

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 1

ИЗУЧЕНИЕ ТЕМПЕРАТУРНОЙ ЗАВИСИМОСТИ СОПРОТИВЛЕНИЯ ПРОВОДНИКОВ

(Продолжительность лабораторной работы 4 ч;
домашняя подготовка — 2 ч)

Цель работы – определение температурных коэффициентов сопротивления проводниковых материалов и резисторов.

Оборудование: модуль «Модуль питания и USB осциллограф», модуль «Магнитомягкие материалы. Температурный коэффициент сопротивления / емкости», модуль «Мультиметры», модуль «Измеритель RLC», минимодули «ТКС проводников» и «ТКС резисторов», соединительные проводники.

I. КРАТКИЕ ПРИКЛАДНЫЕ И ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ СВЕДЕНИЯ ПО ИЗУЧАЕМЫМ ВОПРОСАМ

Классификация веществ по электрическим свойствам. Все вещества по электрическим свойствам разделяют на три класса: проводники, диэлектрики и полупроводники. К *проводникам* относятся металлы, обладающие малым удельным сопротивлением – менее 10^{-6} Ом·м. Удельное сопротивление *полупроводников* обычно лежит в пределах 10^{-6} - 10^{14} Ом·м. Материалы, у которых величина удельного сопротивления больше 10^{14} Ом·м, считаются *диэлектриками*. В зависимости от внешних условий (температуры, давления) одно и то же вещество может проявлять разные электрические свойства. Например, германий при температуре жидкого азота 77 К – диэлектрик, при комнатной температуре – полупроводник, а в жидком виде – проводник.

Зонная теория даёт более обоснованную классификацию веществ. Согласно современной зонной теории твёрдых тел свободные электроны внутри твёрдого тела так же, как и в атомах, могут иметь только некоторые фиксированные значения энергии, т.е. энергия электронов квантуется. Разрешённые уровни энергии при объединении атомов в кристалл образуют совокупность близко расположенных уровней – «разрешённые» зоны, разделённые «запрещёнными» зонами. Каждая разрешённая зона сохраняет наименование уровней, из которых она образована, например, $1s$, $2s$, $2p$ и так далее.

Зона, образованная из энергетических уровней самых удалённых от ядра атома валентных электронов, называется *валентной зоной*. Это самая верхняя из зон, заселённых электронами при температуре $T = 0$ К (-273 °С). Энергетические зоны валентных электронов для металлов, диэлектриков и полупроводников и их заполнение при $T = 0$ К представлены на рисунке 1. Клеточками обозначены занятые уровни энергии. Горизонтальные линии – свободные от электронов разрешённые уровни энергии.

У металлов при $T = 0$ К валентная зона заполнена частично (рисунок 1). Например, в кристалле щелочного металла натрия $_{11}\text{Na}$ в валентной зоне $3s$ электронами заполнена только половина уровней.

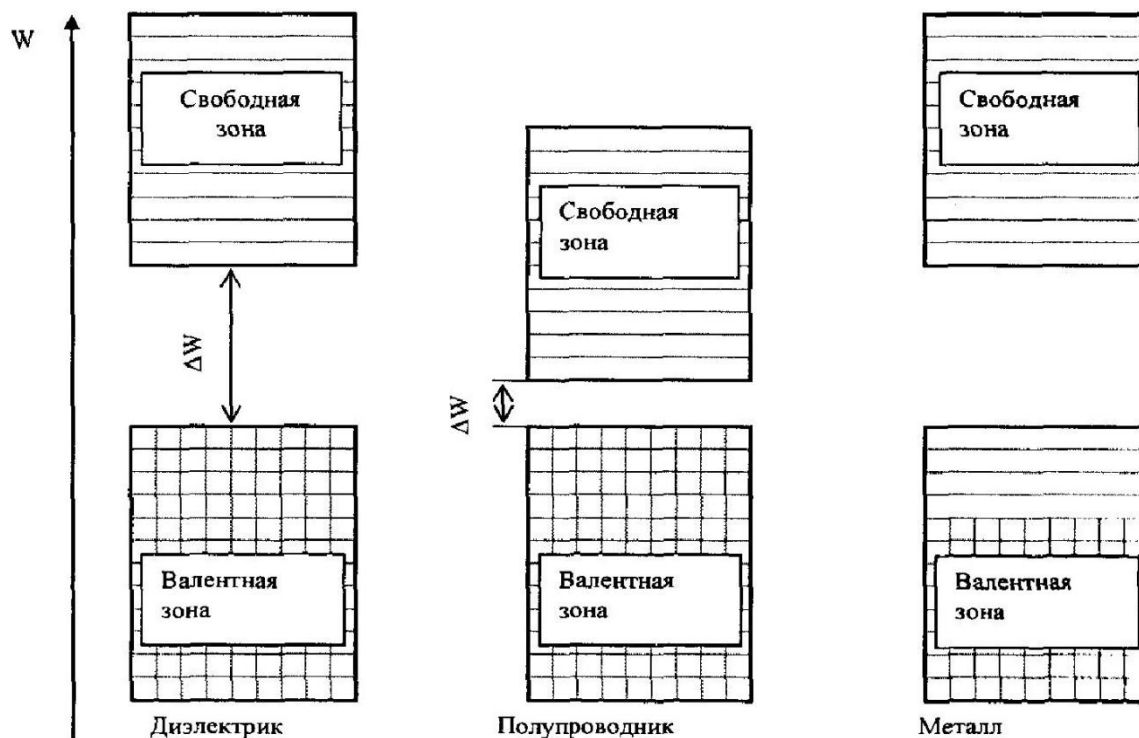


Рисунок 1 – Энергетические уровни различных типов материалов

Чтобы в веществе при наложении электрического поля возник электрический ток, электроны должны начать двигаться направленно. Возникновение тока сопровождается увеличением энергии каждого электрона (к энергии теплового движения добавляется энергия направленного движения). В металлах электрон, получив за счет электрического поля дополнительную энергию на пути свободного пробега, переходит на более высокий уровень энергии в валентной зоне. Освободившийся уровень занимает электрон, расположенный ниже на «энергетической лестнице» и т.д. – возникает электрический ток.

Удельная проводимость и удельное электрическое сопротивление. От концентрации свободных зарядов зависит удельная проводимость σ , обратная удельному сопротивлению ρ

$$\sigma = \frac{1}{\rho}. \quad (1)$$

Удельная проводимость металлов не зависит от напряженности электрического поля, значение которой может изменяться в довольно широких пределах, что полностью соответствует закону Ома (дифференциальная форма записи)

$$j = \sigma E, \quad (2)$$

где j – плотность тока, А/м²;

E – напряженность электрического поля, В/м.

Сопротивление проводника простейшим способом определяют, используя

закон Ома для участка электрической цепи. Для этого нужно измерить вольтметром разность потенциалов U на концах проводника и амперметром силу тока I в проводнике и поделить одно на другое. Этот метод измерений (по току и напряжению) называют *техническим*. Однако при таком способе измерения вносятся систематические ошибки, величина которых зависит от сопротивлений измерительных приборов и величины измеряемых сопротивлений.

Действительно, при включении приборов по схеме на рисунке 2 показания вольтметра соответствуют напряжению на сопротивлении ($U_V = U$), но показания амперметра соответствуют не току через сопротивление, а сумме токов через проводник и вольтметр

$$I_A = I_V + I. \quad (3)$$

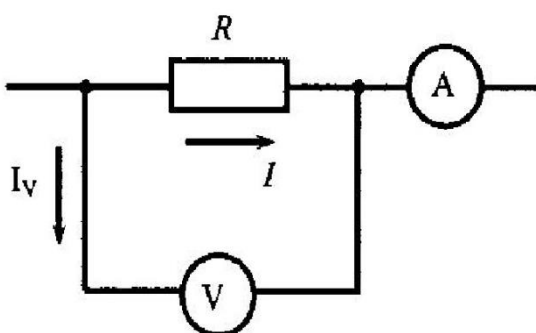


Рисунок 2 – Схема электрическая принципиальная измерения сопротивления вольтметром и амперметром

При включении по схеме на рисунке 3 показания амперметра соответствуют току через сопротивление ($I_A = I$), но вольтметр показывает не напряжение на сопротивлении, а суммарное напряжение на сопротивлении и амперметре

$$U_V = IR + IR_A. \quad (4)$$

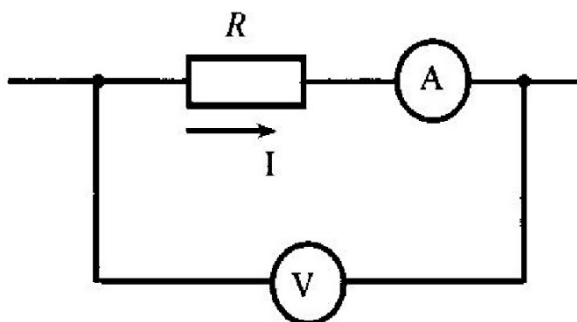


Рисунок 3 – Схема электрическая принципиальная измерения сопротивления вольтметром и амперметром

Из выражений (2) и (4) следует, что для уменьшения погрешностей, вносимых при подключении приборов, сопротивление амперметра должно

быть малым, а сопротивление вольтметра – большим. Данный метод лежит в основе работы *омметров*. Прибор прикладывает известную разность потенциалов к измеряемому сопротивлению и измеряет протекающий ток.

Мостовой метод измерения сопротивления позволяет избавиться от ошибок, вносимых электроизмерительными приборами, так как здесь эти приборы используются не для измерения силы тока и напряжения, идущих в дальнейшие расчеты, а только в качестве чувствительных индикаторов, работающих либо в режиме постоянного показания, либо, чаще, в режиме отсутствия тока (нуль–метод).

Активное сопротивление зависит от формы и размеров проводника

$$R = \int_0^l \rho \frac{dl}{S}. \quad (5)$$

Для однородного проводника с поперечным сечением S и длиной l

$$R = \rho \frac{l}{S}. \quad (6)$$

Удельное электрическое сопротивление $\rho = RS/l$ является характеристикой материала проводника.

Полагая электрическое поле внутри проводника однородным, выразим напряжение U через напряжённость E и длину проводника

$$U = El. \quad (7)$$

Закон Ома в дифференциальной форме записи

$$j = \sigma E, \quad (8)$$

где $j = I/S$ – плотность тока в проводнике.

С другой стороны, плотность тока может быть выражена через концентрацию n свободных зарядов и скорость v_n их направленного движения, которая определяется напряжённостью электрического поля внутри проводника.

Пусть каждый носитель имеет заряд e , тогда весь заряд q , перенесённый через поперечное сечение проводника за время t , будет равен Ne , где N – число зарядов, прошедших за это время сквозь выделенное сечение (рисунок 4). Если средняя скорость направленного движения v_n , то за время t сечение S пересекут лишь те носители, которые находились не дальше, чем на расстоянии $v_n t$ от него. Число носителей N пропорционально их концентрации n и объёму S элемента проводника

$$N = nv_n t S. \quad (9)$$

Тогда перенесённый заряд определится по формуле

$$q = eN = env_{\text{H}}tS. \quad (10)$$

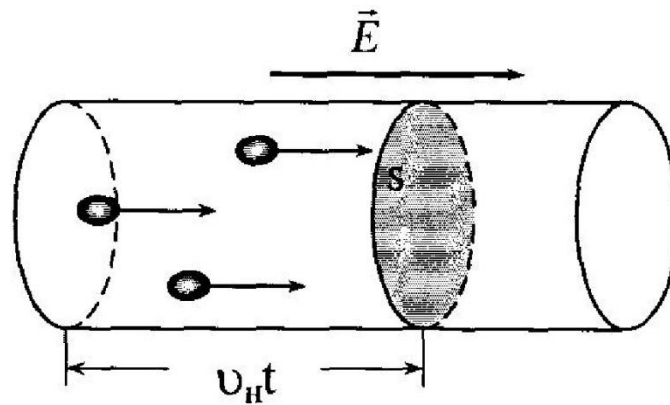


Рисунок 4 – Движение электронов через сечение проводника

Сила тока в проводнике численно равна заряду, протекающему за единицу времени

$$I = env_{\text{H}}S. \quad (11)$$

Из определения плотности тока $j = I/S$ и уравнения (11) получим

$$j = nev_{\text{H}}. \quad (12)$$

Из уравнений (2) и (12) следует, что средняя скорость направленного движения носителей тока прямо пропорциональна напряжённости электрического поля E

$$v_{\text{H}} = \frac{\sigma E}{ne}. \quad (13)$$

Приравнивая правые части формул (12) и (2) и подставляя v_{H} (13), получаем зависимость удельной проводимости от характеристик носителей тока

$$\sigma = neb, \quad (14)$$

где n – концентрация носителей;

e – заряд электрона;

b – коэффициент пропорциональности, называемый *подвижностью носителей зарядов*.

В металлах (проводниках) концентрация носителей не зависит от температуры, а в полупроводниках и диэлектриках она с ростом температуры быстро увеличивается – это основное отличие проводника от полупроводника и диэлектрика.

Температурный коэффициент удельного сопротивления. Подвижность носителей с ростом температуры уменьшается, так как электроны чаще сталкиваются с ионами кристаллической решётки, амплитуда колебаний

которых растёт с увеличением температуры. При постоянстве n это ведёт к уменьшению проводимости, и сопротивление проводников слабо увеличивается при повышении температуры

$$R_t = R_0(1 + at), \quad (15)$$

где t – температура в градусах;

R_0 – сопротивление проводника при $0\text{ }^\circ\text{C}$;

a – температурный коэффициент удельного сопротивления (ТКС).

Коэффициент a называют *температурным коэффициентом удельного сопротивления*. Он показывает относительное изменение первоначального сопротивления при нагревании его на один градус

$$a = \frac{R_t - R_0}{R_0 t}. \quad (16)$$

Для металлов значение a достаточно велико ($4 \cdot 10^{-3}\text{ K}^{-1}$), а у большинства сплавов – значительно меньше. Измеряется ТКС в кельвинах или градусах в минус первой степени или в процентах.

Из формулы следует, что для определения температурного коэффициента удельного сопротивления металла необходимо знать сопротивление металла R_0 при $0\text{ }^\circ\text{C}$ и при некоторой температуре t . График зависимости сопротивления от температуры представлен на рисунке 5.

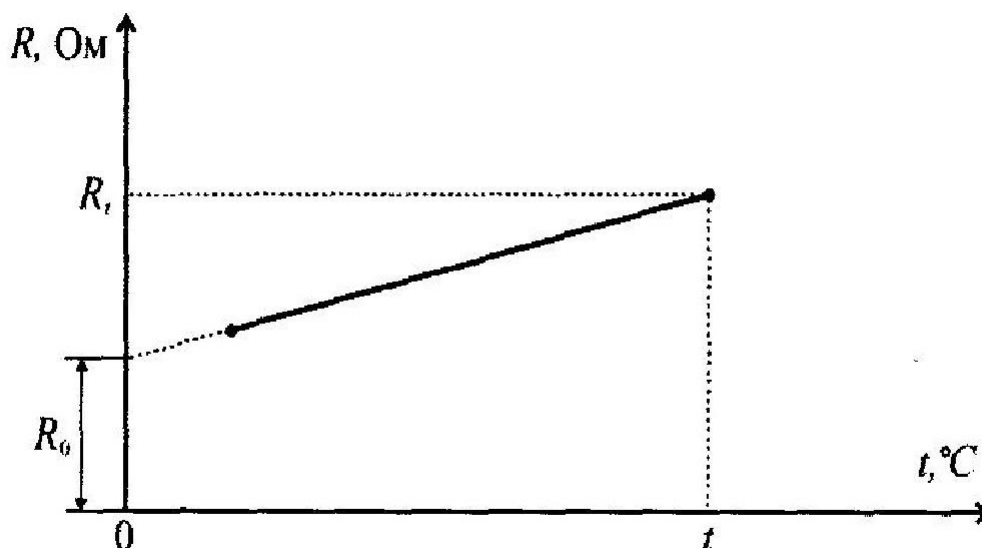


Рисунок 5 – График зависимости сопротивления от температуры

Согласно формуле (16) график имеет вид прямой линии, продолжение которой (экстраполяция) пересекает ось ординат в точке R_0 .

У непроволочных резисторов ТКС не превышает $\pm 0,04$ — $0,2\%$, а у проволочных — $\pm 0,003$ — $0,2\%$.

II. ПОРЯДОК ВЫПОЛНЕНИЯ ЛАБОРАТОРНОЙ РАБОТЫ

1. Изучить теоретический материал, достаточный для выполнения лабораторной работы. Описать преподавателю лабораторное оборудование, порядок выполнения работы и получить у него допуск к проведению лабораторной работы.

2. Согласно рисунку 6 выполнить электрические соединения модулей. **Монтаж схемы производить при отключенном питании.** Соединительный проводник к гнезду «+15 В» модуля «Модуль питания и USB осциллограф» не подключать.

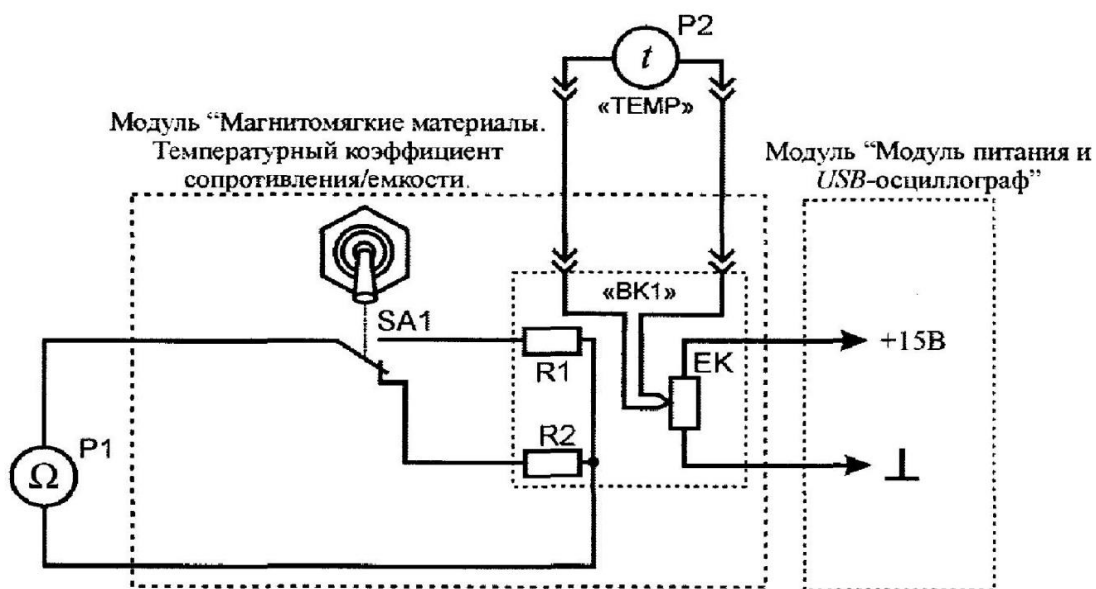


Рисунок 6 – Схема электрическая соединений типового комплекта для измерения ТКС проводников

Установить минимодуль «ТКС проводников» в соответствующие гнезда, расположенные в области «Температурный коэффициент сопротивления / емкости» модуля «Магнитомягкие материалы». Соединить термопару минимодуля (гнезда BK2) с мультиметром (гнезда «TEMP») при помощи соединительного проводника для подключения термопары минимодуля к мультиметру.

В качестве омметра P1 использовать RLC-метр в режиме измерения сопротивления.

В качестве термометра P2 использовать мультиметр 1 модуля «Мультиметры» в режиме измерения температуры «°C».

3. После проверки правильности соединений схемы преподавателем или лаборантом подать напряжение питания на комплект включением автоматического выключателя и УЗО модуля «Модуль питания и USB осциллограф». Включить мультиметр. Включить RLC-метр, выбрать режим измерения сопротивления (кнопка L/C/R).

4. Значения сопротивлений проводников R1, R2 и комнатной температуры T занести в таблицу 1. Переключения между проводниками с сопротивлениями R1 и R2 осуществляется тумблером SA1. Проводник с сопротивлением R1 – медь (верхнее положение ручки тумблера). Проводник с сопротивлением R2 –

вольфрам (нижнее положение ручки тумблера).

5. Включить нагрев минимодуля (подключить соединительный проводник к гнезду «+15 В» модуля «Модуль питания и USB осциллограф»). Если показания температуры ($P2$) уменьшаются, то следует изменить полярность подключения термопары. Нагревать проводники до $100\text{ }^{\circ}\text{C}$, и через каждые $5\text{ }^{\circ}\text{C}$ заносить значения температуры и сопротивления проводников в таблицу 1. Если установившаяся температура не изменяется в течение 5 минут более чем на $1\text{--}2\text{ }^{\circ}\text{C}$, нагрев прекратить. **Не допускается нагревать образцы выше $100\text{ }^{\circ}\text{C}$!** Отключить нагрев минимодуля (отключить соединительный проводник от гнезда «+15 В» модуля «Модуль питания и USB осциллограф»).

Таблица 1 – Определение ТКС проводников

№	Температура T , $^{\circ}\text{C}$	Сопротивление проводника R , Ом						ТКС, $^{\circ}\text{C}^{-1}$	
		$R1$ (медь)			$R2$ (вольфрам)			$R1$ (медь)	$R2$ (вольфрам)
		на- грев	охлажде- ние	сред- нее	на- грев	охлажде- ние	сред- нее		
1									
2									

6. Используя данные таблицы 1, построить график зависимости $R(T)$. Рассчитать ТКС проводников, используя формулу (16), значения ТКС занести в таблицу 1.

7. Заменить минимодуль «ТКС проводников» на «ТКС резисторов». Соединить термопару минимодуля (гнезда ВК1) с мультиметром (гнезда «ТЕМР») при помощи соединительного проводника для подключения термопары минимодуля к мультиметру.

Значения сопротивлений резисторов $R1$, $R2$ и комнатной температуры T занести в таблицу 2.

Таблица 2 – Определение ТКС резисторов

№	Температура T , $^{\circ}\text{C}$	Сопротивление резистора R , Ом						ТКС, $^{\circ}\text{C}^{-1}$	
		$R1$ (проволочный)			$R2$ (угольный)			$R1$ (проволоч- ный)	$R2$ (уголь- ный)
		на- грев	охлажде- ние	сред- нее	на- грев	охлажде- ние	сред- нее		
1									
2									

Переключение между резисторами $R1$ и $R2$ осуществляется тумблером SA1. Резистор с сопротивлением $R1$ – проволочный (верхнее положение ручки тумблера). Резистор с сопротивлением $R2$ – угольный (нижнее положение ручки тумблера).

8. Включить нагрев минимодуля (подключить соединительный проводник к гнезду «+15 В» модуля «Модуль питания и USB осциллограф»). Произвести измерения температуры и сопротивлений резисторов по вышеприведенной методике, результаты занести в таблицу 2. Построить график зависимости $R(T)$, рассчитать ТКС резисторов.

9. После проверки результатов преподавателем необходимо предоставить

комплект в полном составе и исправности преподавателю или лаборанту.

10. Сравнить экспериментальные значения ТКС проводников и резисторов со справочными данными. Анализируя графики зависимости $R(T)$ проводников и резисторов, сделать обобщающие выводы по лабораторной работе.

III. КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. Как классифицируются вещества по электрическим свойствам?
2. Удельное сопротивление проводников, полупроводников и диэлектриков.
3. Энергия электронов согласно зонной теории.
4. Какая зона называется валентной? Изобразить валентную зону для проводников, полупроводников и диэлектриков.
5. Возникновение электрического тока в веществе.
6. Какие факторы влияют, а какие – нет на удельную проводимость?
7. Технический метод измерения сопротивления проводника.
8. Какой метод лежит в основе работы омметров и как с их помощью измеряют сопротивление?
9. Достоинства мостового метода измерения сопротивления.
10. Формула для расчета удельного сопротивления.
11. Формула для определения заряда, перенесенного по проводнику.
12. Что представляет собой подвижность носителей заряда?
13. Зависит ли концентрация носителей заряда от температуры?
14. Как влияет температура на подвижность носителей заряда и почему?
15. Приведите определение и формулу для расчета ТКС.
16. Единицы его измерения.
17. Для каких материалов величина ТКС больше – для металлов или сплавов? Величина ТКС для металлов.
18. Материалы с каким ТКС используются для изготовления резисторов?
19. Чем отличаются положительный и отрицательный ТКС?
20. Как определялся ТКС материалов в работе?