

МИНИСТЕРСТВО ВЫСШЕГО И СРЕДНЕГО  
СПЕЦИАЛЬНОГО ОБРАЗОВАНИЯ РСФСР

КУЙБЫШЕВСКИЙ ордена ТРУДОВОГО КРАСНОГО ЗНАМЕНИ  
АВИАЦИОННЫЙ ИНСТИТУТ имени АКАДЕМИКА С. П. КОРОЛЕВА

## ИССЛЕДОВАНИЕ МАТЕРИАЛОВ ЭЛЕМЕНТОВ КОНСТРУКЦИЙ НЕПРОВОЛОЧНЫХ РЕЗИСТОРОВ

Утверждено  
редакционно-издательским  
советом института  
в качестве  
методических указаний  
к лабораторным работам 3, 6, 7

Составитель В. Н. Буров

УДК 621.315.

*Исследование материалов элементов конструкций непроволочных резисторов: Метод. указания / В. Н. Буров; Куйб. авиац. ин-т. Куйбышев, 1988, с. 20.*

Методические указания «Исследование материалов элементов конструкций непроволочных резисторов» к лабораторным работам 3, 6 и 7 являются частью цикла лабораторных работ по курсу «Материалы электронной техники». Работа 3 предусматривает изучение частотных свойств диэлектрических потерь электронизоляционных материалов, используемых в качестве подложки непроволочных резисторов. Работа 6 посвящена изучению и сравнению широко используемых резисторов по их температурной стабильности, определению свойств проводящих слоев резисторов. В работе 7 исследуется термоЭДС материалов. По каждой лабораторной работе сообщаются краткие теоретические сведения, даются указания к проведению экспериментов и составлению отчета. В приложении приводится программа обработки на ЭВМ «Электроника ДЗ-28» результатов эксперимента.

Методические указания предназначены для студентов специальности 0705 дневной и вечерней форм обучения.

Рецензенты: Ю. С. Дмитриев, И. П. Федорова

## ОБЩИЕ СВЕДЕНИЯ

К числу наиболее распространенных резисторов относятся проволоочные резисторы, основным элементом которых являются слои, состоящие из сложных композиционных материалов. В качестве компонентов этих материалов используются окислы и соединения металлов, сплавы, графиты и сажа, распределенные в изолирующей фазе в виде полимерных смол (сажеполимерные резисторы) или неорганических стекол (керметные резисторы). Широкое распространение получили микрокомпозиционные и углеродистые резисторы, часто называемые тонкопленочными. Резистивные слои этих изделий изготавливают методом конденсации паров сложных по составу соединений на керамическую (чаще всего цилиндрическую) подложку, используя вакуум-термическое испарение, ионно-плазменное распыление, пиролиз органических или металлоорганических соединений.

Особенностью резисторов этого класса является низкое удельное сопротивление (менее  $0,5 \text{ Ом} \cdot \text{см}$ ). Поэтому для получения высоких значений сопротивлений используются тонкие слои ( $500 \dots 2000 \text{ \AA}$ ) и методы увеличения геометрической длины проводящего слоя способом создания спиральной изолирующей канавки на цилиндрической поверхности подложки у дискретных резисторов, либо способы фотолитографии для резисторов планарной конструкции.

Тонкие пленки недостаточно надежны в условиях воздействия внешних факторов. Свойства тонких пленок зависят от микродефектов изолирующей подложки, поэтому в конструкциях переменных резисторов практически не применяются. В последние годы больше внимания стали уделять керметным толстопленочным резисторам. Основное достоинство изделий этого класса заключается в использовании материалов с более высоким удельным сопротивлением. При толщине резистивных слоев порядка  $20 \text{ мкм}$  обеспечивается регулирование удельного поверхностного сопротивления от  $10$  до  $10^7 \text{ Ом}/\square$ . С помощью керметных слоев успешно решается проблема создания высококачественных переменных резисторов.

Таким образом, на характеристики резисторов оказывают существенное влияние свойства материалов их элементов конструкции как проводящих, так и диэлектрических. Некоторые свойства материалов исследуются в тесной лабораторных работах.

## ИССЛЕДОВАНИЕ ТАНГЕНСА УГЛА ДИЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ПОТЕРЬ И ДИЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ПРОНИЦАЕМОСТИ МАТЕРИАЛОВ

Цель работы: исследование частотной зависимости диэлектрической проницаемости и тангенса угла диэлектрических потерь твердых диэлектриков.

Задание:

1. Для образцов диэлектриков экспериментально определить зависимости тангенса угла диэлектрических потерь и диэлектрической проницаемости от частоты электрического поля в радиочастотном диапазоне.

2. Представить теоретическую интерпретацию полученных экспериментальных результатов.

### ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ

#### Диэлектрические потери

Диэлектрические потери — величина электрической мощности, рассеиваемой в диэлектрике, находящемся в электрическом поле. Соответствующая им энергия превращается в тепло, вызывая нагрев диэлектрика. Потери в диэлектриках происходят вследствие сквозной проводимости (утечки электроэнергии); замедленной поляризации; ионизации газовых включений.

Явление поляризации приводит к появлению внутреннего поля. Потери возникают из-за преодоления внутреннего поля и являются основой диэлектрических потерь. В связи с этим в диэлектрике протекает емкостной ток, опережающий напряжение по фазе на  $90^\circ$ , и активный ток, совпадающий по фазе с напряжением. Диэлектрики можно представить в виде двух схем замещения (рис. 1): последовательной (рис. 1,а) и параллельной (рис. 1,б).

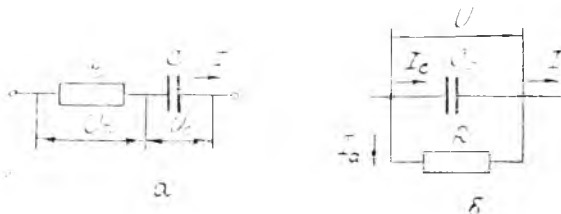


Рис. 1

Параллельной схеме замещения диэлектрика будет соответствовать векторная диаграмма (рис. 2). На диаграмме даны обозначения:  $U$  — приложенное напряжение;  $I$  — суммарный ток;  $\delta$  — угол диэлектрических потерь, дополняющий до  $90^\circ$  угол сдвига фаз между током и напряжением в емкостной цепи;  $I_{c3}$  — емкостный ток, вызванный электронной и ионной поляризацией;  $I_{длс}$  — емкостная составляющая тока добавочной поляризации;  $I_{дпа}$  — активная составляющая тока добавочной поляризации;  $I_{ут}$  — ток утечки, определяющийся электропроводностью диэлектрика;  $I_{дп}$  — ток, вызванный добавочной поляризацией, которая бывает следующих видов: дипольно-релаксационная, ионно-релаксационная, электронно-релаксационная, спонтанная, остаточная, объемная.

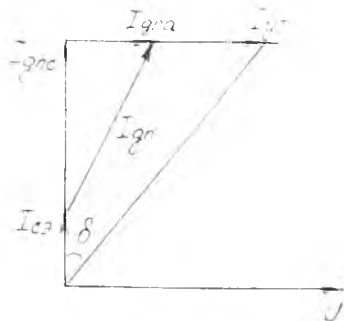


Рис. 2

Добавочная поляризация вызывает не только увеличение потерь мощности в диэлектрике из-за увеличения активного тока, но и увеличение емкостного тока из-за увеличения диэлектрической проводимости.

Если обозначить  $I_c = I_{c3} + I_{длс}$  и  $I_d = I_{дпа} + I_{ут}$ , то

$$\operatorname{tg} \delta = \frac{I_d}{I_c} = \frac{1}{\omega C R} \quad (1)$$

а мощность диэлектрических потерь определяется по формуле

$$P = U^2 \omega C \operatorname{tg} \delta. \quad (2)$$

Из выражения (1) следует, что  $\operatorname{tg} \delta \ll 1$  и колеблется от  $10^{-4}$  до 0,3. Мощность диэлектрических потерь является важной характеристикой диэлектрика. Особенно большое значение имеют диэлектрические потери на высоких частотах. Зависимости  $\operatorname{tg} \delta = f_1(\omega)$  и  $P = f_2(\omega)$  сложнее, чем это видно из выражений (1) и (2). Объясняется это тем, что  $\operatorname{tg} \delta$  диэлектриков, в которых возникают процессы добавочной поляризации, часто являются функцией частоты, причем функциональная зависимость различна для разных видов поляризации и зависит от типа диэлектрика. Если потери в основном определяются явлением электропроводности, то частотные зависимости  $P$  и  $\operatorname{tg} \delta$  могут быть получены при использовании параллельной схемы замещения реального диэлектрика. При этом согласно выражениям (1) и (2) величина  $P$  от частоты не зависит, а  $\operatorname{tg} \delta$  уменьшается с частотой по гиперболическому закону.

При наличии замедленных видов поляризации появляются релаксационные потери, которые характеризуются наличием взаимосвя-

занных максимумов в зависимостях  $\operatorname{tg} \delta = \varphi_1(\omega)$  и  $P = \varphi_2(\omega)$ . Наличие максимумов можно объяснить, основываясь на механизме релаксационной поляризации. Например, молекулы, следуя за изменением электрического поля, поворачиваются в вязкой среде и вызывают потери электрической энергии на трение с выделением тепла. Если вязкость жидкости достаточно велика, молекулы не успевают следовать за изменением поля и поляризация исчезает,  $\operatorname{tg} \delta$  при этом мал. Он будет также мал, если вязкость среды весьма мала и ориентация молекул происходит почти без трения. При средних значениях вязкости среды  $\operatorname{tg} \delta$  может быть значительным и при некоторой вязкости наблюдается максимум на кривой  $\operatorname{tg} \delta = \varphi_1(\omega)$ .

При больших напряженностях электрического поля диэлектрические потери могут привести к тепловому пробое. Диэлектрическая проницаемость  $\epsilon$  определяет величину емкости конденсатора и численно равна отношению емкости конденсатора с диэлектриком к емкости конденсатора с вакуумом, зависит от температуры, частоты тока и влажности. Характер зависимости  $\epsilon$  от частоты определяется структурой диэлектрика и механизмом его поляризации. Значения  $\epsilon$  для изоляционных диэлектриков изменяются от 1 до 150.

В некоторых случаях для характеристики потерь используют величину  $Q = 1 / \operatorname{tg} \delta$ .

#### *Методика проведения исследований*

Тангенс  $\delta$  и  $\epsilon$  на радиочастотах определяется при помощи куметра, блок-схема которого представлена на рис. 3.

На рисунке обозначено:  $C_k$  — конденсатор переменной емкости;  $L_k$  — сменная катушка индуктивности; Д — исследуемый диэлектрик; В — вольтметр.

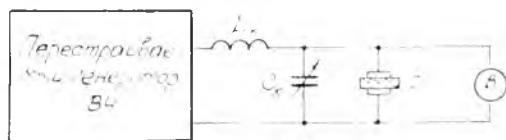


Рис. 3

В каждом случае путем изменения емкости конденсатора  $C_k$  достигается резонанс, фиксируемый максимальным показанием на шкале вольтметра В, проградуированного в значениях  $Q$ . При достижении резонанса напряжение на  $C_k$  в  $Q$  раз больше подводящего напряжения.

Вычисление  $\operatorname{tg} \delta$  материала производится по формуле

$$\operatorname{tg} \delta = \frac{Q_1 - Q_2}{Q_1 \cdot Q_2} \cdot \frac{C_1}{C_2 - C_1}, \quad (3)$$

где  $Q_1$  и  $Q_2$  — добротности конденсатора, измеренные без образца и с образцом диэлектрика  $D$  соответственно;

$C_1$  и  $C_2$  — емкости конденсатора  $C_K$ , соответствующие измерениям без образца и с образцом.

Диэлектрическая проницаемость плоского образца вычисляется по формуле

$$\epsilon = \frac{4 C' h}{\epsilon_0 \pi d^2}, \quad (4)$$

где  $C'$  — емкость образца  $D$ , Ф;

$h$  — толщина исследуемого диэлектрика  $D$ , м;

$d$  — диаметр электрода, приложенного к образцу  $D$ , м;

$$\epsilon_0 = \frac{10^{-9}}{36 \pi} \left[ \frac{\text{Ф}}{\text{м}} \right].$$

Поскольку толщина диэлектрика сравнима с размерами электрода, то следует в формуле (4) учесть краевую емкость  $C_{кр}$ , которая от величины  $C' = C_2 - C_1$  для данной установки составляет порядка 30%, т. е. в выражение (4) следует вместо  $C'$  подставить значение  $C'' = C' - C_{кр}$ .

#### ПОРЯДОК ВЫПОЛНЕНИЯ РАБОТЫ

1. Ознакомьтесь с экспериментальной установкой и ее схемой в зависимости от используемого куметра [1].

2. Включить установку, повернуть ручку «Рег. выхода» вправо до упора.

3. Дать прогреться установке в течение 5 мин. и ручками «Уст. 0» выставить ноль по индикатору добротности «Q».

4. Ручкой «Диапазон частоты» установить первый частотный диапазон 30..60 МГц перестраиваемого генератора. Отсоедините контакты конденсатора с исследуемым образцом диэлектрика.

5. Медленно вращая ручкой «Частота, МГц», найдите резонанс по индикатору добротности «Q». Если во всем частотном поддиапазоне резонанс не будет обнаружен, то смените катушку индуктивности  $L$  (См. рис. 3) с помощью галетного переключателя и вновь плавно изменяйте частоту генератора. Эти операции следует проводить до тех пор, пока резонанс не будет обнаружен.

6. Ручкой «Частота, МГц» установите по индикатору частоту вблизи найденной резонансной и вращением ручкой «Емкость, пФ» вновь найдите резонанс по индикатору «Q». Данные  $f_1$ ,  $Q_1$  и  $C_1$  занести в табл. I.

7. Подсоедините конденсатор с исследуемым образцом диэлектрика к установке.

8. Вращением ручки «Емкость, пФ» вновь найдите резонанс по индикатору « $Q$ ». Данные  $Q_2$  и  $C_2$  при  $f_1$  занесите в табл. 1.

Примечание.

1. При определении добротности следует показавия индикатора  $Q$  перемножить с показаниями индикатора «Множитель  $Q$ ».

2. Произведение показаний обоих индикаторов не зависит от положения ручки «Рег. выхода». В процессе измерений эта ручка ставится в положение, в котором при резонансе можно снять показания с обоих индикаторов добротности.

9. Определите  $C_1$ ,  $C_2$ ,  $Q_1$ ,  $Q_2$  по методике пп. 4–8 на других частотах генератора и в других поддиапазонах. Количество частот должно быть не менее 5.

Таблица 1

№ опыта	$f$ , МГц	$C_1$ , пФ	$Q_1$	$C_2$ , пФ	$Q_2$	$C'$ , пФ	$\operatorname{tg} \delta$	$\epsilon$
1								
2								
+								
+								
+								

10. Определите  $C'$ ,  $\operatorname{tg} \delta$  и  $\epsilon$  по формулам (3) и (4) и внесите в табл. 1.

11. Построить графики зависимостей  $\operatorname{tg} \delta = q_1(f)$  и  $\epsilon = q_2(f)$ .

12. Исследуйте другие образцы диэлектрика, предложенные преподавателем, по методике пп. 4–11.

13. Проведите сравнительный анализ полученных характеристик. Подготовьте отчет, в котором объясните каждую характеристику, сравните с теоретической. Оцените погрешности эксперимента, пользуясь методикой, приведенной в приложении методических указаний. Сделайте выводы.

#### ВОПРОСЫ К КОЛЛОКВИУМУ

1. Какое значение имеет величина относительной диэлектрической проницаемости диэлектрика, используемого в качестве изоляционного материала?

2. От чего зависят потери энергии (мощности) в изоляции и какое состояние изоляции увеличивает их?



3. Что понимают под тангенсом угла диэлектрических потерь и о чем свидетельствует увеличение  $\operatorname{tg} \delta$ ?
4. Чем определяется целесообразность выбора на практике той или иной схемы замещения диэлектрика?
5. Как определяется  $\operatorname{tg} \delta$  и  $\epsilon$  диэлектрика (объясните ход работы)?

#### *БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК*

- Буров В. П. Измерительные приборы для исследований свойств материалов РЭА. Универсальные приборы: Метод. указания. Куйбышев: КуАИ, 1982. 34 с.
- Нисынкoв В. В. Материалы электрошвей техники. М.: Высшая школа, 1986. 306 с.

#### Лабораторная работа 6

### *ИССЛЕДОВАНИЕ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ СВОЙСТВ МАТЕРИАЛОВ ПРОВОДЯЩИХ ЭЛЕМЕНТОВ РЕЗИСТОРОВ*

Цель работы: исследование влияния температуры на удельное сопротивление непроволочных резисторов.

#### Задачи:

1. Для образцов резистивных материалов экспериментально определить температурный коэффициент удельного электрического сопротивления.
2. Дать теоретическую интерпретацию полученных экспериментальных резисторов.
3. Определить группы материалов, из которых выполнены следующие образцы.

#### *ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ*

#### *Электрические свойства резистивных материалов*

Наилучшими проводниками электрического тока являются металлы. Механизм протекания тока по металлам в твердом состоянии обусловлен движением свободных электронов, вследствие чего их называют проводниками с электронной проводимостью. Металлические проводниковые материалы могут быть разделены на материалы высокой проводимости и материалы высокого сопротивления. Металлы с высокой проводимостью используются для проводов, кабелей, обмоток электрических машин и трансформаторов, для изготовления волноводов и т. д. Металлы и сплавы высокого

сопротивления применяются в реостатах, резисторах, лампах накаливания, нагревательных элементах.

Основными электрическими характеристиками проводниковых материалов являются:

удельное сопротивление  $\rho$ , Ом·см или мкОм·м;

температурный коэффициент удельного сопротивления ТК $\rho$ , 1/град;

термоэлектродвижущая сила относительно меди  $E_{\text{м.Св}}^{20,100}$ , мкВ/°С.

Удельное электрическое сопротивление связано с сопротивлением  $R$  проволоки любой длины  $l$  и площади поперечного сечения  $S$  известной формулой  $\rho = R (S/l)$ .

Удельное сопротивление металлического проводника может быть выражено на основании представлений электронной теории металлов  $\rho = (2 m \bar{U}) / (q^2 n_0 \bar{\lambda})$ , где  $m$  — масса электрона;  $\bar{U}$  — средняя скорость теплового движения электрона внутри металлического проводника;  $q$  — заряд электрона;  $n_0$  — число электронов в единице объема металлического проводника;  $\bar{\lambda}$  — средняя длина свободного пути электрона.

Скорость теплового движения электронов мало зависит от температуры, т. е. электронный газ в металлических проводниках находится в состоянии «вырождения». Для различных проводников она примерно одинаковая. Незначительно отличаются также и числа свободных электронов в единице объема проводников, так, например, для меди и никеля это различие составляет менее 10%. Поэтому удельное электрическое сопротивление различных проводников в основном зависит от средней длины свободного пробега электрона в проводнике, связанной со строением проводника, с его структурой. Все чистые металлы с наиболее правильной кристаллической решеткой характеризуются наименьшими значениями удельного сопротивления, а сплавы всегда имеют повышенное значение  $\rho$  в сравнении с компонентами, входящими в их состав. Повышенное сопротивление сплавов объясняется тем, что число свободных электронов и длина свободного пути электрона у них понижены по сравнению с чистыми металлами.

С повышением температуры колебания узлов кристаллической решетки металлического проводника становятся все более активными, и на пути направленного движения электронов под воздействием электрического поля возникают все больше и больше препятствий, т. е. средняя длина свободного пути электронов уменьшается, а сопротивление, следовательно, возрастает. Величина, характеризующая возрастание удельного сопротивления, получила название температурный коэффициент удельного сопротивления (ТК  $\rho$ ).

Так как зависимость  $\rho$  от температуры близка к линейной, то в технике принимают  $\rho = \rho_0 [1 + \text{ТК } \rho (t - t_0)]$ , где  $\rho_0$  — зна-

ченне  $\rho$  при  $t = t_0$ . Для чистых металлов ТК  $\rho$  всегда больше, чем для сплавов из этих металлов, имеют положительный знак и близки к  $1/273$ , т. е. к  $0,004 \text{ K}^{-1}$ . Температурные коэффициенты сплавов могут быть очень малыми, а в некоторых случаях приобретать даже отрицательные значения.

Проводящий слой резисторов может быть из полупроводникового материала. Подвижность носителей заряда в полупроводниках, так же как и в проводниках, уменьшается с ростом температуры по причине, изложенной выше. Однако изменение подвижности  $\mu$  в полупроводниках происходит более интенсивно:  $\mu \approx T^{-3/2}$ . В то же время число носителей заряда с увеличением температуры не сохраняется (как в случае металлов), а увеличивается  $n \sim n_0 \exp(-\Delta W/2kT)$ , где  $\Delta W$  — ширина запрещенной зоны полупроводника.

Таким образом, с ростом температуры протекает два противоположных процесса: уменьшение подвижности; увеличение числа носителей.

Как правило, благодаря экспоненциальному характеру изменения числа носителей второй процесс преобладает над первым. В результате электропроводность полупроводников возрастает с ростом температуры, следовательно, сопротивление уменьшается. Таким образом, ТК  $\rho$  полупроводниковых резисторов имеет отрицательный знак.

### *Влияние конструктивных особенностей резисторов на ТК $\rho$*

Рассмотренные моменты справедливы для материалов, обладающих идеальной кристаллической решеткой, — для монокристаллов. В реальных же условиях приходится иметь дело с поликристаллами. Рассмотрим как это обстоятельство может влиять на температурные свойства резисторов. Остановимся на металлизированных резисторах. В конструктивном отношении этот тип резисторов выполнен в виде тонкопленочного поликристаллического покрытия на керамическом основании. Токпрохождение обусловлено прохождением носителя заряда внутри каждого кристаллита и между смежными кристаллитами.

В первом случае движение носителя происходит в пределах совершенной кристаллической решетки, поэтому сделанные ранее выводы справедливы. Второй случай имеет свои особенности. Очевидно, что возможность продвижения носителя заряда между смежными кристаллитами существенно зависит от расстояния между ними и от геометрических факторов соприкасающихся границ раздела кристаллов, т. е. от контактного сопротивления кристаллов. С ростом температуры происходит линейное расширение как самого покрытия, так и керамического основания. Однако

коэффициент линейного расширения керамического основания во много раз меньше коэффициента линейного расширения металлов, поэтому имеет место своеобразное сжатие металлического покрытия. В результате происходит более тесное сопряжение границ раздела, а значит, уменьшение контактного сопротивления.

Таким образом, знак и величина ТКС будут определяться по результатам суммарного взаимодействия двух рассмотренных конкурирующих процессов, поэтому не исключено, что ТКС металлизированного резистора окажется отрицательным.

### *Особенности технологии изготовления резисторов*

В промышленности нашли применение резисторы из углеродистых, металлопленочных, металлооксидных, полупроводниковых и композиционных материалов.

Для изготовления углеродистых резисторов применяют пиролитический углерод, получаемый разложением углеводородов, чаще гентана ( $C_7H_{16}$ ). Пленки пиролитического углерода толщиной  $10^{-6}$  см имеют плотность  $2,05 \text{ Г/см}^2$ , удельное объемное сопротивление  $1,5 \cdot 10^{-5} \text{ Ом}\cdot\text{см}$ , отрицательный температурный коэффициент сопротивления  $(- (2-4) \cdot 10^{-4} \text{ 1/}^\circ\text{C})$  и температурный коэффициент линейного расширения  $6,6 \cdot 10^{-6} \text{ 1/}^\circ\text{C}$ . Они имеют низкую себестоимость, малую зависимость от частоты, высокую стабильность параметров и стойкость к импульсным нагрузкам.

Для изготовления металлопленочных и металлооксидных резисторов применяют тонкие пленки из металлов, сплавов или оксидов, нанесенных на основание (керамику, стекло, ситалл и др.). Нанесение пленок ведется испарением в вакууме, катодным, реактивным или ионноплазменным распылением, термическим разложением, электрохимическим осаждением, вжиганием и др. методами. Для получения пленочных резисторов наиболее часто применяют никром, тантал, титан, хром, палладий и их сплавы. Например, тонкие пленки нитрида тантала, защищенные пятиоксидом тантала, имеют очень стабильные параметры. В основном для защиты пленок используется двуокись кремния.

Металлооксидные резисторы обладают высокой термостойкостью и область их применения расширяется (особенно на основе двуокиси олова).

Композиционные резисторы типа кермет, РС-3001, РС-3760 и МЛТ получают из смеси различных материалов. Например, кермет, получаемый композицией 90% хрома и 10% кремния, представляет собой металлглазуревую композицию. Смешением порошков металла с оксидом кремния и растворителем получают пасту, которую наносят на подложку и подвергают термообработке при  $1100^\circ\text{C}$ . Полученная пленка резистора толщиной 20—25 мкм обладает высокой термостойкостью, влаго- и износостойкостью,

стабильностью характеристик. Получаемые из нее резисторы обладают номиналами от  $10^3$  до  $10^6$  Ом.

Резистивный сплав РС-3001, имеющий 31,8% хрома, 0,9% железа и 60% кремния, обеспечивает номиналы сопротивления от 100 до  $10^6$  Ом.

#### МЕТОДИКА ПРОВЕДЕНИЯ ИССЛЕДОВАНИИ

Исследование ТК $\rho$  резисторов проводится на установке, схема которой представлена на рис. 4. Установка состоит из термощафа с размещенными в нем исследуемыми резисторами, измерительного моста и измерителя температуры, состоящего из терморезистора и индикатора. Чтобы использовать в процессе измерения все измерительные декады моста, следует обратить особое внимание на правильную установку переключателя «множитель» (в работе используется мост Р333, описание принципа работы и методику эксплуатации которого см. в работе [1]).

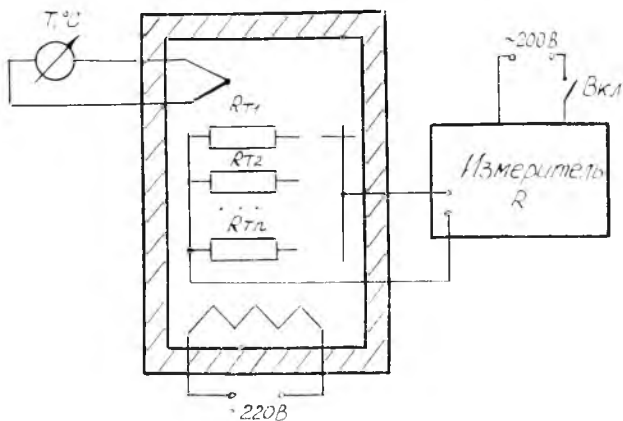


Рис. 4

Индикатор температуры проградуирован в °С. Нулевое показание индикатора соответствует температуре учебной лаборатории (25°С), поэтому это значение следует прибавлять постоянно ко всем показателям индикатора.

#### ПОРЯДОК ВЫПОЛНЕНИЯ РАБОТЫ

1. Ознакомиться с экспериментальной установкой.
2. Откройте термощаф и по виду резисторов внутри шкафа сделайте предположение о материалах, из которых выполнены резисторы, и о стабильности исследуемых резисторов.

3. Включите установку, для чего установите тумблер на левой боковой панели измерительного моста в верхнее положение.

4. Проведите измерения сопротивлений всех исследуемых резисторов с помощью измерительного моста, последовательно подключая их с помощью переключателя, расположенного на дверце термощкафа. Результаты занесите в табл. 2.

5. Закройте дверцу термощкафа и включите термощкаф, поставив тумблер на его передней панели в верхнее положение.

6. Проведите измерение всех исследуемых резисторов через каждые 3—7 минут. Результаты измерения температуры и сопротивления занесите в табл. 2.

7. Постройте график зависимости  $R = f(T)$ .

8. Определите величину и знак ТКР резисторов.

9. Сформулируйте выводы о правильности сделанных в п. 2 предположений. Оцените погрешности эксперимента (прил.).

Т а б л и ц а 2

№ опыта	$T, ^\circ\text{C}$	Тип резистора (при визуальном осмотре)	$R_1$	$R_2$	...	$R_n$
1	25					
2						
3						
4						
10	150					

ТКР  $\cdot 10^{-5} / ^\circ\text{C}$

#### ВОПРОСЫ К КОЛЛОКВИУМУ

1. Чем объясняется знак ТКР резисторов?
2. Влияет ли конструктивное исполнение резистора на ТКР?
3. Какова структура композиционных резисторов?
4. В чем заключаются преимущества и недостатки проволочных и непроволочных резисторов?
5. Какие материалы используются для изготовления металлизированных и металлооксидных резисторов?

#### БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Буров В. И. Измерительные приборы для исследований свойств материалов РЭА. Универсальные приборы: Метод. указания. Куйбышев: КуАИ, 1982. 31 с.

## ИССЛЕДОВАНИЕ ТЕРМОЭДС МАТЕРИАЛОВ

Цель работы: исследование температурной зависимости термоЭДС различных пар металлов и сплавов.

Задание:

1. Снять зависимость термоЭДС образцов материалов от температуры.
2. Определить  $E_{МХ}^{20,100}$  исследуемых пар материалов.
3. Дать интерпретацию полученным результатам.

### ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ

#### *Влияние градиента температуры на свойства резистивного материала*

Составляя цепь из двух металлических проводников и нагревая один из контактов до более высокой температуры, чем другой, можно получить термоэлектродвижущую силу, которая для данной пары будет функцией только разности температур. Подбирая материалы, имеющие меньшую термоэлектродвижущую силу, пользуются ими для создания резисторов, способных работать в радиоэлектронной аппаратуре в условиях значительных градиентов температуры. Материалы с большой термоЭДС используют для измерения температуры (термопара). В измерительных приборах и образцовых сопротивлениях стремятся применять металлы и сплавы с возможно меньшей термоэлектродвижущей силой относительно меди, чтобы не внести погрешности в измерения. Существуют пары материалов, меняющие знак ЭДС в процессе нагревания.

Отрыв электрона от нейтрального атома связан с затратой энергии, необходимой для преодоления сил электростатического притяжения между ними. Эта энергия, выраженная в электронвольтах, получила название потенциала ионизации вещества (аналогично для твердых тел — работа выхода электрона). Физический смысл работы выхода становится понятен при рассмотрении энергетической диаграммы электронов в кристаллическом твердом теле. При образовании кристаллической решетки (вследствие сближения атомов) энергетические барьеры между соседними атомами снижаются настолько, что электроны зоны проводимости приобретают возможность свободно перемещаться по всему кристаллу. В то же время потенциал на поверхности кристалла остается таким же, как и у изолированного атома. Поэтому за работу выхода электронов принимается минимальный интервал энергии  $W_B$ , необходимый для удаления электрона из

кристалла, и измеряется она от самого верхнего уровня, занятого электронами, — уровня Ферми.

Рассмотрим, как видоизменяются энергетические диаграммы при соприкосновении двух металлов.

Следует иметь в виду, что не только при высокой, но и при достаточно низкой температуре имеется определенное количество электронов, обладающих энергией большей  $W_B$  (см. лаб. раб. 2). При этом, чем меньше работа выхода, тем больше таких электронов. Поэтому при соприкосновении металлов между ними начнется обмен «высокоэнергетическими» электронами. Предположим, что работа выхода у первого металла меньше, чем у второго (рис. 5).

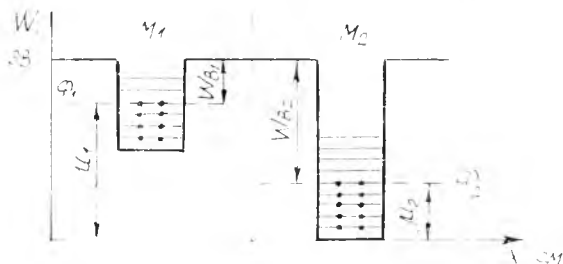


Рис. 5

В этом случае электронный ток, протекающий слева направо, будет больше тока, протекающего в обратном направлении. Следовательно, поверхность второго металла будет заряжаться отрицательно, а на поверхности первого металла появится нескомпенсированный положительный заряд. Процесс преимущественного перетекания зарядов продолжается до тех пор, пока возникшая вследствие этого разность потенциалов между металлами не скомпенсирует разность работ выхода между металлами:

$$q U_K = W_{B1} - W_{B2}, \quad (5)$$

где  $q$  — заряд электрона;  $U_K$  — контактная разность потенциалов;  $W_{B1}$ ,  $W_{B2}$  — работы выхода металлов.

Энергетическая диаграмма, характеризующая этот процесс, показана на рис. 6.

Оценим количество электронов, которое должно перейти из первого металла во второй, чтобы создать равновесную разность потенциалов  $U_K$ . Если принять  $U_K = 1$  В, зазор между металлами  $d = 10^{-7}$  см, то напряженность электрического поля в зазоре составит  $E = 10^7$  В/см. Принимая во внимание, что для плоского конденсатора справедливо выражение  $Q = E/4\pi$ , для плотности поверхностного заряда получим

$$n = E/4\pi q \cong 10^{14} \text{ [см}^{-2}\text{]}.$$



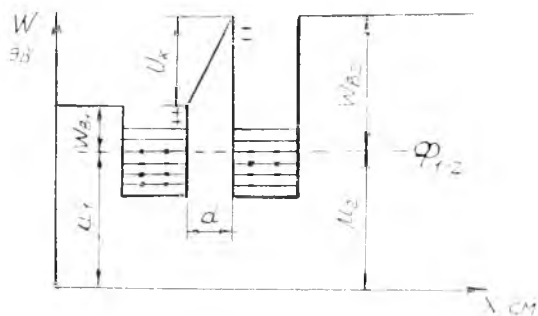


Рис. 6

Число атомов на поверхности металла по порядку величины составляет  $\sim 10^{15}$ , следовательно, в первом металле 0,1% поверхностных атомов будет ионизировано, а во втором такое же количество атомов получит избыточный отрицательный заряд. После этого уровни Ферми обоих металлов сравняются. При переходе части электронов из первого металла во второй изменяются также величины  $W_{B1}$  и  $W_{B2}$ , однако ввиду того, что количество перешедших электронов  $10^{12}$  гораздо меньше общего количества электронов в зоне проводимости  $\sim 10^{23}$ , изменения работ выхода металлов практически не происходят.

### ТермоЭДС

Сущность явления термоЭДС состоит в том, что в электрической цепи, состоящей из последовательно соединенных различных металлов, возникает электродвижущая сила, если контактные спаяны поддерживаются при различных температурах (рис. 7). В простейшем случае, когда такая цепь состоит из двух различных металлов (рис. 7), она носит название термопары.

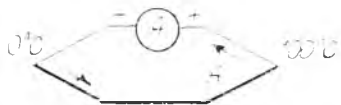


Рис. 7

Возникновение термоЭДС в цепи (рис. 7) объясняется двумя причинами: положение уровня Ферми в каждой проводимке является функцией температуры; наличие градиента температур в проводимке приводит к возникновению градиента концентрации носителей заряда.

В первом приближении зависимость уровня Ферми в металлах от температуры определяется следующим выражением:

$$\mu = \mu_0 \left| 1 - \frac{\pi^2}{12} \left( \frac{kT}{\mu} \right)^2 \right|, \quad (7)$$

где  $\mu_0$  — значение уровня Ферми при  $T = 0$  К.

К примеру, в меди уровень Ферми снижается на 80 мкэВ при повышении температуры от 0 К до комнатной температуры.

Экспериментальные исследования свидетельствуют о том, что термоЭДС термонары зависит от разности температур между холодным  $T_0$  и горячим  $T$  спаями и для небольших интервалов температур с достаточной для практических целей точностью подчиняется соотношению

$$E = \alpha_{AB}(T - T_0), \quad (8)$$

где  $E$  — величина термоЭДС;  $\alpha_{AB}$  — коэффициент термоЭДС для данной пары металлов.

Если оба спая находятся при одинаковой температуре, то термоЭДС спаев равны по величине и направлены противоположно, а следовательно, суммарная термоЭДС равна нулю. С увеличением температуры одного из спаев в нем активизируются процессы диффузионного перемещения заряда, в результате чего появляется дополнительная разность потенциалов.

Для однозначного определения полярности и величины термоЭДС поступают следующим образом. Для цепи из двух проводников А и В, в которых спай находится при температурах 0 и 100°C, определяется величина  $E_{AB}^{0,100}$ , имеющая положительный знак, если через горячий спай ток течет от А к В, т. е. в направлении стрелок, указанных на рис. 7. Величины  $E_{AB}^{0,100}$ , взятые с учетом знака, образуют термоэлектрический ряд напряжений, причем в качестве проводника А используется один и тот же металл — платина.

Следует, однако, иметь в виду, что наличие термоЭДС не всегда является положительным фактором. В частности, при создании прецизионных измерительных мостов постоянного тока в отдельных ветвях последнего могут возникать дополнительные источники ЭДС вследствие неодинаковой температуры контактов металлических соединений, образующих электрическую цепь. Появление непредвиденных источников ЭДС вносит значительные погрешности в процессе измерения параметров цепи.

#### МЕТОДИКА ПРОВЕДЕНИЯ ИССЛЕДОВАНИЙ

Схема экспериментальной установки для изучения термоЭДС металлов приведена на рис. 8. На нем даны обозначения: Г — встроенный термощкаф, В — вольтметр,  $R_n$  — сопротивление нагревательного элемента, в котором расположены горячие спай контактных пар металлов. В качестве эталонного электрода используется материал хромель Х. Исследуемые образцы — сплавы амальга А, конель К. Исследуется также термонара вольфрам В — рений Р. Измерение температуры осуществляется с помощью тер-

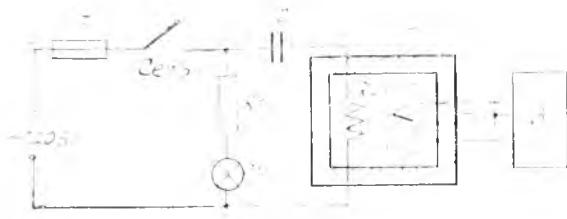


Рис. 8

монары ХА. Измерение термоЭДС производится с помощью милливольтметра постоянного тока. Переключение термонар осуществляется с помощью кнопочного переключателя  $S1-S3$ .

### ПОРЯДОК ВЫПОЛНЕНИЯ РАБОТЫ

1. Ознакомьтесь с экспериментальной установкой (см. рис. 8) и схемой подключения термонар (рис. 9).

2. Провести измерение термоЭДС всех контактных пар, предусмотренных в экспериментальной установке, при нормальной температуре.

3. Включить термостат тумблером «Вкл.» на лабораторном стенде и снять зависимость термоЭДС всех термонар от температуры. Результаты занести в таблицу, форма которой выбирается произвольной.

4. Построить зависимости по экспериментальным данным.

5. Определить коэффициенты термоЭДС и  $T_{\text{ЭДС}}^{\text{ЭДС}} / \Delta T$  для исследуемых пар материалов.

6. Сформулируйте основные выводы по работе.

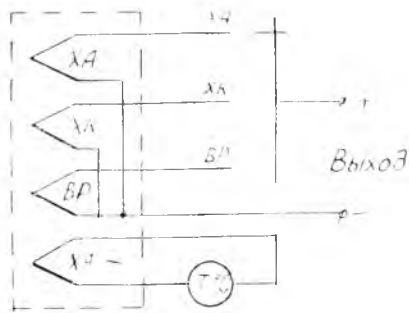


Рис. 9

### ВОПРОСЫ К КОЛЛОКВИУМУ

1. Какие требования предъявляются к резисторам в отношении величины термоЭДС?

2. Как выглядит энергетическая диаграмма до и после соприкосновения одинаковых и различных металлов?

3. Что такое работа выхода электронов?

4. Изменится ли работа выхода каждого из проводников при соприкосновении его с другими проводниками?

5. При каких условиях возникает термоЭДС?

6. Для каких целей выгодно иметь большую термоЭДС? В каких случаях необходимо иметь минимальное значение термоЭДС металлов и сплавов относительно меди?

7. Укажите основные свойства и области использования испытанных металлов и сплавов.

#### *БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК*

1. Писынков В. В. Материалы электронной техники. М.: Высшая школа, 1986. — 406 с.

## Приложение

### МЕТОДИКА ОБРАБОТКИ РЕЗУЛЬТАТОВ ЭКСПЕРИМЕНТА С ПРИМЕНЕНИЕМ МИКРОЭВМ «ЭЛЕКТРОНИКА ДЗ-28»

Если сделанные Вами выводы по результатам исследования материалов расходятся с теорией, то следует оценить погрешности Ваших экспериментальных данных. Для этого необходимо по согласованию с преподавателем повторить труднообъяснимые эксперименты, пользуясь следующей методикой.

1. Снимите исследуемую характеристику материала, задавая влияющему параметру вначале положительные (прямой ход), а затем отрицательные (обратный ход) одинаковые приращения. Величину приращений влияющего параметра определите, разделив весь возможный диапазон его изменения на 10 частей.

2. Повторите исследования, указанные в п.1, не менее 3–5 раз.

3. Полученные данные обработайте на микроЭВМ «Электроника ДЗ-28», для чего получите у преподавателя кассеты с языком «Бейсик» и программой обработки результатов эксперимента.

4. Включите ЭВМ и подготовьте ее к работе. Поставьте кассету с машинным языком на ЭВМ. На клавиатуре машины наберите код 120. После перемотки ленты нажмите клавиши «С» и «Сл». После считывания языка нажмите клавиши «КП». Проверьте код 221518. Нажмите клавиши «С» и «S». Перейдите к работе на диске. Нажмите дважды клавишу «ПС». Поставьте кассету с программой обработки результатов эксперимента на ЭВМ. Наберите на клавиатуре «LOAD», нажмите «ПС». После считывания программы наберите «LIST». Просмотрите программу, с которой будете работать. Выпишите формулы рассчитываемых погрешностей. Наберите на клавиатуре «RUN». Вам осталось ввести данные ваших экспериментальных исследований.

5. При останковке программы на экране дисплея будет написано, какая информация из ваших экспериментальных исследований требуется для дальнейшей работы ЭВМ. Введите необходимую числовую информацию и нажмите клавишу «ПС».

6. Перевинтите с экрана дисплея значения погрешностей: вариационную, конструктивную, среднеквадратичную, предельную и основную.

7. Проведите анализ полученных результатов исходя из формул, по которым производится расчет технических характеристик используемых измерительных приборов. При необходимости еще раз просмотрите программу, набрав на клавиатуре «LIST».

8. Сделайте окончательно выводы о свойствах исследуемого материала, используя данные погрешностей результатов эксперимента.

Составитель *Виктор Николаевич Буров*

ИССЛЕДОВАНИЕ МАТЕРИАЛОВ ЭЛЕМЕНТОВ  
КОНСТРУКЦИИ НЕПРОВОЛОЧНЫХ РЕЗИСТОРОВ

Редактор Е. Д. Антонова  
Техн. редактор Н. М. Калешюк  
Корректор Н. С. Куприянова

Сдано в набор 2.01.89 г. Подписано в печать 6.02.89 г.  
Формат 60×84 1/16. Бумага оберточная.  
Печать высокая. Литературная гарнитура.  
Усл. п. л. 1,25. Уч.-изд. л. 1,16.  
Т. 1000 экз. Заказ 3. Бесплатно.

Куйбышевский ордена Трудового Красного Знамени  
авиационный институт имени академика С. П. Королёва,  
443001, Куйбышев, ул. Молодогвардейская, 151.

---

Тип. ЭОЗ Куйбышевского авиационного института,  
443001, г. Куйбышев, ул. Ульяновская, 18.