три раза вычислить температурный коэффициент сопротивления α для металла. В качестве R_1 и R_2 рекомендуется брать не соседние значения.

4. Используя полученные значения α , вычислить $\langle \alpha \rangle$, оценить абсолютную погрешность $\Delta\alpha$, считая ее равной случайной погрешности, вычислить относительную погрешность $\delta\alpha$ по методу Корнфельда (см. Приложение 2).

5. Записать окончательный результат для температурного коэффициента сопротивления α .

6. Используя формулу (2.4.16), три раза вычислить энергию активации W_a для полупроводника. В качестве R_1 и R_2 рекомендуется брать не соседние значения.

7. Перевести полученные значения энергии активации из джоулей в электрон-вольты, учитывая, что $1 \text{ эВ} = 1,6 \cdot 10^{-19} \text{ Дж}$. В последующих расчетах использовать значения энергии активации в электрон-вольтах.

7. Вычислить среднее значение $\langle W_a \rangle$, абсолютную погрешность, ΔW_a , относительную погрешность δW_a по методу Корнфельда.

8. Записать окончательный результат для энергии активации W_a .

9. Сделать выводы по результатам вычислений.

Контрольные вопросы

1. Что такое электропроводность? Каковы типичные значения удельного сопротивления для металлов, полупроводников и диэлектриков?

2. Как удельное сопротивление металла зависит от температуры? Поясните смысл температурного коэффициента сопротивления. Как рассчитать температурный коэффициент сопротивления, зная сопротивления при двух значениях температуры?

3. Объясните, почему удельное сопротивление металлов растет с повышением температуры.

4. Объясните температурную зависимость удельного сопротивления полупроводников.

5. Что такое энергия активации электронов полупроводника? Как рассчитать энергию активации, зная сопротивления полупроводника при двух значениях температуры?

6. Изобразите зонные схемы металла, диэлектрика, полупроводника. Поясните, в чем их различие.