

Министерство образования и науки Российской Федерации

Федеральное государственное бюджетное образовательное
учреждение высшего профессионального образования

**ТОМСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ СИСТЕМ
УПРАВЛЕНИЯ И РАДИОЭЛЕКТРОНИКИ**

Кафедра промышленной электроники

Л.Р. Битнер

МАТЕРИАЛЫ ЭЛЕКТРОННОЙ ТЕХНИКИ

**Методические указания
к лабораторным работам**

2012

Корректор: Осипова Е.А.

Битнер Л.Р.

Материалы электронной техники: методические указания к лабораторным работам. — Томск: Факультет дистанционного обучения, ТУСУР, 2012. — 22 с.

В пособие внесены изменения в 2020 г.

© Битнер Л.Р., 2012
© Факультет дистанционного
обучения, ТУСУР, 2012

ОГЛАВЛЕНИЕ

1 ИССЛЕДОВАНИЕ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ СВОЙСТВ ПРОВОДНИКОВЫХ МАТЕРИАЛОВ	4
1.1 Цель работы	4
1.2 Краткие сведения из теории.....	4
1.3 Порядок проведения работы.....	5
2 ИССЛЕДОВАНИЕ ТЕМПЕРАТУРНОЙ ЗАВИСИМОСТИ ПРОВОДИМОСТИ ТВЕРДЫХ ДИЭЛЕКТРИКОВ	8
2.1 Цель работы	8
2.2 Краткие сведения из теории.....	8
2.3 Порядок выполнения работы.....	10
3 ТРЕБОВАНИЯ К ОФОРМЛЕНИЮ ОТЧЕТОВ.....	12
3.1 Общие положения	12
3.2 Правила оформления отчета	12
3.3 Экспериментальные результаты.....	12
3.4 Выводы	13
ПРИЛОЖЕНИЕ 1. Пример оформления отчета по работе № 1.....	14
ПРИЛОЖЕНИЕ 2. Пример оформления отчета по работе № 2	18
ПРИЛОЖЕНИЕ 3. Физические свойства чистых металлов и сплавов	22

1 ИССЛЕДОВАНИЕ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ СВОЙСТВ ПРОВОДНИКОВЫХ МАТЕРИАЛОВ

1.1 Цель работы:

- а) определение удельного сопротивления проводниковых материалов и его зависимости от температуры;
- б) вычисление температурного коэффициента удельного сопротивления.

1.2 Краткие сведения из теории

Проводниками называют вещества, основным электрическим свойством которых является высокая электропроводность, т.е. способность хорошо проводить электрический ток.

Проводниковые материалы подразделяются на две группы: металлы высокой проводимости; сплавы высокого сопротивления.

Первая группа используется для изготовления проводов, жил, кабелей, обмоток электрических машин и трансформаторов, вторая группа для изготовления резисторов, нитей ламп накаливания, спиралей нагревательных приборов, термопар и т.п.

Основные свойства проводниковых материалов характеризуются величиной удельного сопротивления ρ и температурным коэффициентом удельного электрического сопротивления α_ρ .

На практике вначале оценивают полное сопротивление образца R . Далее рассчитывается значение ρ :

$$\rho = R \cdot \frac{S}{l}, \quad (1.1)$$

где S — площадь сечения проводника ($S = \frac{\pi \cdot d^2}{4}$ для проволоки диаметром d);

l — длина проводника.

Температурный коэффициент удельного сопротивления в узком интервале температур определяется выражением:

$$\alpha_\rho = \frac{1}{\rho} \cdot \frac{\Delta \rho}{\Delta T}. \quad (1.2)$$

Электропроводность металлов зависит от совершенства кристаллической решетки: чем меньше дефектов имеет кристаллическая решетка, тем выше электропроводность. Поэтому чистые металлы обладают наименьшими значениями удельного сопротивления, а сопротивление сплавов всегда выше сопротивлений металлических компонентов, входящих в их состав.

Сплавом называется механическая или химическая смесь не менее двух металлов. В сплавах, состоящих из двух или нескольких металлов, кристаллическая решетка имеет неправильную форму из-за внедрения ионов одного металла в кристаллическую решетку другого, вследствие этого удельное сопротивление сплавов больше по сравнению с чистыми металлами.

Увеличение температуры не приводит к росту концентрации электронов n , но увеличивает амплитуды колебаний закрепленных ионов. По этой причине увеличивается вероятность столкновения электронов с ионами, т.е. снижается длина свободного пробега и возрастает удельное сопротивление.

Для большинства чистых металлов в диапазоне температур от комнатной до температуры плавления справедлива линейная зависимость удельного сопротивления от температуры.

Так как с ростом температуры наблюдается рост удельного сопротивления металлов и сплавов, величина температурного коэффициента удельного сопротивления α_ρ больше нуля, причем для металлов она выше, чем для сплавов. Более того, для некоторых сплавов величина α_ρ может приобретать небольшое отрицательное значение (т.е. с ростом температуры снижается ρ). Это объясняется тем, что в некоторых сплавах при повышении температуры возможно возрастание концентрации электронов.

1.3 Порядок проведения работы

Экспериментальная установка состоит из печи, термометра, образцов проводниковых материалов. Электрическое сопротивление измеряется омметром. Проводник, помещенный в печь, следует подключить к входным зажимам омметра и замерить его сопротивление в заданном диапазоне температур. Исследуемый образец выполнен в виде проволоки, диаметр и длина которой известны.

В ходе работы необходимо выполнить следующие действия:

1.3.1 Зафиксировать длину и диаметр металлической проволоки.

1.3.2 Включить омметр и записать его показания. Это сопротивление проволоки при комнатной температуре 20 °С.

1.3.3 Включить нагрев печи и фиксировать в таблице значения сопротивления при повышении температуры внутри печи на каждые 5 градусов.

1.3.4 Продолжать эксперимент до 220 °С.

1.3.5 Выключить печь и омметр.

1.3.6 Поскольку работа выполняется в компьютерном варианте, то перед закрытием программы следует сохранить результаты в файле. Подробнее о работе с программой можно посмотреть в **Помощь → Справка по работе**.

Эксперимент закончен и теперь необходимо обработать его результаты.

1.3.7 Загрузить данные из файла в Excel или MathCAD. Обратите внимание, что результаты записаны в файл в текстовом формате. Рассчитать для каждой температуры значение удельного сопротивления по формуле 1.1.

1.3.8 Построить график зависимости удельного сопротивления от температуры (в Excel тип диаграммы выбрать обязательно «точечный»). Построить на том же графике линию тренда, т.е. прямую по методу наименьших квадратов. В Excel для этого выделить экспериментальную зависимость и при нажатии правой кнопки мыши выбрать пункт «Добавить линию тренда». Тип линии тренда — линейный, параметры — «показывать уравнение на диаграмме». Линия тренда строится для того, чтобы свести к минимуму погрешности эксперимента.

Уравнение линии тренда позволяет вычислить температурный коэффициент удельного сопротивления. Ведь числовой коэффициент перед X это наклон прямой, т.е. $\frac{\Delta \rho}{\Delta T}$, и если разделить его на ρ , получим α_ρ (смотрите формулу 1.2).

1.3.9 Результаты измерений и вычислений оформить в виде таблицы.

$T, ^\circ\text{C}$	$R, \text{Ом}$	$\rho, \text{мкОм}\cdot\text{м}$	$\alpha_\rho, \text{K}^{-1}$

1.3.10 Определить материал исследуемого образца по рассчитанным значениям ρ и α_ρ . Параметры металлов и сплавов приведены в Приложении 3.

1.3.11 Оформить отчет по работе. Пример отчета приведен в Приложении 1.

Построение графиков и все расчеты производить на компьютере с помощью программ Excel или MathCAD.

2 ИССЛЕДОВАНИЕ ТЕМПЕРАТУРНОЙ ЗАВИСИМОСТИ ПРОВОДИМОСТИ ТВЕРДЫХ ДИЭЛЕКТРИКОВ

2.1 Цель работы:

- а) определение зависимости сопротивления диэлектриков от температуры;
- б) определение энергии активации проводимости.

2.2 Краткие сведения из теории

Все диэлектрические материалы при приложении постоянного напряжения пропускают некоторый, обычно весьма незначительный, ток проводимости, обусловленный направленным перемещением свободных носителей электрического заряда. В зависимости от типа носителей зарядов в диэлектриках может наблюдаться электронная или ионная электропроводность.

Удельная проводимость γ равна:

$$\gamma = en\mu,$$

где n — концентрация свободных носителей заряда;

μ — подвижность заряженных частиц в направлении поля.

В технике часто используют величину, обратную удельной проводимости, — удельное сопротивление ρ .

$$\rho = \frac{1}{\gamma}, \quad \rho = R \frac{S}{h},$$

где S — площадь поперечного сечения диэлектрика, по которому протекает ток (обычно равна площади меньшего электрода);

h — толщина диэлектрика (расстояние между электродами).

Электропроводность твердых тел обусловлена как передвижением ионов самого диэлектрика, так и ионов случайных примесей, а у некоторых материалов может быть вызвана наличием свободных электронов.

Подвижность электронов на много порядков больше, чем подвижность ионов. В диоксиде титана, например, подвижность электронов составляет примерно $10^{-4} \text{ м}^2/(\text{В} \cdot \text{с})$, тогда как подвижность ионов в алюмосиликатной керамике всего лишь

10^{-13} — 10^{-16} м²/(В·с). Следовательно, в диэлектрике с электронной электропроводностью концентрации электронов в 10^9 — 10^{12} раз меньше, чем концентрация носителей в диэлектрике с ионной электропроводностью, при одинаковом заряде носителей и одинаковом значении удельной проводимости.

И в случае электронной, и в случае ионной проводимости число носителей заряда экспоненциально возрастает с ростом температуры. Следовательно, и рост удельной проводимости диэлектрика от температуры будет происходить по экспоненциальному закону.

$$\gamma = A \cdot \exp\left(-\frac{E}{kT}\right). \quad (2.1)$$

Здесь k — постоянная Больцмана,

T — температура образца в Кельвинах,

A — коэффициент, не зависящий от температуры,

E — в общем случае называется энергией активации и может зависеть от ширины запрещенной зоны диэлектрика или от энергии диссоциации ионов.

Логарифм выражения (2.1) представляет уравнение прямой линии в координатах $\ln \gamma$ и $1/T$ (рисунок 2.1).

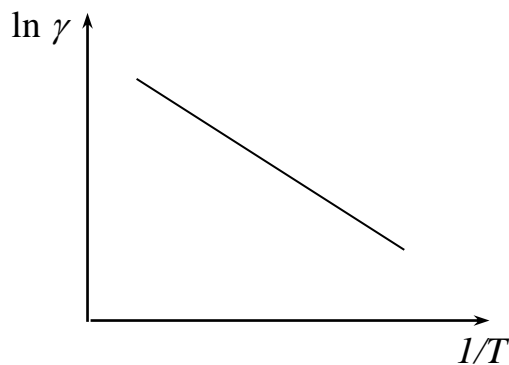


Рисунок 0.1 — Зависимость удельной проводимости диэлектрика (в логарифмическом масштабе) от $1/T$

Чтобы убедиться в этом, надо прологарифмировать левую и правую части выражения (2.1).

$$\ln \gamma = \ln A - \frac{E}{k} \left(\frac{1}{T} \right). \quad (2.2)$$

Если теперь ввести новые обозначения:

$$y = \ln \gamma, \quad x = \frac{1}{T}, \quad b = \ln A, \quad K = \frac{E}{k}, \quad (2.3)$$

то получим привычное уравнение прямой:

$$y = Kx + b. \quad (2.4)$$

Угол наклона этой прямой к оси абсцисс, т.е. коэффициент K , определяется значением энергии активации E .

Энергии активации проводимости можно определить по наклону зависимости. Если в электропроводности участвуют два вида ионов, например примесные и собственные, то температурная зависимость $\ln \gamma$ от $1/T$ будет состоять из двух прямолинейных участков.

2.3 Порядок выполнения работы

2.3.1 Зафиксировать материал образца и его размеры: расстояние между электродами (толщина образца) и площадь электродов.

2.3.2 Образец поместить в печь и регистрировать кликом мыши по кнопке ЗАПИСАТЬ значение сопротивления и температуры через каждые 10 градусов. Начальное и конечное значение температуры зависит от материала образца. Заканчивать измерения следует после того, как температура в печи перестанет изменяться.

2.3.3 Выключить приборы: тераомметр и печь. Сохранить данные из таблицы в файл кликом по кнопке СОХРАНИТЬ (подробности в описании работы №1).

2.3.4 Рассчитать удельную проводимость для каждого значения температуры по формуле:

$$\gamma = \frac{h}{R \cdot S}.$$

2.3.5 Заполнить первые три столбца таблицы:

$T, ^\circ\text{C}$	$R, \text{Ом}$	$\gamma, (\text{Ом} \cdot \text{м})^{-1}$	$1/T, \text{K}^{-1}$	$\ln \gamma$

2.3.6 Рассчитать для каждого измерения значения $1/T$, где $T = t + 273$, а также $\ln \gamma$. Заполнить два последних столбца.

2.3.7 Построить график зависимости логарифма удельной проводимости от обратной температуры ($1/T$). Определить на нем количество прямолинейных участков.

2.3.8 По точкам, принадлежащим каждому участку, построить прямые по методу наименьших квадратов, т.е. линии тренда. Определить из уравнения линии тренда тангенс угла наклона, т.е. коэффициент K .

2.3.9 Рассчитать энергию активации E , пользуясь формулой $K = \frac{E}{k}$. Полученное значение в Джоулях перевести в электронвольты, для чего разделить E на заряд электрона, равный $1,6 \cdot 10^{-19}$ Кл.

2.3.10 Оформить отчет в соответствии со стандартами. Сделать выводы: описать вид полученной кривой, привести рассчитанное значение энергии активации. Если на экспериментальной зависимости наблюдается два или три прямолинейных участка, то и значений энергии активации следует привести два или три.

Построение графиков и все расчеты производить на компьютере с помощью программ Excel или MathCAD.

Для справки:

Для того чтобы найти уравнение прямой $y = Kx + b$, проведенной через экспериментальные точки по методу наименьших квадратов (линия тренда), необходимо:

- **в Excel**

построить график зависимости Y от X (в нашем случае $\ln \gamma$ от $1/T$) и, кликнув по выделенной зависимости правой кнопкой мыши, выбрать пункт «Добавить линию тренда». Тип линии тренда — линейный, параметры — «показывать уравнение на диаграмме». Линия тренда строится для того, чтобы свести к минимуму погрешности эксперимента;

- **в MathCAD**

ввести значения координат экспериментальных точек X и Y в виде векторов (таблицы пронумерованных элементов).

Функция $k = \text{slope}(X, Y)$ вычисляет коэффициент K , $b = \text{intercept}(X, Y)$ — свободный член b .

3 ТРЕБОВАНИЯ К ОФОРМЛЕНИЮ ОТЧЕТОВ

3.1 Общие положения

Отчет по лабораторной работе является одним из видов технической документации и должен удовлетворять требованиям стандартов.

Отчет выполняется на белой бумаге формата А4 и должен включать:

- титульный лист,
- цель работы,
- описание экспериментальной установки и основные расчетные формулы,
- результаты работы,
- выводы.

Разделы должны быть пронумерованы арабскими цифрами в пределах всего отчета. После номера раздела ставится точка. Номер и заголовок раздела пишутся на одной строке. После заголовка точка не ставится.

3.2 Правила оформления отчета

Пример оформления титульного листа приведен далее.

Цель работы сформулирована в описании к работе.

Экспериментальная установка может быть показана блок-схемой, принципиальной схемой или описана словами. В данном разделе приводятся только те формулы, которые будут использоваться при обработке результатов измерения.

3.3 Экспериментальные результаты

В разделе приводятся результаты эксперимента и расчеты.

Все иллюстрации называются рисунками. Они нумеруются последовательно в пределах раздела. Номер рисунка состоит из номера раздела и порядкового номера рисунка, разделенных точкой. Например, Рис. 3.2 — второй рисунок третьего раздела. При необходимости рисунки снабжаются пояснительными данными

(подрисуночный текст). Рисунки должны иметь масштабную сетку. На осях указываются условные обозначения и размерность.

Размер точек на графике должен быть в 3—4 раза больше толщины линии, которая по ним проводится.

Цифровой материал помещают в виде таблиц. Каждая таблица должна иметь название. Номер таблицы состоит из номера раздела и порядкового номера таблицы, разделенных точкой.

3.4 Выводы

Содержание выводов зависит от цели работы и может включать:

- описание характера полученных зависимостей,
- численные значения рассчитанных параметров,
- анализ полученных результатов, объяснение причин расхождения теории и эксперимента,
- объяснение характера полученных зависимостей на основе физических представлений.

ПРИЛОЖЕНИЕ 1
Пример оформления отчета по работе № 1

Министерство науки и высшего образования Российской Федерации

Федеральное государственное бюджетное образовательное
учреждение высшего образования

**ТОМСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ СИСТЕМ
УПРАВЛЕНИЯ И РАДИОЭЛЕКТРОНИКИ (ТУСУР)**

Кафедра промышленной электроники (ПрЭ)

**ИССЛЕДОВАНИЕ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ СВОЙСТВ
МЕТАЛЛОВ И СПЛАВОВ**

Отчет по лабораторной работе
по дисциплине «Материалы электронной техники»

Выполнил
студент Сергеев С.С.
группа _____

Томск 201__

1 ЦЕЛЬ РАБОТЫ

Определение удельного сопротивления проводниковых материалов и его зависимости от температуры; вычисление температурного коэффициента удельного сопротивления.

2 ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ УСТАНОВКА И РАСЧЕТНЫЕ ФОРМУЛЫ

Для проведения эксперимента необходимо следующее оборудование: измерительный прибор для фиксации величины сопротивления металлического образца (омметр); лабораторная печь для обеспечения равномерного нагрева образца в диапазоне от 20 до 220 С; термометр для фиксации температуры в нужном диапазоне; исследуемый образец в виде проволоки фиксированной длины и диаметра.

Удельное сопротивление рассчитывается по формуле:

$$\rho = R \cdot \frac{S}{l},$$

где R — сопротивление проволоки;
 S — площадь сечения проволоки;
 l — длина проволоки.

$$S = \frac{\pi \cdot d^2}{4} \text{ для проволоки диаметром } d.$$

Температурный коэффициент удельного сопротивления определяется выражением:

$$\alpha_{\rho} = \frac{1}{\rho} \cdot \frac{\Delta \rho}{\Delta T}.$$

3 ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ

Исследуемый образец металлической проволоки неизвестного состава имеет длину 1 м и диаметр 0,1 мм.

Результаты эксперимента и расчетные данные приведены в таблице 3.1.

Таблица 3.1 — Экспериментальные и расчетные результаты

$T, ^\circ\text{C}$	$R, \text{Ом}$	$\rho, \text{мкОм}\cdot\text{м}$	$\alpha_\rho, \text{град}^{-1}$
20	12,6	0,0989	0,00404
30	12,8	0,1004	0,00398
40	13,5	0,1059	0,00377
50	13,8	0,1083	0,00369
60	14,4	0,1130	0,00354
70	14,9	0,1169	0,00342
80	15,3	0,1201	0,00333
90	15,9	0,1248	0,00320
100	16,4	0,1287	0,00311
110	16,7	0,1311	0,00305
120	17,2	0,1350	0,00296
130	17,9	0,1405	0,00285
140	18,4	0,1444	0,00277
150	18,7	0,1468	0,00272
160	19,2	0,1507	0,00265
170	19,6	0,1538	0,00260
180	20,2	0,1585	0,00252
190	20,8	0,1633	0,00245
200	21,3	0,1672	0,00239
210	21,7	0,1703	0,00235
220	22,3	0,1750	0,00228

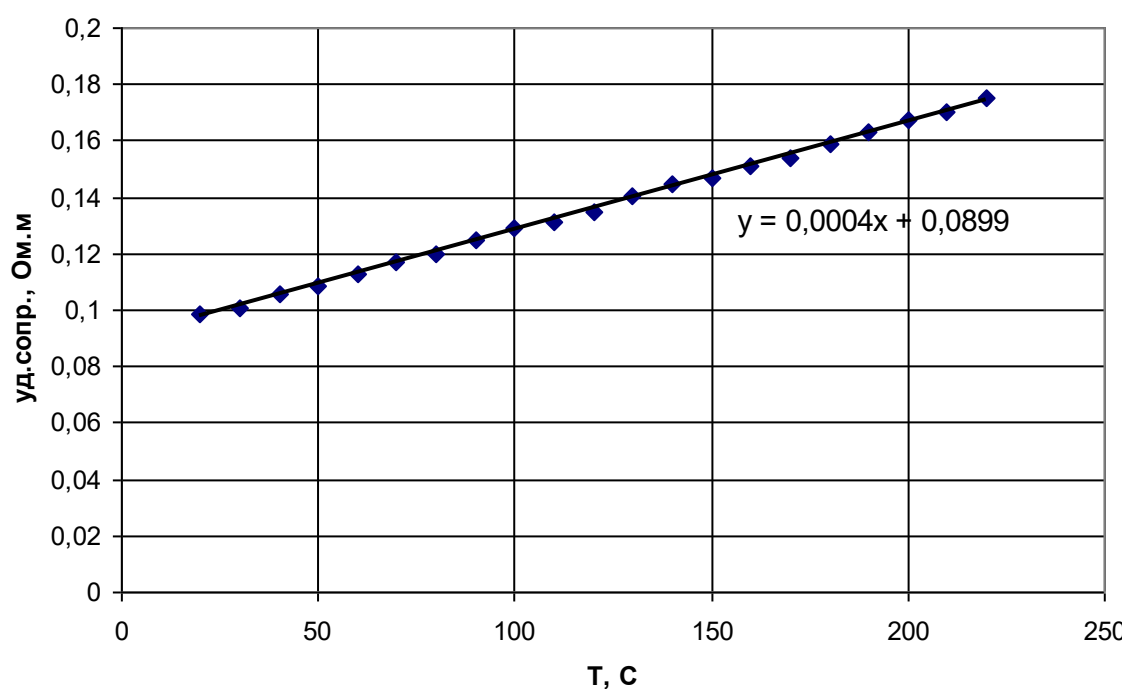


Рисунок 3.1 — Зависимость удельного сопротивления от температуры (точки) и линия тренда (сплошная линия)

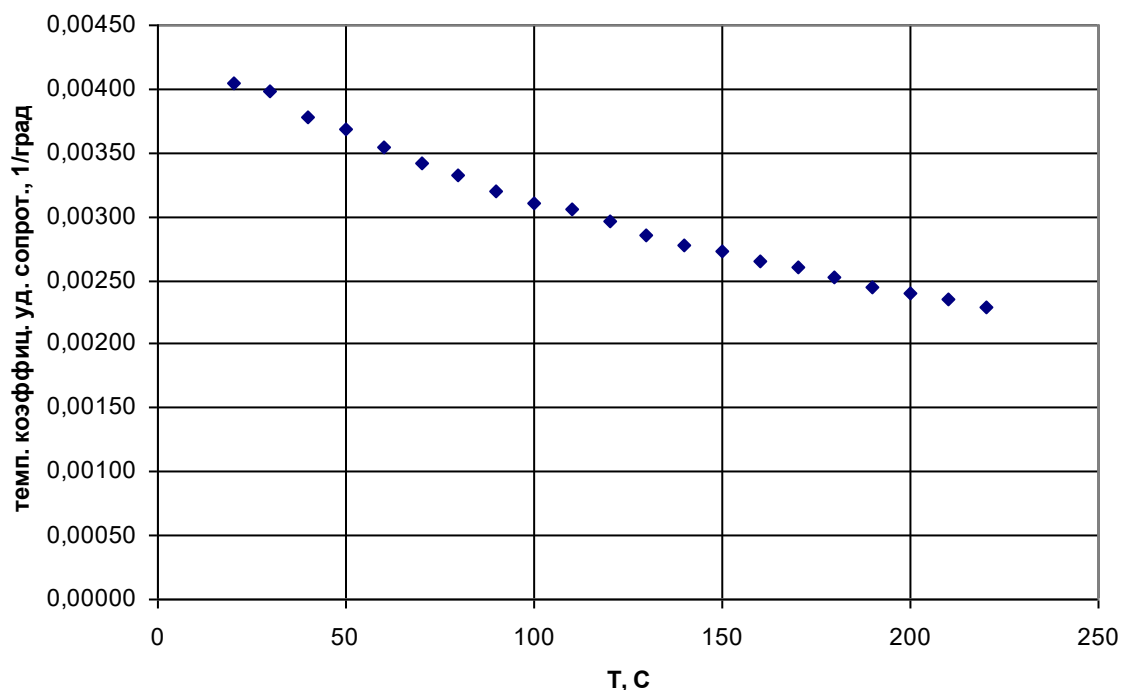


Рисунок 3.2 — Зависимость температурного коэффициента удельного сопротивления от температуры

4 ВЫВОДЫ

4.1 Удельное сопротивление образца линейно возрастает при увеличении температуры от 20 до 220 С.

4.2 Температурный коэффициент удельного сопротивления уменьшается при увеличении температуры в том же диапазоне.

4.3 При температуре 20 С удельное сопротивление образца $\rho = 0,0989$ мкОм·м, температурный коэффициент удельного сопротивления $\alpha_\rho = 0,00404$ град⁻¹.

4.4 Материал образца — платина (справочные данные: $\rho = 0,098$ мкОм·м, $\alpha_\rho = 0,0039$ град⁻¹).

ПРИЛОЖЕНИЕ 2
Пример оформления отчета по работе № 2

Министерство науки и высшего образования Российской Федерации

Федеральное государственное бюджетное образовательное
учреждение высшего образования

**ТОМСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ СИСТЕМ
УПРАВЛЕНИЯ И РАДИОЭЛЕКТРОНИКИ (ТУСУР)**

Кафедра промышленной электроники (ПрЭ)

**ИССЛЕДОВАНИЕ ТЕМПЕРАТУРНОЙ ЗАВИСИМОСТИ
ПРОВОДИМОСТИ ТВЕРДЫХ ДИЭЛЕКТРИКОВ**

Отчет по лабораторной работе
по дисциплине «Материалы электронной техники»

Выполнил
студент Сергеев С.С.
группа ____

Томск 20__

1 ЦЕЛЬ РАБОТЫ

Определение зависимости сопротивления диэлектриков от температуры и определение энергии активации проводимости.

2 ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ УСТАНОВКА И РАСЧЕТНЫЕ ФОРМУЛЫ

Для проведения эксперимента необходимо следующее оборудование: измерительный прибор, способный измерять очень большие величины сопротивления диэлектрического образца (тераомметр); лабораторная печь для обеспечения равномерного нагрева образца вплоть до 500 С ; термометр для фиксации температуры в нужном диапазоне; исследуемый образец в виде пластины диэлектрика с нанесенными металлическими электродами.

Удельная проводимость рассчитывается по формуле:

$$\gamma = \frac{h}{R \cdot S},$$

где R — сопротивление диэлектрика;

S — площадь электрода;

h — толщина диэлектрика или расстояние между электродами.

Для определения энергии активации E используется формула:

$$E = -K \cdot k,$$

где k — постоянная Больцмана ($k = 1,38 \cdot 10^{-23}$ Дж·К⁻¹),

K — коэффициент перед X в уравнении линии тренда.

$$y = Kx + b.$$

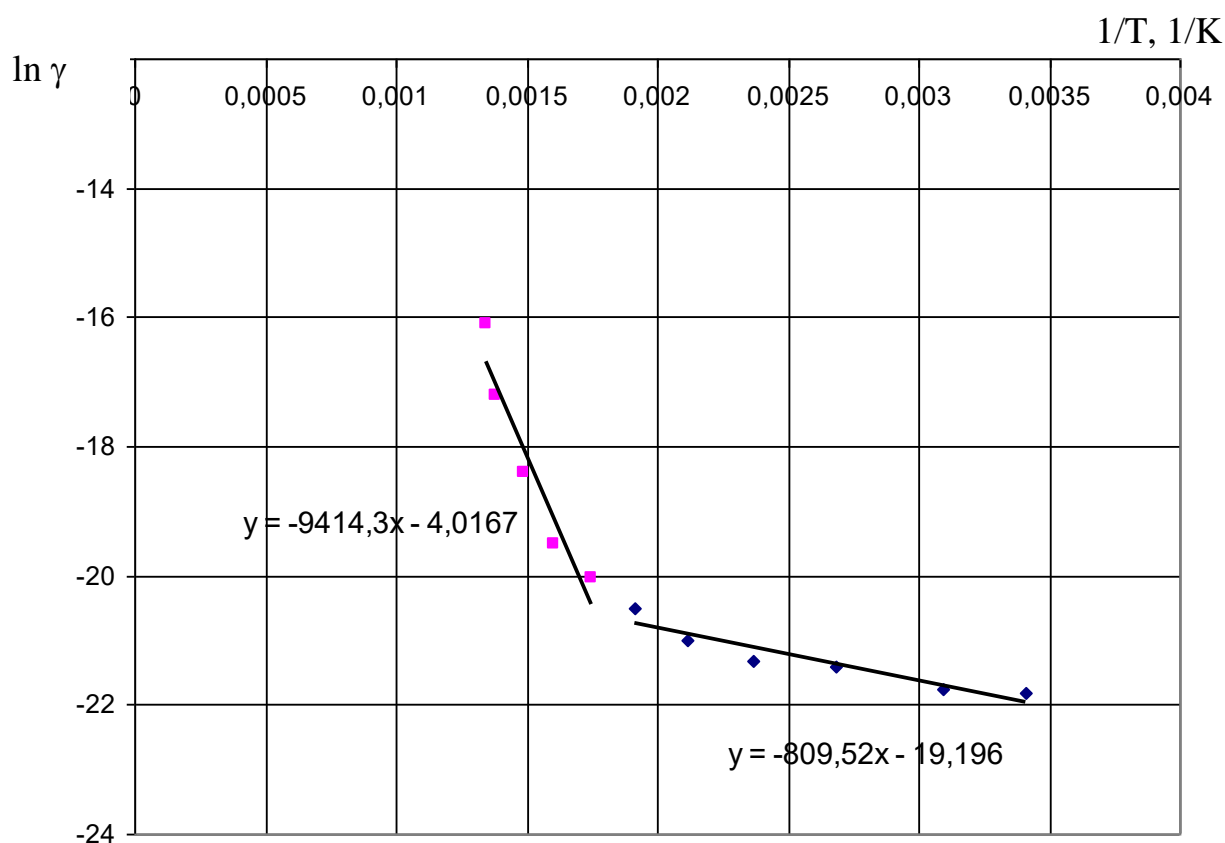
3 ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ

Образец — диэлектрическая пластина из материала стеклоэмаль. Толщина 1мм, площадь электрода 100 мм².

Результаты эксперимента и расчетные данные приведены в таблице 3.1.

Таблица 3.1 — Экспериментальные и расчетные результаты

$T, ^\circ\text{C}$	$R, \text{Ом}$	$\gamma, (\text{Ом}\cdot\text{м})^{-1}$	$1/T, \text{K}^{-1}$	$\ln \gamma$
20	$3,0\cdot 10^8$	$3,333\cdot 10^{-10}$	0,003413	-21,8219
50	$2,8\cdot 10^8$	$3,571\cdot 10^{-10}$	0,003096	-21,7529
100	$2,0\cdot 10^8$	$5,321\cdot 10^{-10}$	0,002681	-21,4164
150	$1,8\cdot 10^8$	$5,555\cdot 10^{-10}$	0,002364	-21,3111
200	$1,3\cdot 10^8$	$7,692\cdot 10^{-10}$	0,002114	-20,9856
250	$8,0\cdot 10^7$	$1,25\cdot 10^{-10}$	0,001912	-20,5001
300	$5,0\cdot 10^7$	$2,012\cdot 10^{-9}$	0,001745	-20,0301
350	$3,0\cdot 10^7$	$3,362\cdot 10^{-9}$	0,001605	-19,5193
400	$1,0\cdot 10^7$	$1,027\cdot 10^{-8}$	0,001486	-18,4207
450	$3,0\cdot 10^6$	$3,212\cdot 10^{-8}$	0,001383	-17,2167
470	$1,0\cdot 10^6$	$1,156\cdot 10^{-7}$	0,001346	-16,1181

Рисунок 3.1 — Экспериментальная зависимость $\ln \gamma$ от $1/T$ (точки) и линии тренда (сплошная линия)

Из уравнения линии тренда:

 $K1 = -809,52,$ $K2 = -9414,3.$

Следовательно

$$E1 = 809,52 \cdot 1,38 \cdot 10^{-23} = 1,11 \cdot 10^{-20} \text{ Дж} = \frac{1,11 \cdot 10^{-20}}{1,6 \cdot 10^{-19}} \text{ эВ} = 0,07 \text{ эВ};$$

$$E2 = 9414,3 \cdot 1,38 \cdot 10^{-23} = 1,3 \cdot 10^{-19} \text{ Дж} = \frac{1,3 \cdot 10^{-19}}{1,6 \cdot 10^{-19}} \text{ эВ} = 0,81 \text{ эВ}.$$

4 ВЫВОДЫ

4.1 Удельная проводимость стеклоэмали возрастает при увеличении температуры от 20 до 470 °С.

4.2 Удельная проводимость стеклоэмали при $T = 20$ °С равна $3,33 \cdot 10^{-10} \text{ (Ом} \cdot \text{м)}^{-1}$.

4.3. Энергия активации в диапазоне температур от 20 до 250 °С равна 0,07 эВ, в диапазоне 300—470 °С равна 0,81 эВ.

ПРИЛОЖЕНИЕ 3

Физические свойства чистых металлов и сплавов

Металл	$T_{пл}, ^\circ\text{C}$	ρ , мкОм·м	$\alpha_\rho, \times 10^{-3} \text{ K}^{-1}$
алюминий	660	0,0265	4,1
вольфрам	3400	0,055	5,0
железо	1540	0,097	6,25
золото	1063	0,0225	3,95
кобальт	1500	0,064	6,0
медь	1083	0,0168	4,33
молибден	2620	0,05	4,33
никель	1453	0,068	6,7
ниобий	2500	0,15	3,9
олово	232	0,113	4,5
платина	1770	0,098	3,9
рений	3180	0,214	3,2
свинец	327	0,190	4,2
серебро	961	0,0150	4,1
тантал	3000	0,124	3,8
титан	1670	0,47	5,5
хром	1900	0,13	2,4
цинк	419	0,0592	4,1
манганин	—	0,42	5—30
константан	—	0,48	—(5—25)
нихром	—	1,0	100—200

Примечания:

α_ρ — температурный коэффициент удельного сопротивления;

$\alpha_\rho, \times 10^{-3} \text{ K}^{-1}$ означает, что величину, указанную в таблице, следует умножить на 10^{-3} K^{-1} .

Удельное сопротивление приведено для $T = 20 ^\circ\text{C}$.