

## ИЗУЧЕНИЕ ЗАВИСИМОСТИ СОПРОТИВЛЕНИЯ ПРОВОДНИКОВ ОТ ТЕМПЕРАТУРЫ.

**Цель работы:** Знакомство с классической и зонной теорией электропроводности веществ и изучение влияния температуры на электропроводность металлических проводников.

**Оборудование:** Измеряемое сопротивление в термостате с термометром, цифровой измеритель сопротивлений, блок нагревателя.

### КРАТКИЕ СВЕДЕНИЯ ИЗ ТЕОРИИ

Сопротивление проводников зависит от их формы и размеров. Эта зависимость особенно проста, если проводники имеют форму цилиндра постоянного поперечного сечения. Тогда сопротивление оказывается равным:

$$R = \rho \frac{l}{S} \quad (1)$$

где  $l$ - длина проводника,  $S$ - площадь поперечного сечения, коэффициент пропорциональности  $\rho$  называется **удельным сопротивлением данного вещества**.

Величина, обратная удельному сопротивлению, называется удельной электропроводностью вещества.

**За единицу сопротивления принято сопротивление такого проводника, в котором при прохождении тока в 1А возникает разность потенциалов на его концах в 1В. Эта единица сопротивления называется омом.**

Удельное сопротивление зависит не только от рода вещества, но и от его состояния, в частности, от температуры. Эта зависимость характеризуется **температурным коэффициентом сопротивления данного вещества  $\alpha$** , который определяется выражением:

$$\alpha = \frac{1}{R_0} \cdot \frac{dR}{dt} \quad (2)$$

**Коэффициент  $\alpha$  определяет относительное приращение сопротивления при увеличении температуры на один градус.**

Температурный коэффициент сопротивления для данного вещества различен при разных температурах. Величина  $\alpha$  имеет одно значение, например при повышении температуры от 20 до 21<sup>0</sup> С и другое - при повышении температуры от 200 до 201<sup>0</sup>С, т.е. удельное сопротивление изменяется с температурой не по линейному закону. Однако, для многих проводников, к которым относятся все металлы, изменение  $\alpha$  с температурой не очень велики. При **обычных температурах** почти для всех металлов **удельное сопротивление меняется с температурой линейно:**

$$\rho = \rho_0(1 + \alpha \cdot t) \quad (3)$$

где  $\rho_0$ —удельное сопротивление при температуре  $t = 0^0\text{C}$ ;  $\rho$  - удельное сопротивление при  $t^0\text{C}$ .

Соответственно и

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

где  $R_0$ —сопротивление при  $0^\circ\text{C}$ ,  $R_t$ — сопротивление при  $t^\circ\text{C}$ .

При высоких температурах ( $1000^\circ$  и более) эта зависимость более сложная и определяется формулой

$$R_t = R_0(1 + \alpha \cdot t + \beta \cdot t^2) \quad (5)$$

Температурный коэффициент сопротивления для металлов всегда больше нуля ( $\alpha > 0$ ), так как при повышении температуры сопротивление металлов увеличивается. Для чистых металлов коэффициент  $\alpha$  близок

$$k = \frac{1}{273} = 0.00367 \text{град}^{-1}$$

Некоторые сплавы имеют весьма малый коэффициент  $\alpha$ . Примером может служить манганин (**Манганин** — прецизионный сплав на основе меди (Cu) (около 85 %) с добавкой марганца (Mn) (11,5—13,5 %) и никеля (Ni) (2,5—3,5 %)).

$$\alpha = \pm(3 - 6) \cdot 10^{-5} \text{град}^{-1}$$

Поэтому проволока из манганина применяется для изготовления точных образцов (эталонов) сопротивления.

Линейная зависимость нарушается и при очень низких температурах, порядка 1-20К. При температурах ниже  $10-15^\circ\text{K}$  в некоторых веществах возникает состояние сверхпроводимости, при котором электрическое сопротивление становится исчезающе малым (обращается в нуль).

Согласно классической электронной теории электропроводности, разработанной голландским физиком Лоренцем в XIX веке, в проводниках, в частности в металлах, имеются свободные электроны, способные перемещаться по металлу. Такие электроны называют электронами проводимости. Положительные ионы металла образуют кристаллическую решетку и могут совершать только колебания относительно некоторых центров. Электроны проводимости при своем движении испытывают соударения с ионами решетки. При отсутствии внешнего электрического поля электроны совершают только беспорядочное тепловое движение, ток в металле не возникает. При наложении внешнего электрического поля электроны получают дополнительное, упорядоченное движение в направлении, противоположном направлению поля. И тогда фактическое движение электронов представляет собой сумму беспорядочного и упорядоченного движений, а следовательно, появляется преимущественное направление движения электронов, так что возникает перенос электрического заряда, т.е. электрический ток.

В классической теории электропроводности считается, что электроны проводимости могут иметь любые значения энергии. В отличие от этого, согласно квантовой теории энергия электронов в любом кристаллическом веществе может принимать лишь «дискретные» (т.е. разделенные конечными промежутками) значения, характеризуемые энергетическими уровнями. Для простейшей энергетической системы - атома водорода, изменение потенциальной энергии в зависимости от расстояния между электроном и ядром можно представить рисунком 1. Здесь кривая 1 представ-

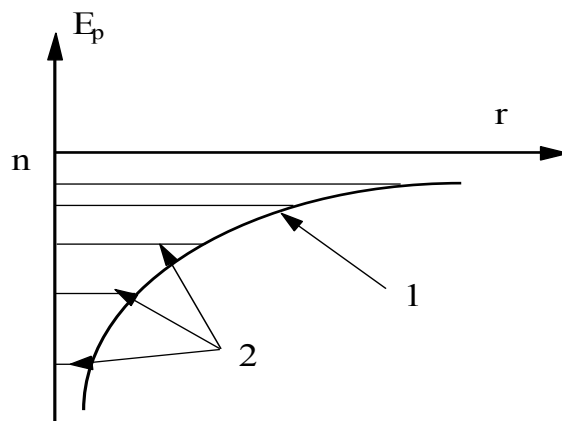


Рис. 1

ляет изменение энергии согласно классической физике, 2-энергетические уровни. В нормальном невозбужденном состоянии атом водорода находится на самом нижнем энергетическом уровне. При этом расстояние между электроном и ядром минимально.

При возбуждении атома за счет поглощения энергии извне, атом переходит на один из более высоких энергетических уровней. Для свободных атомов водорода энергетические уровни совершенно одинаковы. При образовании молекулы водорода  $H_2$  атомы сближаются настолько сильно, что их электроны начинают вращаться вокруг обоих ядер. Их взаимодействие в молекуле настолько сильное, что энергетические уровни для каждого электрона несколько смещаются. В результате этого вместо одного уровня для атома получается по два близко лежащих подуровня для молекулы. Если же из атомов водорода образуется кристалл, содержащий  $N$  атомов, то в этом случае внутри кристалла становятся свободными все  $N$  электронов, а их взаимное влияние друг на друга приводит к тому, что каждый из энергетических уровней свободного атома расщепляется на  $N$  близко расположенных подуровней, образующих энергетическую зону (рис.2). В случае образования кристаллов из более сложных атомов, свободными внутри кристалла становятся валентные электроны. Расщепление уровней и образование энергетических зон происходит только для валентных электронов.

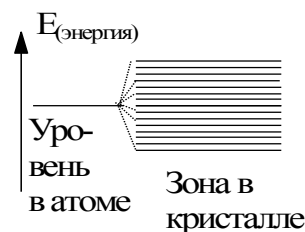


рис.2

В нормальном невозбужденном состоянии валентные электроны занимают самые низкие из свободных от внутренних электронов энергетические уровни, которым соответствуют самые малые значения энергии. Уровень, который занимает самый слабо связанный с ядром валентный электрон, называется нормальным. При образовании кристалла этот уровень расщепляется в энергетическую зону, получившую название валентной зоны. Первый из возбужденных уровней расщепляется в энергетическую зону, называемую зоной проводимости. Промежутки между энергетическими зонами, в которых нет разрешенных значений энергии, называются запретными или запрещенными зонами. Ширина разрешенных и запрещенных зон не зависит от размеров кристалла. Поэтому чем больше атомов содержит кристалл, тем теснее располагаются уровни в зоне. Ширина разрешенных зон по порядку величины составляет несколько электрон вольт. Так, если кристалл содержит  $10^{23}$  атомов, то расстояние между соседними подуровнями зоны будет составлять примерно  $10^{-23}$  эВ. Поэтому если электрону, находящемуся на таком энергетическом подуровне, выше которого находятся свободные подуровни, сообщить энергию порядка  $10^{-23}$  эВ, то этого будет достаточно для перевода электрона в более высокое энергетическое состояние. Переход электрона с одного энергетического уровня на другой означает изменение его кинетической энергии, а значит, и изменение скорости. Таким образом, нахождение электронов на разных энергетических уровнях соответствует разным скоростям движения в кристалле.

Распределение электронов по энергетическим уровням происходит в соответствии с принципом Паули, который для данного случая утверждает, что на одном энергетическом уровне не может быть более двух электронов. При этом электроны должны отличаться друг от друга направлением своих собственных механических моментов, т. е. спинами.

Рассмотренные квантово-механические закономерности позволяют объяснить явление электропроводности. При отсутствии внешнего электрического поля электроны определенным образом заполняют энергетические уровни, что соответствует определенному набору скоростей электронов. Направление скоростей распределено симметрично, что соответствует, как и в классической теории, их беспорядочному движению и, следовательно, отсутствию в кристалле направленного перемещения заряженных частиц, т.е. электрическому току. При наличии электрического поля возможны несколько случаев в зависимости от распределения электронов по зонам и строения зон. Кристаллы проводников (в частности металлов) имеют такое строение, что валентная

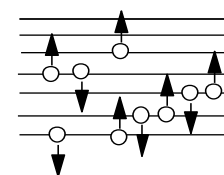


Рис. 3

зона лишь частично заполнена электронами или валентная зона перекрывается зоной проводимости. При этом имеются свободные энергетические уровни, и поэтому даже слабые внешние поля приводят к переводу электронов на более высокие энергетические уровни. Таким образом, под действием внешнего электрического поля энергия электронов может измениться, и электроны могут приобрести добавочную скорость против направления поля. Это направленное перемещение электронов приводит к возникновению электрического тока в кристалле.

Рассмотренная картина движения электронов приводит также к объяснению электрического сопротивления металлов. Между двумя последовательными соударениями электрон движется под действием поля с ускорением и приобретает определенную энергию. Эта энергия передается полностью или частично положительным ионам, расположенным в узлах кристаллической решетки при соударении и превращается в энергию беспорядочного колебания ионов, т.е. в тепло. Поэтому при наличии тока металлы нагреваются. Таким образом, причина электрического сопротивления заключается в соударениях электронов с положительными ионами решетки металлов. Увеличение температуры металла приводит не только к увеличению скорости беспорядочного движения электронов, но и одновременно к увеличению амплитуды беспорядочного колебания ионов. Эффективные размеры ионов как бы возрастают с ростом температуры. Частота столкновений электронов с ионами увеличивается. Направленное движение электронов становится все более затруднительным, следовательно, электропроводность металла с увеличением температуры уменьшается, сопротивление же, наоборот, увеличивается.

## ОПИСАНИЕ УСТАНОВКИ

Лабораторный стенд для изучения зависимости сопротивления проводника от температуры (Рис. 4) состоит из электрической печи 1, в которую помещен образец 4. Сопротивление проводника измеряется мультиметром 2. Контроль температуры осуществляется цифровым индикатором 3. Включение/выключение установки осуществляется переключателем 6, а изменение температуры кнопкой 5.

**ВНИМАНИЕ!!! При однократном нажатии кнопки 5 значение температуры увеличивается на 10 градусов.**

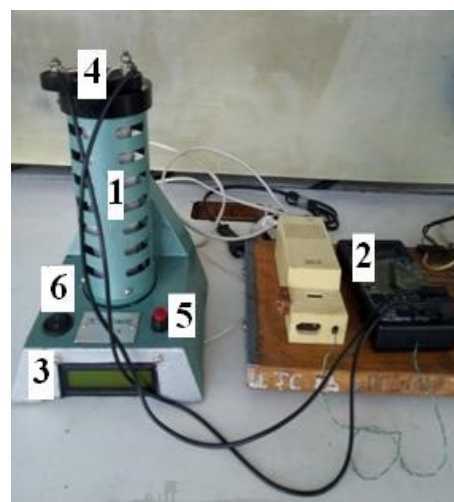


Рис. 4. Лабораторный стенд

## ПОРЯДОК ВЫПОЛНЕНИЯ РАБОТЫ

1. Изучить теорию работы, установку и порядок выполнения работы и получить у преподавателя допуск к выполнению экспериментов.
2. Включить лабораторный стенд и мультиметр в сеть питания, нажать переключатель 6, на цифровом индикаторе температур установится температура  $R_1 = 20^{\circ}\text{C}$ .
3. Дождаться когда на индикаторе 3 установится установленная температура. Записать показания температуры и сопротивления в таблицу 1, нажать кнопку 5.
4. Продолжить нагревание, регистрируя сопротивление через интервалы температуры в  $10^{\circ}\text{C}$  до температуры  $110^{\circ}\text{C}$ .
5. Производить измерения температуры и сопротивления в соответствии с пунктом 3.

6. По данным табл.1 строится график зависимости  $R_{cp}$  от  $t$ . Прямую необходимо проводить таким образом, чтобы она проходила через как можно большее число экспериментальных точек, а те точки, которые на прямую не укладываются, должны быть расположены по обе стороны от прямой примерно на одинаковых расстояниях.

Таблица 1

№	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
$t^{\circ}\text{C}$	20	30	40	50	60	70	80	90	100	110
$R, [\text{om}]$										

7. Взяв два значения температуры  $t_2$  и  $t_3$  и соответствующие им средние значения сопротивлений  $R_2$  и  $R_3$  из формул  $R_2=R_1(1+\alpha t_2)$  и  $R_3=R_1(1+\alpha t_3)$ , где  $R_1$  начальная температура, находится значение температурного коэффициента сопротивления

$$\alpha = \frac{R_3 - R_2}{R_1 \cdot (t_3 - t_2)}$$

### КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. В каких единицах измеряется сопротивление в системе СИ?
2. Определите температурный коэффициент сопротивления.
3. Какой знак (положительный или отрицательный) имеет температурный коэффициент сопротивления у металлов?
4. При каких температурах у металлов нарушается линейная зависимость сопротивления от температуры?
5. Что является носителем заряда в проводнике?
6. Чем объясняется возникновение сопротивления в проводнике протеканию электрического тока?

Таблица удельных сопротивлений и ТКС некоторых проводников

проводник	Уд.сопроти вление, ом·м	ТКС, $10^{-3}\text{C}^{-1}$
Алюминий	$2,7 \cdot 10^{-8}$	4,2
Вольфрам	$5,5 \cdot 10^{-8}$	5
Графит	$800,0 \cdot 10^{-8}$	
Железо	$10,0 \cdot 10^{-8}$	6
Золото	$2,2 \cdot 10^{-8}$	4
Иридий	$4,74 \cdot 10^{-8}$	
Константан	$50,0 \cdot 10^{-8}$	0,05
Магний	$4,4 \cdot 10^{-8}$	3,9
Манганин	$43,0 \cdot 10^{-8}$	0,01
Медь	$1,72 \cdot 10^{-8}$	4,3
Молибден	$5,4 \cdot 10^{-8}$	
Никель	$8,7 \cdot 10^{-8}$	6,5
Нихром	$112,0 \cdot 10^{-8}$	0,1
Олово	$12,0 \cdot 10^{-8}$	4,4
Платина	$10,7 \cdot 10^{-8}$	5,9
Ртуть	$96,0 \cdot 10^{-8}$	1,0
Свинец	$20,8 \cdot 10^{-8}$	3,7
Серебро	$1,6 \cdot 10^{-8}$	4,1
Сталь	$13,0 \cdot 10^{-8}$	1-4
Цинк	$5,9 \cdot 10^{-8}$	4,2
Чугун	$100,0 \cdot 10^{-8}$	1,0

## ЛИТЕРАТУРА:

1. Савельев И.В. Курс общей физики Т. 2: Электричество и магнетизм. Волны. Оптика. -М.: Наука. Гл. ред. физ.-мат. лит., 1988.
2. Тамм И.Е. Основы теории электричества. - М.: Наука, 1976
3. Иродов И. Е. Электромагнетизм. -М.: Лаборатория базовых знаний, 2002.
4. Калашников Э.Г. Электричество. – М.:Наука, 1977.
5. Трапицын Н.Ф. Краткий курс общей физики. Ч.3. Электричество и магнетизм. – Бишкек: Изд-во КРСУ, 1996
6. Зисман Г.А., Тодес О.М. Курс общей физики. Т.2. Электричество и магнетизм. – М.: Наука, 1974.
7. Физический практикум. Ч.2./ Под ред. В.И. Ивероновой. -М.: «Наука». -1968.