

Министерство образования Республики Беларусь

Учреждение образования  
«Гомельский государственный технический  
университет имени П. О. Сухого»

Кафедра «Промышленная электроника»

**А. А. Алексеенко**

# **МАТЕРИАЛЫ И КОМПОНЕНТЫ ЭЛЕКТРОННОЙ ТЕХНИКИ**

## **ПРАКТИКУМ**

**по выполнению лабораторных работ  
по одноименной дисциплине  
для студентов специальности 1-36 04 02  
«Промышленная электроника»  
дневной и заочной форм обучения**

**Электронный аналог печатного издания**

**Гомель 2021**

УДК 621.315.5+539.261(075.8)  
ББК 31.221.9я73  
А47

*Рекомендовано к изданию научно-методическим советом  
факультета автоматизированных и информационных систем  
ГГТУ им. П. О. Сухого  
(протокол № 1 от 03.09.2020 г.)*

Рецензенты: проректор по науч. работе, проф. каф. «Физика» ГГТУ  
им. П. О. Сухого д-р техн. наук *А. А. Бойко*;  
декан фак. физики и информ. технологий ГГУ  
им. Ф. Скорины канд. физ.-мат. наук, доц. *Д. Л. Коваленко*

**Алексеевко, А. А.**

А47      Материалы и компоненты электронной техники : практикум по выполнению лаборатор. работ по одним. дисциплине для студентов специальности 1-36 04 02 «Промышленная электроника» днев. и заоч. форм обучения / А. А. Алексеевко. – Гомель : ГГТУ им. П. О. Сухого, 2021. – 36 с. – Систем. требования: РС не ниже Intel Celeron 300 МГц ; 32 Mb RAM ; свободное место на HDD 16 Mb ; Windows 98 и выше ; Adobe Acrobat Reader. – Режим доступа: <https://elib.gstu.by>. – Загл. с титул. экрана.

ISBN 978-985-535-465-0.

Содержит пять лабораторных работ с методическими рекомендациями по их выполнению, изложены основные теоретические сведения, а также даны контрольные вопросы.

Для студентов специальности 1-36 04 02 «Промышленная электроника» дневной и заочной форм обучения.

УДК 621.315.5+539.261(075.8)  
ББК 31.221.9я73

ISBN 978-985-535-465-0

© Алексеевко А. А., 2021  
© Учреждение образования «Гомельский  
государственный технический университет  
имени П. О. Сухого», 2021

## Предисловие

Представленный цикл лабораторных заданий предназначен для ознакомления студентов специальности 1-36 04 02 «Промышленная электроника» с существующими видами материалов электронной техники, позволяющими изготавливать с их применением соответствующую элементную базу электронной техники. Рассматриваются различные режимы эксплуатации выбранных к изучению компонентов электронной техники, а также особенности влияния внешних факторов (например, температуры или давления) на стабильность их электротехнических характеристик. Отдельно приводится лабораторная работа, позволяющая студентам получить общие сведения о возможности изучения фазового состава компонентов, входящих в состав электротехнического изделия.

Целью выполнения лабораторных работ является углубление понимания и эффективности усвоения теоретического материала, излагаемого студентам в процессе чтения курса лекций по данной дисциплине. В частности, на примере конкретных изделий (или компонент изделий) электронной техники изучается современная приборная база и методы ее применения, используемые при установлении функциональных характеристик элементной базы электронной техники: резистивных элементов в виде металлических проводников (на примере одножильных проводов различного элементного состава и диаметра сечения); полупроводниковых терморезистивных элементов; магнитомягких материалов (для сердечников трансформатора броневоего типа) и активных пьезоэлектриков (используются низкочастотные кварцевые резонаторы). Приводятся примеры применения современного аналитического оборудования (рентгеновского дифрактометра), позволяющего проводить фазовый анализ поверхности элементной базы компонентов электронной техники, а также рассчитывать дисперсию размеров формируемых в их структуре кристаллических нанообъектов (для частного случая отдельно локализованных наночастиц с размерностью не более 200 нм).

## Общие сведения

Выполнение лабораторной работы включает в себя несколько основных этапов, состоящих из самостоятельной подготовки студентов, базирующейся на рабочей программе, разработанной для данного спецкурса; последующего допуска к самостоятельной работе (после прохождения инструктажа по технике безопасности); выполнения измерений (включая обработку погрешности измерений) и описания результатов полученных исследований, состоящих из отчета и соответствующих ему выводов.

Проведении самостоятельной подготовки по теме лабораторного занятия студент обязан изучить методику проведения измерений, четко понимать цель работы и установленный порядок ее выполнения, знать и следовать существующим требованиям к оформлению отчета по лабораторной работе.

Получив допуск к выполнению конкретной лабораторной работы на имеющемся аудиторном стенде, студенту необходимо предоставить оформленный в соответствии с установленными в вузе требованиями отчет о выполнении предыдущей лабораторной работы, осуществить защиту этого отчета и иметь предварительный отчет по предлагаемой к выполнению следующей лабораторной работы. Преподаватель осматривает функциональное состояние стенда для выполнения лабораторной работы, задает уточняющие вопросы по тематике проведения измерений и разрешает допуск к ее выполнению.

При выполнении лабораторных работ необходимо учитывать и неукоснительно придерживаться следующих общих требований, включающих также требования по технике безопасности (ТБ):

– измерения, выполняемые приборами с цифровой индикацией измеряемых величин, должны содержать общее количество – не менее трех значащих цифр (причем после запятой – не менее одной цифры). В случае проведения измерений аналоговыми приборами или устройствами (например, аналоговым осциллографом) получаемые значения должны состоять из не менее чем двух цифр (после запятой – не менее одной цифры);

– при подключении измерительной и задающей аппаратуры (генераторов, осциллографов, вольтметров (амперметров) и т. д.) к собранной на стенде лабораторной работе общий провод прибора должен быть соединен с общим проводом стенда. Необходимо обязательно проверять наличие рабочего состояния заземления как для стенда, так и корпусов оборудования, применяемого при выполнении лабораторной работы;

– после завершения работы сначала проводится отключение стенда от электрической сети, а затем – разборка общей схемы, соединяющей его отдельные блоки или узлы. Начало указанных работ производится только после письменного предоставления преподавателю результатов сделанных измерений, их проверки и получения от преподавателя разрешения на разборку собранной на стенде лабораторной работы.

Итоговый отчет по выполненной лабораторной работе должен содержать:

- формулировку цели работы;
- чертеж схемы или блок-схему проводимого эксперимента;
- методику получения и последующего численного расчета результатов измерений;
- заполненные таблицы, содержащие результаты измерений и сделанные согласно приведенным в лабораторной работе формулам численные расчеты;
- обработанные в виде графических зависимостей результаты измерений (вычислений), оформленные с применением программ Origin или MathCAD;
- обоснованные выводы по результатам самостоятельно выполненной студентом работы, содержащие сравнительный анализ полученных данных с известными справочными или литературными значениями. Обязательно указать данные об области конкретного практического применения полученных результатов исследований (относительно материалов и изделий электронной техники, свойства которых изучались в выполненной лабораторной работе).

## Лабораторная работа № 1

### Изучение электротехнических свойств проводниковых материалов и резистивных элементов

#### 1. Цель лабораторной работы

Изучение влияния температуры на удельное электрическое сопротивление металлических проводящих материалов и сплавов. Проведение расчета температурного коэффициента сопротивления (ТКС) и сравнение полученных данных с известными справочными значениями. Ознакомление с методикой измерения и расчета ТКС. Понятие о погрешности проводимых измерений. Установление рабочих характеристик термопар, изучение явления термоЭДС.

#### 2. Краткие теоретические сведения

В общем случае в качестве проводников могут использоваться твердые тела, жидкости и газы в ионизированном состоянии. К первой группе в основном относятся металлические проводники. Электрический ток в них формируется за счет значительного числа коллективизированных электронов, которые составляют вполне определенное для данного металла количество свободных носителей заряда, не принадлежащих ни одному атому в отдельности. Атомы, находящиеся в узлах кристаллической решетки, не являются нейтральными, а представляют собой положительно заряженные ионы, образовавшиеся в результате перехода валентных электронов в свободное состояние. Количество свободных электронов, а также характер взаимодействия свободных электронов с ионами кристаллической решетки влияют на основные свойства проводникового материала, к которым относятся:

1. Удельная проводимость  $\sigma$  или удельное электрическое сопротивление  $\rho$ . Величина  $\sigma$  в общем случае для любого материала определяется из закона Ома в дифференциальной форме:  $\vec{j} = \sigma \vec{E}$ , где  $\vec{j}$  – вектор плотности электрического тока;  $\vec{E}$  – вектор напряженности электрического поля. Величина, обратная  $\sigma$ , называется удельным сопротивлением  $\rho$  и описывается следующей формулой:

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

где  $R$  – сопротивление проводника;  $S$  – площадь поперечного сечения;  $l$  – длина. ГОСТ предусматривает представление величины удельного сопротивления в следующей форме: [Ом · м] или [Ом · мм<sup>2</sup>/м].

2. Температурный коэффициент удельного сопротивления  $\alpha_\rho$ , характеризующий изменение удельного сопротивления при изменении температуры на один градус. Эта величина является мерой чувствительности сопротивления к температуре, или, напротив, мерой его термической стабильности. Для металлов данная величина всегда положительна и может быть рассчитана исходя из формулы

$$\alpha_\rho = \frac{\rho(t_2) - \rho(t_1)}{\rho(t_1) \Delta t}, \quad (1.2)$$

где  $\rho(t_2)$ ,  $\rho(t_1)$  – удельная проводимость при двух различных температурах исследуемого образца, причем  $t_1 < t_2$ ;  $\Delta t$  – модуль разности температур.

Дифференциальное выражение для  $\alpha_\rho$  при температуре  $T$  имеет вид

$$\alpha_\rho = \frac{1}{\rho_T} \frac{d\rho}{dt}. \quad (1.3)$$

Значения, полученные исходя из выражений (1.2) и (1.3), могут отличаться из-за различных значений  $\Delta t$ ,  $dt$ , а также абсолютных значений температуры, при которых проводились измерения ввиду нелинейности температурной зависимости сопротивления проводника. В данной лабораторной работе необходимо вычислить отклонение дифференциального значения  $\alpha_\rho$  от среднего:

$$\delta_\rho = \frac{\alpha_{\rho 10}}{\alpha_{\rho 90}} 100 \%, \quad (1.4)$$

где  $\alpha_{\rho 10}$  – температурный коэффициент удельного сопротивления, определяемый на интервале температур  $\Delta t = 10$  °С;  $\alpha_{\rho 90}$  – для интервала температур 90 °.

3. Контактная разность потенциалов или термоЭДС – это ЭДС, возникающая в месте контакта двух металлов, которую можно установить из выражения

$$\Delta U_t = \frac{E_t}{t_1 - t_2}, \quad (1.5)$$

где  $t_1$  и  $t_2$  – температуры противоположных концов контакта;  $E_t$  – термоЭДС контакта, зависящая от материала контактирующих проволок. Данное явление объясняется различной концентрацией и подвижностью электронов в различных металлах и имеет нелинейный характер в функции от температуры. В практических целях контактная разность потенциалов используется при измерении температуры, а также в термоэлектрических преобразователях. Называют эти устройства термопарами. Значения термоЭДС необходимо учитывать при выборе материалов для чувствительных измерительных устройств.

4. Удельная теплопроводность металлов пропорционально связана с их электропроводностью и характеризует количество тепловой энергии, проходящей через единицу площади при единичном градиенте температур за секунду.

Выбор того или иного проводникового материала должен производиться на основании комплексного учета требований, предъявляемых к его механическим, технологическим, химическим, тепловым и электрическим характеристикам.

### 3. Порядок выполнения лабораторной работы

1. Поместить стенд с четырьмя образцами тонкой металлической проволоки известной длины и диаметра в вентилируемый сушильный шкаф.

2. С помощью  $R-L-C$ -метра провести измерения начального сопротивления 4 образцов тонких металлических проводников. За начальную температуру принять температуру, равную 20 °С.

3. Задать на программаторе сушильного шкафа скорость подъема температуры 110 °С/1 ч.

4. С интервалом  $\Delta T = 10$  °С провести измерения изменения сопротивлений  $R_{x1}-R_{x4}$  в динамическом режиме (за устанавливаемое значение сопротивления для каждого шага принимать сопротивление, находящееся в интервале отклонения температур  $\pm 1$  °С).

5. Рассчитать величины удельного электрического сопротивления  $\rho_{x1}-\rho_{x4}$  из выражения (1.1):



6. Произвести измерения изменения приращений  $\Delta R_{x1}-\Delta R_{x4}$  в интервале температур 20–110 °С (с шагом  $\Delta T = 10$  °С). Определить значение  $\delta$  по методике (1.4). Результаты измерений занести в таблицу для каждого из измеряемых материалов:

$T$	°С	20	30	40	50	60	70	80	90	100	110
$R$	Ом										
$\Delta R$	Ом										
$\rho(t)$	Ом · м										
$\alpha_p(t)$	отн. ед.										
$\delta(t)$	%										

7. Аналогичным образом для интервала температур 20–800 °С измерить контактную разность потенциалов выданных двух образцов термопар, используя для их крепления штативы, а для нагрева – программируемую трубчатую электрическую печь. Результаты измерений и вычислений оформить в таблицу:

$t$	°С	20	30	40	50	60	70	80	90	100	110
$E_t$	мВ										
$\Delta U_t$	мВ/ °С										

*Примечание.* Значение  $E_t$  определить по выражению (1.5).

8. По известным справочным значениям определить тип термопар, а также изучаемых металлических проводников.

9. На отдельных рисунках построить графики зависимостей  $R(t)$ ,  $\alpha_p(t)$ ,  $E(t)$ ,  $\delta(t)$  для каждого вида образцов тонкой металлической проволоки и термопар.

10. В выводах описать ход выполнения работы, основные полученные результаты и возможные области применения изученных проводящих материалов (сплавов) и термопар.

11. При выполнении лабораторной работы **строго** соблюдать технику безопасности при работе с электроприборами, находящимися под напряжением и высокой токовой нагрузкой, а также подвергающимся термическому нагреву.

#### 4. Содержание отчета

1. Наименование и цель работы.
2. Исходные данные для расчета.
3. Изучение инструкции эксплуатации программатора сушильного шкафа и электрической печи.
4. Измерение исходных данных и расчет значений  $\rho_{x_i}$ ,  $\alpha_{\rho_i}(t)$ ,  $E_i(t)$ ,  $\delta_i(t)$ .
5. Сравнение полученных результатов с известными справочными значениями и установление типа изучаемых материалов.
6. Построение графической зависимости изучаемых характеристик от температуры.
7. Выводы по результатам проделанной работы.

#### Контрольные вопросы

1. Перечислить основные характеристики металлических проводниковых материалов.
2. Как экспериментально определяется значение удельной электропроводности металлов?
3. Почему различные методы измерения  $\alpha_{\rho}$  могут приводить к различным результатам? Определить различие между результатами измерений и справочными данными  $\alpha_{\rho}$ .
4. Сравнить результаты измерения  $\rho$  со справочными значениями, охарактеризовать возможные причины различия этих значений.
5. Ориентировочно оценить, во сколько раз изменится КПД линии электропередачи, выполненной из медного провода, при изменении температуры окружающей среды от  $-20$  до  $+30$  °С. При ответе воспользоваться результатами измерений.
6. От чего зависит значение контактной разности потенциалов  $U_t$ ?
7. Как практически используют явление контактной разности потенциалов?
8. Можно ли использовать проводящие материалы (металлы) с различной электроотрицательностью для создания контактных соединений?
9. Дать определение явления термоЭДС. Какой параметр термоЭДС вносит наибольший вклад в получаемое количественное значение для проводимых исследований (указать примерное процентное значение)?

## Литература

1. Покровский, Ф. Н. Материалы и компоненты радиоэлектронных средств : учеб. пособие для вузов / Ф. Н. Покровский. – М. : Горячая линия – Телеком, 2005. – 350 с.

2. Справочник по электротехническим материалам : в 3 т. / под ред. Ю. В. Корицкого, В. В. Пасынкова, Б. М. Тареева. – 3-е изд., перераб. – Л. : Энергоатомиздат. Ленингр. отд-ние, 1988. – 726 с.

3. Кухаренко, С. Н. Изучение свойств материалов : практ. рук-во по выполнению лаборатор. работ по курсу «Материалы и компоненты электронной техники» для студентов специальности 1–36 04 02 «Промышленная электроника» днев. и заоч. форм обучения / С. Н. Кухаренко. – Гомель : ГГТУ им. П. О. Сухого, 2006. – 26 с.

## Лабораторная работа № 2

### Определение основных характеристик терморезисторов

#### 1. Цель лабораторной работы

Изучение температурного коэффициента терморезистора. Определение изменения температурного сопротивления, понятие о температуре переключения терморезистора. Сравнение полученных расчетных (теоретических) и экспериментальных параметров со справочными значениями.

#### 2. Краткие теоретические сведения

Температурная характеристика терморезистора зависит от типа использованных для его получения полупроводниковых материалов, которые обычно состоят из поликристаллической смеси оксидов, подвергшихся спеканию при  $T = 1000\text{--}1400$  °С. В виде оксидов применяют:  $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ,  $\text{Zn}_2\text{TiO}_4$ ,  $\text{MgCr}_2\text{O}_4$ ,  $\text{TiO}_2$  или  $\text{NiO}$ ,  $\text{CoO}$  с  $\text{Li}_2\text{O}$ . Обычно контакты на резисторах получают путем вжигания серебряной пасты. Высокая стабильность сопротивления (особенно в условиях длительной эксплуатации) достигается путем проведения процесса искусственного старения резисторов, а также подбором техпроцесса их изготовления. Герметизация рабочего элемента терморезистора имеет несколько исполнений: остеклованные, монолитные, защищенные и изолированные.

Область практического применения выпускаемых отечественной промышленностью терморезисторов различного номинала (согласно данным электронного каталога РУП «Витебский завод радиодеталей «Монолит»», г. Витебск, Республики Беларусь) достаточно широка. Приведем данные для некоторых типов терморезисторов:

- тип «РТС-П»: терморезисторы прямого подогрева с положительным температурным коэффициентом сопротивления предназначены для эксплуатации в качестве встроенных элементов внутри комплектных изделий для бесконтактных пусковых устройств двигателей;
- тип «РТС-Л»: терморезисторы прямого подогрева с положительным температурным коэффициентом сопротивления применяются для эксплуатации в качестве встроенных элементов внутри комплект-

ных изделий в цепях переменного тока частотой от 50 до 35 кГц (схема регулирования процесса зажигания люминесцентных ламп);

– тип «РТС-Н»: терморезисторы прямого подогрева с положительным температурным коэффициентом сопротивления предназначены для эксплуатации в качестве нагревательных элементов.

Температура, при которой характеристика «сопротивление – температура» обладает явно выраженным положительным ТКС, называется температурой реагирования ( $T_{\text{реар}}$ ). При некоторой температуре касательная для двух значений сопротивления  $R_1$  и  $R_2$  позволяет найти коэффициент ТКС. При логарифмическом масштабе и  $R_2 = 10R_1$ , которым соответствуют  $T_2$  и  $T_1$ , ТКС терморезистора условно определяется по формуле

$$\alpha_R = \frac{100}{0,4343} \frac{1}{T_2 - T_1}, \% / \text{К}. \quad (2.1)$$

На рис. 2.1 приводится типичный график зависимости роста сопротивления терморезистора, обладающего температурой переключения  $125 \pm 10 \text{ }^\circ\text{C}$  [1].

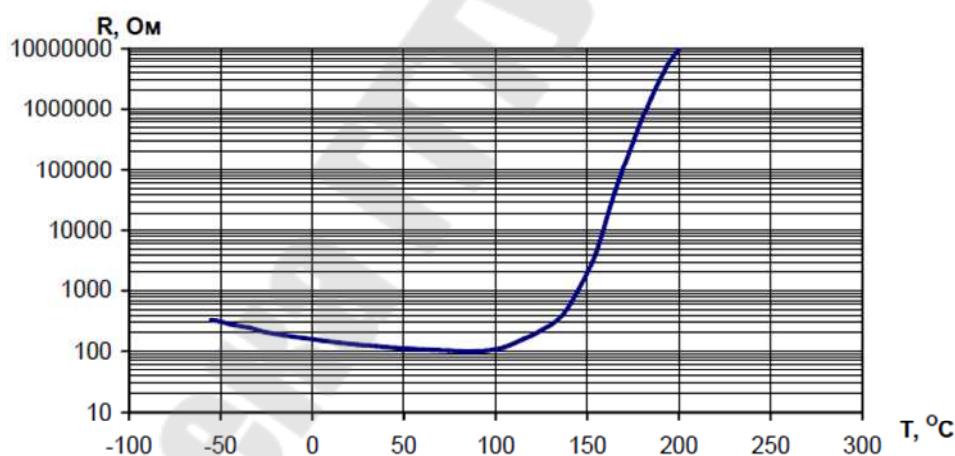


Рис. 2.1. Зависимость сопротивления терморезистора РТС-Л с номинальным сопротивлением 120 Ом

### 3. Порядок выполнения лабораторной работы

1. Поместить стенд с образцами терморезисторов известных номинальных характеристик в вентилируемый сушильный шкаф.
2. С помощью  $R$ - $L$ - $C$ -метра провести измерения начального сопротивления образцов терморезисторов. За начальную температуру принять температуру, равную  $20 \text{ }^\circ\text{C}$ .

3. Задать на программаторе сушильного шкафа скорость подъема температуры  $150\text{ }^{\circ}\text{C}/1\text{ ч}$ .

4. С интервалом  $\Delta T = 10\text{ }^{\circ}\text{C}$  провести измерения изменения сопротивлений в динамическом режиме (за устанавливаемое значение сопротивления для каждого шага принимать сопротивление, находящееся в интервале отклонения температур  $\pm 1\text{ }^{\circ}\text{C}$ ).

5. Построить графики зависимости  $R(t)$  для предоставленных типов терморезисторов (как в линейном, так и логарифмическом масштабе).

6. Определить температуру переключения терморезисторов и сравнить ее с заявляемыми производителем значениями.

7. Рассчитать по формуле (2.1), ТКС терморезисторов и сравнить с известными значениями.

8. По касательной к графику зависимости  $R(t)$ , построенной в результате расчета по формуле (2.1), определить температуру для точки касания и сравнить ее с температурой переключения терморезистора.

9. Результаты измерений и расчетов занести в таблицу для каждого из измеряемых типов терморезистора:

$T$	$^{\circ}\text{C}$	20	30	40	50	60	70	80	90	...	150
$R$	Ом										
$\Delta R$	Ом										
$\alpha R(t)$	отн. ед.										

10. В выводах описать ход выполнения работы, основные полученные результаты и возможные области применения изученных видов терморезисторов.

11. При выполнении лабораторной работы строго соблюдать технику безопасности при работе с электроприборами, находящимися под напряжением и высокой токовой нагрузкой, а также подвергающимся термическому нагреву.

#### 4. Содержание отчета

1. Наименование и цель работы.
2. Исходные данные для расчета (заявляемые производителем значения для изучаемых типов терморезисторов).
3. Изучение инструкции эксплуатации программатора сушильного шкафа.

4. Измерение исходных данных и расчет значений  $\alpha_R(t)$ .
5. Сравнение полученных результатов с известными справочными значениями.
6. Построение графической зависимости изучаемых характеристик  $\alpha_R$  и  $R$  от температуры.
7. Выводы по результатам проделанной работы.

### Контрольные вопросы

1. Определение ТКС терморезистора.
2. Виды ТКС терморезисторов.
3. Какими критериями определяется область практического применения терморезистора?
4. Факторы, влияющие на срок службы терморезистора.
5. Конструкционное исполнение терморезисторов.
6. От чего зависит отклонение номинального сопротивления терморезистора и почему оно имеет достаточно большие значения?
7. Механизмы нанесения и виды контактных площадок терморезисторов.
8. Требования к материалам, применяемым для изготовления терморезисторов.
9. Устройства, в которых используются терморезисторы с отрицательным ТКС.
10. Механизм получения отрицательного ТКС в терморезисторах.

### Литература

1. ЭлектронТехЭкспо : электрон. каталог РУП «Витебский завод радиодеталей «Монолит». – Витебск, 2008. – 66 с. – Режим доступа: <http://catalog-2008.pdf>.
2. Справочник по электротехническим материалам : в 3 т. / под ред. Ю. В. Корицкого, В. В. Пасынкова, Б. М. Тареева. – 3-е изд., перераб. – Л. : Энергоатомиздат. Ленингр. отд-ние. – 1988. – 726 с.
3. Таиров, Ю. М. Технология полупроводниковых диэлектрических материалов / Ю. М. Таиров, В. Ф. Цветков. – СПб. : Лань, 2002. – 424 с.

## Лабораторная работа № 3

### Изучение влияния внешних условий на магнитные характеристики магнитомягких материалов

#### 1. Цель лабораторной работы

Изучение влияния внешней нагрузки (давления) на потери в магнитомягких материалах на примере электротехнических сталей и пермаллоевых сплавов. Определение механизма изменения магнитных свойств нагружаемых магнитомягких материалов в виде амплитудно-частотной зависимости.

#### 2. Краткие теоретические сведения

Условно магнитомягкими считают материалы, у которых коэрцитивная сила  $H_c < 800$  А/м, а магнитотвердыми, когда  $H_c > 4$  кА/м. В общем случае у магнитомягких материалов  $H_c$  может составлять величину менее 1 А/м, а для лучших магнитотвердых материалах ее значение превышает 500 кА/м. Ограничение использования магнитомягких материалов в электронной технике связано с величиной зоны Рэлея. В основном магнитомягкие материалы применяются для получения больших значений магнитного потока. Величина магнитного потока ограничивается магнитным насыщением материала, и, следовательно, основным требованием к магнитным материалам является высокое значение индукции насыщения. Магнитомягкие материалы применяют в устройствах, которые должны перемагничиваться в слабых магнитных полях, например, датчики магнитного потока, считывающие головки для чтения магнитной записи, сердечники трансформаторов, дроссели, магнитные носители информации и т. п. В идеальном случае материал должен обладать максимальной относительной магнитной проницаемостью  $\mu$  и минимальными значениями коэрцитивной силы  $H_c$ , а также петлей гистерезиса, близкой к идеальной форме и с достаточно малой площадью. Такая зависимость возможна при условии облегчения движения доменных стенок на границе их раздела при процессах перемагничивания, что позволяет уменьшить влияние эффектов магнитной анизотропии и магнитострикции. Для получения подобного эффекта необходимо уменьшить



количество дефектов, мешающих свободному движению соприкасающихся доменов, и использовать сплавы ферромагнетиков с малой магнитной анизотропией и магнитострикцией. Однако любое внешнее воздействие, вызывающее деформацию доменной структуры ферромагнитного материала, будет сказываться на величине магнитной проницаемости и, как следствие, на потерях в магнитопроводе даже при работе в слабых полях низкой частоты (до 10 кГц).

Для электротехнических сталей характерна форма петли гистерезиса с большим значением индукции насыщения при относительно высоких значениях магнитной проницаемости. Они используются в основном на низких частотах и очень чувствительны к внешним механическим нагрузкам, а также техпроцессу изготовления сердечника магнитопровода.

Пермаллои (железоникелевые сплавы) также обладают большой индукцией и еще более высокой магнитной проницаемостью. Предназначены в основном для работы в слабых полях, имеют узкую и крутую петлю гистерезиса. Из-за особенностей внутреннего строения при внешнем механическом воздействии (особенно статических нагрузках) такие материалы резко ухудшают свои магнитные характеристики.

Потери в магнитомягких материалах зависят от трех основных параметров: частоты  $f$ , толщины  $h$ , удельного сопротивления  $\rho$  и могут быть выражены следующей зависимостью:

$$P \approx \frac{(fh)^2}{\rho}. \quad (3.1)$$

Индуктивность катушки на броневом сердечнике приближенно рассчитывается по формуле

$$w = 100 \left\{ \frac{L(A+B)}{(k\mu)} \right\}^{1/2}, \quad (3.2)$$

где  $w$  – число витков катушки, а коэффициенты  $A$  и  $B$  рассчитываются из соотношений:

$$A = (h_1 + h_2) \left\{ \frac{1}{(D_1^2 - D_3^2)} + \frac{1}{(D_2^2 - d_4^2)} \right\}; \quad (3.3)$$

$$B = \left\{ \frac{1}{(h_1 - h_2)} \right\} \ln \left\{ \frac{(D_1^2 + d_3^2)}{(D_2^2 + d_4^2)} \right\}. \quad (3.4)$$

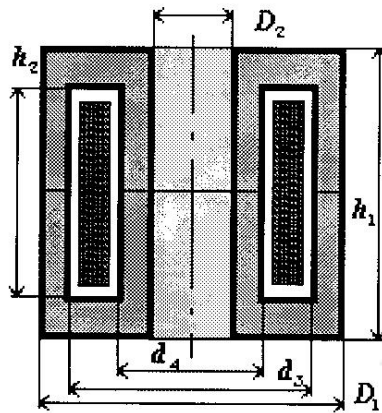


Рис. 3.1. Размеры и форма катушки на броневом сердечнике

На рис. 3.1 приведена форма и размеры, которые необходимо брать для расчета катушки в сердечнике броневом типа.

### 3. Порядок выполнения лабораторной работы

1. Поместить катушку индуктивности, сердечник которой собран из электротехнической стали (или пермаллоевых сплавов) с известными исходными параметрами (размеры, количество витков) в герметичный контейнер.

2. Измерить микрометром начальную толщину пластин  $h_0$ , из которых набран сердечник.

3. Подключить катушку к колебательному контуру и подать генератором резонансную частоту, для которой  $X_C = X_L$ . Записать значение  $f_{рез}$ .

4. Включением форвакуумного насоса создать разрежение давления. Начиная от 1 и до  $4 \cdot 10^{-2}$  мм рт. ст., через 0,2 мм рт. ст. проводить измерение  $R-L-C$ -метром изменения индуктивности катушки, а также соответствующего ей значения резонансной частоты.

5. Расчет изменения толщины листов (полученных с помощью микрометра) электротехнического железа выполнить отдельно для аналогичных образцов электротехнической стали по формуле степени деформации ( $\epsilon$ ):  $\epsilon = (h_0 - h_d) / h_d$ , где  $h_d$  – измеренная толщина листа при эквивалентной механической нагрузке (сопоставимой с разряжением воздуха), создаваемой уже гидравлическим прессом.

6. Вычислить потери в катушке на резонансной частоте исходя из формулы (3.1) и сравнить с известными справочными значениями.

7. Рассчитать значение магнитной проницаемости  $\mu$  до и после создания вакуума, основываясь на формулы (3.2)–(3.4).

8. Записать полученные результаты измерений и расчетов в таблицу:

Давление	мм рт. ст.	1	$8 \cdot 10^{-1}$	$6 \cdot 10^{-1}$	$4 \cdot 10^{-1}$	$2 \cdot 10^{-1}$	$10^{-1}$	$8 \cdot 10^{-2}$	$6 \cdot 10^{-2}$	$4 \cdot 10^{-2}$
$\mu$	отн. ед.									
$L$	Гн									
$P$	Вт									
$f_{рез}$	кГц									
$\varepsilon$	отн. ед.									
$h_d$	мм									

9. Построить график зависимости магнитной проницаемости  $\mu$  и индуктивности  $L$  от внешнего давления, а также аналогичную зависимость для потерь в катушке на резонансной частоте.

10. В выводах описать причины влияния внешнего давления на магнитные и общие функциональные характеристики изучаемого типа магнитомягких материалов. Указать возможные пределы их эксплуатации относительно прилагаемой статической нагрузки.

#### 4. Содержание отчета

1. Наименование и цель работы.
2. Исходные данные для расчета (тип и размеры катушки на броневом сердечнике).
3. Изучение инструкции эксплуатации форвакуумного насоса.
4. Измерение исходных данных:  $\mu$ ,  $L$ ,  $f_{рез}$ ,  $P$  (для изучаемого типа катушки).
5. Таблица с зависимостью  $\mu$ ,  $L$ ,  $f_{рез}$ ,  $P$  от внешнего давления.
6. Графики зависимости магнитной проницаемости  $\mu$ , индуктивности  $L$  и мощности потерь  $P$  от внешнего давления.
7. Сравнение полученных результатов с известными справочными значениями.
8. Выводы по результатам проделанной работы.

## Контрольные вопросы

1. Классификация магнитных материалов. Ферро- и ферромагнетики.
2. Области применения магнитомягких материалов при производстве изделий электронной техники.
3. Особенности и отличия пермаллоев от электротехнических сталей.
4. Влияние пластической деформации на магнитные свойства магнитомягких материалов.
5. Ограничения, связанные с применением пермаллоев и электротехнических сталей в изделиях электронной техники.
6. Доменная структура ферромагнетиков, ее связь с формой петли гистерезиса и магнитной проницаемостью.
7. Область Рэлея. Расчетные формулы магнитомягких материалов, учитывающие их работу только в этой области.
8. Виды потерь в магнитомягких материалах: описание и доминирование в зависимости от условий эксплуатации.
9. Потенциальная возможность применения магнитомягких материалов (в виде микropорошков) при изготовлении магнитодиэлектриков.

## Литература

1. Брусенцов, Ю. А. Материалы электронной техники / Ю. А. Брусенцов, В. А. Пручкин, И. С. Филатов. – Тамбов : Изд-во ТГТУ, 2006. – 44 с.
2. Справочник по электротехническим материалам : 3 т. / под ред. Ю. В. Корицкого, В. В. Пасынкова, Б. М. Тареева. – 3-е изд., перераб. – Л. : Энергоатомиздат. Ленингр. отд-ние – 1988. – 726 с.
3. Ферриты и магнитодиэлектрики : справочник / под общ. ред. Н. Д. Горбунова и Г. А. Матвеева – М. : Сов. радио. – 1968. – 175 с.
4. Летюк, Л. М. Технология производства материалов магнитоэлектроники : учеб. для вузов / Л. М. Летюк. – М. : Металлургия. – 1994. – 416 с.
5. Кухаренко, С. Н. Изучение свойств материалов : практ. рук-во по выполнению лаборатор. работ по курсу «Материалы и компоненты электронной техники» для студентов специальности 1-36 04 02 «Промышленная электроника» днев. и заоч. форм обучения / С. Н. Кухаренко. – Гомель : ГГТУ им. П. О. Сухого, 2006. – 26 с.

## Лабораторная работа № 4

### Изучение рабочих параметров активных пьезоэлектриков на примере кварцевого резонатора

#### 1. Цель лабораторной работы

Изучение рабочих характеристик активных пьезоэлектриков на примере кварцевого резонатора. Установление основных функциональных параметров кварцевого резонатора, условий его эксплуатации и отличий между свойствами кристаллического и плавленого кварца.

#### 2. Краткие теоретические сведения

Использование кварцевых резонаторов в электрических генераторах позволяет обеспечить высокую стабильность частоты без значительного усложнения схемы. Электрические фильтры с кварцевыми резонаторами обладают значительно более высокими параметрами, чем фильтры с катушками индуктивности и конденсаторами. Заявляемые характеристики кварцевых резонаторов ( $Q_{\max} \approx 10^5$ ) получаются благодаря свойствам кварцевых пластин различного геометрического профиля работать как стабилизаторы резонансной частоты в широком частотном интервале. На рис. 4.1 приводится общий вид кристалла кварца и направление срезов пластин, формируемых относительно указанных кристаллографических осей. Для ориентации отрезных и шлифовальных машин при получении кварцевых пластин используется свойство кристаллической решетки  $\text{SiO}_2$ -матрицы отражать рентгеновские лучи всегда под определенным углом, что позволяет с применением рентгеногонометров вырезать пластины, ориентированные в нужной плоскости с точностью до долей угловых минут.

В общем случае пьезоэлектрическим резонатором называется прибор (устройство), содержащее в своей структуре электромеханическую резонансную систему пьезоэлектрического типа. Классификация кварцевых резонаторов производится по 4 основным признакам (видам):

- назначению: генераторный, фильтровый и т. д.;
- способу герметизации корпуса: негерметизированный, герметизированный, вакуумный и др.;

- порядку колебаний пьезоэлемента (1, 2, ...,  $n$ );
- числу резонансных систем (электромеханических, т. е. непосредственно самих кварцевых пластин): одинарная, сдвоенная и т. д.

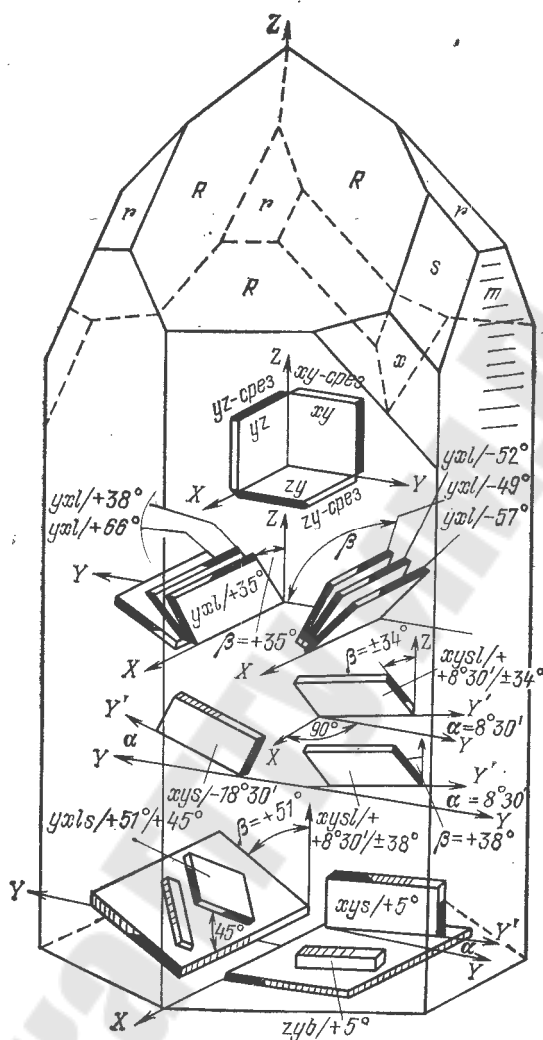


Рис. 4.1. Кристалл кварца с расположением срезов относительно кристаллографических осей  $X, Y, Z$  [1]

Стабильность эквивалентных параметров кварцевого резонатора зависит от свойств электромеханической колебательной системы, обеспечиваемой непосредственно самой кварцевой платиной. В общем случае изменение индуктивности (емкости) контура, в который входит кварцевый резонатор, не вызывает отклонения частоты, так как это связано с резким изменением индуктивности самого резонатора (т. е. происходит компенсация этих изменений). На рис. 4.2 приведена эквивалентная схема стандартного кварцевого резонатора. Указанные обозначения поясняют следующие величины:  $L_k$  – дина-

мическая индуктивность;  $C_k$  – динамическая емкость;  $R_k$  – динамическое (активное) сопротивление;  $C_0$  – статическая емкость кварцевого резонатора;  $C_1$  – статическая емкость кварцедержателя. Все динамические параметры обусловлены пьезоэффектом и соответствуют численным значениям (справочным) для конкретного кварцевого резонатора.

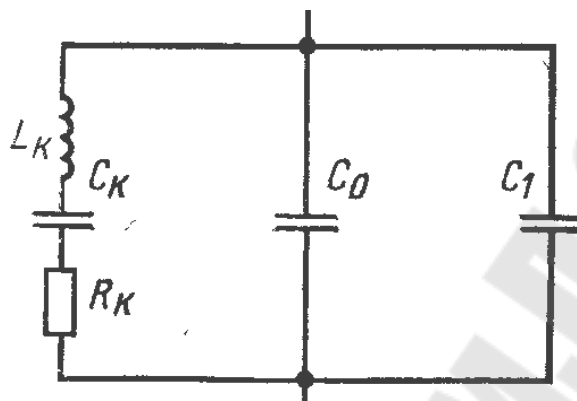


Рис. 4.2. Эквивалентная схема кварцевого резонатора

Очевидно, что если на пластину пьезоэлемента (т. е. кварцевую пластину) действует переменное напряжение, то она должна испытывать механические колебания, что, соответственно, позволяет управлять процессом протекания в цепи переменного электрического тока. В свою очередь, этот ток состоит из емкостного тока (зависит от емкости между обкладками) и тока самого пьезоэффекта (определяется величиной возникающих зарядов на пластине кварца). Имеющийся фазовый сдвиг между пьезосоставляющей тока и напряжением может как опережать, так и отставать от вектора напряжения (т. е. отличаться от  $90^\circ$ ).

В случае создания условий в колебательном контуре, близких к электромеханическому резонансу, как амплитуда тока, так и амплитуда колебаний (механических) кварцевого резонатора становятся максимальными. Если при этом определить значение не только амплитуды тока, но и фазового сдвига тока к напряжению, то можно подобрать условные значения эквивалентной схемы кварцевого резонатора (рис. 4.2), т. е. при измерении параметров реального кварцевого резонатора (рис. 4.3) будет рассматриваться эквивалентная схема, содержащая участок последовательного колебательного контура  $L_k-C_k-R_k$ , для которой имеет собственная частота, равная:

$$f_{\text{рез1}} = \frac{1}{2\pi\sqrt{L_{\text{к}}C}}, \quad (4.1)$$

где  $C = (C_{\text{к}} - C_0)/(C_{\text{к}} + C_0)$  является эквивалентной емкостью контура с учетом емкости кварцедержателя.

Только для участка  $L_{\text{к}}-C_{\text{к}}-R_{\text{к}}$ :

$$f_{\text{рез2}} = \frac{1}{2\pi\sqrt{L_{\text{к}}C_{\text{к}}}}. \quad (4.2)$$

Формула (1) соответствует резонансу токов (параллельный резонанс), а формула (2) – резонансу напряжений.

Вводятся следующие расчетные параметры:

- $p = \frac{C_{\text{к}}}{C_0}$  – коэффициент включения;
- $Q_{\text{эkv}} = p_2 Q = \frac{p_2}{(2pCR_{\text{к}}f_{\text{рез1}})}$  – эквивалентное значение добротности.

*Примечание.* Обычно  $Q_{\text{эkv}}$  превышает реальное значение, что обусловливается погрешностью проводимого эксперимента.

Эквивалентная схема измерений параметров кварцевого резонатора (рис. 4.3) содержит следующие обозначения: резонатор  $Q$ , резистор  $R$  с сопротивлением, соответствующим параметрам изучаемого кварцевого резонатора, а также сам генератор и измеритель амплитудно-частотных (АЧХ) и фазово-частотных характеристик (ФЧХ), соответственно. В качестве измерителя обычно используется осциллограф. В промежутке между  $f_{\text{рез1}}$  и  $f_{\text{рез2}}$  реактивное сопротивление резонатора имеет чисто индуктивный характер (ток через резистор  $R$ , с которого снимается выходной сигнал напряжения, запаздывает почти на  $90^\circ$ ).

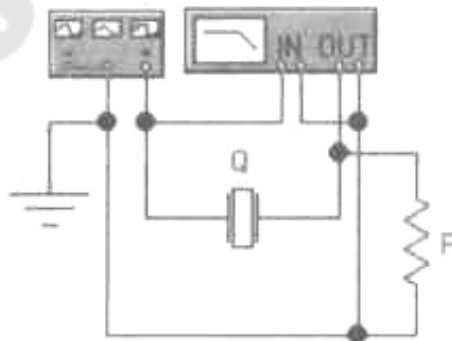


Рис. 4.3. Общая схема подключения кварцевого резонатора в испытательный стенд (аналог подключения по данным работы [3])



В данной лабораторной работе рассматриваются основные характеристики герметизированных низкочастотных кварцевых резонаторов. Согласно справочным данным [2], к низкочастотным кварцевым резонаторам относятся резонаторы, работающие в диапазоне частот  $1-10^3$  кГц. В указанном диапазоне частот в пьезоэлементе совершаются колебания изгиба, кручения, сжатия/растяжения (продольные колебания), а также сдвиговые колебания (по контуру, толщине и «векторный» сдвиг).

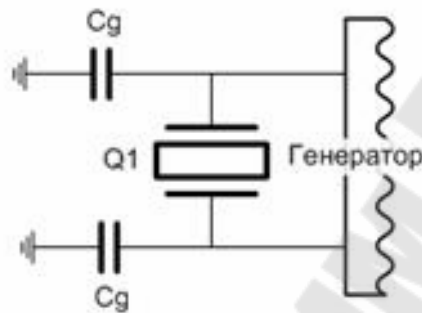


Рис. 4.4. Эквивалентная схема согласования емкости и нагрузки (см. точную настройку кварцевого резонатора на примере генератора Пирса)

Точная частота кварцевого резонатора корректируется подключением нагрузочного конденсатора  $C_g$  к общему проводу. Его емкость обычно соответствуют  $15-35$  пФ (рис. 4.4) и рассчитывается исходя из значения, что при известной емкости нагрузки  $C_n$  величина паразитной емкости составляет около  $30\%$  от  $C_n$ , т. е.  $C_g = 2(C_n - 0,3 C_n)$ .

### 3. Порядок выполнения лабораторной работы

1. Собрать стенд для изучения рабочих параметров кварцевого резонатора согласно схеме, приведенной на рис. 4.3.
2. Включить и прогреть приборы в течение  $1-2$  мин.
3. Подать сигнал заданной амплитуды в интервале частот  $f = (f_{рез} \pm 0,3f_{рез})$ . Шаг изменения частоты брать  $\Delta f = (0,05f_{рез})$ . Резонансную частоту определить из маркировки кварцевого резонатора.
4. Снять показания амплитуды сигнала, возникающей при резонансе напряжений (для токов – только в случае известной емкости кварцедержателя, см. паспортные данные). Сравнить получаемые экспериментально значения резонансной частоты со значениями, оп-

ределяемыми из расчета известных справочных характеристик для изучаемого типа кварцевого резонатора.

5. Занести полученные результаты в таблицу.

Частота $f$ , кГц									
Амплитуда сигнала, В									

Примечание. Отдельно привести значения  $f_{\text{рез. эксп}}$  и  $f_{\text{рез. расчетн.}}$ .

6. Построить график зависимости амплитуды колебаний напряжения на выходе кварцевого резонатора от частоты сигнала для всего подаваемого от генератора интервала частот.

7. Определить коэффициент включения и значение эквивалентной добротности (при известных соответствующих справочных значениях).

8. Изучить АЧХ и ФЧХ исследуемого кварцевого резонатора (привести фото с экрана осциллографа).

9. Рассчитать коэффициент ослабления сигнала для всего интервала задаваемых частот в простой и логарифмической форме (из отношения значения сигнала на входе и выходе). Построить график зависимости коэффициента ослабления от частоты в простом и логарифмическом виде.

10. По данным АЧХ и ФЧХ установить время задержки сигнала  $\langle \tau \rangle$ :  $\tau = hn$ , где  $\langle h \rangle$  – смещение полуволн сигнала на экране осциллографа;  $\langle n \rangle$  – коэффициент развертки (множитель, указанный на делениях переключателя развертки).

11. Установить расчетным путем скорость распространения генерируемых механических колебаний в кварцевом резонаторе  $\langle \upsilon \rangle$  для известной справочной величины толщины кварцевого резонатора  $\langle l \rangle$  (или путем измерения ее как расстояния между электродами резонатора):  $\upsilon = l/\tau$ .

#### 4. Содержание отчета

1. Наименование и цель работы.
2. Исходные данные для расчета (тип кварцевого резонатора и известные для него справочные значения).
3. Схема установки для измерения свойств кварцевого резонатора с пояснением способа подключения и функциональных свойств элементов цепи.
4. Фото АЧХ и ФЧХ для выбранного типа резонатора.

5. Значения коэффициента включения, эквивалентной добротности и коэффициента ослабления (в последнем случае – для каждой фиксированной частоты). В случае необходимости расчетные данные представлять в виде таблицы.

6. Таблица значений амплитуды сигнала от частоты.

7. График зависимости амплитуды сигнала от частоты.

8. Графики зависимости коэффициента ослабления в простой и логарифмической форме.

9. Численные данные времени задержки сигнала и скорости распространения механических колебаний в кварцевом резонаторе.

10. Выводы по результатам проделанной работы. Указать причины наблюдаемой связи эквивалентной схемы резонатора с видом ФЧХ и АЧХ кварцевого резонатора. Пояснить отличие значений резонансных частот для параллельного и последовательного резонанса (на примере кварцевого резонатора).

### **Контрольные вопросы**

1. Основные кристаллические оси кристалла кварца, их механические, электрические и электрооптические характеристики.

2. Понятие прямого и обратного пьезоэффекта. Области его практического применения в электронной технике.

3. Понятие резонансной частоты кварцевого резонатора. Причины высокой добротности кварцевого резонатора.

4. Области практического применения кварцевых резонаторов низких, средних и высоких частот.

5. Понятие кратности значений (гармоник) резонансной частоты.

6. Связь кристаллической ориентации кварцевого резонатора и его толщины (геометрических размеров) со значением резонансной частоты.

7. Технологическая схема получения кварцевых резонаторов.

8. Фазовые переходы в кристалле кварца. Отличия кристаллического и аморфного кварца.

9. Принцип работы установки для определения АЧХ и ФЧХ кварцевого резонатора.

10. Влияние температуры и других условий эксплуатации на частотные характеристики кварцевого резонатора.

11. Использование кварцевых резонаторов в работе атомно-силового микроскопа.

12. Основные рабочие параметры кварцевого резонатора.

## Литература

1. Глюкман, Л. И. Пьезоэлектрические кварцевые резонаторы / Л. И. Глюкман. – 3-е изд., перераб. и доп. – М. : Радио и связь, 1981. – 232 с.

2. Альтшуллер, Г. Б. Кварцевые генераторы : справ. пособие / Г. Б. Альтшуллер, Н. Н. Елфимов, В. Г. Шакулин. – М. : Радио и связь, 1984. – 232 с.

3. Брусенцов, Ю. А. Материалы электронной техники / Ю. А. Брусенцов, В. А. Пручкин, И. С. Филатов. – Тамбов : Изд-во ТГТУ, 2006. – 44 с.

## Лабораторная работа № 5

### Расчет спектров рентгеновской дифракции микropорошков, содержащих наноразмерные фазы неорганических соединений

#### 1. Цель лабораторной работы

Изучение аналитических возможностей метода рентгенофазового анализа, позволяющего установить точный фазовый состав исследуемой поверхности, а также произвести расчет дисперсии размеров нанокристаллических образований, входящих в состав исследуемой пробы вещества (или элемента поверхности), если максимальный размер таких частиц составляет величину не более 100–200 нм.

#### 2. Краткие теоретические сведения

Для установления межплоскостного расстояния в кристаллах обычно применяется метод дифракции рентгеновских лучей или рентгенофазовый анализ (РФА). Описываемая дифракция получается в результате взаимодействия первичного пучка рентгеновских лучей с плоской поверхностью подготовленной для анализа пробы (которая в основном имеет неорганическую природу), что приводит к их дифракции, наблюдаемой в виде характерного спектра, называемого спектром рентгеновской дифракции.

Для кристалла характерно присутствие параллельных атомных плоскостей, на которых происходит дифрагирование рентгеновского излучения. При угле падения первичного луча на атомную плоскость, равном  $\Theta$ , отраженный луч составляет с первичным углом угол в  $2\Theta$ . При этом необходимо соблюдение нескольких условий:

- длина волны рентгеновского излучения должна быть близкой по величине к расстоянию между атомными плоскостями;

- необходимо выполнение правила дифракции, аналогичного для геометрической оптики, а именно: разность хода между двумя лучами, отраженными от параллельных друг другу атомных плоскостей, должна быть кратна целому числу  $n$  длин волн дифрагирующего излучения  $\lambda$  (в нашем случае это рентгеновское излучение). Получаемая в этом случае формула называется законом Вульфа–Брэгга и имеет вид

$$nl = 2d\sin\Theta, \quad (5.1)$$

где  $n$  – целое число, называемое порядком дифракции;  $\lambda$  – длина волны рентгеновского излучения, которая определяется материалом анода рентгеновской трубки, дающего это излучение;  $\Theta$  или  $2\Theta$  – угол падения и дифракции рентгеновского излучения, соответственно;  $d$  – межплоскостное расстояние, которое вычисляется по уравнению Вульфа–Брэгга (в нашем случае  $n = 1$  – считается главным или первым максимумом дифракции).

В методе рентгенофазового анализа (РФА) необходимо направить первичный пучок под углом  $\Theta$  к выбранной плоской поверхности и измерить параметры дифракции для уже отраженного дифрагированного луча. В дальнейшем становится возможным рассчитать, под каким углом кристаллографическая плоскость расположена к поверхности в структуре исследуемого образца. В настоящее время для расчета спектров РФА применяются специальные аналитические программы, включающие в себя базу данных по спектрам эталонных веществ. Обычно наиболее просто изучать РФА-спектры несложных веществ типа Si, Ge, чистых металлов, оксидов и так далее, а также поликристаллов, получаемых на их основе.

При проведении измерения методом РФА изучаемый образец (например, пленка, нанесенная на подложку, микропорошок, пластина металла и т. д.) помещается в специальный держатель плоской поверхностью к падающему рентгеновскому излучению. Держатель с образцом (или кювета) жестко фиксируется в структуре рентгеновского гониометра – аппарата, позволяющего проводить автоматический поворот образца на угол  $\Theta$  и направлять дифрагированный от него луч в счетчик интенсивности рентгеновского излучения (что соответствует углу дифракции в  $2\Theta$ ). Гониометр является частью рентгеновского дифрактометра, включающего в себя рентгеновскую трубку с высоковольтной схемой управления, измерительное устройство и компьютер. Падающий от рентгеновской трубки луч излучения направляется на поверхность образца (в том числе и под малыми углами дифракции [1]), образец автоматически поворачивается на малый угол (шаг) сканирования, причем одновременно с ним с вдвое большей угловой скоростью по кругу движется детектор, принимающий рентгеновское излучение. С помощью специальной программы на мониторе компьютера отображается кривая в виде графика, по оси абсцисс которого обычно откладывается угол дифракции  $2\Theta$ , а по оси

ординат – интенсивность отраженных лучей (в относительных единицах). Измеряя углы, соответствующие пикам максимумов интенсивности, вычисляют межплоскостные расстояния, позволяющие точно определить фазовый состав изучаемого вещества, точная стехиометрия которого устанавливается в автоматическом режиме путем сравнения с имеющимися эталонными значениями. Полученные рентгенограммы путем определения соотношения между тригонометрическими функциями углов отражения позволяют определить тип элементарной ячейки, а также индексы атомных плоскостей, участвующих в отражении [2], [3].

Анализ распределения интенсивности в дифракционных максимумах дает возможность исследовать наведенные изменения в кристаллической решетке, возникающие при изменении ее химического состава, дроблении микрочастиц (например, при их перекристаллизации), динамику возникновения внутренних напряжений, ориентировку кристаллов и других сопутствующих процессов, происходящих при изготовлении (обработке) элементов изделий электронной техники.

Для расчета образующихся в структуре вещества поликристаллических наночастиц используется формула Шеррера, которая неприменима для кристаллов размерами больше 0,1–0,2 мкм (100–200 нм).

Средний размер частиц (или условный диаметр  $d$ ) определяли по данным об уширении рентгенографических максимумов (расчет проводился по формуле Шеррера [1]):

$$D(\lambda) = \frac{k\lambda}{\beta \cos \Theta}, \quad (5.2)$$

где  $D$  – диаметр наночастицы, нм;  $\beta$  – ширина рентгеновского максимума на полувысоте (в радианах);  $\lambda$  — длина волны рентгеновского излучения ( $\lambda = 1,541 \text{ \AA}$  для для  $K_{\alpha}$  – линии меди);  $k$  – коэффициент формы частиц (для условно сферических частиц обычно можно считать  $k \approx 0,9$  [2]).

Приведем общие определения.

Значение в радианах рассчитывается следующим образом. Возьмем окружность произвольного радиуса, тогда угол в один радиан есть центральный угол, у которого длина дуги равна радиусу окружности (длина круга:  $l = 2\pi r$ ). Учитывая определение числа  $\pi$ , можно заключить, что углу в  $360^{\circ}$  равен угол  $2\pi$  радиан.

Формула перевода радиан в градусы: из определения числа  $\pi$ , зная, что углу  $2\pi$  соответствует угол  $360^\circ$ :  $\alpha_g = \alpha_r \frac{180}{\pi}$ , где  $\alpha_g$  – угол в градусах;  $\alpha_r$  – угол в радианах.

Формула перевода градусов в радианы: из определения числа  $\pi$ , зная, что углу  $360^\circ$  соответствует угол  $2\pi$ :  $\alpha_r = \alpha_g \frac{180}{\pi}$ , где  $\alpha_g$  – угол в градусах;  $\alpha_r$  – угол в радианах.

### 3. Порядок выполнения лабораторной работы

1. Получить распечатки пиков дифракции и их электронные оцифрованные варианты (аналог визуального изображения пиков дифракции приведен на рис. 5.1).

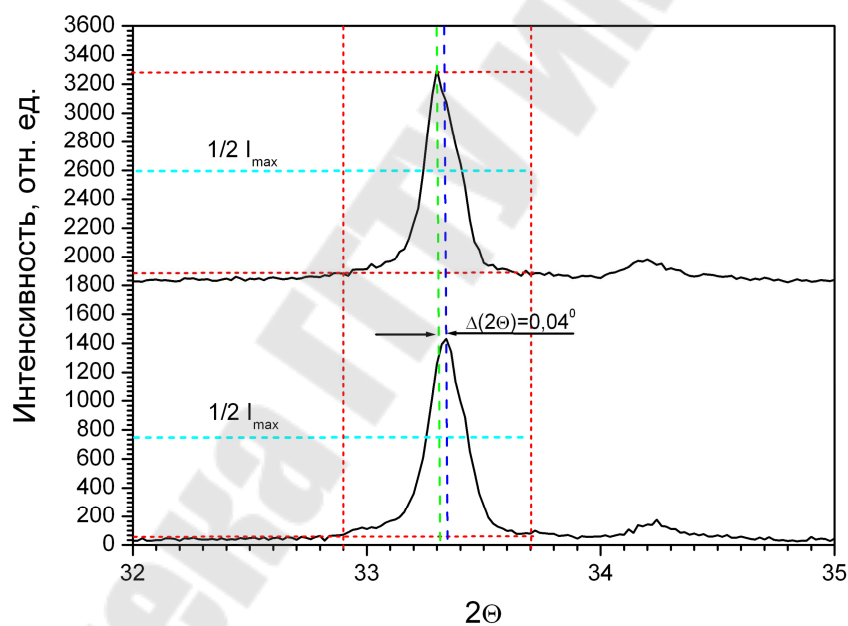


Рис. 5.1. Пример установления полуширины интенсивности для двух разных пиков рентгеновской дифракции (приводится ширина смещения основного пика дифракции для верхнего и нижнего максимумов)

2. Изучить методическое руководство по обработке оцифрованных графиков программой Origin [4]. Применить полученные данные к процессу обработки имеющегося графического материала данной программой.



3. Провести расчет примерной дисперсии размеров наночастиц, формируемых в структуре изучаемого материала по формуле (5.2).

### Пример расчета для рис. 5.1

Исходя из сравнения основного пика дифракции для интервала максимального угла дифракции  $2\Theta = [32,9; 33,7]^\circ$  (верхний пик, приводимый на рис. 5.1), было установлено, что ширина рентгеновского максимума  $\beta$  для указанного диапазона на полувысоте, выраженная в радианах, составляет:  $\beta_1 = \Delta(2\Theta) \approx \frac{(0,17^\circ \cdot 3,14)}{180} = 0,00267$  и

$\beta_2 = \Delta(2\Theta) \approx \frac{(0,2^\circ \cdot 3,14)}{180} = 0,00349$  (нижний пик, приводимый на рис. 5.1).

Подставляя полученные значения в формулу (5.2), получаем:

$$D_1 = \frac{(k\lambda)}{\left[ \beta_1 \cos\left(\frac{2\Theta_{\max_1}}{2}\right) \right]} = \frac{(0,9 \cdot 0,1541 \cdot 10^9)}{\left[ 0,00267 \cdot \cos(16,65) \right]} =$$

$$= \left( \frac{0,13869}{0,002558} \right) 10^{-9} \text{ м} = 54,2181 \cdot 10^{-9} \text{ м} \approx 54 \text{ нм};$$

$$D_2 = \frac{(k\lambda)}{\left[ \beta_2 \cos\left(\frac{2\Theta_{\max_2}}{2}\right) \right]} = \frac{(0,9 \cdot 0,1541 \cdot 10^9)}{\left[ 0,00349 \cdot \cos(16,67) \right]} =$$

$$= \left( \frac{0,13869}{0,003343} \right) 10^{-9} \text{ м} = 41,4867 \cdot 10^{-9} \text{ м} \approx 41 \text{ нм}.$$

4. Занести полученные результаты расчетов в таблицу.

Номер образца спектра РФА									
Ширина рентгеновского максимума $\beta$ , рад									
Средний размер частиц $D$ , нм									

5. Сделать выводы о причинах величины погрешности точности расчета среднего размера частиц  $D$ , получаемых для обрабатываемых РФА-спектров (для оценки этой величины использовать литературные данные, приводимые в ссылках [1]–[3]).

## 4. Содержание отчета

1. Наименование и цель работы.
2. Исходные данные для расчета (данные о пиках дифракции, представленные в электронном и бумажном виде).
3. Опции программы Origin, позволяющие обрабатывать оцифрованные графики.
4. Расчетные значения ширины рентгеновского максимума  $\beta$  и среднего размера частиц  $D$ , представленные в виде подробно раскрытых формул (см. пример расчета) и занесенные в соответствующую таблицу.
5. Определение причин величины погрешности для получаемого среднего значения размера частиц, сделанное на основе анализа имеющихся литературных источников.
6. Выводы по результатам проделанной работы. Привести примеры наноструктурированных материалов и веществ, применяемых при изготовлении изделий электронной техники. Описать аппаратные и аналитические возможности метода РФА, используемого для изучения различных видов материалов и компонент современной электроники.

## Контрольные вопросы

1. Какие процессы начинают происходить при попадании  $\gamma$ -кванта на поверхность неорганического вещества?
2. Как формируется спектр излучения рентгеновской трубки, какие он имеет составляющие?
3. Как формируются дифракционные максимумы и минимумы, наблюдаемые на обзорном (общем) дифракционном спектре для изучаемого вещества?
4. Возможно ли наблюдать дифракционную картину для аморфных веществ? Дать развернутый ответ.
5. Чем отличается пробоподготовка и конечный результат в виде дифракционной картины при исследовании порошкового, монокристаллического или пленочного образца?
6. Можно ли провести количественный анализ вещества методом рентгеновской дифракции. Какова погрешность измерений при использовании метода РФА?
7. В чем особенность прохождения рентгеновского излучения через тонкие слои бериллия?
8. От чего зависит чувствительность метода рентгеновской ди-

фракции. Какие минимальные количества вещества можно изучать методом РФА?

9. Что такое эталонный рентгеновский спектр и для чего он нужен?

10. Возможно ли на одном типе рентгеновской трубки изучать различные неорганические соединения (на примере металлов)?

11. Для чего используется фильтр рентгеновского излучения?

12. Каким образом наладчик рентгеновского дифрактометра может «увидеть» рентгеновское излучение? На каких физических принципах основаны наблюдаемые при этом визуальные эффекты?

### Литература

1. Микронеоднородная структура и ближний порядок многокомпонентных стекол, полученных из отходов промышленного производства. / Р. Н. Осауленко [и др.]. – Режим доступа: <http://zhurnal.apc.relar.ru/articles/2003/099.pdf>.

2. Размер, морфология и структура частиц нанопорошка диоксида циркония, полученного в гидротермальных условиях / О. В. Альмяшева [и др.] // Наносистемы: физика, химия, математика. – 2010. – Т. 1, № 1. – С. 26–36.

3. Приборы и методы рентгеновской и электронной дифракции : учеб. пособие / П. Чижов [и др.] – М. : МФТИ, 2011. – 152 с.

4. Плющ, О. Б. Информационные технологии анализа и обработки данных : практикум / О. Б. Плющ, Г. М. Северин, Т. В. Безъязычная. – Минск : Акад. упр. при Президенте Респ. Беларусь, 2010. – 112 с.

## Содержание

Предисловие .....	3
Общие сведения .....	4
<i>Лабораторная работа № 1. Изучение электротехнических свойств проводниковых материалов и резистивных элементов .....</i>	<i>6</i>
<i>Лабораторная работа № 2. Определение основных характеристик терморезисторов.....</i>	<i>12</i>
<i>Лабораторная работа № 3. Изучение влияния внешних условий на магнитные характеристики магнитомягких материалов .....</i>	<i>16</i>
<i>Лабораторная работа № 4. Изучение рабочих параметров активных пьезоэлектриков на примере кварцевого резонатора.....</i>	<i>21</i>
<i>Лабораторная работа № 5. Расчет спектров рентгеновской дифракции микропорошков, содержащих наноразмерные фазы неорганических соединений.....</i>	<i>29</i>

Учебное электронное издание комбинированного распространения

Учебное издание

**Алексеевко Александр Анатольевич**

# **МАТЕРИАЛЫ И КОМПОНЕНТЫ ЭЛЕКТРОННОЙ ТЕХНИКИ**

**Практикум  
по выполнению лабораторных работ  
по одноименной дисциплине  
для студентов специальности 1-36 04 02  
«Промышленная электроника»  
дневной и заочной форм обучения**

**Электронный аналог печатного издания**

Редактор  
Компьютерная верстка

*Т. Н. Мисюрова*  
*И. П. Минина*

Подписано в печать 09.07.21.

Формат 60x84/16. Бумага офсетная. Гарнитура «Таймс».

Ризография. Усл. печ. л. 2,09. Уч.-изд. л. 2,35.

Изд. № 26.

<http://www.gstu.by>

Издатель и полиграфическое исполнение  
Гомельский государственный  
технический университет имени П. О. Сухого.  
Свидетельство о гос. регистрации в качестве издателя  
печатных изданий за № 1/273 от 04.04.2014 г.  
пр. Октября, 48, 246746, г. Гомель