

ФГБОУ ВПО "Воронежский государственный технический университет"

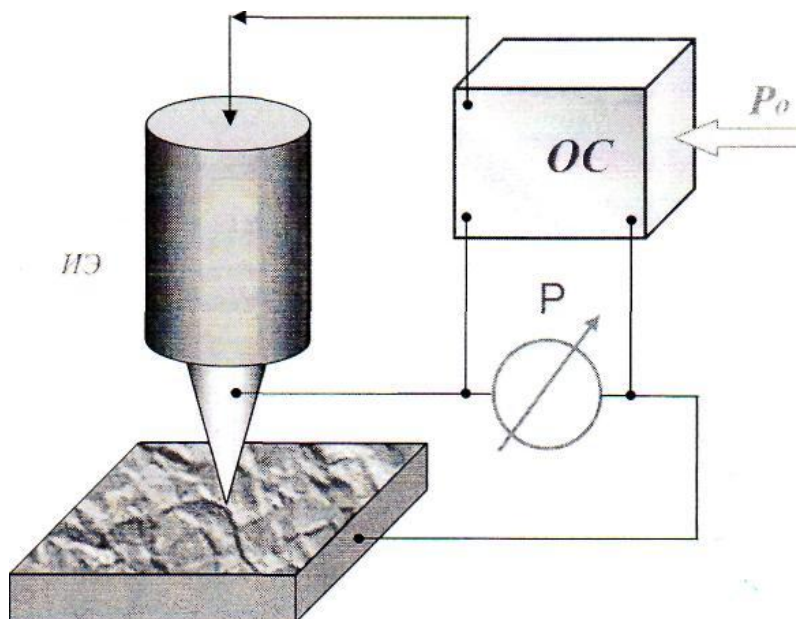
Кафедра физики твердого тела

71-2015

МЕТОДИЧЕСКИЕ УКАЗАНИЯ

к практическим занятиям

по курсу «Экспериментальные методы исследований»
для студентов направления 16.03.01 «Техническая физика»
(профиль «Физическая электроника»)
очной формы обучения



Воронеж 2015

Составитель д-р физ.-мат. наук Ю.Е. Калинин
УДК 539.67, 548:537.621

Методические указания к практическим занятиям по дисциплине «Экспериментальные методы исследований» для студентов направления 16.03.01 «Техническая физика» (профиль «Физическая электроника») очной формы обучения / ФГБОУ ВПО «Воронежский государственный технический университет»; сост. Ю.Е. Калинин. Воронеж, 2015. 27 с.

В методических указаниях приводятся краткие теоретические сведения, темы практических занятий и задачи для самостоятельных работ.

Методические указания подготовлены в электронном виде в текстовом редакторе MS Word 2003 и содержатся в файле Мет. практика (ЭМИ).doc.

Библиогр.: 12 назв.

Рецензент д-р физ.-мат. наук, проф. А.Т. Косилов

Ответственный за выпуск зав. кафедрой д-р физ.-мат. наук, проф. Ю.Е. Калинин

Издается по решению редакционно-издательского совета Воронежского государственного технического университета

© ФГБОУ ВПО «Воронежский
государственный технический
университет», 2015

1. ВВЕДЕНИЕ В КУРС «ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЙ»

Общей чертой, объединяющей инженеров, физиков и социологов, является то, что все они проводят эксперименты. И хотя проводимые ими экспериментальные методы различны, они имеют много общего. Исследователи стараются контролировать свой эксперимент или исключить влияние внешних переменных, поскольку это ускоряет его работу и делает ее более экономичной. Многие экспериментальные переменные исследователь не может контролировать, и поэтому он должен определенным образом планировать эксперимент, чтобы свести к минимуму или вообще исключить эти внешние воздействия. Кроме того биолог вынужден многократно повторять эксперимент, тогда как физик-экспериментатор может удовлетвориться несколькими отчетами. Однако это не означает, что планирование эксперимента и статистический вывод не интересуют инженера: эти методы находят применение в различных областях техники.

С другой стороны, более вероятно, что инженер-экспериментатор, имея сравнительно точные данные, будет использовать графики и формулы для представления полученных им результатов, тогда как биолог часто может ограничиться составлением простой таблицы статистических данных. В промышленных и производственных экспериментах, где имеет место взаимодействие человека и экспериментального оборудования, различие между этими двумя подходами к проведению эксперимента исчезает, и нередко инженеру приходится обращаться к методам, которые были разработаны специалистами весьма отдаленных областей исследования.

Целью любого эксперимента является поиск таких параметров физических явлений, которые можно измерить, получив численные значения. Между этими измеренными значениями уже можно установить определенную функциональную зависимость. Свойства физических объектов и процессов, которые можно прямо или косвенно измерить, называют физиче-

скими величинами. Физические законы, связывающие между собой эти величины, имеют вид математических уравнений. Физические величины можно разделить на классы, каждый из которых описывает определенный круг явлений.

При измерении физической величины ее значение G сравнивают с единицей измерения $[G]$. Число, которое получается при измерениях, называют численным значением $\{G\}$ физической величины:

$$G = \{G\}[G].$$

Таким образом, любая физическая величина равна произведению численного значения и единицы измерения [1].

Физические величины связаны математическими уравнениями. Можно выделить несколько независимых величин, которые не сводятся одна к другой. Их называют основными физическими величинами. Эти величины, вообще говоря, можно выбрать произвольно. Поэтому существует международное соглашение, которое определяет основные физические величины. Все остальные величины называют производными. Они определяются уравнениями, в которые входят основные физические величины или их комбинации.

В 1960 г. было заключено международное соглашение о выборе основных физических величин. Эти величины, а также производные физические величины составляют основу Международной системы Единиц СИ (Système International d'Unités). Во многих странах эта система единиц имеет силу закона. Международную систему единиц очень удобно использовать как в теории, так и на практике. Производные единицы в СИ получаются из основных. Наиболее важные из них имеют собственные имена и краткие обозначения.

В таблице приведены основные физические величины и их единицы измерения. Существуют точные определения этих величин.

Основные величины и единицы измерения

Физическая величина	Обоз- начение	Единица измерения	Обозначение единицы изм.
Длина	l	Метр	м
Масса	m	Килограмм	кг
Время	t	Секунда	с
Сила электрического тока	I	Ампер	A
Температура	T	Кельвин	K
Количество вещества	n	Моль	моль
Сила света	I	Кандела	кд

Отметим, что на практике эти определения реализуются с конечной точностью. Для этого используют разнообразные методы измерений, которые постоянно совершенствуются. Если обратиться к истории, то мы увидим, как, с одной стороны, возрастали требования к точности определения единиц физических величин, а с другой стороны, возникали принципиально новые способы их измерения. Исследователи стремились и стремятся связать основные физические величины с фундаментальными постоянными, которые можно в любое время измерить с хорошей воспроизводимостью.

Определим теперь понятие размерности физической величины. Размерность показывает, как связана данная величина с основными физическими величинами. Поэтому нет нужды отдельно определять единицу измерения для каждой физической величины: они выражаются через произведение основных физических единиц с целыми показателями степени и численными множителями, равными 1. В Международной системе единиц СИ основным физическим величинам соответствуют основные единицы измерения: длина, масса, время, сила тока, температура, количество вещества и сила света. Их обычно обозначают прописными буквами L, M, T, I, Θ , N и J.

Физическая величина и ее размерность - это не одно и то же. Одинаковую размерность могут иметь совершенно разные

по своей природе физические величины, например работа и вращающий момент или сила электрического тока и напряженность магнитного поля. Размерность не содержит информации о том, является ли данная физическая величина скаляром, вектором или тензором. Однако величина размерности важна для проверки правильности соотношений между физическими величинами.

Возможное рабочее описание термина «измерение», согласующееся с нашей интуицией, звучит так: «измерение - это получение информации». Одним из наиболее существенных аспектов измерения является сбор информации; измерения производятся для того, чтобы что-то узнать об объекте измерения, то есть об измеряемой величине. Это означает, что результат измерения должен описывать то состояние или то явление в окружающем нас мире, которое мы измеряем. Между этим состоянием или явлением и результатом измерения должно существовать то или иное соотношение. Хотя получение информации очевидно, оно является лишь необходимым, но не достаточным для определения измерения: когда кто-то читает учебник, он накапливает информацию, но не выполняет измерения.

Второй аспект измерения состоит в том, что оно должно быть избирательным. Оно может снабдить нас сведениями только о том, что мы хотим измерить (об измеряемой величине), но ничего не говорит ни об одном из многих других состояний или явлений вокруг нас. Это обстоятельство тоже необходимо, но не достаточно для определения измерения. Любуясь картиной в пустой комнате, где нет ничего другого, вы получите информацию только об этой картине, но это не будет измерением.

Третьей, и также необходимой стороной дела, является тот факт, что измерение должно быть объективным. Исход измерения не должен зависеть от наблюдателя. Любой наблюдатель должен извлекать из измерения одну и ту же информацию и приходить к одним и тем же выводам. Но это почти невозможно, если наблюдатель будет пользоваться только своими собст-

венными органами чувств. Наблюдения, выполненные с помощью наших органов чувств, в очень большой степени субъективны. Например, наше восприятие температуры сильно зависит от ощущения тепла или холода, предшествующего измерению. В этом легко убедиться, пытаясь определить рукой температуру кувшина с водой. Если сначала окунуть руку в холодную воду, то вода в кувшине покажется сравнительно теплой, а если вначале опустить руку в теплую воду, то вода в кувшине покажется относительно холодной. Помимо субъективности восприятия человек-наблюдатель испытывает также затруднение оттого, что существует много состояний и явлений в окружающем нас реальном мире, которые мы либо вовсе не ощущаем (например, магнитные поля), либо воспринимаем лишь качественно (например, очень низкие температуры или движение с большой скоростью). Таким образом, чтобы гарантировать объективность измерения, мы должны воспользоваться теми или иными приспособлениями (средствами, приборами). Назначение этих приборов состоит в том, чтобы преобразовать наблюдаемое состояние или явление в другое состояние или явление, которое наблюдатель уже не может истолковать неверно. Другими словами, прибор преобразует исходное наблюдение к такому виду, в котором оно доступно любому наблюдателю и относительно которого между наблюдателями не может быть разногласия. Поэтому желательно, чтобы результат измерения на выходе прибора можно было воспринимать объективно, например как число на алфавитно-цифровом дисплее, а не в виде субъективной оценки таких характеристик, как цвет и т.п. Измерительная техника как раз и занимается созданием таких приборов, называемых измерительными системами.

С помощью качественного измерения устанавливают природу того, что должно быть измерено; качественное измерение обеспечивает нас информацией, необходимой для того, чтобы выбрать приборы для проведения количественного измерения. Однако почти во всех случаях у нас уже имеется эта структурная информация и нам нужно выполнить только количественные измерения.

При измерении физических величин конкретных материалов в материаловедении или технике измеряемые характеристики часто называют параметрами. Всю совокупность измеряемых параметров можно разделить на три большие группы.

1. Фундаментальные параметры, т.е. такие, величина которых слабо зависит от наличия примесей. Примерами таких параметров могут служить: упругие модули, ширина запрещенной зоны, концентрация основных носителей, магнитная индукция насыщения для ферромагнитных материалов и др.

2. Характеристические параметры, т.е. такие, величина которых существенно зависит от наличия примесей. Примерами таких параметров могут служить плотность дислокаций в кристалле, удельное электрическое сопротивление полупроводников, магнитная проницаемость ферромагнетиков и т.д. Величина характеристических параметров может изменяться в миллионы раз, и поэтому, они могут быть и технологическими параметрами, т.е. характеристиками, определяющими качество аттестуемого материала или прибора. Допустимые пределы изменения величин этих параметров оговорены техническими условиями.

3. Физико-химические параметры, включающие в себя характеристики или величины, знание которых необходимо для технологии получения аттестуемых материалов и приборов на их основе. Сюда относятся температуры фазовых превращений (кристаллизации, испарения, переходов из одной кристаллической модификации в другую, температура Кюри и др.), пределы растворимости примесей и т.д.

Проблема качества аттестуемого материала, определяемого характеристическими параметрами, оказывает существенное влияние на эффективность производства из него готовых твердотельных приборов. Для успешного решения вопроса повышения эффективности производства необходимо иметь надежную систему контроля качества таких материалов. При создании этой надежной системы выделяют три самостоятельных направления:

- разработка методики измерения;

- разработка аппаратуры, позволяющей реализовать выбранную методику и организация ее производства;
- метрологическое обеспечение измерений, включающее установление реальной точности методик и измерительной аппаратуры, поддержание ее в процессе эксплуатации, а также разработка системы поверок и аттестаций. Сюда же относится организация производства стандартизации образцов.

Указанные три направления развиваются неодинаково. Как правило, разработка методик опережает разработку аппаратуры и метрологию. При изучении курса «Экспериментальные методы исследований» основное внимание будет уделено главным образом первому направлению, а именно методикам проведения эксперимента по определению различных параметров функциональных и конструкционных материалов.

2. ВОПРОСЫ ДЛЯ ПРАКТИЧЕСКИХ ЗАНЯТИЙ

Введение

1. Сформулируйте задачи курса "Экспериментальные методы исследования".
2. Перечислите основные параметры функциональных и конструкционных материалов:
 - 2.1. - проводников;
 - 2.2. - полупроводников;
 - 2.3. - диэлектриков;
 - 2.4. - магнитных материалов;
 - 2.5. – конструкционных материалов.
3. Классифицируйте всю совокупность параметров, разделив на три большие группы.
4. Перечислите основные направления системы контроля качества материалов.
5. Какие из этих направлений опережают развитие других?
6. Дайте определение прямым и косвенным методам измерений физических величин.

7. Определите абсолютную и относительную погрешности измерений.
8. Как проводится обработка результатов измерений?
9. Что такое надежность результатов измерений?

ЧАСТЬ 1. МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ МАТЕРИАЛОВ И КОМПОНЕНТОВ ЭЛЕКТРОННОЙ ТЕХНИКИ

I. Вопросы и задачи к занятиям по теме «Методы измерения электропроводности и термоэда»

1. Перечислите основные методы измерения электрического сопротивления металлов и резисторов.
2. Опишите методику вольтметра-амперметра.
3. В чем заключается метод непосредственной оценки электрического сопротивления?
4. Дайте описание электромеханических и электронных омметров.
5. Как использовать мостовые методы измерения для определения электрических параметров?
6. Опишите основные технологические операции подготовки полупроводниковых образцов к измерениям.
7. Перечислите методы изготовления образцов заданной геометрии.
8. Дайте определение омического контакта и сформулируйте основные требования к ним.
9. Приведите основные методы получения омических контактов и дайте характеристику каждому методу. Как проверить качество изготовленного контакта.
10. Опишите методики двухзондовых измерений удельного электрического сопротивления
11. Опишите методики однозондовых измерений удельного электрического сопротивления однородного и неоднородного полупроводника.
12. Как выбираются условия измерений и электрические параметры измерительной схемы в однозондовом методе при перемещении зонда по образцу?

13. Перечислите источники ошибок при использовании двухзондового метода и укажите пути снижения погрешности измерения.
14. Какие физические допущения используются при выводе формул в четырехзондовом методе?
15. Опишите методику измерения удельного электрического сопротивления четырехзондовым методом.
16. Охарактеризуйте основные источники погрешностей при измерениях удельного электрического сопротивления четырехзондовым методом и укажите способы уменьшения их влияния.
17. Каков физический смысл поправочной функции f ? При каких условиях эксперимента можно пренебречь влиянием поправочной функции на результаты измерений?
18. Охарактеризуйте основные особенности и сферы применения метода Ван-дер-Пау?
19. Опишите методику определения слоевого распределения проводимости в эпитаксиальных, диффузионных и ионно-имплантированных слоях.
20. Охарактеризуйте бесконтактные методы измерения удельного электрического сопротивления.
21. Как определить ширину запрещенной зоны полупроводников и диэлектриков по температурной зависимости проводимости?
22. Дайте классификацию основных методов измерения термоэдс.
23. Опишите дифференциальные методы измерения термоэдс. Как влияет концентрация электронов в невырожденном полупроводнике n -типа на величину дифференциальной термоэдс?
24. Дайте описание интегральных методов измерения термоэдс.
25. Приведите источники ошибок при измерении перепада температуры термопарами.

II. Вопросы к занятиям по теме «Физические основы эффекта Холла и методы его измерения»

1. Опишите физические процессы, возникающие при измерении эффекта Холла.
2. Охарактеризуйте сопутствующие явления, возникающие при измерении эффекта Холла: эффект Эттингауза, Риги-Ледюка, Нернста.
3. Дайте критерии сильного магнитного поля и объясните, почему в сильных полях $r_H = 1$.
4. Опишите ситуацию, при которой коэффициент Холла обращается в нуль.
5. Опишите достоинства и недостатки схемы измерения эффекта Холла на постоянном токе и при постоянном магнитном поле. Укажите основные источники погрешностей.
6. Охарактеризуйте достоинства и недостатки схем измерения эффекта Холла на переменном токе и постоянном магнитном поле.
7. Охарактеризуйте достоинства и недостатки схемы измерения эффекта Холла на переменном токе в переменном магнитном поле.
8. Опишите метод измерения тока Холла, указав его достоинства и недостатки.
9. Опишите методику определения концентрации свободных носителей заряда и их энергии ионизации из температурной зависимости коэффициента Холла.
10. Как с помощью эффекта Холла определить тип электропроводности полупроводника?
11. Как определить концентрацию донорной примеси и температурную зависимость положения уровня Ферми в полупроводнике с одним типом примеси?
12. Как определить ширину запрещенной зоны полупроводника по температурной зависимости коэффициента Холла. В каких координатах строится график для этих целей?
13. Как определить положение уровня Ферми в компенсированном полупроводнике?

14. Как определить концентрации донорной и акцепторной примеси в компенсированном полупроводнике?

15. Приведите примеры практического использования эффекта Холла.

III. Вопросы к занятиям по теме «Оптические методы измерения параметров полупроводников»

1. Как распределяется световая энергия при взаимодействии луча света с твердым телом?

2. Каков физический смысл и взаимосвязь коэффициентов: - поглощения света? – пропускания? – отражения?

3. Как выражается коэффициент поглощения через характеристики фотона в полупроводнике?

4. Как можно определить показатель преломления вещества из измерений коэффициента отражения света?

5. Перечислите задачи оптического спектрального анализа.

6. Охарактеризуйте основные типы спектральных приборов и назовите их основные узлы.

7. Опишите принцип действия двухлучевого спектрометра.

8. Назовите основные механизмы поглощения света в полупроводниках.

9. Как определить ширину запрещенной зоны и характер межзонных переходов в полупроводниках? Как влияет температура на положение края собственного оптического поглощения?

10. Как определить энергию фононов из спектра фундаментального поглощения?

11. Охарактеризуйте основные источники погрешностей при определении запрещенной зоны полупроводника.

12. В чем различие спектров примесного поглощения на мелких и глубоких уровнях?

13. Назовите основные разновидности оптической спектроскопии и их применение для анализа наноструктур.

IV. Вопросы к занятиям по теме «Определение параметров полупроводников из фотолюминесцентных, фотоэлектри-

ческих измерений и методами электрического и светового зонда»

1. Почему и как различаются по внешнему виду спектры поглощения и фотолюминесценции?
2. Как определить ширину запрещенной зоны из спектра фотолюминесценции?
3. Как определить энергию ионизации примеси из спектра фотолюминесценции?
4. Опишите методику наблюдения спектров фотолюминесценции.
5. Укажите источники погрешности измерений и опишите способы уменьшения их влияния.
6. Какими механизмами обусловлена монополярная и биполярная фотопроводимость?
7. Дайте определение основных параметров фотопроводимости: темновой проводимости, квантового выхода фотопроводимости, стационарной проводимости и др.
8. От каких параметров полупроводника зависит фототок? Как можно экспериментально определить квантовый выход?
9. Как различается характер изменения концентрации неравновесных носителей заряда при малом и большом уровнях возбуждения?
10. Чем обусловлен колоколообразный вид спектра собственной фотопроводимости полупроводника?
11. Чем различаются режимы постоянного поля и постоянного тока при измерении фотопроводимости?
12. Как обеспечить максимальную чувствительность фотопроводимости?
13. Как определить время жизни неравновесных носителей заряда из временной зависимости частотно модулированной фотопроводимости?
14. Как определить время жизни носителей заряда методом сдвига фаз?
15. Как определить время жизни носителей заряда методом затухания фотопроводимости?

16. Как определить время жизни носителей заряда методом модуляции проводимости точечным контактом?
17. Опишите методику измерения дрейфовой подвижности.
18. Опишите методику измерения диффузионной длины неравновесных носителей заряда методом светового зонда.

ЧАСТЬ II. МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ КОНСТРУКЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ

V. Вопросы к занятиям по теме: «Методы исследования механических свойств»

1. Дайте классификацию и укажите особенности механических испытаний.
2. Какова цель проведения испытаний на растяжение? Какие образцы применяют для испытания материалов на растяжение? Опишите методику испытаний на растяжение. В чём измеряются механические характеристики при испытании на растяжение?
3. Дайте определение основных прочностных параметров, определяемых при испытании на растяжение: предела пропорциональности, предела упругости, предела текучести и временного сопротивления.
4. Какие деформации называют упругими, остаточными? Перечислите основные параметры пластичности, определяемые при испытании на растяжение. Опишите методику их измерения. Объясните физический смысл таких характеристик как относительное удлинение и относительное сужение материала.
5. Какие образцы применяют при испытании материалов на сжатие? Опишите методику испытаний на сжатие. Каково различие между диаграммами растяжения и сжатия пластичного материала? Каково различие между диаграммами растяжения и сжатия хрупкого материала?
6. Опишите методику испытаний на изгиб. Какова цель проведения испытаний на изгиб? В процессе испытания на изгиб образец испытывает сжатие или удлинение? В чём измеряются механические характеристики при испытании на изгиб? Какие основные отличия пластичного материала от хрупкого при испытании на изгиб?

7. Опишите технологические пробы на изгиб. Чем они отличаются от механических испытаний на изгиб?
8. Опишите методику испытаний на кручение.
9. Опишите методику испытаний на ползучесть.
10. Опишите методику испытаний на длительную прочность.
11. Опишите методику испытаний на замедленное разрушение.
12. Опишите методику испытаний на релаксацию напряжений.
13. Что такое работа удара? Что такое ударная вязкость? Какова цель определения ударной вязкости? Что характеризует вязкая составляющая в изломе образцов? Что такое хладноломкость стали? Какие образцы применяют при испытании металла на ударный изгиб? Как обозначают ударную вязкость? Опишите методику испытаний на ударную вязкость.
14. Опишите методику испытаний на усталость.
15. Что такое твердость? Сформулируйте основные методы макро-, микро – и наноиндентирования.
16. Опишите методику измерения твердости по Бринеллю. Что принимают за единицу твердости по Бринеллю? Как осуществляется выбор нагрузки, время выдержки и диаметр шарика при испытании по Бринеллю? Какие преимущества и недостатки метода Бринелля?
17. Опишите методику измерения твердости по Виккерсу. Что принимают за единицу твердости по Виккерсу? Как записывается твердость по Виккерсу?
18. Опишите методику измерения твердости по Роквеллу. На каком расстоянии могут находиться отпечатки от края образца и друг от друга при измерении твердости методами Бринелля и Роквелла? Что принимают за единицу твердости по Роквеллу? Чему равна нагрузка (предварительная, основная и общая) при измерении твердости по шкале А, В, С? Как записывается твердость по Роквеллу?
19. Опишите методику измерения микротвердости.
20. Опишите методику измерения твердости методом царапания.
21. Перечислите основные группы задач, которые решают методом силового нанотестинга.

22. Приведите принципиальную схему осуществления метода непрерывного вдавливания, кинетику изменения нагрузки и смещения индентора при его непрерывном вдавливании в поверхностный слой твердого тела.

23. Приведите примеры использования силового нанотестинга в исследованиях механических свойств поверхности.

VI. Вопросы к занятиям по теме: «Методы исследования упругих и неупругих свойств»

1. Дайте определение модулю нормальной упругости, модулю сдвига и коэффициенту Пуассона.

2. На каком принципе основаны динамические методы измерения модуля упругости и сдвига?

3. Как связана резонансная частота колебаний образцов с их модулем упругости? Охарактеризуйте динамические методы определения упругих свойств.

4. Дайте определение неупругости и внутреннего трения. Чем обусловлено возникновение внутреннего трения? Дайте характеристику мер внутреннего трения.

5. Дайте классификацию методов измерения внутреннего трения.

6. Охарактеризуйте метод крутильного маятника.

7. Перечислите особенности и преимущества обратного крутильного маятника.

8. Дайте характеристику методике измерения внутреннего трения в тонких пленках и фольгах.

9. Опишите методику резонанса-антирезонанса при использовании пьезоэлектрического и магнитострикционного резонаторов.

10. Опишите импульсный метод для измерения скорости звука и коэффициента поглощения в твердых телах.

11. Дайте феноменологическое описание релаксационных процессов.

12. Поясните причину и природу возникновения релаксационных максимумов затухания в твердом теле.

13. Опишите методику определения энергии активации релаксационного процесса по смещению положения максимума.
14. Опишите методику определения энергии активации релаксационного максимума по форме максимума внутреннего трения.
15. Опишите методику определения энергии активации релаксационного процесса по полувысоте релаксационного максимума.
16. Опишите методику определения энергии активации релаксационного процесса по температурному положению максимума внутреннего трения.
17. Дайте характеристику исследованию коэффициента диффузии методом внутреннего трения.
18. Сформулируйте физические основы демпфирующей способности твердых тел.

ЧАСТЬ III. ФИЗИЧЕСКИЕ МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

VII. Вопросы к занятиям по теме: «Методы измерения магнитных свойств»

1. Назовите основные параметры, характеризующие магнитные материалы. Как связаны между собой магнитная восприимчивость и магнитная проницаемость вещества?
2. Дайте характеристику методов измерения напряженности магнитного поля.
3. Опишите методику использования датчика Холла для измерения напряженности магнитного поля.
4. Охарактеризуйте другие методы измерения напряженности магнитного поля.
5. Опишите методы измерения парамагнитной и диамагнитной восприимчивости. Как экспериментально определить, к какому типу магнетиков относится то или иное вещество?
6. Дайте характеристику магнитометрическому методу измерения магнитных свойств и опишите астатический магнитометр.
7. Опишите принцип работы вибрационного магнитометра.

8. Охарактеризуйте метод вольтметра и амперметра для измерения магнитных параметров ферромагнетиков.
9. Приведите методику измерения магнитных параметров ферромагнетиков мостовыми методами.
10. Опишите резонансный метод измерения магнитной проницаемости в области высоких частот.
11. В чем заключается явление магнитострикции? Охарактеризуйте тензометрический метод измерения магнитострикции.
12. Дайте описание методики емкостного метода измерения магнитострикции.
13. Перечислите магнитооптические и другие методы измерения магнитострикции.
14. Назовите основные методы наблюдения доменной структуры ферромагнетиков.
15. Опишите метод порошковых фигур Акулова-Биттера.
16. Охарактеризуйте принципы наблюдения доменной структуры методами просвечивающей и растровой электронной микроскопии.
17. Опишите принцип наблюдения доменной структуры рентгеновским методом.
18. Дайте характеристику применения магнитооптических методов для визуализации доменной структуры.
19. Какими методами еще можно исследовать доменную структуру ферромагнетиков?

VIII. Вопросы к занятиям по теме: «Сканирующая зондовая микроскопия»

1. Чем была обусловлена актуальность разработок сканирующих зондовых микроскопов? Перечислите основные направления развития сканирующей зондовой микроскопии.
2. Охарактеризуйте принцип работы сканирующих зондовых микроскопов.
3. Перечислите сканирующие элементы зондовых микроскопов.
4. Какую защиту имеют зондовые микроскопы от внешних воздействий?

5. Опишите принцип формирования и обработки СЗМ изображений.
6. Какие основные типы зондовой микроскопии Вы знаете? Чем они отличаются и характеризуются?
7. Охарактеризуйте принцип работы сканирующих туннельных микроскопов.
8. Опишите принцип формирования СТМ изображений поверхности по методу постоянного туннельного тока и постоянного среднего расстояния.
9. Сформулируйте методы изготовления зондов для сканирующих туннельных микроскопов.
10. Охарактеризуйте принцип работы атомно-силовых микроскопов.
11. Охарактеризуйте принцип работы электросиловой зондовой микроскопии.
12. Охарактеризуйте принцип работы магнитно-силовой зондовой микроскопии.
13. Охарактеризуйте принцип работы ближнепольной оптической микроскопии.
14. Приведите разрешающую способность сканирующих зондовых микроскопов.
15. Назовите основные преимущества и недостатки зондовой микроскопии.

IX. Вопросы к занятиям по теме: «Методы определения плотности»

1. Дайте определение истинной и кажущейся плотности.
2. Опишите флотационный метод определения плотности.
3. Рассмотрите определение плотности твердых тел методом гидростатического взвешивания. Чем простой метод гидростатического взвешивания отличается от дифференциального метода гидростатического взвешивания.
4. Какие принципы лежат в основе выбора весов при гидростатическом методе.
5. Перечислите правила выбора вспомогательной жидкости при определении плотности.

6. Дайте характеристику и опишите методику определения плотности пикнометрическим методом.
7. В чем преимущество методик определения пикнометрической плотности с предварительной откачкой образцов в вакууме?
8. Каким образом рентгеновский метод можно использовать для измерения плотности твердых тел? Каковы недостатки и достоинства этого метода?
9. Охарактеризуйте другие методы определения плотности.

X. Вопросы к занятиям по теме: «Определение теплового расширения»

1. Какова физическая природа теплового расширения твердых тел? Дайте определение коэффициентов линейного и объемного теплового расширения.
2. Перечислите основные методы теплового расширения.
3. Охарактеризуйте основные прямые методы измерения теплового расширения вещества:
 - метод компаратора,
 - интерференционный метод,
 - рентгеновский метод.
4. Опишите принципы косвенных методов измерения теплового расширения вещества.
5. Рассмотрите принцип измерения теплового расширения dilatометром Шевенара.

XI. Вопросы к занятиям по теме: «Определение теплопроводности»

1. Какой процесс называют теплопроводностью?
2. Сформулируйте закон теплопроводности Фурье.
3. От каких факторов зависит коэффициент теплопроводности материалов?
4. Как коэффициент теплопроводности зависит от температуры?
5. Какие методы определения коэффициента теплопроводности Вы знаете?

6. Дайте характеристику калориметрических методов измерения коэффициента теплопроводности в условиях стационарного теплового режима.
7. Охарактеризуйте энергетические методы измерения коэффициента теплопроводности в условиях стационарного теплового режима.
8. Опишите относительные методы измерения коэффициента теплопроводности.
9. Дайте характеристику нестационарных методов измерения коэффициента теплопроводности.

XII. Вопросы к занятиям по теме: «Методы электронной спектроскопии»

1. Назовите основные методы электронной спектроскопии, дайте их сравнительную характеристику.
2. Дайте характеристику рентгеновской фотоэлектронной спектроскопии (РФЭС).
3. Поясните сущность эффекта Оже. ЭОС как метод элементного анализа.
4. Почему в атомах Н и Не Оже-электроны возникать не могут?
5. Какова глубина выхода Оже-электронов?
6. Чем обусловлена тонкая структура Оже-спектров?
7. В чем заключаются особенности метода Оже-спектроскопии в сравнении с другими методами спектроскопии, используемые для диагностики состава полупроводников?
8. Чем обусловлен химический сдвиг в кинетической энергии Оже-электрона?
9. Дайте характеристику применения ЭОС для анализа поверхности материалов с низкой проводимостью.
10. Охарактеризуйте интегральный и дифференцированный энергетический спектр Оже-электронов.
11. Назовите типы анализаторов энергий, применяющихся в ЭОС. Детекторы.
12. Зачем используется ионное распыление поверхности образ-

ца при анализе состава твердых тел методом ЭОС?

13. Дайте характеристику методов количественного анализа электронной Оже-спектроскопии.
14. Какие методы численного анализа экспериментальных данных используются при обработке Оже-спектров?

Вопросы к занятиям по теме: «Перспективы развития экспериментальных методов исследования»

1. Дайте характеристику перспективам развития методов исследования электрических и гальваномагнитных свойств.
2. Назовите тенденции развития оптических методов исследования твердых тел.
3. Каковы тенденции развития основных параметров конструкционных материалов?
4. Охарактеризуйте перспективы развития методов исследования параметров магнитных материалов.
5. Дайте характеристику тенденции развития сканирующей зондовой микроскопии.
6. Каковы тенденции развития других экспериментальных методов исследований?

3. ЗАДАЧИ ДЛЯ САМОСТОЯТЕЛЬНОЙ РАБОТЫ СТУДЕНТОВ

1. При включении в электрическую цепь проводника диаметром 0,5 мм и длиной 43 мм разность потенциалов на концах проводника составила 2,4 В при токе 2 А. Определить удельное сопротивление материала проводника.
2. На диэлектрическую подложку нанесена металлическая пленка толщиной 0,1 мкм, имеющая форму прямоугольника размером 1х5 мм². Электрическое сопротивление пленки при напряжении, приложенном в продольном направлении, составляет 100 Ом. Определить сопротивление квадрата пленки.
3. Через прямоугольный образец полупроводника сечением 0.25 см² протекает ток $I=0.1$ А. Разность потенциалов между двумя зондами, расположенными на расстоянии $S=1$ см равна

$U = 0,4$ В. Определите удельное сопротивление полупроводника.

4. Четырехзондовым методом на измерительной установке с $s = 0,5$ мм и $I = 0,1$ мА измеряется удельное сопротивление слитков кремния КЭФ с удельным сопротивлением $\rho = 0,1; 1; 4,5; 7,5$ Ом·см. Определите измеряемое сопротивление между 2 и 3 зондами экспериментальной установки.

5. Было обнаружено, что удельное сопротивление собственного германия ρ изменяется с температурой T следующим образом:

$T, \text{ К}$	365	458	556	714
$\rho, \text{ Ом, м}$	0,028	0,061	0,0013	0,00027

Определить ширину запрещенной зоны в германии, предполагая, что она не изменяется с температурой. Предположить, что подвижности электронов и дырок изменяются пропорционально $T^{-3/2}$.

6. Прямоугольный образец полупроводника n -типа с размерами $40 \times 5 \times 1$ мм³ помещен в магнитное поле с индукцией 0,5 Тл, перпендикулярное плоскости образца. Под действием напряжения 0,4 В вдоль образца протекает ток 25 мА. Величина эдс Холла равна 5 мВ. Найти удельное сопротивление, подвижность и концентрацию носителей заряда, считая, что электропроводность обусловлена носителями одного знака.

7. Полупроводник InAs имеет вид стержня размером $10 \times 2 \times 1$ мм³. Его сопротивление в продольном направлении составляет 1, 25 Ом. При токе 0,12 А и магнитной индукции 0,5 Тл возникающее поле Холла равно $E_H = 17$ В/м. Определить:

а) тип носителей заряда;

б) плотность носителей заряда;

в) подвижность носителей заряда.

8. Определить положение уровня Ферми в германии при 300 К, если концентрация донорной примеси $N_d = 5 \cdot 10^{15}$ см⁻³, а акцепторной $N_a = 3 \cdot 10^{15}$ см⁻³. Считать, что все примеси ионизованы.

9. Используя соотношение Эйнштейна $E = h\nu$ найти коэффициент пропорциональности между длиной световой волны (в мкм) и ее энергией (в эВ). Оценить ширину запрещенной зоны

ΔE_g для полупроводника, чувствительного к излучению с $\lambda=565$ нм.

10. При измерении коэффициента поглощения света в двух образцах полупроводниковой пленки, различающихся по толщине на 1 мкм, отношение интенсивностей проходящего света изменилось в e -раз. Определить коэффициент поглощения света α (см^{-1}).

11. В области примесной проводимости Cu_2O обычно обладает проводимостью p -типа. Это связано с отклонением от стехиометрии, вызванном недостатком одного из химических компонентов соединения. Какой компонент должен быть в недостатке, чтобы наблюдаемая проводимость была именно p -типа?

12. Какой длиной волны света можно генерировать собственные неравновесные носители в InP и GaAs ?

13. В двух полупроводниковых образцах время жизни фотоносителей заряда $\tau_1 = 1$ мкс и $\tau_2 = 3$ мкс. Нарисовать графики спада фотопроводимости.

14. Для кристалла $n\text{-Si}$ с подвижностью электронов $\mu_n = 900 \text{ см}^2 / (\text{В} \cdot \text{с})$ зонды установлены на расстоянии $l = 1$ мм, смещение $U_{\text{эк}} = 10$ В. Определить время t_0 прохождения носителями расстояния l .

15. Вычислить диффузионную длину электронов в германии p -типа и дырок в германии n -типа, если время жизни неосновных носителей заряда $\tau_n = \tau_p = 10^{-4}$ с, коэффициенты диффузии для германия p -типа $D_n = 99 \cdot 10^{-4} \text{ м}^2/\text{с}$ и для германия n -типа $D_p = 47 \cdot 10^{-4} \text{ м}^2/\text{с}$.

16. Какие силы надо приложить к концам стальной проволоки с модулем упругости $E=200$ ГПа длиной 4 м и сечением $0,5 \text{ мм}^2$ для удлинения ее на 2 мм?

17. На испытательной установке проводятся испытания на растяжение 20 образцов: 10 при быстром и 10 при медленном приложении нагрузки. При медленном приложении нагрузки семь образцов имели воронкообразный излом, а остальные три - получашечный излом. При быстром приложении нагрузки четыре образца имели воронкообразный излом, а остальные шесть -

получающечный излом. Проверьте справедливость соответствующих гипотез.

18. При измерении твердости по Роквеллу были получены следующие результаты: 97,5; 98,7; 99,9; 99,5; 97,1; 99,5; 99,7; 98,8; 98,5; 99,5; 92,0; 97,5. Найдите среднее значение твердости и среднее квадратичное отклонение.

19. Какую силу F надо приложить к стальному стержню сечением в 1 см^2 , чтобы растянуть его настолько же, насколько он удлиняется при нагревании на $\Delta t = 1^\circ\text{C}$. Коэффициент линейного расширения $\beta = 12 \cdot 10^{-6} \text{ }^\circ\text{C}^{-1}$. Модуль Юнга $E = 2,1 \cdot 10^7 \text{ Н/см}^2$.

20. Определите температуру пика Бордони в алюминии на частоте 1 МГц , если энергия активации $E = 0,16 \text{ эВ}$, а частотный фактор $\nu_0 = 5 \cdot 10^{12} \text{ с}^{-1}$.

21. Определите энергию активации релаксационного максимума в молибдене, если температура максимума изменяется от $T_1 = -110^\circ\text{C}$ при $f = 5 \text{ МГц}$ к $T = -100^\circ\text{C}$ при $f = 10 \text{ МГц}$ и $T_3 = -70^\circ\text{C}$ при $f = 30 \text{ МГц}$.

22. Определить коэрцитивную силу кольцевого ферромагнитного сердечника, если для его размагничивания через обмотку, содержащую 100 витков, требуется пропустить ток 63 мА . Средний диаметр кольца 20 мм .

23. Определить магнитную проницаемость сердечника длиной 100 мм и диаметром 8 мм , на который намотано 178 витков, если ее измеренная индуктивность равна $L = 10 \text{ мГн}$.

24. Тороидальный сердечник из пермаллоя с внутренним диаметром 30 мм и наружным диаметром 40 мм имеет обмотку из 200 витков. При пропускании через обмотку тока $0,5 \text{ А}$ в сердечнике создается магнитное поле индукцией $1,5 \text{ Тл}$. Определить магнитную проницаемость сердечника.

25. Найдите рентгеновскую плотность кремния, если постоянная решетки равна $a = 0,357 \text{ нм}$.

26. Стекланный шарик с коэффициентом объемного расширения α взвешивается в жидкости при температурах t и t_1 . Массы вытесненной жидкости соответственно m и m_1 . Определить ко-

коэффициент объемного расширения жидкости α_1 в интервале температур от t до t_1 .

27. Уравнение $L=L_0(1+\alpha T)$ выражает зависимость линейных размеров стержня от температуры, где L_0 и α - постоянные, которые необходимо определить экспериментальным путем. Определите данные величины, если $L = 10,14$ м при $T=10^\circ\text{C}$ и $L=10,14$ м при $T=310^\circ\text{C}$.

28. Несколько раз измерялась теплопроводность граната и было вычислено среднее значение и среднее квадратичное отклонение. Какие из десяти отсчетов следует исключить: 0,23; 0,27; 0,25; 0,23; 0,23; 0,2; 0,24; 0,31; 0,22; 0,25.

29. Для определения коэффициента объемного расширения α стекла взвешивают небольшой стеклянный баллон с оттянутым кончиком – сначала пустой, а затем с количествами ртути, необходимыми для заполнения всего баллона при двух температурах, например 0°C и t . Пусть m_0 и m_1 – массы ртути при указанных температурах. Определить коэффициент объемного расширения стекла α , если коэффициент объемного расширения ртути α_1 .

30. Пикнометр при некоторой температуре t заполнен спиртом, масса которого равна m . Затем пикнометр вместе со спиртом нагревается до температуры t_1 , и излишек спирта против прежнего уровня удаляется фильтровальной бумагой. После этого масса спирта оказалась равной m_1 . Определить средний коэффициент объемного расширения спирта α , если коэффициент линейного расширения стекла β .

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Экспериментальные методы исследований [Текст] / И.В. Золотухин, Ю.Е. Калинин, В.С. Железный, В.С. Гущин. – Воронеж: ВГТУ, 2004. – 494 с.
2. Физические методы исследования материалов твердотельной электроники [Текст] / С.И. Рембеза, Б.М. Синельников, Е.С. Рембеза, Н.И.Каргин. – Ставрополь: СевКавГТУ, 2002. – 432 с.
3. Павлов П.В. Физика твердого тела [Текст] / П.В. Павлов, А.Ф. Хохлов. – М.: Высшая школа, 2000. – 494 с.
4. Перспективные материалы. Структура и методы исследования: Учеб. пособие [Текст] / под ред. Д.Л. Мерсона. – М.: МИСиС, 2006. – 536 с.
5. Ормонт Б.Ф. Введение в физическую химию и кристаллохимию полупроводников [Текст] / Б.Ф. Ормонд, под ред. В.М.Глазова. – М.: Высшая школа, 1982. – 528 с.
6. Антипов Б.Л. Материалы электронной техники: Задачи и вопросы [Текст] / Б.Л. Антипов, В.С. Сорокин, В.А. Терехов. – С.-Пб.: Лань, 2003. – 208 с.
7. Шенк Х. Теория инженерного эксперимента [Текст] / Х. Шенк, под ред. Н.П. Бусленко. – М.: Мир, 1972. – 382 с.
8. Терехов В.А. Задачник по электронным приборам [Текст] / В.А. Терехов. – М.: Энергоатомиздат, 1983. – 280 с.
9. Батавин В.В. Измерение параметров полупроводниковых материалов и структур [Текст] / В.В. Батавин, Ю.А. Концевой, Ю.В. Федорович. – М.: Радио и связь, 1985. – 264 с.
10. Физическое металловедение: В 3-х т. [Текст] / под ред. Р.У. Кана, П.Т. Хаазена. Т.3: Физико-механические свойства металлов и сплавов [Текст]. – М.: Металлургия, 1987. – 663 с.
12. Кунце Х.И. Методы физических измерений [Текст] / Х.И.Кунце. – М.: Мир, 1989. – 216 с.

СОДЕРЖАНИЕ

1. Введение в курс «Экспериментальные методы исследований»	1
2. Вопросы для практических занятий	7
3. Задачи для самостоятельной работы студентов	21
Библиографический список	26

МЕТОДИЧЕСКИЕ УКАЗАНИЯ
к практическим занятиям по курсу «Экспериментальные
методы исследований» для студентов направления 16.03.01
«Техническая физика» (профиль «Физическая электроника»)
очной формы обучения

Составитель
Калинин Юрий Егорович

В авторской редакции

Подписано к изданию 20.03.2015.
Уч.-изд. л. 1,7.

ФГБОУ ВПО "Воронежский государственный технический
университет"
394026 Воронеж, Московский просп., 14