

Физический факультет
кафедра общей физики и физики конденсированного состояния

Методическая разработка
по общему физическому практикуму

Лаб. работа № 71

ЭЛЕКТРОПРОВОДНОСТЬ МЕТАЛЛОВ В
ДИАПАЗОНЕ ТЕМПЕРАТУР

Описание составила доц. Свирина Е.П.

Москва 2012 г.

Подготовил методическое пособие к изданию доц. Авксентьев Ю.И.

ЭЛЕКТРОПРОВОДНОСТЬ МЕТАЛЛОВ В ДИАПАЗОНЕ ТЕМПЕРАТУР

1. КРАТКИЕ СВЕДЕНИЯ ОБ ЭЛЕКТРОПРОВОДНОСТИ МЕТАЛЛОВ

Упорядоченное движение электрических зарядов называется электрическим током. В металле носителями зарядов являются электроны. Количественной характеристикой постоянного тока является сила тока

$$I = \frac{q}{t}, \quad (1)$$

где q - количество заряда, которое переносится через поперечное сечение S проводника за время t . За направление силы тока принято направление движения положительного заряда в электрическом поле. Сила тока I измеряется в амперах. В некоторых случаях удобно пользоваться величиной, называемой плотностью тока \vec{j} равной отношению силы тока I к площади поперечного сечения проводника S , причём направление \vec{j} задается вектором нормали \vec{n}_s к некоторой площадке в поперечном сечении, т.е.

$$\vec{j} = \frac{I}{|S|} \vec{n}_s. \quad (2)$$

Выразим плотность тока \vec{j} через среднюю скорость упорядоченного движения свободных зарядов (электронов) в проводнике. Пусть ΔV - часть объема проводника, в которой имеется ΔN свободных электронов, концентрация которых равна $n = \frac{\Delta N}{\Delta V}$. Если средняя скорость упорядоченного движения электрона равна U то за время Δt через сечение S переносится заряд $\Delta q = e\Delta N = en\Delta V = en\vec{u} \cdot \Delta t \cdot |S| \vec{n}_s$.

Отсюда следует, что плотность тока

$$\vec{j} = \frac{I}{|S|} \vec{n}_s = \frac{\Delta q}{\Delta t |S|} \vec{n}_s = en\vec{u}. \quad (3)$$

В соответствии с законом Ома для участка цепи постоянного тока сила тока I пропорциональна разности потенциалов $\Delta\varphi$ на концах этого участка, т.е.

$$I = \frac{1}{R} \Delta\varphi. \quad (4)$$

Здесь электросопротивление $R = \rho \frac{l}{S}$; l - длина выделенного участка металлического проводника, S - площадь поперечного сечения проводника, ρ - удельное электросопротивление.

Учитывая соотношение между разностью потенциалов и напряженностью электрического поля $\left(\vec{E}_l = -\frac{\Delta\varphi}{\Delta l}\vec{e}_l\right)$, где \vec{e}_l - единичный вектор в направлении l , формулу (4) можно записать в следующем виде

$$jS = \frac{ElS}{\rho l} \quad \text{или} \quad \vec{j} = \frac{1}{\rho}\vec{E}, \quad (5)$$

где \vec{E} - напряженность электрического поля, а величина $\sigma = \frac{1}{\rho}$ называется удельной электропроводностью.

Приравнивая соотношения для плотности тока (3) и (5) получаем

$$en\vec{u} = \sigma\vec{E} \quad \text{или} \quad \vec{u} = \frac{\sigma\vec{E}}{en}. \quad (6)$$

Отсюда следует, что средняя скорость упорядоченного движения электронов в проводнике (так называемая «дрейфовая скорость») пропорциональна напряженности электрического поля \vec{E} .

Отношение средней скорости упорядоченного движения электронов в металле к величине напряженности электрического поля E в проводнике называется подвижностью носителей тока $\mu = \frac{u}{E}$. Подвижность носителей тока μ в металлах численно равна средней скорости упорядоченного движения электронов при напряженности электрического поля E , равной единице. (Размерность подвижности $\left[\frac{m^2}{Vs}\right]$).

Средняя скорость упорядоченного движения электронов получила название дрейфовой скорости и обозначается U_D .

Из соотношения (6) видно, что электропроводность

$$\sigma = en\mu. \quad (7)$$

Здесь n - концентрация электронов, e и μ - заряд и подвижность электронов.

Согласно теории металлов концентрация носителей тока n (электронов) почти не зависит от температуры. В соответствии с формулой (7) температурная зависимость электропроводности σ определяется температурной зависимостью подвижности μ носителей тока в металлах.

Рассмотрим температурную зависимость подвижности μ , используя классические представления, согласно которым электронный газ в металлах подобен молекулам идеального газа. При наличии электрического поля с напряженностью \vec{E} на каждый электрон действует сила $e\vec{E}$, сообщающая ему ускорение $\frac{e\vec{E}}{m}$, где m - масса электрона.

Если предположить, что после каждого соударения электрона с ионом кристаллической решетки металла скорость упорядоченного движения

электрона равна нулю, то на длине свободного пробега λ эта скорость достигает максимальной величины:

$$\vec{U}_{\max} = \frac{e\vec{E}}{m}\tau \quad (8)$$

Здесь τ - есть время между двумя последовательными соударениями электрона с ионами решетки (время релаксации). Так как электрон между соударениями движется равноускоренно, среднее значение скорости равно половине ее максимального значения, т.е.

$$\vec{u} = \frac{1}{2} \frac{e\vec{E}}{m}\tau . \quad (9)$$

Если u_{cp} - есть средняя скорость теплового движения, то число соударений, испытываемых одним электроном в $1c$ равно $\frac{u_{cp}}{\lambda}$, где λ - средняя длина свободного пробега.

Следовательно, среднее время между соударениями $\tau = \frac{\lambda}{u_{cp}}$. Подставляя это значение τ в формулу (9), получаем соотношение для средней скорости упорядоченного электрона

$$\vec{u} = \frac{1}{2} \frac{e\lambda}{m u_{cp}} \vec{E} . \quad (10)$$

С учетом (10) для подвижности электронов получим выражение

$$\mu = \frac{u}{E} = \frac{1}{2} \frac{e}{m} \frac{\lambda}{u_{cp}} . \quad (11)$$

С учетом соотношения (11), формулу $\sigma = en\mu$ для удельной электропроводности можно переписать в виде

$$\sigma = \frac{1}{2} \frac{ne^2\lambda}{m u_{cp}} . \quad (12)$$

Видно, что электропроводность σ тем больше, чем выше концентрация электронов проводимости и чем больше средняя длина свободного пробега λ . С повышением средней скорости теплового движения u_{cp} электропроводность уменьшается. С помощью формул (11) и (12) можно качественно объяснить уменьшение электропроводности с ростом температуры, а следовательно, увеличение удельного электросопротивления ρ , поскольку $\rho = \frac{1}{\sigma}$.

Действительно, средняя скорость теплового движения электронов в рамках классической модели равна

$$u_{cp} = \sqrt{\frac{8kT}{\pi m}}, \quad (13)$$

где k - постоянная Больцмана. Следовательно, удельное электросопротивление ρ должно расти с увеличением температуры T по закону \sqrt{T} . В действительности эксперимент показывает, что $\rho \sim T$ и это противоречие устраняется в рамках более точной квантовой теории электропроводности металлов.

Целью настоящей работы является изучение температурной зависимости электросопротивления металлов (меди). Если интервал изменения температуры достаточно мал, то, согласно эксперименту, справедливо соотношение

$$R = R_0(1 + \alpha t), \quad (14)$$

где R электросопротивление металла при t °C, R_0 - электросопротивление того же металла при 0 °C, коэффициент α - температурный коэффициент сопротивления для данного металла. Если интервал изменения температуры достаточно мал, то приближенно можно считать коэффициент α постоянной величиной. У всех металлов сопротивление R увеличивается с ростом температуры, следовательно, для металлов коэффициент α имеет положительный знак. Температурный коэффициент сопротивления согласно формуле (14) определяется величиной

$$\alpha = \frac{1}{R_0} \frac{dR}{dt}. \quad (15)$$

Видно, что коэффициент α численно равен относительному приращению сопротивления данного металла при увеличении температуры на один градус.

2. ОПИСАНИЕ УСТАНОВКИ

На рис.1 показана схема измерения электросопротивления. Здесь R -

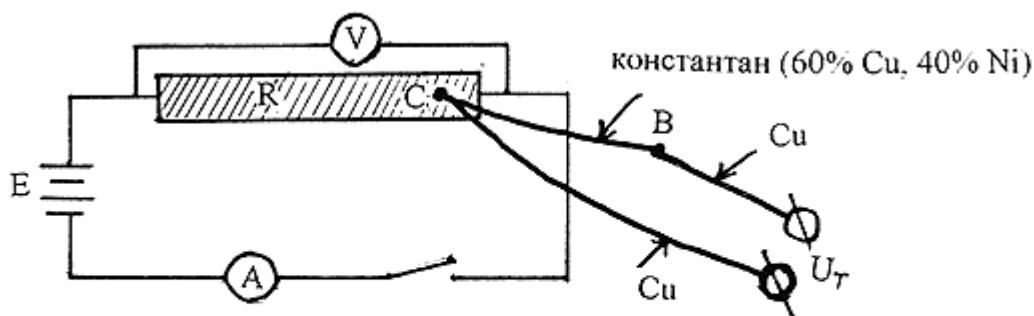


Рис.1

измеряемое электросопротивление в виде медной проволоки, намотанной на специальный стержень - трубу. Амперметром измеряется сила тока I_H . Вольтметром - падение напряжения U_H на участке цепи с сопротивлением R . E - ЭДС источника тока. (Нагревание медной проволоки происходит за счет электрического тока I_H в соответствии с законом Джоуля-Ленца)

Для измерения температуры T исследуемого сопротивления R в точке A обеспечен тепловой контакт специального датчика типа термопары (датчика температуры) с измеряемым проводом. В термопаре используется явление термоэлектродвижущей силы (термоэлектричество), при электрическом контакте двух различных металлов. Для данной пары металлов, например, медь-константан, контактная разность потенциалов зависит только от температуры. На рис.1 разность потенциалов U_T измеряется между точками A и B . Эта величина линейно зависит от температуры T в точке A образца при постоянной температуре T_0 в точке A , расположенной вне образца.

Хорошо известно, что если один из металлов заменить полупроводником, то термоэлектродвижущая сила может увеличиться на 4-5 порядков.

В данной измерительной установке в качестве датчика температуры использован полупроводниковый диод, принцип действия которого основан на появлении контактной разности потенциалов на границе полупроводников n - и p -типа. Используется выпрямляющее действие диода, при котором в прямом направлении на диоде контактная разность потенциалов практически линейно зависит от температуры.

На рис.2 дан внешний вид измеряемого сопротивления 2 в виде медной проволоки, намотанной на трубу 1, в которую вставлен датчик температуры 3.

Электропитание производится через разъем 7 (рис.2), подключаемый через кабель к разъему измерительной системы - термостата ИСТ-2М (см. рис.3).

На переднюю панель ИСТ-2М вынесены следующие элементы схемы или органы управления (рис.3).

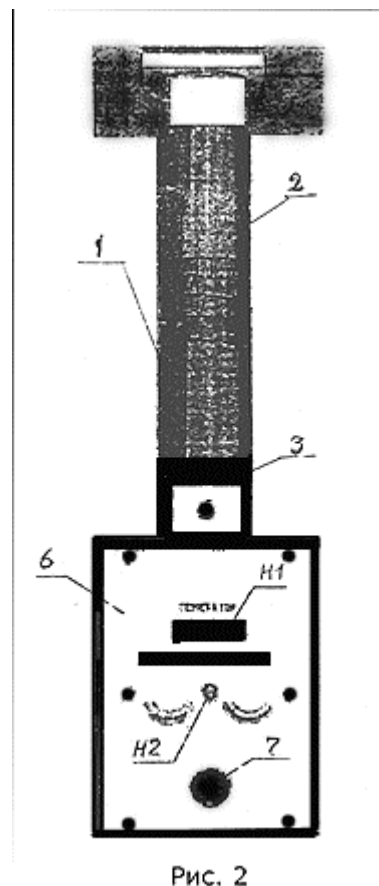
«Сеть» - тумблер включения сети.

$H1$ - 4-разрядный цифровой индикатор. Его свечение свидетельствует о включении питания прибора. Интерпретация показаний определяется нажатой кнопкой переключателя:

« U_H » - напряжение на концах медной проволоки, в вольтах;

« I_H » - ток в измерительной цепи, в миллиамперах;

« T_1 » - температура подключенного к системе температурного датчика в $^{\circ}C$ с разрешением 0,1 градуса; таким образом, термометр измеряет температуру проволоки, если нажата кнопка T_1 (см.рис.3).



«Температура 40...80...100» - ручка температуры термостата в пределах 20-100°C.

«Нагрев 0...10...20» - ручка регулировки напряжения питания нагревателя в пределах от 0 до 20 В.

«Вкл» - тумблер включения нагревателя.

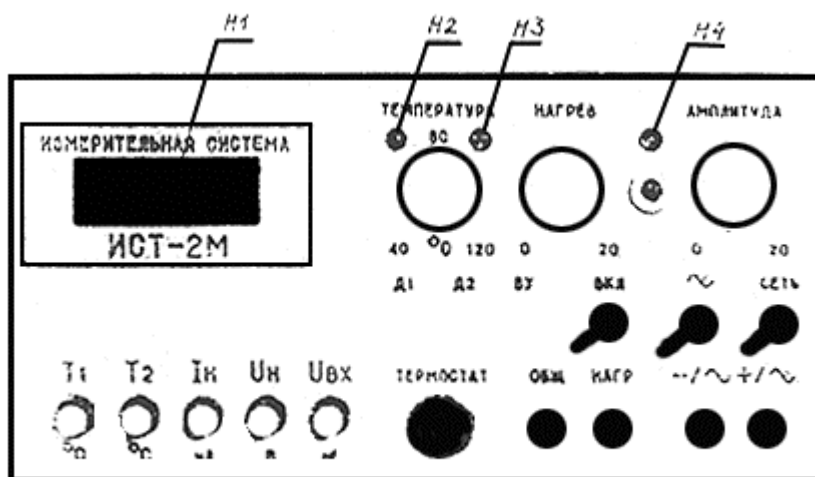


Рис. 3 Измерительная система ИСТ-2М

Все измерения производятся в режиме термостатирования ($T=const$). Необходимая температура измерения устанавливается ручкой «Температура». Если температура ниже установленной регулятором «Температура», то светится зеленый индикатор $H2$ (см. рис.3). Если же температура приближается к установленной регулятором «Температура», то включается терморегулятор и напряжение на нагревателе снижается. Соответствующее напряжение указано в таблице и устанавливается ручкой «нагрев». При этом светятся два индикатора: зеленый $H2$ и красный $H3$. Система переходит в режим термостатирования ($T_1=const$). Если светится только красный индикатор, то система переходит в режим термостатирования при остывании объекта.

3. ЭКСПЕРИМЕНТ

Сопротивление R при комнатной температуре определяется при пониженном напряжении (5-6 В) на обмотке проволоки во избежание ее нагрева. Затем устанавливается рабочее напряжение U_H в пределах от 10 В до 20 В, задавая нужные значения температуры с помощью регулятора «Температура» (см. рис.3 и таблицу ниже).

После стабилизации каждого значения температуры T °С измеряется напряжение U_H в вольтах и ток I_H в миллиамперах в обмотке из проволоки.

По формуле $R = \frac{U_H}{I_H}$ вычисляется исследуемое электросопротивление.

Результаты измерений и сопротивление R записываются в таблицу.

Таблица

$T^{\circ}\text{C}$	$U_{\text{H}}, \text{В}$	I_{H}, mA	$R, \text{Ом}$
20	5		
40	10		
50	15		
60	15		
70	18		
80	18		
90	19		

а) Желательно иметь 10-15 значений R и T для построения графика зависимости R от T .

б) На миллиметровке построить график зависимости электросопротивления R от температуры $T^{\circ}\text{C}$.

в) Найти значение $\frac{dR}{dT}$ как тангенс угла наклона прямой $R(T)$.

г) Определите R_0 методом экстраполяции прямой $R(T)$ на ось $T^{\circ}\text{C} = 0$ как отрезок, отсекаемый этой прямой на оси ординат при 0°C .

д) Определите температурный коэффициент сопротивления меди с учетом абсолютной ошибки измерений по формуле

$$\alpha = \frac{1}{R_0} \frac{dR}{dT} \pm \Delta\alpha .$$

Сравните полученные данные с табличными значениями α для меди.

ЛИТЕРАТУРА

1. Белов Д.В. Электромагнетизм и волновая оптика. - Изд. МГУ, 1994. § 10.
2. Савельев И.В. Курс общей физики. Т.II. - М., Наука. 1977.
3. Яворский Б.М., Пинский А.А. Механика, молекулярная физика и электродинамика. - М., Наука. 1981.