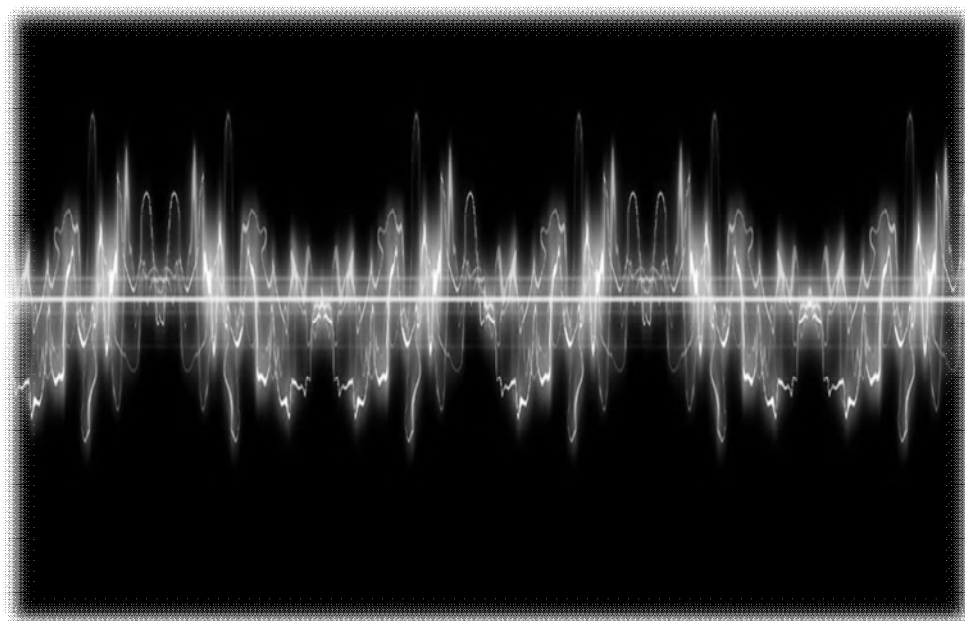


Г.В. Афонин, Ю.П. Митрофанов, С.В. Тютин,
К.С. Леденев, В.А. Хоник

НАУЧНО- ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКАЯ ПРАКТИКА

ЧАСТЬ 1



ВОРОНЕЖ
Воронежский государственный педагогический университет
2017

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ
РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ

ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ
ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
«ВОРОНЕЖСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ ПЕДАГОГИЧЕСКИЙ
УНИВЕРСИТЕТ»

КАФЕДРА ОБЩЕЙ ФИЗИКИ

**Г.В. Афонин, Ю.П. Митрофанов, С.В. Тютин,
К.С. Леденев, В.А. Хоник**

НАУЧНО-ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКАЯ ПРАКТИКА

Часть 1

*Учебно-методическое пособие
для студентов магистратуры физико-математического факультета,
обучающихся по направлению 44.04.01 «Педагогическое образование»,
программа «Физическое образование»*

ВОРОНЕЖ
Воронежский государственный педагогический университет
2017

УДК 535(07)
ББК В22
Н346

Печатается по решению
учебно-методического совета ВГПУ.
Протокол №3 от 10 ноября 2016 г.

Рецензенты:

доктор физико-математических наук,
профессор *С.Н. Дрождин* (ВГПУ);

доцент кафедры информатики и методики преподавания математики,
кандидат технических наук *Е.А. Кубряков* (ВГПУ)

Научный редактор:

доктор физико-математических наук,
профессор *В.В. Свиридов*

Научно-исследовательская практика. Часть 1 : учебно-методическое пособие для студентов магистратуры физико-математического факультета, обучающихся по направлению 44.04.01 «Педагогическое образование», программа «Физическое образование» / Г.В. Афонин [и др.]. – Воронеж : Воронежский государственный педагогический университет, 2017. – 56 с.

В методических указаниях приводится описание установок и приборов, порядок выполнения, теоретическое обоснование, контрольные вопросы к научно-исследовательским работам. Показано также, какие компетенции должен освоить студент в результате выполнения научно-исследовательских работ.

Издание предназначено для студентов магистратуры физико-математического факультета, обучающихся по направлению 44.04.01 «Педагогическое образование», программа «Физическое образование».

УДК 535(07)
ББК В22

© Г.В. Афонин, Ю.П. Митрофанов, С.В. Тютин,
К.С. Леденев, В.А. Хоник, 2017
© Воронежский государственный педагогический университет,
редакционно-издательская обработка, 2017

ВВЕДЕНИЕ

Одной из основных целей проведения научно-исследовательской работы является формирование специальных *профессиональных компетенций*:

- способность анализировать результаты научных исследований, применять их при решении конкретных научно-исследовательских задач в сфере науки и образования, самостоятельно осуществлять научное исследование (**ПК-5**);

- готовность использовать индивидуальные креативные способности для самостоятельного решения исследовательских задач (**ПК-6**);

- готовность осуществлять научное исследование в образовательной и научной области под квалифицированным руководством для умения находить место физическим законам в дидактическом материале по выполнению лабораторных и исследовательских работ по физике (**СК-4**).

Для формирования заявленных компетенций в ходе каждой работы студентам придется решать *ряд задач*, которые позволяют научиться:

- понимать актуальность изучаемого в данной работе физического явления;

- объяснять физическую суть изучаемого в данной работе явления;

- характеризовать, давать описание объекта исследования (образец, устройство, поток частиц, излучение) и выделять его особенности;

- объяснять физические основы используемой в работе методики измерений, обосновывать последовательность действий при выполнении каждой конкретной работы;

- работать с приборами, выбирать нужный диапазон измерений (определять цену деления шкалы);

- проводить измерения, соблюдая заданные условия, грамотно и аккуратно записывать результаты в заранее составленные таблицы;

- вычислять и учитывать приборную и случайную погрешности прямых и косвенных измерений;

- представлять результаты эксперимента в виде сводных таблиц и графиков;

- определять параметры исследуемых функциональных зависимостей;

– анализировать полученные результаты, делать обоснованные выводы, составлять отчет по работе.

По результатам выполнения работы студент должен оформить отчет в виде документа IvanovNIR1.doc (docx). После согласования отчета (в электронном виде) с руководителем НИР необходимо сдать его окончательную версию в бумажном виде и на CD-носителе. Кроме электронной версии отчета, на CD необходимо записать файл презентации, используемой на итоговой защите результатов НИР. Пример оформления отчета о НИР представлен в приложении.

Научно-исследовательская работа №1

ИЗУЧЕНИЕ ИЗОТЕРМИЧЕСКОЙ РЕЛАКСАЦИИ МОДУЛЯ ЮНГА

Цель работы:

– выявить особенности релаксации модуля Юнга ленточного металлического стекла.

В работе используются:

1. Экспериментальная установка по измерению резонансной частоты (Vibrating Reed Technique).
2. Модельное ленточное металлическое стекло.

Теоретическая часть

Под действием приложенных к телу сил всякое реальное тело деформируется, т.е. изменяет свои размеры и форму.

В качестве величины, характеризующей деформацию тела, берут относительное изменение его длины ε :

$$\varepsilon = \frac{\Delta l}{l_0}. \quad (1)$$

Опыты показывают, что для стержней из данного материала относительное удлинение при упругой деформации пропорционально силе, приходящейся на единицу площади поперечного сечения стержня:

$$\varepsilon = \frac{\alpha F}{S}, \quad (2)$$

где α – коэффициент пропорциональности (модуль упругости), отношение $\frac{F}{S} = \sigma$ – нормальное напряжение.

Следовательно, закон Гука имеет следующий вид:

$$\varepsilon = \alpha \sigma. \quad (3)$$

Физический смысл модулей упругости, в том числе модуля Юнга, состоит в том, что они характеризуют сопротивляемость материалов упругой деформации, то есть смещение атомов из положения равновесия.

Модуль Юнга (E) рассчитывается по формуле:

$$E = \frac{Fl}{S\Delta l}. \quad (4)$$

Таким образом, закон Гука будет иметь вид:

$$\sigma = E\varepsilon, \quad (5)$$

откуда

$$E = \frac{\sigma}{\varepsilon}. \quad (6)$$

В настоящей научно-исследовательской работе будут рассматриваться упругие свойства металлических стекол. Металлические стекла (МС) обладают уникальными физическими свойствами и занимают особое место среди аморфных материалов. Получают МС охлаждением расплава с высокой скоростью, чтобы перевести переохлажденную жидкость в твердое состояние, минуя процессы кристаллизации. Критические скорости охлаждения, необходимые для получения полностью некристаллических отливок, сильно различаются в зависимости от химического состава стеклообразующей жидкости.

Для описания термодинамических и кинетических свойств жидких и аморфных состояний вещества в 1992 году американским ученым Гранато (Granato A.V.) была предложена так называемая межузельная теория (Interstitialcy Theory). Она основывается на идее о том, что все конденсированные состояния вещества в тепловом равновесии являются кристаллами, содержащими определенную концентрацию внутренних дефектов – межузельных гантелей (межузельных атомов в гантельной конфигурации). Такая конфигурация возникает, когда два атома в решетке стремятся занять один и тот же минимум потенциальной энергии.

Согласно межузельной теории, жидкость представляется как кристалл и содержит несколько процентов межузельных гантелей, что объясняет её текучесть и основные термодинамические свойства. Стекла же представляют собой кинетически замороженную жидкость, а структурная релаксация металлических стекол, следовательно, может интерпретироваться как самопроизвольное уменьшение концентрации межузельных гантелей, замороженных при закалке.

Особенностью металлических стекол является структурная неравновесность, определяющая термодинамический стимул для непрерывных структурных изменений. Независимо от способа получения МС они находятся в неравновесном состоянии и при любой температуре имеют место самопроизвольные атомные перестройки. Совокупность релаксационных процессов, стремящихся привести структуру в более равновесное состояние, получила название «структурная релаксация». Эти структурные изменения в МС носят специфический характер.

Интенсивность или скорость структурной релаксации, т.е. число атомных перестроек в единице объема за единицу времени, сильно зависит от температуры и тепловой предыстории МС. В результате структурной релаксации практически все физические свойства изме-

няются. Известно, что процессы структурной релаксации могут приводить к росту сдвиговой вязкости в сто тысяч раз, в результате чего происходит сильное охрупчивание МС. Также структурная релаксация приводит к снижению величины внутреннего трения, «скорости релаксации напряжений и ползучести, плотность увеличивается на $\approx 0,5-1$ %, модуль Юнга – на $\approx 7-18$ %, модуль сдвига – на $\approx 8-22$ %» (Г.В, 2012). Изменения физических свойств МС при термообработке дают основания полагать, что структурная релаксация представляет собой сложный и многогранный процесс.

Наиболее часто структурная релаксация приводит к монотонным изменениям свойств при изотермическом отжиге. Однако после определенной термической обработки знак изменения свойств со временем может поменяться на противоположный. Такое поведение называется кроссоверной релаксацией. В 60-х и 70-х годах прошлого века этот феномен был впервые обнаружен в оксидном стекле при помощи измерений показателя преломления. Позднее похожие эксперименты были выполнены на металлическом стекле, что показало кроссоверную релаксацию точки Кюри, индуцированную анизотропию и явление остаточного магнетизма. Утверждалось, что кроссоверный эффект указывает на присутствие либо двух заметно разных периодов релаксации, либо на их непрерывное распространение.

Физическая интерпретация кроссовера тесно связана с природой структурной релаксации, в то время как структурная релаксация является предметом обширных дебатов.

Рассматривать упругие свойства вещества в данной работе будем на примере ленточного металлического стекла (далее МС).

Исходный сплав приготавливается прямым сплавлением компонентов в толстостенной кварцевой ампуле. Лента изготавливалась методом одновалкового спиннингования. Толщина приготовленного таким образом металлического стекла составила 50–100 мкм.

Для измерения релаксации модуля Юнга будет использована специальная экспериментальная установка, устройство и особенности которой будут рассмотрены далее.

Описание установки

Автоматизированная экспериментальная установка (рис. 1) позволяет производить *in situ* (в процессе термообработки) измерения резонансной частоты в режиме вынужденных и в режиме затухающих низкочастотных (200–2000 Гц) консольных изгибных колебаний. В первом случае производится циклический последовательный перебор частот, и резонансная частота $f_{рез}$ определяется как частота, соответствующая пику резонансной кривой. Во втором случае последова-

тельно производятся циклы раскачки – затухания с периодичностью 10–12 с. Из полученных таким образом данных рассчитывается внутреннее трение Q^{-1} , а также с помощью быстрого преобразования Фурье определяется частота затухающих колебаний $f_{зат}$, которая далее с помощью соотношения $f_{рез} = \sqrt{f_{зат}^2 + \beta^2}$ (β – коэффициент затухания, определяемый из кривой затухания) пересчитывается в резонансную частоту $f_{рез}$. Точность определения резонансной частоты при этом составляет 0,01 Гц.



Рис. 1 – Экспериментальная установка

Основные компоненты экспериментальной установки:

1. 2 ПК, используемых для автоматических измерений и обработки данных.
2. Блоки питания: ВУП-2, В-24м, Agilent E3640A.
3. Прецизионный мультиметр «Keithley Integra 2700» для измерения температуры с автоматической подстройкой прибора под температуру холодного спая термопары с помощью платинового термодатчика «РТ 100».
4. Генератор сигналов различной формы «Agilent 33210A».
5. Аналого-цифровой преобразователь сигналов «Agilent Daq U2353A» (плата сбора данных).
6. Осциллограф «Tektronix 2001C».

Элементы установки:

- молибденовая печь;
- лазер;
- электрод;
- хромель-алюмелевая термопара;
- платиновый термодатчик «РТ100»;
- позиционно-чувствительный фотодатчик «PSD Hamamatsu S3932» (рис. 2).

Вакуумная установка:

- рабочий объем (вакуумная камера);
- форвакуумный баллон;
- форвакуумный насос;
- диффузионный насос.

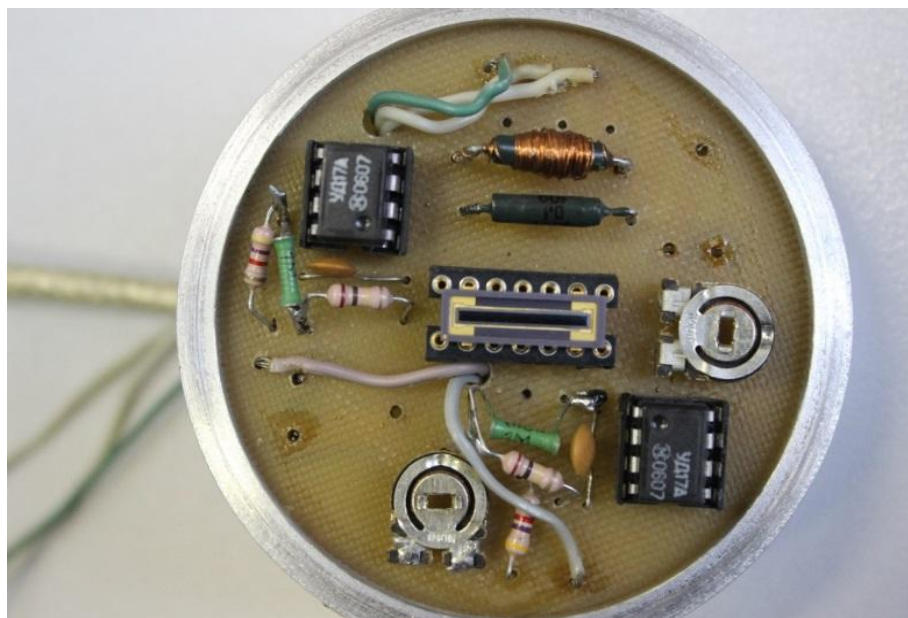


Рис. 2 – Позиционно-чувствительный фотодатчик PSD

Все измерения проводятся в вакууме порядка 10^{-2} Па. Эксперимент проводится двумя компьютерами. Первый осуществляет контроль за генерацией – затуханием колебаний образца и расчетами необходимых величин. Для раскачки используется специальная схема усиления низкочастотного сигнала. На вход этой схемы генератором «Agilent 33210A» подается управляющее напряжение заданной частоты, которое открывает канал подачи напряжения с источника постоянного тока на электрод. Таким образом создается разность потенциалов между электродом и образцом с той частотой, которая задается генератором. Лазерный луч, отраженный от поверхности образца, па-

дает на поверхность позиционного фотодатчика «Hamamatsu S3932» (рис. 4). Перемещаясь по поверхности датчика, зайчик лазерного луча вызывает возникновение на выходе датчика синусоидальных сигналов, пропорциональных амплитуде колебаний образца. Сигналы с выходов датчика усиливаются специально разработанной схемой и поступают на плату сбора данных (АЦП) «Agilent Daq U2353а». После оцифровки сигналов датчика производится расчет коэффициента затухания и резонансной частоты колебаний образца. Все это осуществляется автоматически с помощью специально разработанного приложения.

Второй компьютер осуществляет терморегулирование по принципу ПИД-регулирования. Измерение температуры производится с помощью хромель-алюмелевой термопары, разность потенциалов которой считывается посредством прецизионного мультиметра «Keithley Integra 2700» и далее пересчитывается в температуру. Температура холодного спая термопары контролируется платиновым датчиком сопротивления «PT100».

Данные из мультиметра считываются компьютером посредством шины «GPIB» и контроллера «IEEE» и далее в специально разработанном приложении путем сравнения реальной величины температуры с задатчиком температуры рассчитывается величина напряжения и значения времени, в течение которого блок питания «Agilent E3640A» подает на транзистор управляющее напряжение, инициализируя подачу рабочего напряжения на печь. Печь представляет собой несколько витков бифилярно намотанного молибденового провода диаметром 1 мм. Описанная схема терморегулирования обеспечивает работу в диапазоне температур 290–800 К, стабилизацию температуры не хуже 0,1 К, линейный нагрев со скоростями 1,5–10 К/мин.

Практическая часть

Подготовка образца

1. Для подготовки образцов используются специальные гильотинные пресс-ножницы (рис. 3). В качестве образца будет использоваться модельное ленточное металлическое стекло.

2. Возьмите катушку с ленточным металлическим стеклом, отрубите ~ 15 мм резким вертикальным нажатием на ручку.

3. Вырубите из заготовки образцы шириной 0.5–1 мм.

4. Подготовьте таким образом 2–3 образца и произведите их очистку в ультразвуковой ванне (рис. 4), используя стеклянную емкость, наполненную ацетоном, в течение 15 минут (ультразвуковую ванну необходимо предварительно заполнить дистиллированной водой).



Рис. 3 – Гильотинные пресс-ножницы



Рис. 4 – Ультразвуковая ванна

Установка образца и выполнение эксперимента

1. Отсоедините провод с USB-разъёмом, выходящий из усилителя PSD, расположенного на колпаке вакуумной системы, и далее поднимите колпак.

2. Отключите молибденовую печь, открутив болты 1 и 2 (рис. 5), после чего отсоедините корпус экрана печи от основания.

3. Отведите термопару в сторону от держателя образца для удобства установки исследуемого образца.

4. Ослабьте крепеж 3 и 4 на механическом зажиме 5 (рис. 6).

5. Поместите образец в зажим 5, расположите его перпендикулярно зажимной пластине и зафиксируйте положение образца болтами 3 и 4 (рис. 8).

6. Направьте лазерный луч на образец так, чтобы отраженный луч проходил на уровне установки лазера, и при этом пятно отраженного луча должно быть максимально сфокусировано на том расстоянии, где будет располагаться PSD.

7. Установите термопару таким образом, чтобы она была максимально близко к образцу, но не имела контакта. Кроме этого, термопара не должна контактировать с электродом.

8. Установите печь и соедините ее стокотопводящими проводами с помощью болтов 1 и 2 (рис. 5).

9. С помощью мультиметра проверьте отсутствие контакта печи с подставкой, контакта термопары с печью и с электродом. Если мультиметр издает сигнал, необходимо проверить правильность установки образца, печи и термопары, сняв печь и повторив процедуру ее установки еще раз. В случае отсутствия электрических контактов приступайте к следующему пункту.

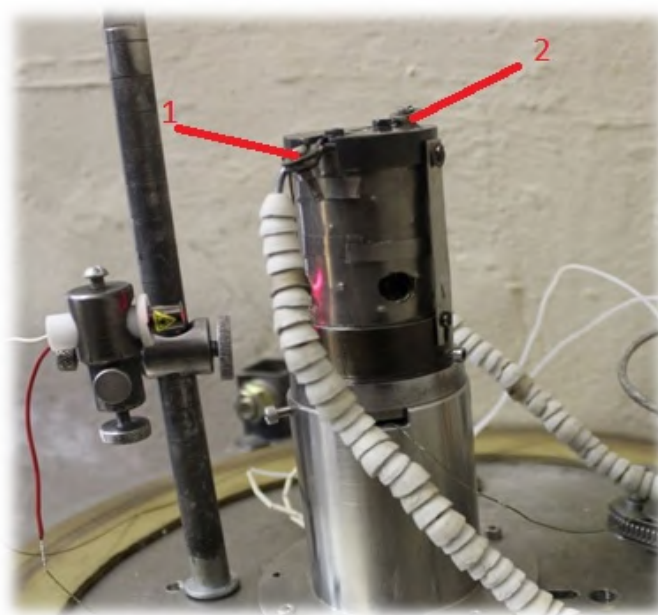


Рис. 5 – Внешний вид экрана печи



Рис. 6 – Пример установленного образца



Рис. 7 – Механизмы позиционирования фотодатчика

10. Установите на место колпак вакуумной системы, разместив его так, чтобы отраженный от образца лазерный луч падал в центр фотодатчика. Для более точной подстройки используйте механизмы

1 и 2 (рис. 7) для перемещения фотодатчика по вертикали и горизонтали. При установке колпака обратите особое внимание на правильность его положения на уплотнительной резинке.

11. Подключите USB-разъем.

12. С помощью генератора «Agilent» начните поиск резонансной частоты путем вращения ручки прибора 1 (рис. 8), тем самым перебирая различные значения частот. При этом следите за изображением сигнала на осциллографе. Как только изображение на экране осциллографа примет похожий на рис. 9 вид, запишите частоту, отображенную на дисплее генератора 2 (рис. 8) (если не получается получить подобный сигнал, попробуйте изменить положение фотодатчика механизмами 1–2 (рис. 7)).



Рис. 8 – Генератор «Agilent 33210А»



Рис. 9 – Пример сигнала осциллографа

13. Произведите откачку воздуха из рабочего объема для создания в нем предварительного вакуума. Для этого перекройте краны 2 и 3, а кран 1 откройте (рис. 10).

14. После того, как стрелка на вакуумметре дойдет до красной отметки, следует приступить к созданию высокого вакуума. Для этого откройте клапан 2, закройте клапан 1 одновременно с открытием клапана 3 (рис. 10). Высокий вакуум будет получен, когда стрелка вакуумметра достигнет максимального отклонения.

15. После откачки воздуха из рабочего объема сигнал может измениться. Для восстановления сигнала используйте механизмы регулировки положения датчика 1–2 (рис. 7).

16. Для проведения последующих экспериментов потребуется напускать воздух в рабочий объём, что осуществляется при перекрытых клапанах 1 и 3 путем выкручивания заглушки 4 (рис. 10). Стоит отметить, что воздух можно напускать после завершения эксперимента только тогда, когда температура в печи будет менее 50 °С.



Рис.10 – Вакуумная система

17. Внесите в первую программу, определенную в п.12, резонансную частоту, в поле «Frequency» (рис. 11).

18. Выставьте в поле «Voltage» (рис. 11) управляющее значение напряжения «3» В.

19. Для определения более точного значения резонансной частоты нажмите кнопку *Measurements 1* (рис. 11). После трех циклов раскочки-затухания остановите этот режим измерений кнопкой *Stop*.

20. Впишите название файла для сохранения будущих результатов измерения в поле *File name* (рис. 11) в произвольном виде.

21. Далее перейдите к программе на втором компьютере (рис. 12). В поле *Temperature of iso* необходимо ввести температуру, при которой планируется измерение (например, «386» К). Время, в течение которого будет выполняться изотермическая выдержка, введите в поле *Timeofiso, s* – «10000», в поле *Experiments type* поставьте галочку перед словом *isothermal*, скорость нагрева в поле *Heatingrate, K/min* – «5», в поле *File name* запишите произвольное название файла и нажмите на кнопку *Accept* чтобы сохранить введенные параметры.

22. Выполните инициализацию мультиметра нажатием кнопки *Keithley* (рис. 12).

23. После подготовки к эксперименту всех узлов измерительной установки и программных средств автоматизации измерений необходимо начать эксперимент. Для этого необходимо одновременно нажать в первой программе (рис. 11) кнопку *Measurements 1* и кнопку *Heat* во второй программе.

24. После окончания эксперимента (в поле *Time to end* второй программы (рис. 12) будет значение "0") можно остановить работу обоих приложений.

25. Выполните такие же измерения для другой температуры (по указанию преподавателя), установив новый образец. Не забывайте изменять название сохраняемого файла и копировать файлы на съемный носитель, чтобы не потерять результаты измерений!

Обработка результатов

1. Скопируйте файлы с результатами экспериментов с компьютеров на носитель информации.

2. Обработайте файлы с помощью специального приложения и сохраните итоговый файл.

3. Полученный файл импортируйте в любую поддерживающую таблицы программу.

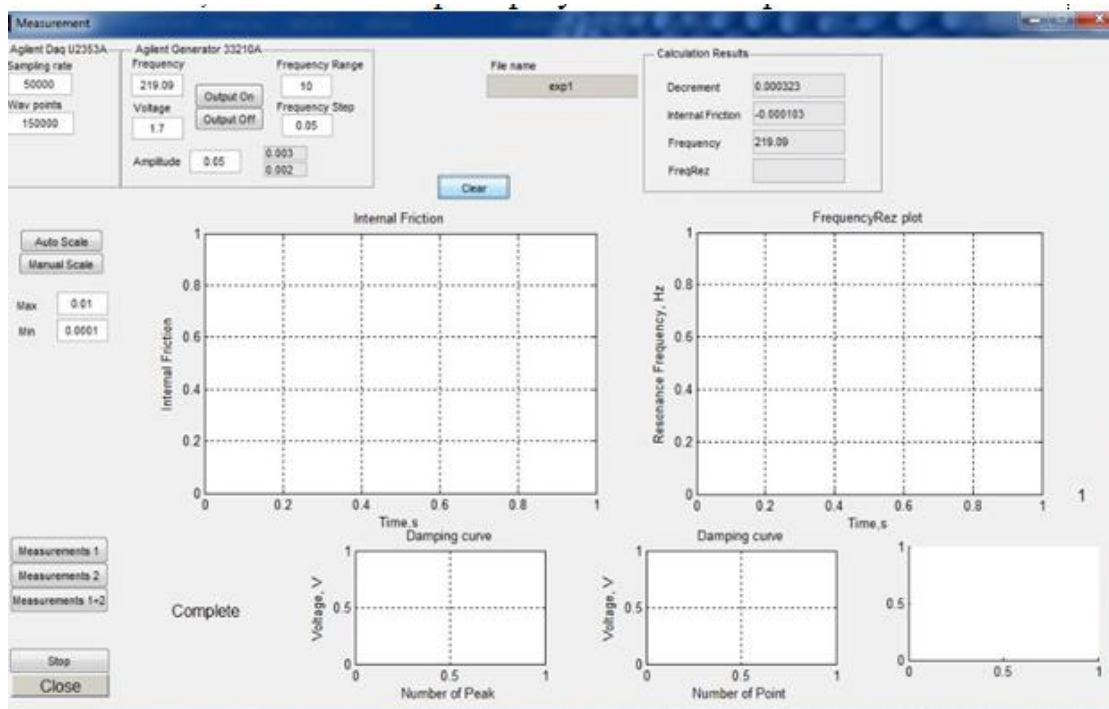


Рис. 11 – Меню программы для осуществления контроля колебаний образца и записи полученных данных

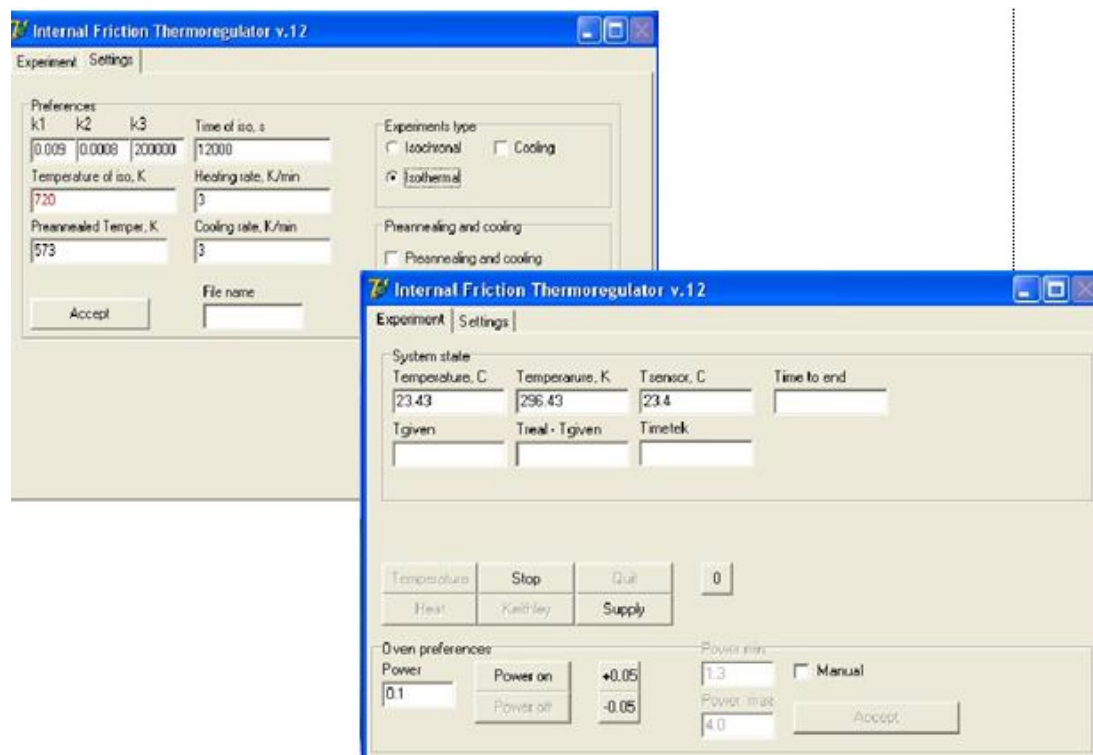


Рис. 12 – Меню программы терморегулирования образца

4. Пересчитайте значения резонансной частоты в значения относительного изменения модуля Юнга по формуле:

$$\Delta E(t) = \frac{f^2(t) - f_0^2}{f_0^2},$$

где f_0 – резонансная частота в момент выхода на изотерму.

5. Постройте график зависимости изменения модуля Юнга от логарифма времени.

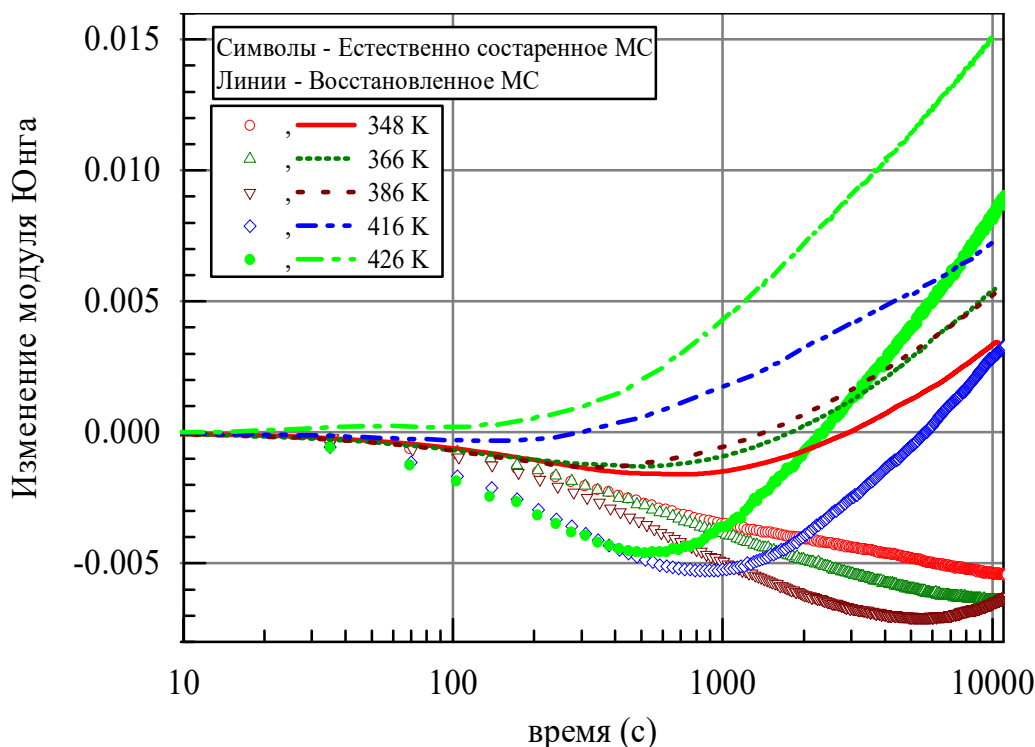


Рис. 13 – Зависимости изменения модуля Юнга состаренного и восстановленного стекла от логарифма времени

6. В файле *.doc или *.docx оформите отчет о проведенном исследовании. Проанализируйте характер временной зависимости относительного изменения модуля Юнга исследуемого образца (рис. 13). Напишите, как согласуются данные, полученные в настоящей работе, с данными, имеющимися в литературе. Сделайте выводы.

Контрольные вопросы

1. Что такое деформация?
2. Модуль Юнга. Понятие, единицы измерения.
3. Как вы понимаете, что такое структурная релаксация?
4. Опишите установку, с помощью которой проводился эксперимент в данной лабораторной работе.
5. Охарактеризуйте этапы выполнения лабораторной работы?

6. Какой физический смысл несет в себе итоговый график лабораторной работы?
7. Опишите принцип работы вакуумной системы, используемой в настоящей работе.
8. Поясните, для чего необходимо проводить очистку образцов в ультразвуковой ванне.
9. Расскажите о приборах, используемых в настоящей исследовательской работе.
10. Предложите варианты возможных исследований на этом экспериментальном оборудовании.

Список литературы

1. Внутреннее трение и изменение модуля Юнга в сплаве Mg-Ni-Y, обусловленное переходом из аморфного в нанокристаллическое состояние [Текст] / Н.П. Кобелев [и др.] // Физика твердого тела. – 1999. – №4. – Т. 41.
2. Макаров, А.С. Взаимосвязь релаксации высокочастотного модуля сдвига и тепловых явлений в объемных металлических стеклах : дис. ... канд. физ.-мат. наук [Текст] / А.С. Макаров. – Воронеж, 2014.
3. Митрофанов, Ю.П. Изотермическая кинетика и возврат релаксации высокочастотного модуля сдвига в процессе структурной релаксации объемного стекла $Pd_{40}Cu_{30}Ni_{10}P_{20}$ [Текст] / Ю.П. Митрофанов, В.А. Хоник, А.Н. Васильев // ЖЭТФ. – 2009. – № 5. – Т. 135. – С. 951.
4. Тютин, С.В. Методика измерения релаксации модуля Юнга металлических материалов [Текст] / С.В. Тютин // Тезисы докладов студенческой научной конференции по итогам работы за 2014 год. – Воронеж : ВГПУ, 2015. – Т. 19. – С. 258–260.
5. Harms, U. Vibrating reed apparatus with optical detection and digital signal processing: application to measurements on thin films / U. Harms, L. Kempen, H. Neuhäuser // Rev. Sci. Instrum. – 1999. – Vol. 70. – P. 1751–1755.
6. Khonik, V.A., Crossover and normal structural relaxation in naturally aged glassy $Pd_{40}Cu_{30}Ni_{10}P_{20}$ / V.A. Khonik, G.V. Afonin, A.Yu. Vinogradov, A.N. Tsyplakov, S.V. Tyutin // Intermetallics. – 2016. – Vol. 74. – P. 53–59.

Научно-исследовательская работа №2

ИЗМЕРЕНИЕ МОДУЛЯ СДВИГА ТВЕРДОГО ТЕЛА МЕТОДОМ ЭЛЕКТРОМАГНИТНО-АКУСТИЧЕСКОГО ПРЕОБРАЗОВАНИЯ

Цель работы:

– выполнить измерения модуля сдвига методом электромагнитно-акустического преобразования для монокристалла алюминия.

Приборы и принадлежности:

- генератор сигналов специальной формы многофункциональный Гб – 34;
- осциллограф «GOS-310»;
- частотомер электронносчётный «ЧЗ-34»;
- образец монокристалла алюминия, помещенный в катушки, сделанные из медного лакированного провода;
- постоянные магниты.

Теоретическая часть

Встречается несколько разновидностей сил, широко представленных в природе и технике, которые играют важную роль в механических процессах. В качестве примера обратимся к силам упругости. Общеизвестно, что внешняя механическая сила может деформировать тело – изменять его форму или объем. В момент деформации возникает противодействующая сила, стремящаяся вернуть составляющие его частицы в исходное положение – сила упругости, равная по величине внешней силе.

Существует несколько видов деформаций: одностороннее (всестороннее) растяжение или сжатие, кручение, сдвиг и изгиб. В настоящей лабораторной работе мы исследуем модуль сдвига (модуль жесткости) твердого тела, который характеризует способность материала сопротивляться изменению формы при постоянном объёме.

Существует множество методов измерения упругих модулей твердых тел: контактные, бесконтактные, статические, динамические. Среди них можно выделить метод электромагнитно-акустических преобразований (ЭМАП), поскольку он обладает рядом преимуществ по сравнению с другими.

Метод ЭМАП основан на явлении преобразования электромагнитной волны в звуковые, и наоборот, за счет взаимодействия тока, текущего на поверхности проводящего материала, с внешним постоянным магнитным полем, т.е. за счет лоренцева взаимодействия. Этот метод успешно применяют как для определения скорости распространения и затухания упругих волны, так и для определения твердости и пластичности различных материалов. Метод ЭМАП можно рассматривать в качестве одного из направлений радиоспектроскопии – раздела физики твердого тела, изучающего взаимодействие электромагнитного поля с веществом.

Изначально проблему возбуждения звука в твердых телах решали при помощи контактных преобразователей, а развитие техники эксперимента связывали с их совершенствованием. Вышеназванный способ основан на восприимчивости определенных кристаллов к воздействию электрического или магнитного поля, из-за чего они меняют свои размеры и форму, т.е. деформируются.

Однако в методе ЭМАП отсутствует прямой акустический контакт между источником/приемником звуковых волн и исследуемым телом, что позволяет минимизировать влияние источника/приемника на результат измерения. Упрощенные схемы бесконтактного ЭМАП и контактного методов представлены на рис. 1а, б.

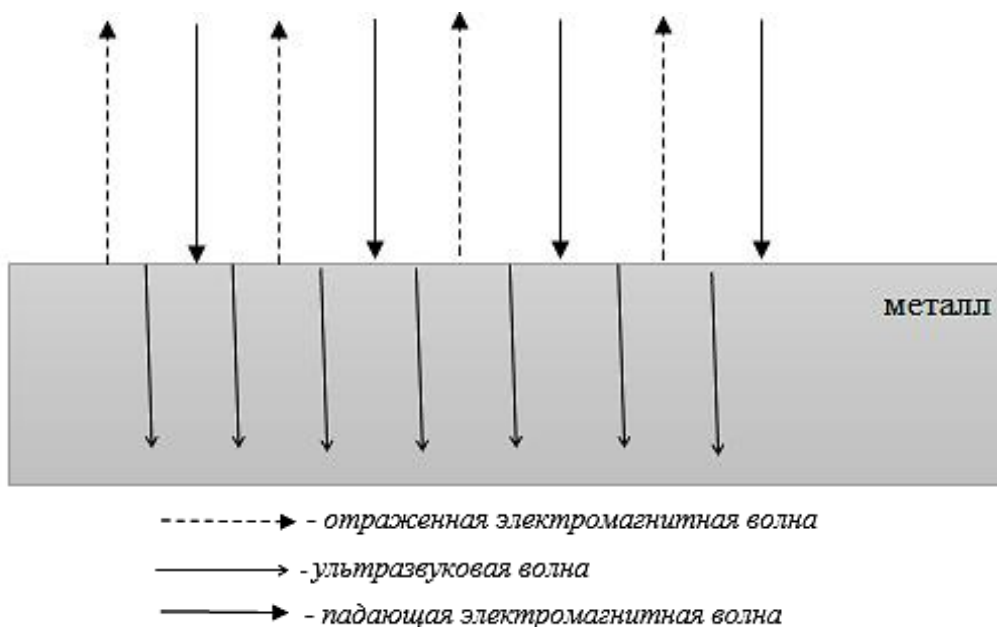


Рис. 1а – Схема эксперимента по электромагнитному возбуждению звука в металле

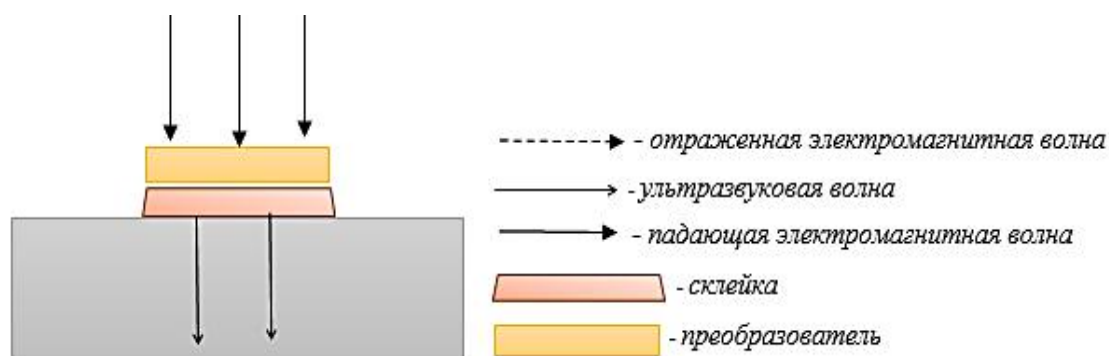


Рис. 1б – Схема эксперимента по возбуждению звука в металле с использованием контактного преобразователя

Из рисунков можно увидеть, что при контактном методе используются два дополнительных элемента – преобразователь и склейка. Из-за них возникают недостатки использования данного метода. Первый недостаток заключается в том, что довольно небольшое количество преобразователей обладают требуемыми пьезоэлектрическими или магнитострикционными свойствами в требуемом диапазоне температур. Как правило, диапазон температур, в котором возможно использование таких преобразователей, ограничен небольшими температурами (до 200 °С). Второй недостаток возникает при использовании склеек. Во время изменения температуры на границе «образец-склейка» и «склейка-преобразователь» появляются огромные термические напряжения, возникающие из-за различий коэффициентов теплового расширения этих веществ. Когда температура изменяется в широких интервалах, напряжения могут привести к деформации поверхности образца либо разрушить сам акустический контакт. Вышеуказанные ограничения способствовали разработке бесконтактных методов.

Чтобы перейти к описанию методики измерения упругих модулей методом ЭМАП, необходимо качественно ознакомиться с механизмами взаимодействий, ответственных за ЭМАП. Металлический материал хорошо отражает электромагнитную волну, но практически всегда очень малая часть её проникает в поверхностный слой (скин-слой). Это явление лежит в основе бесконтактного возбуждения звука.

Простейшим механизмом возбуждения звука в методе ЭМАП является индукционное взаимодействие. Оно возникает при наличии

постоянного магнитного поля, в котором располагается изучаемый образец. При отсутствии магнитного поля электроны и ионы в скин-слое (δ) образца под действием поля электромагнитной волны движутся навстречу друг другу, теряя свою кинетическую энергию при столкновениях. При этом генерации звука происходить не будет, так как электромагнитная энергия, подводимая к образцу, превращается в тепло (см. рис. 2).

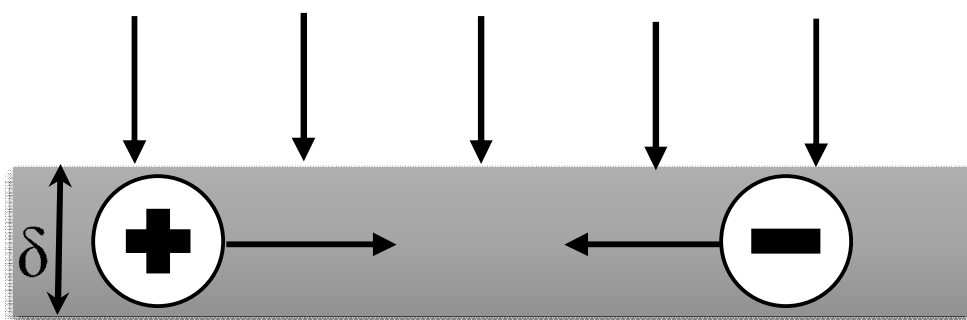


Рис. 2 – Принцип действия индукционного механизма ЭМАП при отсутствии постоянного магнитного поля

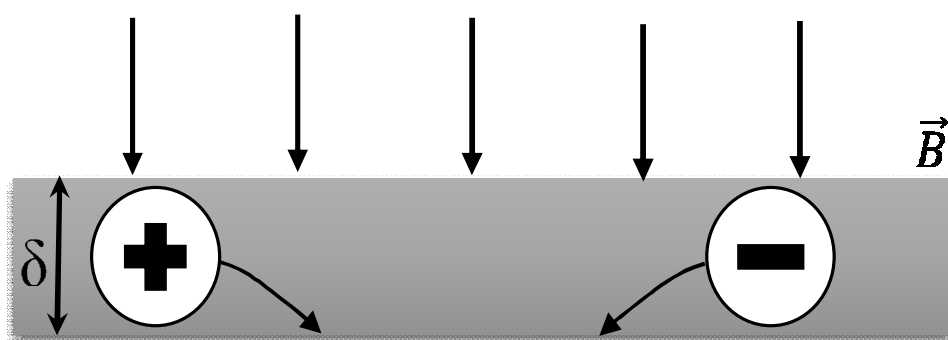


Рис. 3 – Принцип действия индукционного механизма ЭМАП при наличии постоянного магнитного поля

Когда образец находится в постоянном магнитном поле с магнитной индукцией \vec{B} , электроны и ионы отклоняются от своего начального движения под действием силы Лоренца. Так как заряды этих частиц имеют противоположные знаки и движение их противо-

положно, то сила Лоренца \vec{F} отклоняет их в одну и ту же сторону (см. рис. 3), где $\vec{F} = \vec{j} \times \vec{B}$, \vec{j} – плотность тока.

В зависимости от взаимной ориентации векторов \vec{j} и \vec{B} возбуждаются продольные или поперечные акустические колебания. На рис. 4а магнитное поле распространяется вдоль большой поверхности исследуемого материала, на рис. 4б – перпендикулярно ей. В первом случае (рис. 4а) возникает деформация растяжения (сжатия) и, как результат, продольная волна. Во втором случае (рис. 4б) возникает деформация сдвига и, как результат, поперечная волна.

При совпадении частоты f возбуждающего переменного тока с собственной частотой колебаний образца возникает механический резонанс. Это происходит, когда на толщине образца h укладывается целое число длин полувольт $\lambda/2$. При этом возникает стоячая ультразвуковая волна, скорость v распространения которой есть:

$$v = 2ahf, \quad (1)$$

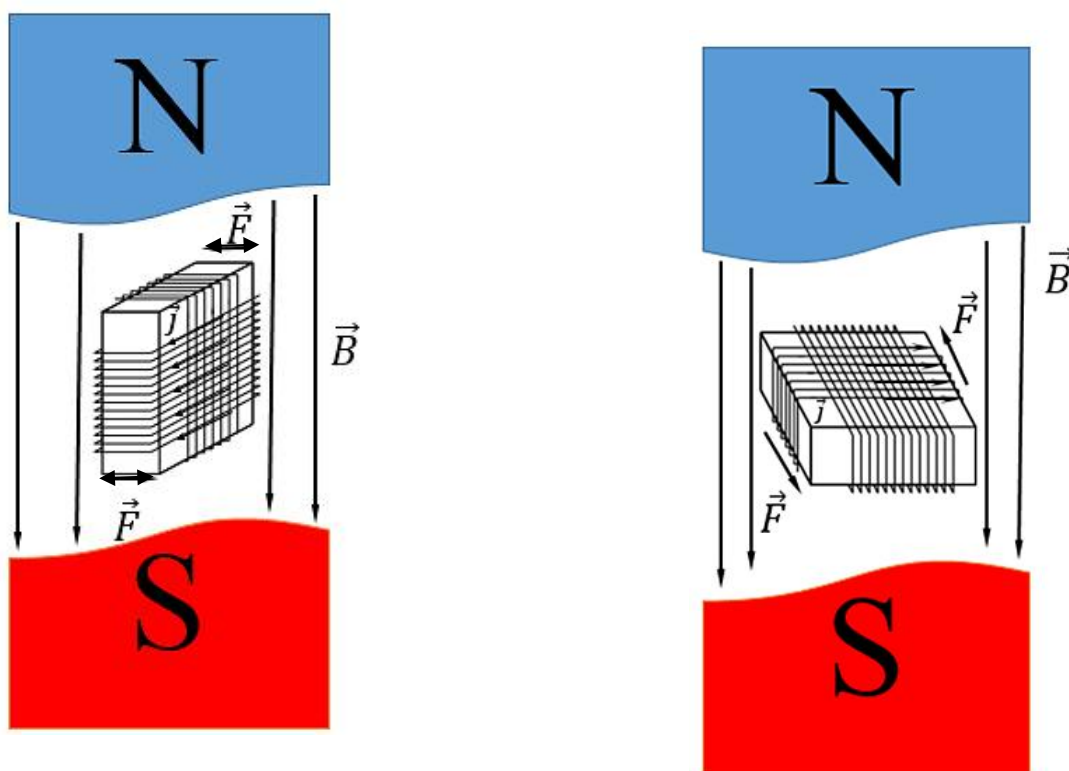


Рис. 4 – Схема возбуждения продольных (а) и поперечных (б) акустических колебаний

где α – поправочный коэффициент, учитывающий геометрию образца, и h – толщина образца. В нашем случае образцы имеют форму параллелепипеда размером около $5 \times 5 \times 2$ мм³, а параметр α при этом имеет значение ≈ 0.9 .

Рассмотрим подробнее деформацию образца при поперечных (сдвиговых) колебаниях. Во время столкновения с ионами электроны передают им свою избыточную энергию, из-за чего возникают колебания решетки образца на частоте падающей волны. В результате возникает такая деформация твердого тела, при которой его слои, параллельные заданной плоскости, не искривляясь и не изменяясь в размерах, смещаются параллельно друг другу, т.е. происходит сдвиговая деформация (рис. 5),

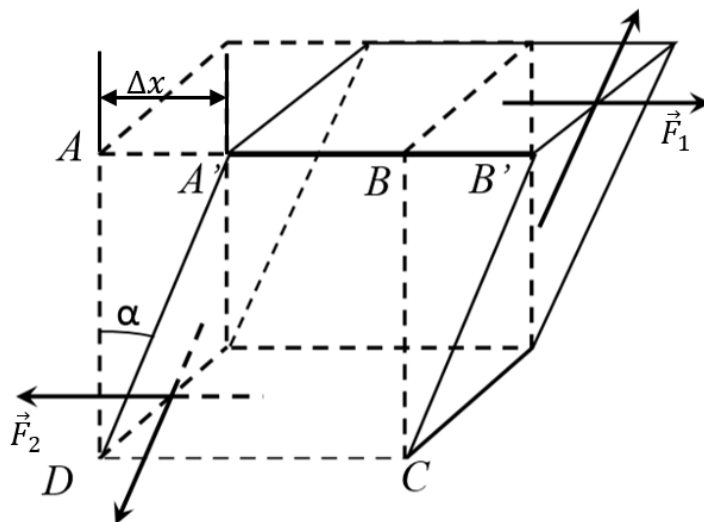


Рис. 5 – Иллюстрация деформации сдвига

где $AA' = \Delta x$ – абсолютная деформация, α – угол сдвига. При малом угле сдвига можно записать: $\alpha \approx \text{tg} \alpha = \Delta x/x$, ($x = AD$). Величину α также называют относительным сдвигом. Если действие сил \vec{F}_1 и \vec{F}_2 равномерно распределено по всей поверхности соответствующей грани S , то в любом сечении, параллельном этим граням, возникает тангенциальное напряжение $\tau = F/S$. Опытным путем доказано, что относительный сдвиг пропорционален тангенциальному напряжению: $\alpha = \tau/G$ – закон Гука при сдвиге. Коэффициент G зависит только от свойств материала и называется *модулем сдвига* (модуль упругости второго порядка), который является физической постоянной, характеризующей жесткость (способность сопротивляться упругим деформациям).

циям) твердого тела при сдвиге. Модуль сдвига связан со скоростью распространения v_{\perp} поперечной (сдвиговой) волны в твердом теле:

$$v_{\perp} = \sqrt{\frac{G}{\rho}}, \quad (2)$$

где ρ – плотность материала.

Регистрация звука, генерируемого в образце при помощи метода ЭМАП, возможна вследствие того, что при падении упругой волны на границу раздела «проводник-внешняя среда» возникает электромагнитное излучение – обратное явление ЭМАП, основанное на обратной взаимоиנדукции. Возникшее излучение попадает в приемную катушку и в результате возникает ЭДС-индукции.

Описание лабораторной установки

В настоящей работе исследование модуля сдвига твердого тела производится методом ЭМАП с помощью следующего оборудования и принадлежностей (рис. 6а–г).

1. Частотомер электронносчётный «ЧЗ-34» (рис. 6а). Назначение: измерение частоты гармонического сигнала, подаваемого на возбуждающую катушку.



Рис. 6а – Частотомер электронносчётный «ЧЗ-34»

2. Многофункциональный генератор сигналов специальной формы «Г6-34» (рис. 6б). Назначение: генерация гармонического сигнала в возбуждающей катушке; позволяет модулировать частоту сигнала, т.е. изменять частоту в требуемом диапазоне частот с заданной скоростью модуляции.



Рис. 6б – Многофункциональный генератор сигналов специальной формы «Г6-34»

3. Осциллограф «GOS-310» (рис. 6в). Назначение: визуализация сигнала принимающей катушки, которая отражает особенности колебаний образца вблизи резонансной частоты.



Рис. 6в – Осциллограф «GOS-310»

4. Образец монокристалла алюминия, помещенный в катушки, изготовленные из лакированного медного провода (рис. 6г).

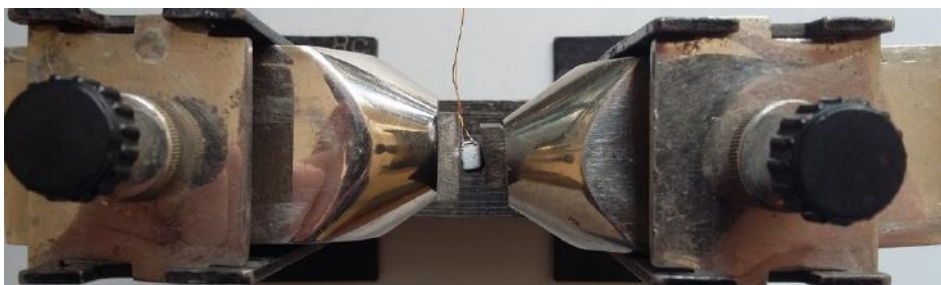


Рис. 6г – Образец монокристалла алюминия

5. Постоянные магниты (см. рис. 6г).

Принципиальная схема лабораторной установки

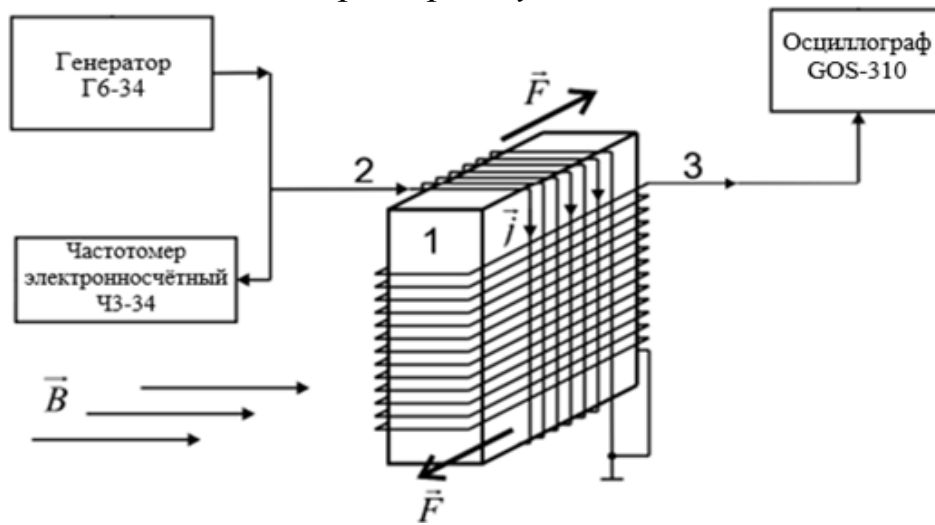


Рис. 7 – Принципиальная схема лабораторной установки:

1 – образец проводящего твердого тела;

2 – возбуждающая катушка;

3 – приемная катушка

Внешний вид лабораторной установки



Рис. 8 – 1 – генератор сигналов специальной формы многофункциональный «Г6-34», 2 – частотомер электронносчетный «ЧЗ-34», 3 – осциллограф «GOS-310», 4 – постоянные магниты, 5 – образец монокристалла алюминия, помещенный в катушки


Методика эксперимента

Исследуемый образец 1 располагается в возбуждающей 2 и приемной 3 катушках, которые находятся в постоянном магнитном поле между полюсами постоянного магнита. С генератора на катушку 2 подается синусоидальный переменный ток частотой f , промодулированный по частоте. В результате скин-эффекта в поверхностном слое образца течёт переменный ток \vec{j} . При взаимодействии тока \vec{j} с постоянным магнитным полем \vec{B} возникает сила Лоренца \vec{F} . Поскольку ток \vec{j} является переменным, то сила Лоренца вызывает периодическую деформацию образца. Если частота f возбуждающего переменного тока совпадает с собственной частотой колебаний образца, возникает механический резонанс. В образце возникает стоячая сдвиговая волна. При этом на осциллографе наблюдается скачкообразное увеличение амплитуды сигнала. Частота, при которой наблюдается такой эффект, определяется с помощью частотомера.

Ход работы


1. Из формул (1) и (2) найти выражение, связывающее модуль сдвига G и резонансную частоту f акустических колебаний.

2. Исследуемый образец монокристалла алюминия имеет толщину $h = 1,98$ мм. Используя табличные данные для скорости распространения поперечной волны $v_{\perp} = 3130$ м/с и полученное соотношение, вычислить ожидаемое значение резонансной частоты $f_{\text{расчет}}$ сдвиговых колебаний.

3. Подключить оборудование к сети. Включить генератор, частотомер и осциллограф переключением тумблера .

4. После того, как приборы прогреются в течение 5 минут, выставить на генераторе частоту, по величине сопоставимую с рассчитанной $f_{\text{расчет}}$.

5. На осциллографе установить линию развертки по центру экрана. Левый аттенюатор («VOLTS/DIV») усилителя перевести в положение «5 mV / дел.» или «10 mV/дел.». Правый аттенюатор («TIME/DIV») установить в положение «1 μ S / дел.». На экране осциллографа получить устойчивое изображение гармонического сигнала с помощью аттенюатора стабилизации («SWP.VAR.»).

6. Произвести частотную модуляцию с помощью ручки модуляционного генератора «Hz» и «». При этом добиться четкой и

устойчивой картины скачкообразного изменения амплитуды сигнала при достижении резонансной частоты. Значение текущей частоты высвечивается на электронном частотомере.

7. Найти резонансную частоту f . Для этого на экране осциллографа визуально зафиксировать скачкообразное изменение амплитуды гармонического сигнала, а также искомую величину f на экране частотомера.

8. Выполнить 5–10 измерений резонансной частоты f . Определить среднее значение f_{cp} резонансной частоты и погрешности измерения.

9. Сравнить полученное значение f_{cp} с расчетным $f_{расчет}$ и сделать выводы.

Контрольные вопросы

1. Что такое упругая деформация? Какие виды деформаций бывают?

2. Что называют упругим модулем? В чем состоит физический смысл модуля сдвига?

3. Что такое явление механического резонанса? При каких условиях возникают продольные и поперечные акустические колебания?

4. Что называют стоячей волной?

5. В чем суть явления электромагнитно-акустического преобразования (ЭМАП)?

6. Какие физические механизмы лежат в основе явления ЭМАП?

7. Дайте определение скин-эффекта. Что является необходимым условием для его возникновения?

8. Наличие каких условий необходимо для возникновения упругой волны в методе ЭМАП?

9. Почему так важно наличие постоянного магнитного поля, в которое помещается образец с катушками?

10. Каким образом менять тип упругих волн в методе ЭМАП?

11. От чего зависит величина скачка амплитуды во время резонанса в методе ЭМАП?

Список литературы

1. Васильев, А.Н. Бесконтактные возбуждения звуков в металлах [Текст] / А.Н. Васильев, Ю.П. Гайдуков // Успехи физических наук. – 1983. – Т. 141. – Вып. 3. – С. 431–467.

2. Васильев, А.Н. ЭМАП – новое направление в радиоспектроскопии твердых тел [Текст] / А.Н. Васильев // Квант. – 1991. – №8.
3. Головин, И.С. Внутреннее трение и механическая спектроскопия металлических материалов [Текст] / И.С. Головин. – М. : Изд. Дом «МИСиС», 2012. – 247 с.
4. Готтштайн, Г. Физико-химические основы материаловедения [Текст] / Г. Готтштайн ; пер. с англ. К.Н. Золотовой, Д.О. Чаркина ; под ред. В.П. Зломанова. – М. : БИНОМ, 2014. – 400 с.
5. Каганов, М.И. Электромагнитно-акустические преобразование – результат действия поверхностной силы [Текст] / М.И. Каганов, А.Н. Васильев // Успехи физических наук. – 1993. – Т. 163. – Вып. 10. – С. 67–80.
6. Матвеев, А.Н. Механика и теория относительности [Текст] / А.Н. Матвеев. – М. : ОНИКС XXI век, 2003. – 432 с.
7. Черепанов, В.И. Резонансные методы исследования вещества [Текст] / В.И. Черепанов // Соросовский образовательный журнал. – 1997. – №9. – С. 86–90.

Научно-исследовательская работа №3 ТЕРМОЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ ЯВЛЕНИЯ И ГРАДУИРОВКА ТЕРМОПАРЫ

Цели работы:

- измерить температурную зависимость электродвижущей силы (ЭДС) термопары;
- определить коэффициент Зеебека и выполнить градуировку термопары;
- определить коэффициент Зеебека термоэлектрических элементов (ТЭЭ) модуля Пельтье.

Оборудование и принадлежности:

- соединительные провода;
- хромель-константановая термопара;
- электрическая плитка;
- термометр с держателем;
- алюминиевый стакан с водой;
- милливольтметр;
- модуль Пельтье на алюминиевом радиаторе;
- источник постоянного тока (выпрямитель В-24 (учебный)).

Теоретическая часть

В случае, если привести два разных металла в соприкосновение, между ними возникнет разность потенциалов, которая называется контактной. При этом в находящемся вокруг металлов пространстве возникает электрическое поле.

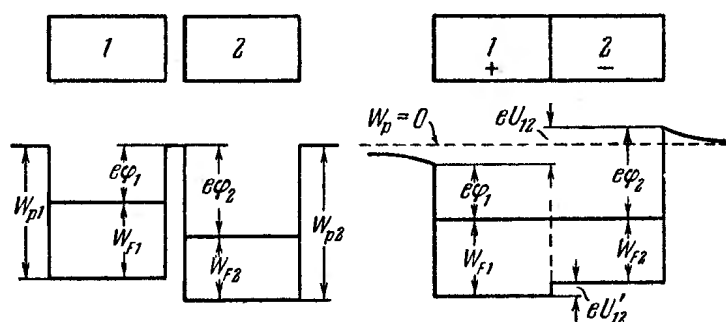


Рис. 1 – Потенциальная энергия электрона вблизи поверхности двух металлов до (слева) и после (справа) установления контакта между ними

Контактная разность потенциалов возникает тогда, когда при соприкосновении металлов часть электронов из одного металла переходит в другой. На рис. 1 в верхней части представлены два металла: по левую сторону – до приведения их в

соприкосновение, по правую сторону – после их соприкосновения. В нижней части рисунка изображён график потенциальной энергии электрона вблизи поверхности металла. Пусть уровень Ферми в первом металле располагается выше, чем во втором металле. При возникновении контактов между металлами электроны с самых высоких уровней металла 1 начнут переходить в наиболее низкие незанятые уровни металла 2. В результате потенциал φ_1 первого металла увеличивается, а второго (φ_2) – уменьшается. Из этого следует, что потенциальная энергия электрона в первом металле (W_{p1}) станет меньше, а во втором металле (W_{p2}) – больше.

В квантовой статистической физике доказывается, что условием баланса между соприкасающимися средами является равенство полных энергий, соответствующих уровням Ферми (рис. 1). При соблюдении такого условия потенциальная энергия электрона в непосредственной близости к поверхности первого металла будет на $\Delta W = e(\varphi_2 - \varphi_1)$ меньше, чем вблизи второго металла. Следовательно, потенциал на поверхности первого металла будет на

$$U_{12} = e(\varphi_2 - \varphi_1) / e = \varphi_2 - \varphi_1 \quad (1)$$

выше, чем на поверхности второго. Величина U_{12} и есть контактная разность потенциалов между первым и вторым металлами.

Разность потенциалов U_{12} устанавливается между точками, лежащими за пределами металлов в непосредственной близости к их поверхности. Вследствие этого ее называют внешней контактной разностью потенциалов. Часто говорят просто о контактной разности потенциалов, подразумевая под ней внешнюю. Между внутренними точками металлов также имеется разность потенциалов, которую называют внутренней. Как видно из рисунка 1, потенциальная энергия электрона в первом металле меньше, чем во втором, на величину $\Delta W_F = W_{F1} - W_{F2}$. Соответственно, потенциал внутри первого металла выше, чем внутри второго на величину:

$$U'_{12} = \frac{W_{F1} - W_{F2}}{e}. \quad (2)$$

Формула (2) представляет собой внутреннюю контактную разность потенциалов.

Внешняя контактная разность потенциалов колеблется для различных пар металлов от нескольких десятых вольт до нескольких вольт. Контактная разность потенциалов появляется и на границе между металлом и полупроводником, а также на границе между двумя полупроводниками.

В замкнутой цепи, составленной из разного количества разнородных металлов или полупроводников, сумма скачков потенциала равна нулю. Таким образом, если все спаи поддерживать при одной температуре, ЭДС в цепи возникнуть не сможет. Возникновение ЭДС в замкнутой цепи находилось бы в противоречии со вторым началом термодинамики.

Возникновение контактной разности потенциалов на границе металлов и/или полупроводников как раз и обуславливает термоэлектрические явления: эффекты Зеебека, Пельтье и Томсона. Рассмотрим детально каждый из них.

1. Эффект Зеебека

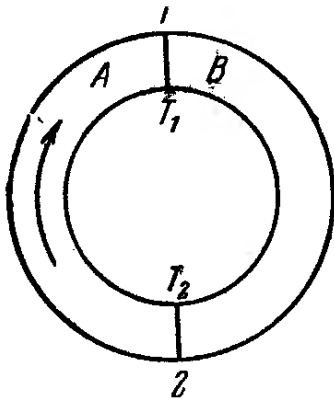


Рис. 2 – Замкнутая цепь двух проводников, спаи которых имеют разную температуру

В 1821 году Зеебек обнаружил, что если спаи 1 и 2 (рис. 2) двух разных металлов, образующих замкнутую цепь, поддерживать при разных температурах, то в цепи будет протекать ток. Термоэлектродвижущая сила (термо-ЭДС) в этом случае обусловлена двумя причинами. Первая – уровень Ферми зависит от температуры. Этот факт является первой причиной появления термо-ЭДС:

$$\begin{aligned} \varepsilon_{\text{конт}} = U'_{AB}(T_1) + U'_{BA}(T_2) &= \frac{1}{e} \{ [W_{FA}(T_1) - W_{FB}(T_1)] + \\ &+ [W_{FB}(T_2) - W_{FA}(T_2)] \} = \frac{1}{e} \{ [W_{FB}(T_2) - W_{FB}(T_1)] - \\ &- [W_{FA}(T_2) - W_{FA}(T_1)] \}, \end{aligned}$$

где U' – разность потенциалов; W_F – энергия Ферми; T – температура; $\varepsilon_{\text{конт}}$ – термо-ЭДС.

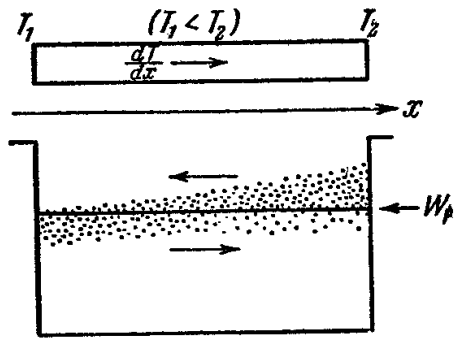


Рис. 3 – Металлический проводник, вдоль которого имеется градиент температуры

Последнее выражение можно записать следующим образом:

$$\varepsilon_{\text{конт}} = \frac{1}{e} \int_{T_1}^{T_2} \left(\frac{dW_{FB}}{dT} - \frac{dW_{FA}}{dT} \right) dT. \quad (3)$$

Рассмотрим однородный металлический проводник, вдоль которого имеется градиент температуры (рис. 3). В данном случае концентрация электронов с высокой энергией, $W > W_F$, у нагретого конца будет больше, чем у холодного.

При этом концентрация электронов с низкой энергией, $W < W_F$, будет наоборот – у нагретого конца она будет меньше. Вдоль проводника возникает градиент концентрации электронов с заданными значениями энергии. Это повлечет за собой диффузию быстрых электронов к холодному концу, а медленных к теплому. При этом диффузионный поток быстрых электронов будет больше, чем поток медленных электронов. Это приводит к тому, что возле холодного конца образуется избыток электронов, а возле горячего – их недостаток. В итоге внутри проводника появится электрическое поле, направленное навстречу градиенту температуры. Оно будет уменьшать поток быстрых электронов и увеличивать поток медленных. Когда с течением времени и тот и другой поток выровняются в каждом сечении, наступит равновесное состояние.

При этом на каждом участке проводника длиной dx будет осуществляться изменение потенциала $d\phi$, соответствующее изменению температуры dT на этом же участке. Тогда между концами проводника, находящимися при температурах T_1 и T_2 , будет разность потенциалов $\Delta\phi_{\text{диффуз}} = \int_{T_1}^{T_2} \beta dT$, где $\beta = d\phi/dT$. При этом величина β оказывается небольшой – порядка 10^{-4} В/К.

Обнаружить такой эффект на практике оказывается трудно. Нужно отметить, что данный механизм имеет место быть и в случае полупроводников. Если носителями тока являются электроны, потенциал нагретого конца, как мы видели, оказывается выше, чем потенциал холодного. Значит, у полупроводников n-типа величины $d\phi$ и dT имеют одинаковые знаки и, следовательно, $\beta > 0$.

В случае дырочной проводимости дырки, диффундируя в большем числе к холодному концу, и создают вблизи него избыточный положительный заряд. Таким образом, у полупроводника р-типа потенциал холодного конца будет выше, чем потенциал нагретого, т.е. $\beta < 0$. За счет различия β для участков А и В (рис. 2) в замкнутой цепи двух разных металлов будет возникать термо-ЭДС, равная:

$$\varepsilon_{\text{диффуз}} = \int_{T_1}^{T_2} \beta_A dT + \int_{T_1}^{T_2} \beta_B dT = \int_{T_1}^{T_2} (\beta_A - \beta_B) dT. \quad (4)$$

Таким образом, термо-ЭДС складывается из двух компонент – скачка потенциала ($\varepsilon_{\text{конт}}$) за счет зависимости уровня Ферми от температуры и изменения потенциала ($\varepsilon_{\text{диффуз}}$), вызванного диффузией носителей тока:

$$\varepsilon_{\text{термо}} = \varepsilon_{\text{конт}} + \varepsilon_{\text{диффуз}}. \quad (5)$$

Из формул (3), (4) и (5) следует, что

$$\varepsilon_{\text{термо}} = \int_{T_1}^{T_2} (\alpha_A - \alpha_B) dT, \quad (6)$$

где величину $\alpha = \beta - \frac{1}{e} \frac{dW_F}{dT}$ называют коэффициентом термо-ЭДС.

Эффект Зеебека используют на практике для измерения температуры тел. Техническое устройство при этом называют термопарой. Один спай термопары удерживают при постоянной температуре (например, при 0 °С), а другой при этом помещают в тот объем, температуру которого желают измерить. С помощью термопар можно определять с точностью порядка сотых долей градуса как низкие, так и высокие температуры.

2. Эффект Пельтье

Явление, открытое Пельтье в 1834 году, состоит в том, что при протекании тока через цепь, изготовленную из полупроводников или разных металлов, в одних контактах происходит выделение, а в других – поглощение тепла. Явление Пельтье является обратным явлением Зеебека. Путем опыта определено, что количество поглотивше-

гося или выделившегося в контакте А–В тепла Q_{AB} пропорционально заряду q , прошедшему через контакт:

$$Q_{AB} = \Pi_{AB} \cdot q = \Pi_{AB} it, \quad (7)$$

где Π_{AB} – коэффициент Пельтье (из звена А ток течет в звено В). Из формулы (7) следует, что теплота Пельтье пропорциональна не квадрату, а первой степени силы тока, в отличие от теплоты Джоуля-Ленца. При изменении направления тока, тепло Q меняет знак и, таким образом, наблюдается поглощение (выделение) тепла, вместо его выделения (поглощения), т.е. $\Pi_{AB} = \Pi_{BA}$.

Из законов термодинамики вытекает, что коэффициент Пельтье и коэффициент термо-ЭДС связаны между собой соотношением:

$$\Pi_{AB} = \alpha_{AB} T. \quad (8)$$

Явление Пельтье имеет следующее объяснение. Носители тока (дырки или электроны) по разные стороны от контакта имеют разную среднюю энергию. В случае если носители попадают в область с большей энергией, то недостающую энергию они забирают у кристаллической решётки, что приводит к охлаждению контакта. В другом спае носители, пройдя через него, попадают в область с меньшей энергией, где они передают избыток энергии кристаллической решётке, в результате чего контакт нагревается.

В контакте двух полупроводников с разными типами проводимости дело обстоит иначе. В этом случае явление Пельтье имеет иное объяснение. На одном спае дырки и электроны перемещаются навстречу друг другу. Встретившись, они рекомбинируют: электрон, находившийся в зоне проводимости n-полупроводника, попадая в р-полупроводник, занимает в валентной зоне место дырки. При этом освобождается энергия, которая требуется для образования свободного электрона в n-полупроводнике и дырки в р-полупроводнике, а также кинетическая энергия дырки и электрона. Такая энергия сообщается кристаллической решётке и идет на нагревание спаев. На другом спае текущий ток отсасывает дырки и электроны от границы между полупроводниками. Убыль носителей тока в пограничной области восполняется за счет попарного рождения дырок и электронов (при этом электрон переходит в зону проводимости n-полупроводника из

валентной зоны р-полупроводника). Когда образуются пары, энергия затрачивается. Она заимствуется у кристаллической решетки и спай охлаждается.

Идею использования эффекта Пельтье для создания холодильных установок была выдвинута академиком А.Ф. Иоффе. Рабочим элементом таких холодильников является батарея из чередующихся полупроводников n- и р-типа. Спаи одного вида (соответствующие р-n-переходу) выводятся наружу, другого вида (соответствующие n-р-переходу) – в охлаждаемую область. Наружные спаи отдают тепло внешней среде, а при надлежащем направлении тока внутренние спаи поглощают тепло, понижая температуру окружающего их пространства.

3. Эффект Томсона

У. Томсон в 1856 году предсказал на основании термодинамических соображений, что тепло должно поглощаться или выделяться при прохождении тока по однородному проводнику, вдоль которого существует градиент температуры. Его гипотеза была в дальнейшем подтверждена опытным путем, а обнаруженный эффект получил название явления Томсона.

Удельная тепловая мощность, выделяющаяся в проводнике вследствие эффекта Томсона, равна:

$$\omega = \tau \frac{dT}{dx} j, \quad (9)$$

где τ – коэффициент Томсона, j – плотность тока и $\frac{dT}{dx}$ – градиент температуры.

Явление Томсона поясняется аналогично явлению Пельтье. Если ток протекает в направлении повышения температуры, то носители тока (если они электроны) при своем движении станут переходить из мест с более высокой температурой в места с более низкой.

В результате избыток собственной энергии электроны отдадут кристаллической решетке, что приведет к выделению тепла. Если носителями тока являются дырки, то тепловой эффект будет иметь противоположный знак.

Описание и внешний вид лабораторной установки

1. Источник постоянного тока (выпрямитель «В-24» (учебный)). Предназначен для получения регулируемого напряжения переменного тока от 0 до 30 В или постоянного (пульсирующего) от 0 до 24 В. Питание источника осуществляется от сети переменного тока напряжением 220 В или 127 В частотой 50 Гц. Максимально допустимая сила тока нагрузки – 10 А.

2. Элемент Пельтье «ТЕС1-127060-40» – термоэлектрический модуль, имеющий следующие параметры: размер 40×40 мм², мощность 72 Вт, максимальное напряжение питания 15.2 В, максимальный ток 6 А.

3. Алюминиевый радиатор. Предназначен для отвода тепла от горячей стороны термоэлектрического модуля.

4. Термометр. Предназначен для измерения температуры воды.

5. Электрическая плитка. Предназначена для нагрева алюминиевого стаканчика с водой.

6. Термопара – устройство, состоящее из спаянных хромелевых и константановых проводов.

7. Милливольтметр – прибор для измерения термо-ЭДС термопары.

8. Соединительные провода.

9. Алюминиевый стаканчик с водой.



Рис. 8 – Оборудование и принадлежности лабораторной установки

Ход работы

1. Поставьте на плиту алюминиевый стакан с водой. Поместите термометр и спай термопары в воду. Включите электрическую плитку в сеть.

2. По мере роста температуры T воды запишите показания милливольтметра. Измерения нужно выполнять вплоть до температуры кипения воды ($T_{\text{кип}} = 100 \text{ }^\circ\text{C}$). Необходимо выполнить 8–10 измерений термо-ЭДС ε и температуры T (значения температуры перевести в градусы Кельвина). Измерения рекомендуется выполнять через каждые 8–10 $^\circ\text{C}$. При этом текущие значения температуры (T_i) и ЭДС (ε_i) необходимо вносить в таблицу 1.

3. После того, как вода закипит и выполнено последнее измерение, необходимо обязательно (!) выключить плитку, вынуть термометр из воды и поместить его вдали от горячей поверхности плитки. В противном случае вода в алюминиевом стакане выкипит, уровень столба жидкости в термометре превысит допустимый предел, и в результате он выйдет из строя.

Таблица 1 – Текущие значения температуры

i	T_i [K]	ε_i [mV]	$T_i \varepsilon_i$ [K·mV]	T_i^2 [K ²]	ε_i^p [mV]	$(\varepsilon_i^p - \bar{\varepsilon})^2$ [mV ²]	$(\varepsilon_i - \bar{\varepsilon})^2$ [mV ²]
1							
2							
...							
n	$\sum T_i$	$\sum \varepsilon_i$	$\sum T_i \varepsilon_i$	$\sum T_i^2$		$\sum (\varepsilon_i^p - \bar{\varepsilon})^2$	$\sum (\varepsilon_i - \bar{\varepsilon})^2$

4. Далее, из полученных данных необходимо определить коэффициенты уравнения линейной регрессии:

$$\varepsilon = \varepsilon_0 + \alpha \cdot T,$$

где коэффициенты ε_0 и α (коэффициент Зеебека) находятся, используя метод наименьших квадратов:

$$\alpha = \frac{n \cdot \sum T_i \varepsilon_i - \sum T_i \cdot \sum \varepsilon_i}{n \cdot \sum T_i^2 - (\sum T_i)^2}$$

$$\varepsilon_0 = \frac{\sum \varepsilon_i - k \cdot \sum T_i}{n},$$

где n – количество выполненных измерений, ε_i и T_i – значения ЭДС и температуры при i -ом измерении соответственно. Полученные значения параметров расчета занести в таблицу 1.

5. Используя полученные значения коэффициентов b и k , записать уравнение линейной регрессии, связывающее термо-ЭДС и температуру.

6. Далее необходимо выполнить анализ качества полученного линейного уравнения. Для этого вычисляем коэффициент детерминации R^2 :

$$R^2 = \frac{\sum (\varepsilon_i^p - \bar{\varepsilon})^2}{\sum (\varepsilon_i - \bar{\varepsilon})^2}$$

где $\bar{\varepsilon}$ – среднее значение ЭДС, ε_i^p – i -е значение ЭДС, вычисленное с помощью полученного уравнения регрессии, при i -м значении T , т.е. $\varepsilon_i^p = \varepsilon_0 + \alpha \cdot T_i$. При этом необходимо заполнить соответствующие столбцы и ячейки таблицы 1. Из полученного значения величины R^2 сделать вывод о качестве модели. Если значение R^2 меньше 0,8, то построенная модель является не качественной и эксперимент нужно переделать.

7. Необходимо нанести экспериментальные данные на график, а также построить полученную функциональную зависимость ε .

8. Далее выполняем градуировку термопары. Для этого из полученной зависимости $\varepsilon = \varepsilon_0 + \alpha \cdot T$ необходимо найти зависимость $T(\varepsilon)$:

$$T = T_0 + \alpha^* \cdot \varepsilon,$$

где $T_0 = -\varepsilon_0/\alpha$ – значение температуры при ЭДС, равном нулю, а $\alpha^* = 1/\alpha$. Зависимость $T(\varepsilon)$ позволяет определить величину температуры по величине ЭДС термопары, измеренной с помощью милливольтметра.

9. Далее выполняется исследование эффекта Пельтье и его связь с явлением Зеебека. Для этого необходимо включить источник тока

(выпрямитель «В-24»), к которому подключен модуль Пельтье, и установить ток около 2–3 А.

10. Необходимо подождать 1–2 минуты, чтобы тепловой поток, текущий через модуль Пельтье и радиатор, стал стационарным. После этого необходимо приложить спай термопары к центру горячей поверхности радиатора, т.е. к поверхности радиатора со стороны его ребер. Далее необходимо записать показания милливольтметра, т.е. значение ЭДС ε_2 , характеризующее температуру T_2 горячей стороны модуля Пельтье.

11. Затем необходимо спай термопары приложить к обратной стороне конструкции, т.е. к алюминиевой пластинке, которая поджимает модуль Пельтье. При этом вы обнаружите, как стрелка милливольтметра опустится ниже нуля. Это означает, что значение термо-ЭДС стало отрицательным. Чтобы измерить его, необходимо переставить местами клеммы термопары на милливольтметре. В результате милливольтметр покажет значение ЭДС ε_1 , характеризующее температуру с холодной стороны модуля Пельтье. Для дальнейшего расчета T_1 измеренное значение ε_1 необходимо брать со знаком минус (!).

13. Измерения ε_1 и ε_2 выполнить 3 раза и результаты занести в таблицу 2, при этом параллельно записать значение силы тока I в цепи.

Таблица 2 – Результаты измерений термо-ЭДС

j	ε_1 [мВ]	ε_2 [мВ]	I [А]	T_1 [К]	T_2 [К]	ΔT [К]	α [мкВ/К]
1							
2							
...							

14. Вычислить температуру горячей (T_2) и холодной (T_1) сторон с помощью линейного уравнения, а также разницу температур между ними, $\Delta T = T_2 - T_1$. Результаты расчета занести в таблицу 2.

15. Далее необходимо вычислить коэффициент Зеебека полупроводников для каждого j -го измерения:

$$\alpha_{pn} = \frac{\lambda^* S \Delta T}{NITd}$$

где S – площадь модуля Пельтье (в нашем случае $S = 40 \times 40$ мм²), d – толщина модуля Пельтье (в нашем случае $d = 4$ мм), N – количество ТЭЭ в модуле (в нашем случае $N = 127$), T – температура окружающей среды (т.е. комнатная температура), λ^* – эффективный коэффициент теплопроводности, который определяется свойствами теплопроводящей системы «алюминиевая пластинка + модуль Пельтье + радиатор» (в нашем случае его нужно принять равным 1,3 Вт/(м·К)).

13. Вычислить среднее значение $\overline{\alpha_{pn}}$ коэффициента Зеебека и найти систематическую погрешность косвенных измерений для этой величины.

14. Сравнить результаты исследования с табличным значением коэффициента Зеебека для ТЭЭ Пельтье, сделанного из полупроводникового соединения Bi_2Te_3 (висмут-теллур): $\alpha_{pn}(Bi_2Te_3) = +170$ мкВ/К.

15. Сделать общие выводы по работе.

Контрольные вопросы

1. Контактная разность потенциалов и ее характеристики.
2. Физические основы термоэлектричества.
3. В чем состоит эффект Зеебека?
4. В чем состоит эффект Пельтье?
5. В чем состоит эффект Томсона?
6. Практическое применение эффекта Зеебека.
7. Какие факторы необходимо учитывать при выборе термопары?
8. Причины нагрева (охлаждения) спаев термопары при пропускании через них тока.
9. Коэффициент Пельтье и его физический смысл.
10. Зависимость коэффициента Пельтье от температуры.
11. Практическое применение эффекта Пельтье.
12. Физические механизмы возникновения внутренней и внешней контактной разности потенциалов.
13. Энергия Ферми: определение, физический смысл и ее связь с термоэлектрическими явлениями.
14. Распределение Ферми-Дирака для электронов в металлах.

15. Физические основы отличия между теплом Джоуля и теплом Пельтье.

16. Объясните, почему в настоящей лабораторной работе джоулево тепло можно не учитывать?

17. Можно ли создать разность потенциалов в однородном проводнике, имеющем в разных точках различную температуру? Ответ обосновать.

18. Почему в полупроводниках эффект Пельтье имеет значительно большую величину, чем в проводниках? Наблюдается ли эффект Пельтье в диэлектриках?

Список литературы

1. Калашников, С. Электричество [Текст] / С. Калашников. – М. : ФИЗМАТЛИТ, 2008. – 624 с.

2. Матвеев, А.Н. Электричество и магнетизм [Текст] / А.Н. Матвеев. – М. : Мир и Образование, 2005. – 464 с.

3. Орир, Д. Физика. Полный курс: примеры, задачи, решения [Текст] / Д. Орир. – М. : КДУ, 2015. – 752 с.

4. Парселл, Э. Электричество и магнетизм. Берклеевский курс физики [Текст] / Э. Парселл. – СПб. : Лань, 2005. – 420 с.

5. Савельев, И.В. Курс общей физики : в 5 т. Т. 2. Электричество и магнетизм [Текст] / И.В. Савельев. – СПб. : Лань, 2011. – 348 с.

6. Сивухин, Д.В. Общий курс физики. Атомная и ядерная физика [Текст] / Д.В. Сивухин. – М. : ФИЗМАТЛИТ, 2008. – Т. 5. – 784 с.

7. Сивухин, Д.В. Общий курс физики. Электричество [Текст] / Д.В. Сивухин. – М. : ФИЗМАТЛИТ, 2015. – Т. 3. – 656 с.

8. Фриш, С.Э. Курс общей физики. Т. 2. Электрические и электромагнитные явления [Текст] / С.Э. Фриш, А.В. Тиморева. – СПб. : Лань, 2008. – 528 с.

Приложение

Пример оформления отчета о НИР

Министерство образования и науки РФ
Федеральное государственное бюджетное образовательное
учреждение высшего образования
«Воронежский государственный педагогический университет»

Кафедра общей физики

УДК _____

ОТЧЕТ
О НАУЧНО-ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКОЙ РАБОТЕ

ТЕМА

Выполнил(а): студент(ка) 1 курса
магистратуры ФМФ по направлению
«Педагогическое образование»
профиля «Физическое образование»
Иван Иванович Иванов

Руководитель:
заведующий кафедрой общей физики,
д. ф.-м. н.,
профессор В.А. Хоник

Воронеж 2017

Реферат

Реферат должен содержать:

- сведения об объеме отчета, количестве иллюстраций, таблиц, приложений, количестве частей отчета, количестве использованных источников;

- перечень ключевых слов (Перечень ключевых слов должен включать от 5 до 15 слов или словосочетаний из текста отчета, которые в наибольшей мере характеризуют его содержание и обеспечивают возможность информационного поиска. Ключевые слова приводятся в именительном падеже и печатаются прописными буквами в строку через запятые);

- текст реферата.

Текст реферата должен отражать:

- объект исследования или разработки;
- цель работы;
- метод или методологию проведения работы;
- результаты работы и их новизну;
- основные конструктивные, технологические и технико-эксплуатационные характеристики;
- степень внедрения;
- рекомендации по внедрению или итоги внедрения результатов НИР;
- область применения;
- экономическую эффективность или значимость работы;
- прогнозные предположения о развитии объекта исследования.

Пример составления реферата на отчет о НИР

Реферат

Отчет с. 14, 1 ч., 6 рис., 10 источников.

МОДУЛЬ ЮНГА, МОДУЛЬ СДВИГА, МЕТАЛЛИЧЕСКИЕ СТЕКЛА, ПЛАСТИЧЕСКАЯ ДЕФОРМАЦИЯ, АМОРФНЫЕ СПЛАВЫ.

В качестве объекта исследования выбрано металлическое стекло $Zr_{46}Cu_{46}Al_8$.

Цель работы – теоретический анализ научной литературы, экспериментальное исследование кинетики релаксации модуля сдвига и

физическая интерпретация полученных результатов, написание отчета о научно-исследовательской работе на тему: «Релаксация модуля сдвига объемного металлического стекла $Zr_{46}Cu_{46}Al_8$ ».

Метод или методология проведения работы – анализ, систематизация и обобщение теоретических и экспериментальных сведений.

В результате работы был осуществлен анализ научной литературы, проведены серии экспериментов, направленных на исследование кинетики релаксации модуля сдвига в металлическом стекле $Zr_{46}Cu_{46}Al_8$, предпринята попытка интерпретации полученных результатов в рамках межузельной теории Гранато.

Содержание

Реферат	3
Введение	6
Основная часть	8
Заключение	15
Список литературы	16

Введение

Введение должно содержать оценку современного состояния решаемой научно-технической проблемы, основание и исходные данные для разработки темы, обоснование необходимости проведения НИР, сведения о планируемом научно-техническом уровне разработки, о патентных исследованиях и выводы из них, сведения о метрологическом обеспечении НИР. Во введении должны быть показаны актуальность и новизна темы, связь данной работы с другими научными исследованиями.

Во введении промежуточного отчета по этапу НИР должны быть приведены цели и задачи этапа исследований, их место в выполнении НИР в целом.

Во введении заключительного отчета о НИР помещают перечень наименований всех подготовленных промежуточных отчетов по этапам и их инвентарные номера.

Основная часть

В основной части отчета приводят данные, отражающие сущность, методику и основные результаты выполненной НИР.

Основная часть должна содержать:

1. Выбор направления исследований, включающий его обоснование, методы решения задач и их сравнительную оценку, описание выбранной общей методики проведения НИР.

2. Процесс теоретических и (или) экспериментальных исследований, включая определение характера и содержания теоретических исследований, методы исследований, методы расчета, обоснование необходимости проведения экспериментальных работ, принципы действия разработанных объектов, их характеристики.

3. Обобщение и оценку результатов исследований, включающих оценку полноты решения поставленной задачи и предложения по дальнейшим направлениям работ, оценку достоверности полученных результатов и технико-экономической эффективности их внедрения и их сравнение с аналогичными результатами отечественных и зарубежных работ, обоснование необходимости проведения дополнительных исследований, отрицательные результаты, приводящие к необходимости прекращения дальнейших исследований.

Пример основной части отчета о НИР

1. В результате измерения температуры T_i и ЭДС ε_i был получен ряд значений, которые представлены в следующей таблице (обозначим ее как таблица 1).

Таблица 1 – Результаты измерения температуры T_i и ЭДС ε_i

i	T_i [К]	ε_i [мВ]	$T_i\varepsilon_i$ [К·мВ]	T_i^2 [К ²]	ε_i^p [мВ]	$(\varepsilon_i^p - \bar{\varepsilon})^2$ [мВ ²]	$(\varepsilon_i - \bar{\varepsilon})^2$ [мВ ²]
1	298	0,4	119,2	88804	0,4513	6,0919	6,3504
2	303	0,8	242,4	91809	0,7648	4,6450	4,4944
3	313	1,4	438,2	97969	1,3907	2,3389	2,3104
4	323	2,1	678,3	104329	2,0166	0,8162	0,6724
5	333	2,7	899,1	110889	2,6425	0,0770	0,0484
6	343	3,3	1131,9	117649	3,2684	0,1214	0,1444
7	353	4,0	1412,0	124609	3,8943	0,9492	1,1664
8	363	4,6	1669,8	131769	4,5202	2,5605	2,8224
9	368	4,9	1803,2	135424	4,8331	3,6600	3,9204
10	373	5,0	1865,0	139129	5,1461	4,9554	4,3264
n	$\sum T_i$	$\sum \varepsilon_i$	$\sum T_i\varepsilon_i$	$\sum T_i^2$		$\sum (\varepsilon_i^p - \bar{\varepsilon})^2$	$\sum (\varepsilon_i - \bar{\varepsilon})^2$
10	3370	29,2	10259,1	1142,38·103		26,2155	26,256

2. Чтобы вычислить коэффициенты b и k уравнения линейной регрессии, нашли величины $\sum T_i$, $\sum \varepsilon_i$, $\sum T_i \varepsilon_i$, $\sum T_i^2$ и записали их в таблицу 1. Далее вычислили коэффициенты ε_0 и α :

$$\alpha = \frac{10 \cdot 10259,1 - 3370 \cdot 29,2}{10 \cdot 1142,38 \cdot 10^3 - 3370^2} = 62,59 \text{ мкВ/К},$$

$$\varepsilon_0 = \frac{1}{10} \cdot (29,2 - 62,59 \cdot 10^{-3} \cdot 3370) = -18,2 \text{ мВ}.$$

Таким образом, искомое уравнение имеет вид:

$$\varepsilon = -18,2 + 62,59 \cdot 10^{-3} \times T.$$

3. Чтобы сделать вывод о качестве полученного уравнения (т.е. полученного линейной регрессионной модели), вычислили коэффициент детерминации R^2 . При этом выполнили расчет величин $\sum (\varepsilon_i^p - \bar{\varepsilon})^2$ и $\sum (\varepsilon_i - \bar{\varepsilon})^2$, а также заполнили соответствующие ячейки таблицы 1. В результате получили следующее значение R^2 :

$$R^2 = \frac{26,2155}{26,256} = 0,9985.$$

Таким образом, в нашем случае $R^2 > 0,8$, т.е. полученное линейное уравнение с высокой степенью точности описывает зависимость ЭДС от температуры.

4. Построили график линейной функции $\varepsilon(T)$ вместе с экспериментальными данными (рис. 1).

5. Выполнили градуировку термопары. Для этого из полученного линейного уравнения нашли функцию $T(\varepsilon)$:

$$\alpha^* = \frac{1}{62,59 \cdot 10^{-3}} = 15,98 \text{ К/мВ},$$

$$T_0 = 18,2 / (62,59 \cdot 10^{-3}) = 290,78 \text{ К},$$

$$T = 290,78 + 15,98 \cdot \varepsilon.$$

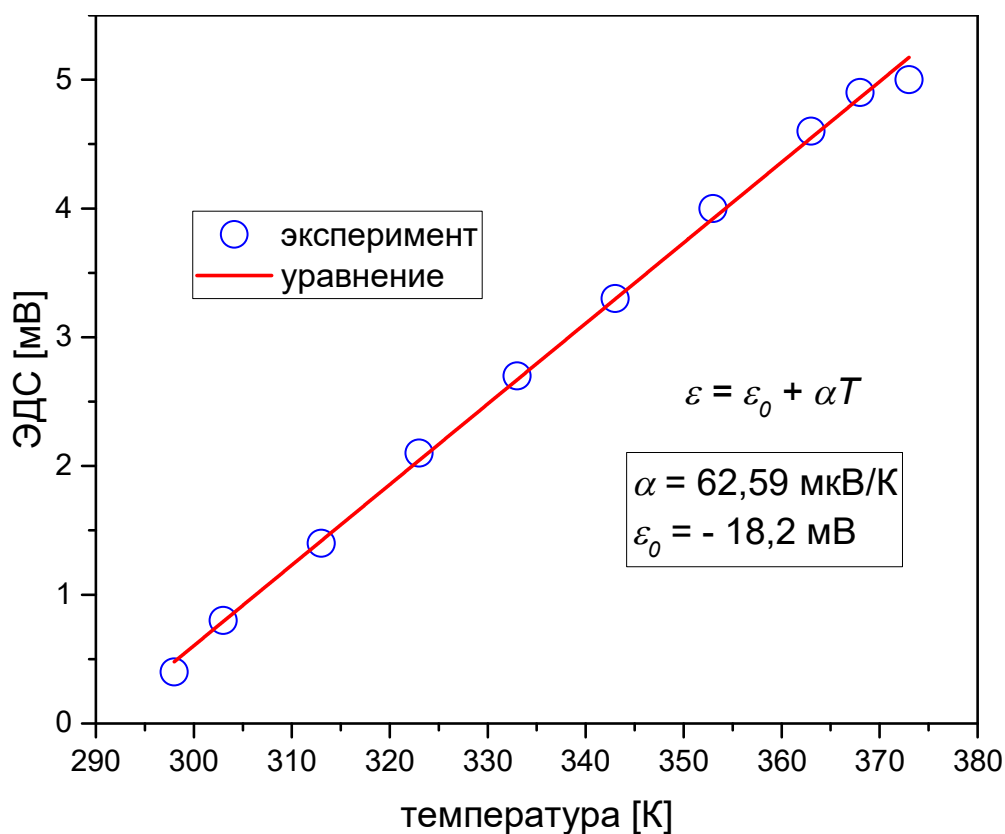


Рис. 1 – График линейной функции

7. Далее включили источник тока с подключенным к нему модулем Пельтье. Выполнили пять измерений температуры холодной и горячей сторон модуля Пельтье. Полученные значения термо-ЭДС, силы тока и температуры, вычисленной из ЭДС, представлены в таблице 2.

Таблица 2 – Значения термо-ЭДС, силы тока и температуры

j	ε_1 [мВ]	ε_2 [мВ]	I [А]	T_1 [К]	T_2 [К]	ΔT [К]	α [мкВ/К]
1	-0,9	0,6	2,7	276,39	300,37	23,97	124,06
2	-0,8	1,2	2,6	277,99	309,96	31,96	171,78
3	-0,3	1,4	2,6	285,99	313,15	27,17	146,01

8. Вычислили коэффициенты Зеебека для ТЭЭ модуля Пельтье с учетом комнатной температуры T , равной 293 К. Результаты вычисления занесли в таблицу 2.

9. Вычислили среднее значение коэффициента Зеебека для модуля Пельтье, $\overline{\alpha_{pn}} = 147,28$ мкВ/К, и рассчитали систематическую погрешность E косвенных измерений:

$$E = \frac{\Delta\lambda^*}{\lambda^*} + \frac{\Delta S}{S} + \frac{\Delta(\Delta T)}{\Delta T} + \frac{\Delta I}{I} + \frac{\Delta T}{T} + \frac{\Delta d}{d}.$$

При этом:

- $\frac{\Delta\lambda^*}{\lambda^*} = \frac{0,05}{1,3} = 0,038$ – относительная погрешность определения эффективного коэффициента теплопроводности;

- $\frac{\Delta S}{S} = 2 \frac{\Delta a}{a} = 2 \frac{0,5}{40} = 0,025$ – относительная погрешность деления площади пластин модуля Пельтье, где $\frac{\Delta a}{a}$ – относительная погрешность измерения стороны модуля Пельтье;

- $\frac{\Delta(\Delta T)}{\Delta T} = \frac{0,5}{27,7} = 0,018$ – относительная погрешность измерения разницы температур между горячей и холодной пластинами;

- $\frac{\Delta I}{I} = \frac{0,125}{2,6} = 0,048$ – относительная погрешность измерения силы тока в цепи;

- $\frac{\Delta T}{T} = \frac{0,5}{293} = 0,002$ – относительная погрешность измерения комнатной температуры;

- $\frac{\Delta d}{d} = \frac{0,1}{4} = 0,025$ – относительная погрешность измерения толщины модуля Пельтье.

Таким образом, имеем:

$$E = 0,038 + 0,025 + 0,018 + 0,048 + 0,002 + 0,025 = 0,156 = 15,6 \text{ \%}.$$

Тогда абсолютная ошибка определения α_{pn} будет:

$$\Delta\alpha_{pn} = E\overline{\alpha_{pn}} = 0,156 \cdot 147,28 \approx 22,98 \text{ мкВ/К}.$$

Таким образом, получили окончательный результат:

$$\alpha_{pn} = (147,28 \pm 22,98) \text{ мкВ/К.}$$

10. Полученное значение α_{pn} близко к табличному значению коэффициента Зеебека для полупроводникового соединения Bi_2Te_3 . Более того, в пределах ошибки измерения оно совпадает с табличным.

Заключение

Заключение должно содержать:

- краткие выводы по результатам НИР или отдельных ее этапов;
- оценку полноты решений поставленных задач;
- разработку рекомендаций и исходных данных по конкретному использованию результатов НИР;
- результаты оценки технико-экономической эффективности внедрения;
- результаты оценки научно-технического уровня выполненной НИР в сравнении с лучшими достижениями в данной области.

Список литературы

Список литературы должен содержать сведения об источниках, использованных при составлении отчета. Сведения об источниках приводятся в соответствии с требованиями ГОСТ 7.1.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Авдеева, И.А. Разработка лабораторной работы для исследования термоэлектрических явлений [Текст] / И.А. Авдеева // Выпускная квалификационная работа бакалавра по направлению «Педагогическое образование», профиль «Физика», «Информатика». – Воронеж : Воронежский государственный педагогический университет, 2016. – 42 с.
2. Васильев, А.Н. Бесконтактные возбуждения звуков в металлах [Текст] / А.Н. Васильев, Ю.П. Гайдуков // Успехи физических наук. – 1983. – Т. 141. – Вып. 3. – С. 431–467.
3. Васильев, А.Н. Бесконтактные возбуждения звуков в металлах (эксперимент) [Текст] / А.Н. Васильев, Ю.П. Гайдуков // Успехи физических наук. – 1986. – Т. 150. – Вып. 1. – С. 161–164.
4. Васильев, А.Н. ЭМАП – новое направление в радиоспектроскопии твердых тел [Текст] / А.Н. Васильев // Квант. – 1991. – №8.
5. Каганов, М.И. Трансформация электромагнитной энергии в звуковую электронами металла (теория) [Текст] / М.И. Каганов, В.Б. Фикс // Успехи физических наук. – 1986. – Т. 150. – Вып. 1. – С. 159–161.
6. Каганов, М.И. Электромагнитно-акустические преобразование – результат действия поверхностной силы [Текст] / М.И. Каганов, А.Н. Васильев // Успехи физических наук. – 1993. – Т. 163. – Вып. 10. – С. 67–80.
7. Леденев, К.С. Разработка лабораторной работы для измерения упругих модулей методом электромагнитно-акустического преобразования [Текст] / К.С. Леденев // Выпускная квалификационная работа бакалавра по направлению «Педагогическое образование», профиль «Физика», «Информатика». – Воронеж : Воронежский государственный педагогический университет, 2016. – 42 с.
8. Савельев, И.В. Курс общей физики : в 5 т. Т. 2. Электричество и магнетизм [Текст] / И.В. Савельев. – СПб. : Лань, 2011. – 348 с.
9. Сивухин, Д.В. Общий курс физики. Электричество [Текст] / Д.В. Сивухин. – М. : ФИЗМАТЛИТ, 2015. – Т. 3. – 656 с.
10. Тютин, С.В. Разработка лабораторной работы по изучению релаксации модуля Юнга : [Текст] / С.В. Тютин // Выпускная квалификационная работа бакалавра по направлению «Педагогическое об-

разование», профиль «Физика», «Информатика». – Воронеж : Воронежский государственный педагогический университет, 2016. – 52 с.

11. Khonik, V.A. Crossover and normal structural relaxation in naturally aged glassy $\text{Pd}_{40}\text{Cu}_{30}\text{Ni}_{10}\text{P}_{20}$ / V.A. Khonik, G.V. Afonin, A.Yu. Vinogradov, A.N. Tsyplakov, S.V. Tyutin // *Intermetallics*. – 2016. – Vol. 74. – P. 53–59.

СОДЕРЖАНИЕ

Введение	3
Научно-исследовательская работа №1	
Изучение изотермической релаксации модуля Юнга	5
Научно-исследовательская работа №2	
Измерение модуля сдвига твердого тела методом электромагнитно-акустического преобразования	20
Научно-исследовательская работа №3	
Термоэлектрические явления и градуировка термопары	32
Приложение	
Пример оформления отчета о НИР	45
Список литературы	53

Учебное издание

АФОНИН Геннадий Витальевич, МИТРОФАНОВ Юрий Петрович,
ТЮТИН Сергей Владимирович, ЛЕДЕНЕВ Константин Сергеевич,
ХОНИК Виталий Александрович

НАУЧНО-ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКАЯ ПРАКТИКА. ЧАСТЬ 1

*Учебно-методическое пособие для студентов магистратуры
физико-математического факультета, обучающихся по направлению
44.04.01 «Педагогическое образование», программа «Физическое образование»*

Редактор *М.В. Бондаренко*

Изготовление оригинала-макета: *М.В. Бондаренко*

Подписано в печать 02.02.2017. Формат 60 x 84/16. Печать трафаретная.

Гарнитура «Таймс». Усл.-печ. л. 3,5. Уч.-изд. л. 3,3.

Тираж 16 экз. Заказ 34.

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение
высшего образования

«Воронежский государственный педагогический университет».

Отпечатано в издательско-полиграфическом центре ВГПУ.
394043, г. Воронеж, ул. Ленина, 86. Тел. (473) 255-58-32; 255-61-83.