

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА №1

ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОВОДНИКОВЫХ МАТЕРИАЛОВ

Цель работы:

изучение процессов, протекающих в проводниках в электрическом поле; исследование основных свойств проводников по температурным зависимостям проводимости.

1.1 Теоретические сведения о проводниках

Электропроводность характеризует перенос электрических зарядов в веществе под действием внешнего электрического поля. В изотропном теле (жидком, твердом или газообразном), при приложении к нему разности потенциалов U [В] создается однородное электрическое поле

$$E = U / l \text{ [В/м]}, \quad (0.1)$$

где l [м] – расстояние между точками приложения U . В результате через него начнет протекать электрический ток, совпадающий по направлению с полем E , плотность которого j [А/м²]. Зависимость плотности тока, протекающего при приложении электрического поля, описывается выражением

$$j = \sigma E, \quad (0.2)$$

где σ [См/м] – удельная электропроводность. Обратная ей величина $\rho = 1 / \sigma$ [Ом·м] называется удельным электрическим сопротивлением.

К проводникам относят материалы, удельное электрическое сопротивление которых в нормальных условиях лежит в диапазоне $\rho = 10^{-8} \dots 10^{-5}$ Ом·м. Основными электрическими характеристиками проводниковых материалов являются:

1. Удельное электрическое сопротивление ρ ;
2. Температурный коэффициент удельного сопротивления α_ρ ;

Наилучшими проводниками электрического тока являются металлы.

Классическая электронная теория проводимости

В основе классической электронной теории металлов, развитой Друде и Лоренцем, лежит представление об электронном газе, состоящем из свободных (коллективизированных) электронов. Электронному газу приписываются свойства идеального газа, т.е. движение электронов подчиняется законам классической статистики.

Если считать, что атомы в металле ионизированы однократно, то концентрация свободных электронов будет равна концентрации атомов и может быть рассчитана по формуле:

$$n = \frac{d}{A} N_A \text{ [м}^{-3}\text{]}, \quad (0.3)$$

где d [г/м³] – плотность материала, A [г/моль] – атомная масса, $N_A = 6.022 \cdot 10^{23}$ [моль⁻¹] – число Авогадро.

Средний промежуток времени между последовательными столкновениями электрона является средним временем свободного пробега ($\langle \tau \rangle$). Все время, пока электрон свободен, он может ускоряться электрическим полем. Это ускорение увеличивает скорость, которой электрон уже обладает. При следующем столкновении электрон отдает решетке избыток импульса, который он получил со времени последнего столкновения, и изменяет траекторию своего движения, т.е. рассеивается. Средние свободные пробеги электронов ($\langle L \rangle$) в кристалле ограничиваются этими столкновениями.

Приложение внешнего напряжения приводит к увлечению электронов в направлении действующих сил поля, т.е. электроны получают некоторую добавочную (дрейфовую) скорость направленного движения, благодаря чему и возникает электрический ток. Плотность тока в проводнике определяется выражением:

$$j = qn \langle v \rangle, \quad (0.4)$$

где $\langle v \rangle$ [м/с] – средняя скорость направленного движения носителей заряда (скорость дрейфа), $q = 1.602 \cdot 10^{-19}$ [Кл] – заряд электрона;

$$\langle v \rangle = a \cdot \langle \tau \rangle = \frac{F}{m} \langle \tau \rangle = \frac{qE \langle \tau \rangle}{m}, \quad (0.5)$$

где a – ускорение электрона, F – сила, действующая на электрон со стороны электрического поля, $\langle \tau \rangle$ [с] – среднее время свободного пробега электрона между двумя столкновениями, $m = 9.109 \cdot 10^{-31}$ [кг] – масса электрона.

При подстановке скорости дрейфа в выражение (0.4), получим равенство:

$$j = \frac{q^2 n E \langle \tau \rangle}{m} = \sigma E, \quad (0.6)$$

т.е. плотность тока пропорциональна напряженности электрического поля, а это и есть аналитическое выражение закона Ома.

Дрейфовую скорость в единичном электрическом поле определяют термином подвижность:

$$\mu = \frac{\langle v \rangle}{E} = \frac{q \langle \tau \rangle}{m} \text{ [м}^2\text{/(В}\cdot\text{с)]}. \quad (0.7)$$

Сопоставляя выражения (0.6) и (0.7) приходим к следующей зависимости удельной проводимости от подвижности

$$\sigma = qn\mu. \quad (0.8)$$

Подвижность носителей заряда пропорциональна среднему свободному пробегу и определяется частично природой механизма, ограничивающего средний свободный пробег, т.е. рассеянием.

Вообще классическая модель наглядна и дает правильную зависимость, выражаемую законом Ома. Однако она не приводит к правильным количественным результатам, т.е. имеются расхождения с экспериментом. Квантовая физика позволяет устранить эти расхождения. Прежде всего, необходимо учитывать различие в поведении микрочастиц и обычных макрочастиц.

Квантово-механическая теория проводимости

При квантово-механическом подходе учитываются волновые свойства электронов, и подвижность электронов связывают с их рассеянием. К числу наиболее важных источников рассеяния электронов относятся: решеточные рассеяния, или рассеяния на колебаниях решетки; рассеяние на примеси – как на заряженной, так и на нейтральной, то есть рассеяние на точечных дефектах; рассеяние на линейных дефектах – дислокациях; рассеяние на двумерных нерегулярностях решетки.

Для чистых металлов зависимость $\sigma(T)$ в основном определяется рассеянием электронов на колебаниях решетки.

При подходе к задаче о рассеянии электронов колебаниями решетки вводится в рассмотрение фононный газ, и механизм рассеяния сводится к взаимодействию электронного газа с фононным. Фононы появляются как результат квантования колебаний решетки.

Основные результаты теории таковы:

Средняя кинетическая энергия свободных электронов, согласно статистике Ферми, практически не зависит от температуры и однозначно определяется плотностью электронного газа, то есть:

$$W_k = \frac{h^2}{40\sigma m} \left(\frac{3n}{\pi} \right)^{\frac{3}{2}}, \quad (0.9)$$

где $h = 6.62 \cdot 10^{-34}$ [Дж·с] – постоянная Планка.

Электропроводность σ выражается в виде:

$$\sigma = 2 \left(\frac{\pi}{3} \right)^{\frac{1}{3}} \frac{q^2 n^{\frac{2}{3}}}{h} \langle L \rangle, \quad (0.10)$$

где $\langle L \rangle$ [м] – средняя длина свободного пробега электронов. То есть зависимость электропроводности от температуры определяется только температурной зависимостью длины свободного пробега $\langle L \rangle$ (ибо концентрация свободных электронов n от T практически не зависит).

Однако следует отметить, что и эта теория является лишь приближением.

Относительное изменение удельного сопротивления при изменении температуры на один кельвин называется температурным коэффициентом удельного сопротивления:

$$\alpha_p = \frac{1}{\rho} \cdot \frac{d\rho}{dT} \quad (0.11)$$

Если зависимость $\rho(T)$ линейная, то

$$\alpha_p = \frac{\rho_2 - \rho_1}{\rho_2 (T_2 - T_1)} \quad (0.12)$$

В технике широко применяются металлические сплавы, имеющие структуру неупорядоченных твердых растворов, все сплавы имеют повышенное удельное сопротивление в сравнении с компонентами, входящими в их состав. Полное сопротивление сплава можно выразить в виде суммы двух слагаемых

$$\rho = \rho_m + \rho_{ост} \quad (0.13)$$

где ρ_m – сопротивление, обусловленное рассеянием электронов на тепловых колебаниях узлов решетки; $\rho_{ост}$ – добавочное (остаточное) сопротивление, связанное с рассеянием электронов на неоднородностях структуры сплава.

Взаимосвязь конструктивных (длины L , площади поперечного сечения S) и технологических (R) параметров проводника устанавливается уравнением:

$$R = \rho \frac{L}{S} \quad (0.14)$$

1.2 Порядок выполнения работы

Рабочее задание

1. Включить лабораторный стенд.
2. Запустить программу измерения (Cond_xrusb).
3. Выбрать конечную температуру ($T_{кон}$), шаг измерения (ΔT) и исследуемый проводник из табл. 1. (вариант задается преподавателем).

Таблица 1.

Вариант	Материал	$T_{\text{кон}}, ^\circ\text{C}$	$\Delta T, ^\circ\text{C}$	$T_{\text{расч}}, ^\circ\text{C}$
1	Медь	50	1	30
2	Никель	50	1	32
3	Константан	50	1	34
4	РС-37-10*	50	1	36
5	Медь	55	2	38
6	Никель	55	2	40
7	Константан	55	2	42
8	РС-37-10*	55	2	44
9	Медь	60	2	46
10	Никель	60	2	48

* РС-37-10 Резистивный сплав – Cr 37%, Fe 10%, Ni 53%

Для установки конечной температуры и шага измерений зайдите в меню **Опции**→**Температура**. Параметр поправка установите равным 0 (рис. 1).

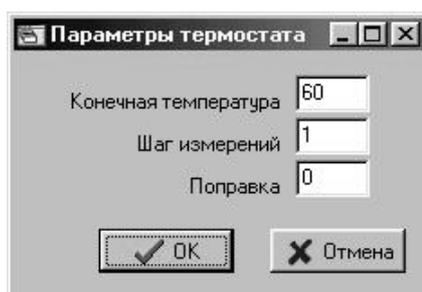


Рисунок 1 – Диалоговое окно изменения параметров термостата

4. Провести измерения. Для этого в меню выбрать пункт меню **Измерение**.

В этом режиме происходит измерение сопротивления установленных образцов. На мониторе в это время индицируется изменение температуры, и строятся графики зависимостей сопротивления образцов от температуры (рис. 3).



Рисунок 3 – Вид экрана в режиме Измерение

После проведения измерений результаты запишутся в базу данных.

5. В окне «База данных» (рис. 4) выбрать строку с результатами своих измерений. Чтобы просмотреть полученные данные, следует нажать на кнопку «Просмотр» (, см. рис. 4).

Data_time	Kr_name	Obr1_name	Obr2_name	Obr3_name	Obr4_name
12.12.2007 8:22:06	Измерение	Медь	Никель	Константан	PC-37-10

Рисунок 4 – Окно «База данных»

Этот режим работы позволяет просмотреть измеренные данные в различных вариантах представления и сформировать отчет о проделанной работе. При активизации этой команды на экране появляется окно, изображенное на рисунке 5.

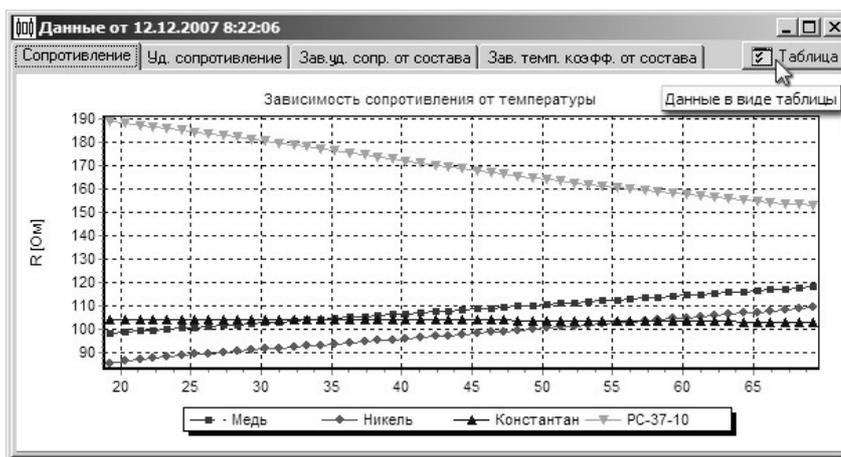


Рисунок 5 – Вид экрана в режиме просмотра

Необходимо перейти к табличному представлению результатов, для чего нажать на кнопку «Таблица» (рис. 5).

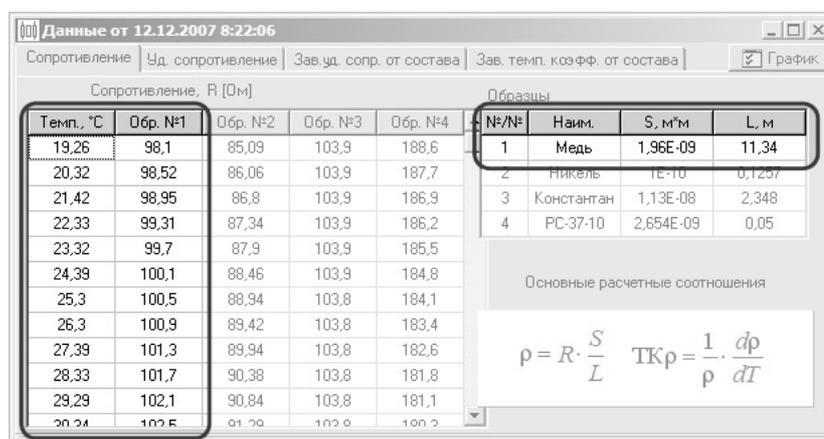


Рисунок 6 – Табличное представление результатов

Из таблицы (рис. 6) переписать результаты измерений для материала, соответствующего вашему варианту, а также параметры образца.
Таблица 2.

$T, ^\circ\text{C}$	$R, \text{Ом}$
25	
26	
...	

- Используя таблицу 2 построить график зависимости $R(T)$ для материала, соответствующего вашему варианту.
- Используя формулу (0.14) определить удельное сопротивление ρ для температуры $T_{\text{расч}}$. Результат занести в табл. 3.
- Рассчитать температурный коэффициент удельного сопротивления α_ρ , используя формулу (0.12). Результат занести в табл. 3.

9. Определить среднюю длину свободного пробега электронов $\langle L \rangle$, используя выражения (0.3) и (0.10). Результат занести в табл. 3.
10. Определить среднюю кинетическую энергию электронов W_k , используя выражение (0.9). Результат занести в табл. 3.
11. Определить подвижность электронов μ , используя выражение (0.8). Результат занести в табл. 3.
12. Определить среднюю скорость дрейфа электронов $\langle v \rangle$ по проводнику, используя выражения (0.1), (0.2) и (0.4). Результат занести в табл. 3.
13. Определить время дрейфа электронов по проводнику t при приложении к нему напряжения 10 В. Результат занести в табл. 3.

Содержание отчета

Отчет по лабораторной работе должен содержать

1. Цель работы, описание работы.
2. Данные заданного варианта в соответствии с табл. 1.
3. Результаты измерений сопротивления проводника от температуры (табл. 2).
4. Расчет необходимых величин по пп. 7–13 рабочего задания.
5. Таблицу 3 с результатами расчетов

Таблица 3.

Вар-т	Т _{расч} , °С	R, Ом	ρ, Ом·м	α _ρ , 1/°С	⟨L⟩, м	W _к , Дж	μ, м ² /В·с	⟨v⟩, м/с	t, с

6. График зависимости $R(T)$.

Контрольные вопросы

1. Электропроводность металлов
2. Теплопроводность металлов
3. Энергия Ферми
4. Виды сплавов
5. Влияние дефектов на свойства проводников

Литература

1. Пасынков В.В., Сорокин В.С. Материалы электронной техники: Учеб. – 2-е изд. – М.: Высш. шк., 1986. – 367 с.
2. Морозов А.И. Высокотемпературная сверхпроводимость: предлагаемые механизмы. Учеб. пособие / Моск. Гос. ин-т радиотехники, электроники и автоматики (ТУ). – М., 1996. – 58 С.

3. Аверин И.А., Медведев С.П., Печерская Р.М. Материалы микроэлектронных устройств. Уч. пособие – Пенза: ПГТУ, 1993 – 63 с.
4. Печерская Р.М. Расчет электрорадиоэлементов. Уч. пособие. Пенза: ПГТУ, 1994 – 80 с.
5. Справочник по электротехническим материалам / Под ред. Ю.В. Корицкого, В.В. Пасынкова, Б.М. Тареева. – М.: Энергоиздат, 1988. т.3.
6. Материалы в приборостроении и автоматике. Справочник / Под ред. Ю.М. Пятина, – М.: Машиностроение, 1982.