

**Федеральное государственное автономное образовательное  
учреждение высшего образования  
«Московский физико-технический институт  
(национальный исследовательский университет)»**

**УТВЕРЖДЕНО**

**Проректор по учебной работе и  
довузовской подготовке**

**А.А. Воронов**

	<b>Рабочая программа дисциплины (модуля)</b>
<b>по дисциплине:</b>	Основы современной физики: лабораторный практикум
<b>по направлению:</b>	Прикладные математика и физика
<b>профиль подготовки:</b>	Физика перспективных технологий: электроника и квантовые технологии Физтех-школа Электроники, Фотоники и Молекулярной Физики кафедра общей физики
<b>курс:</b>	3
<b>квалификация:</b>	бакалавр

Семестр, формы промежуточной аттестации: 6 (весенний) - Дифференцированный зачет

Аудиторных часов: 30 всего, в том числе:

лекции: 0 час.

семинары: 0 час.

лабораторные занятия: 30 час.

Самостоятельная работа: 60 час.

Всего часов: 90, всего зач. ед.: 2

Программу составили:

С.Н. Жабин, канд. физ.-мат. наук

А.В. Кубышкин, д-р техн. наук, профессор

Программа обсуждена на заседании кафедры общей физики 06.03.2020

## Аннотация

В лаборатории кафедры представлено достаточное количество установок по каждому разделу курса. Лабораторные установки группируются по темам раздела. Темы лабораторных работ организованы в маршруты, по которым проводится выполнение работ студентами. Для каждой лабораторной работы подготовлены специальные описания: описание темы работы, описание эксперимента, проводимого в лабораторной работе и техническое описание лабораторной установки. В лабораторном практикуме рассматриваются ключевые понятия экспериментальной физики, студенты обучаются элементарным экспериментальным методам, а также навыкам работы с оборудованием.

Практическая работа в лаборатории позволяет студентам разобраться в базовых физических вопросах, без которых невозможно глубокое понимание общей физики. Для успешного освоения лабораторного практикума слушателю необходимо владеть базовыми навыками проведения эксперимента, полученными в школе, владеть основами математического анализа, знать основы линейной алгебры, теории вероятностей, а также применять знания, полученные на лекционных и семинарских занятиях по общей физике.

### 1. Цели и задачи

#### Цель дисциплины

формирование базовых знаний по основам современной физики и умения работать в лаборатории для дальнейшего использования в других дисциплинах естественнонаучного содержания;

формирование культуры эксперимента, исследовательских навыков и способности применять знания на практике.

#### Задачи дисциплины

- формирование у обучающихся базовых знаний по основам современной физики;
- формирование культуры эксперимента: умение работать в лаборатории, знать основные методы эксперимента, устанавливать логические связи между понятиями;
- формирование умений и навыков применять полученные знания для постановки эксперимента, самостоятельного анализа полученных результатов.

### 2. Перечень формируемых компетенций

Освоение дисциплины направлено на формирование следующих компетенций:

Код и наименование компетенции	Индикаторы достижения компетенции
УК-1 Способен осуществлять поиск, критический анализ и синтез информации, применять системный подход для решения поставленных задач	УК-1.1 Анализирует задачу, выделяя этапы ее решения, действия по решению задачи
ОПК-1 Способен применять фундаментальные знания, полученные в области физико-математических и (или) естественных наук, и использовать их в профессиональной деятельности	ОПК-1.1 Способен анализировать поставленную задачу, намечать пути ее решения
ПК-1 Способен планировать и проводить научные эксперименты (в избранной предметной области) и (или) теоретические (аналитические и имитационные) исследования	ПК-1.1 Владеет фундаментальными понятиями, законами и теориями современной физики
ПК-3 Способен выбирать и применять подходящее оборудование, инструменты и методы исследований для решения задач в избранной предметной области	ПК-3.1 Знает принципы работы и диапазоны рабочих параметров используемого научного оборудования

### 3. Перечень планируемых результатов обучения по дисциплине (модулю)

В результате освоения дисциплины обучающиеся должны знать:

- ☐ фундаментальные законы и понятия квантовой макрофизики, а также границы их применимости;
- ☐ основные метода описания кристаллических структур, понятия примитивной и элементарной ячеек, ячейка Вигнера-Зейтца, понятия обратной решётки и первой зоны Бриллюэна;
- ☐ основные экспериментальные методы определения параметров кристаллических структур: рентгеновские и нейтронные методы исследования, дифракция Брэгга-Вульфа;
- ☐ способы описания коллективных возбуждений кристаллической решётки, иметь представление о фононах;
- ☐ метод описания поведения электронов в твёрдых телах: зонная теория, распределение Ферми-Дирака, модель сильной и слабой связи;
- ☐ особенности строения полупроводников, а также поведения электронов в полупроводниках;
- ☐ основные положения электронно-дырочной проводимости металлов и полупроводников;
- ☐ иметь представление о примесной проводимости в полупроводниках;
- ☐ связь контактная разности потенциалов и термоЭДС;
- ☐ базовые модели описания явлений сверхтекучести и сверхпроводимости;
- ☐ положения квантового описания магнитных свойств твёрдых тел.

уметь:

- ☐ применять изученные законы квантовой физики для решения конкретных задач;
- ☐ уметь пользоваться классификацией типов кристаллических решёток Браве;
- ☐ применять законы дисперсии фононов для расчёта теплоёмкости кристаллов в мках модели Дебая и Эйнштейна;
- ☐ вычислять закон дисперсии для электронов и дырок в рамках слабой и сильной связи;
- ☐ определять уровень энергии ферми в металлах и полупроводниках относительно края зоны проводимости;
- ☐ определять вид температурной зависимости электропроводности полупроводников;
- ☐ вычислять вид вольт-амперной характеристики p-n перехода;
- ☐ анализировать физические задачи, выделяя существенные и несущественные аспекты явления, и на основе проведённого анализа строить упрощённые теоретические модели физических явлений;
- ☐ применять различные математические инструменты решения задач исходя из сформулированных физических законов, и проводить необходимые аналитические и численные расчёты.

владеть:

- ☐ основными методами решения задач квантовой макрофизики;
- ☐ основными математическими инструментами, характерными для задач квантовой макрофизики.

#### 4. Содержание дисциплины (модуля), структурированное по темам (разделам) с указанием отведенного на них количества академических часов и видов учебных занятий

##### 4.1. Разделы дисциплины (модуля) и трудоемкости по видам учебных занятий

№	Тема (раздел) дисциплины	Трудоемкость по видам учебных занятий, включая самостоятельную работу, час.			
		Лекции	Семинары	Лаборат. работы	Самост. работа
1	Закон Кюри - Вейсса и обменное взаимодействие в ферромагнетиках.			4	7
2	Электронный парамагнитный резонанс.			4	8
3	Определение ширины запрещенной зоны полупроводников.			4	7
4	Исследование собственной и примесной фотопроводимости в полупроводниках			4	8

5	Измерение контактной разности потенциалов в полупроводниках (в германиевом диоде)			4	7
6	Туннелирование в полупроводниках			4	8
7	Проверка закона Видемана-Франца			4	8
8	Измерение сечения образования электрон-позитронных пар.			2	7
Итого часов				30	60
Подготовка к экзамену		0 час.			
Общая трудоёмкость		90 час., 2 зач.ед.			

#### 4.2. Содержание дисциплины (модуля), структурированное по темам (разделам)

Семестр: 6 (Весенний)

##### 1. Закон Кюри - Вейсса и обменное взаимодействие в ферромагнетиках.

Исследуется температурная зависимость магнитной восприимчивости металлического гадолиния в парамагнитной области (выше точки Кюри). По измеренной температуре Кюри оценивается энергия обменного взаимодействия.

##### 2. Электронный парамагнитный резонанс.

Исследуется ЭПР в молекуле ДФПГ. По результатам измерений определяется g-фактор электрона и ширина линии ЭПР.

##### 3. Определение ширины запрещенной зоны полупроводников.

Исследуется температурная зависимость проводимости германия и кремния. По результатам определяется ширина запрещенной зоны и сравниваются погрешности трех методов.

##### 4. Исследование собственной и примесной фотопроводимости в полупроводниках

Исследование собственной и примесной проводимости в полупроводниках.

Исследуется спектральная зависимость фототока в образцах CdS и CdSe с примесями ионов меди. По результатам определяются ширина запрещенной зоны полупроводника и энергия ионизации примеси.

##### 5. Измерение контактной разности потенциалов в полупроводниках (в германиевом диоде)

Измеряется температурная зависимость сопротивления германиевого диода. По результатам определяется контактная разность потенциалов (p-n)-перехода.

##### 6. Туннелирование в полупроводниках

Исследуется принцип действия туннельного диода. Измеряется его вольт-амперная характеристика и определяются основные параметры диода.

##### 7. Проверка закона Видемана-Франца

Черырехточечным методом определяются коэффициенты теплопроводности и электрическая проводимость при комнатной температуре для меди, латуни, алюминия и дюраллюминия. По результатам вычисляется постоянная Лоренца.

##### 8. Измерение сечения образования электрон-позитронных пар.

С помощью телескопа из двух сцинтилляторов и черенковского детектора измеряется сечение образования электрон-позитронных пар в свинце. Измеряется радиационная длина и длина поглощения.

## **5. Описание материально-технической базы, необходимой для осуществления образовательного процесса по дисциплине (модулю)**

Тема 1. Квантовая теория магнетизма

Работа 9.1, к.325 ЛК, 9 установок

Закон Кюри-Вейса и обменное взаимодействие в ферромагнетиках (образец – Cd-гадолиний)

Работа 9.2, к.325 ЛК, 7 установок

Наблюдение и изучение доменной структуры в ферромагнитной пленке железо- иттриевого граната

Тема 2 Электронный парамагнитный резонанс

Работа 10.1, к.325 ЛК, 7 установок

Электронный парамагнитный резонанс (в МГц диапазоне и в ГГц диапазоне)

Тема 3. Энергетические зоны в твердом теле

Работа 11.1, к.325 ЛК, 8 установок

Определение ширины запрещенной зоны полупроводника (на постоянном токе, на переменном токе и бесконтактным методом)

Тема 4. Фотоэффект

Работа 11.2, к.325 ЛК, 6 установок

Исследование собственной и примесной фотопроводимости в полупроводниках

Тема 5. Контактная разность потенциалов

Работа 4.3, к.325 ЛК, 9 установок

Измерение контактной разности потенциалов в полупроводниках (в германиевом диоде)

Тема 6. Туннельные диоды

Работа 11.5, к.325 ЛК, 8 установок

Туннелирование в проводниках

Тема 7. Физика высоких энергий

Работа 7.1, к.325 ЛК, 2 установки

Измерение времени жизни мюона

Работа 7.4, к.325 ЛК, 2 установки

Исследование поглощения космического излучения в свинце

Работа 7.4А, к.503 ЛК, 3 установки

Изучение поглощения космического излучения в свинце

## **6.Перечень рекомендуемой литературы**

### **Основная литература**

1. Квантовая микро- и макрофизика [Текст] : учеб. пособие для вузов / Ю. М. Ципенюк .— М. : Физматкнига, 2006 .— 640 с.
2. Квантовая физика конденсированных систем [Текст] : учеб. пособие для вузов / Н. А. Кириченко ; М-во образования и науки РФ, Моск. физ.-техн. ин-т (гос. ун-т) .— М. : МФТИ, 2012 .— 200 с.
3. Сборник задач по общему курсу физики [Текст] : в 3 ч. Ч. 3 : Атомная и ядерная физика : учеб. пособие для вузов / под ред. В. А. Овчинкина .— 2-е изд., испр. и доп. — М. : Физматкнига, 2009 .— 512 с
4. Лабораторный практикум по общей физике [Текст] : в 3 т. Т. 3 : Квантовая физика : учеб. пособие для вузов / Ф. Ф. Игошин, Ю. А. Самарский, Ю. М. Ципенюк ; под ред. Ю. М. Ципенюка ; Моск. физ.-техн. ин-т (гос. ун-т) .— 2-е изд., испр. и доп. — М. : Физматкнига, 2005 .— 432 с.
6. Калашников Н.П., Смондырев М.А./Основы физики в 2-х томах М.-Лаборатория знаний, 2017

## Дополнительная литература

1. Введение в физику твердого тела [Текст] : учебник для вузов / Ч. Киттель ; пер. под ред. А. А. Гусева. — 2-е изд., стереотип. / перепеч. с изд. 1978 г. — М. : Медиа Стар, 2006. — 792 с.
2. Лекции по общей физике. Строение вещества [Текст] : учеб. пособие для вузов. Ч. 1 / А. Д. Гладун ; М-во образования и науки Рос. Федерации, Моск. физ.-техн. ин-т (гос. унт. — М. : Изд-во МФТИ, 2007. — 128 с.
3. Введение в квантовую физику систем многих частиц [Текст] : учеб. пособие для вузов / А. А. Иванов ; М-во образования и науки Рос. Федерации, Моск. физ.-техн. ин-т (гос. ун-т) . — 2-е изд., перераб. и доп. — М. : Изд-во МФТИ, 2007. — 163 с.
4. Основы физики [Текст] : Курс общей физики : в 2 т. Т. 2 : учебник для вузов. Квантовая и статистическая физика. Термодинамика / В. Е. Белонучкин, Д. А. Заикин, Ю. М. Ципенюк ; под ред. Ю. М. Ципенюка. — 2-е изд., испр. — М. : Физматлит, 2007. — 608 с.
5. Основы квантовой физики и строение вещества [Текст] : учеб. пособие для вузов / И. П. Крылов ; М-во высш. и сред. спец. образования РСФСР , Моск. физико-техн. ин-т (гос. ун-т) . — М. : МФТИ, 1989. — 184 с.
6. Общий курс физики [Текст] : в 5 т. Т. 5 : Атомная и ядерная физика : учеб. пособие для вузов / Д. В. Сивухин. — 2-е изд., стереотип. — М : Физматлит : МФТИ, 2002, 2006, 2008. — 784 с.

## 7. Перечень ресурсов информационно-телекоммуникационной сети "Интернет", необходимых для освоения дисциплины (модуля)

1. <http://mipt.ru/education/chair/physics/index.php> Сайт кафедры общей физики
2. <http://www.physics.ru>- образовательный сайт с элементарными сведениями по физике.
3. <http://www.edu.ru>- федеральный портал «Российское образование».
4. <http://benran.ru>-библиотека по естественным наукам Российской академии наук.
5. <http://www.i-exam.ru>- единый портал Интернет-тестирования в сфере образования.

## 8. Перечень информационных технологий, используемых при осуществлении образовательного процесса по дисциплине (модулю), включая перечень необходимого программного обеспечения и информационных справочных систем (при необходимости)

В лабораторном практикуме на части работ компьютеры используются как измерительные приборы и оборудования для обработки данных. На данных компьютерах используются ОС MSWindows, FreeDOS, программа MathCAD, а также программы разработанные программистами учебно-методического центра кафедры.

В процессе самостоятельной работы обучающихся возможно использование таких программных средств, как Mathcad, Scilab, Origin и др.

## 9. Методические указания для обучающихся по освоению дисциплины (модуля)

Студент, изучающий курс, должен с одной стороны, овладеть общим понятийным аппаратом, а с другой стороны, должен научиться применять теоретические знания на практике.

В результате изучения дисциплины студент должен знать:

Успешное освоение курса требует напряжённой самостоятельной работы студента. В программе курса приведено минимально необходимое время для работы студента над темой. Самостоятельная работа включает в себя:

- чтение и конспектирование рекомендованной литературы;
- проработку учебного материала (по конспектам лекций, учебной и научной литературе), подготовку ответов на вопросы, предназначенных для самостоятельного изучения, доказательство отдельных утверждений, свойств;
- решение задач, предлагаемых студентам на лекциях и практических занятиях;
- подготовку к практическим занятиям, коллоквиумам, зачёту.

Руководство и контроль за самостоятельной работой студента осуществляется в форме индивидуальных консультаций.

Показателем владения материалом служит умение решать задачи. Для формирования умения применять теоретические знания на практике студенту необходимо решать как можно больше задач. При решении задач каждое действие необходимо аргументировать, ссылаясь на известные теоретические сведения. Значительно облегчить решение задачи может хорошо выполненный чертеж, если он соответствует условию задачи (прямой угол нарисован прямым, равнобедренный треугольник - равнобедренным и т. д.). При подготовке к практическим занятиям необходимо повторять ранее изученные основные определения, формулировки теорем. В начале занятия, как правило, проводится короткий (10-15 минут) опрос по материалу прошедших занятий в устной или письменной форме. Обычно придерживаются следующей схемы: изучение материала лекции по конспекту в тот же день, когда была прослушана лекция (10-15 минут); повторение материала накануне следующей лекции (10-15 минут), проработка учебного материала по конспектам лекций, учебной и научной литературе, подготовка ответов на вопросы, предназначенных для самостоятельного изучения (1 час неделю), подготовка к практическому занятию, решение задач (1 час). Важно добиться понимания изучаемого материала, а не механического его запоминания. При затруднении изучения отдельных тем, вопросов, следует обращаться за консультациями к лектору или преподавателю, ведущему практические занятия.

Дополнительная литература:

1. Морозов А.И. Физика твердого тела. Кристаллическая решетка. Фононы. М.:МИРЭА, 2010
2. Морозов А.И. Физика твердого тела. Электроны в кристалле. Металлы. Полупроводники. Диэлектрики. Магнетики. Сверхпроводники. М.:МИРЭА, 2010.

**ОЦЕНОЧНЫЕ МАТЕРИАЛЫ ПО ДИСЦИПЛИНЕ (МОДУЛЮ)**

<b>по направлению:</b>	Прикладные математика и физика
<b>профиль подготовки:</b>	Физика перспективных технологий: электроника и квантовые технологии Физтех-школа Электроники, Фотоники и Молекулярной Физики кафедра общей физики
<b>курс:</b>	3
<b>квалификация:</b>	бакалавр

Семестр, формы промежуточной аттестации: 6 (весенний) - Дифференцированный зачет

**Разработчики:**

С.Н. Жабин, канд. физ.-мат. наук

А.В. Кубышкин, д-р техн. наук, профессор



## 1. Компетенции, формируемые в процессе изучения дисциплины

Код и наименование компетенции	Индикаторы достижения компетенции
УК-1 Способен осуществлять поиск, критический анализ и синтез информации, применять системный подход для решения поставленных задач	УК-1.1 Анализирует задачу, выделяя этапы ее решения, действия по решению задачи
ОПК-1 Способен применять фундаментальные знания, полученные в области физико-математических и (или) естественных наук, и использовать их в профессиональной деятельности	ОПК-1.1 Способен анализировать поставленную задачу, намечать пути ее решения
ПК-1 Способен планировать и проводить научные эксперименты (в избранной предметной области) и (или) теоретические (аналитические и имитационные) исследования	ПК-1.1 Владеет фундаментальными понятиями, законами и теориями современной физики
ПК-3 Способен выбирать и применять подходящее оборудование, инструменты и методы исследований для решения задач в избранной предметной области	ПК-3.1 Знает принципы работы и диапазоны рабочих параметров используемого научного оборудования

## 2. Показатели оценивания компетенций

В результате изучения дисциплины «Основы современной физики: лабораторный практикум» обучающийся должен:

### знать:

- ☐ фундаментальные законы и понятия квантовой макрофизики, а также границы их применимости;
- ☐ основные методы описания кристаллических структур, понятия примитивной и элементарной ячеек, ячейка Вигнера-Зейтца, понятия обратной решётки и первой зоны Бриллюэна;
- ☐ основные экспериментальные методы определения параметров кристаллических структур: рентгеновские и нейтронные методы исследования, дифракция Брэгга-Вульфа;
- ☐ способы описания коллективных возбуждений кристаллической решётки, иметь представление о фононах;
- ☐ метод описания поведения электронов в твёрдых телах: зонная теория, распределение Ферми-Дирака, модель сильной и слабой связи;
- ☐ особенности строения полупроводников, а также поведения электронов в полупроводниках;
- ☐ основные положения электронно-дырочной проводимости металлов и полупроводников;
- ☐ иметь представление о примесной проводимости в полупроводниках;
- ☐ связь контактная разности потенциалов и термоЭДС;
- ☐ базовые модели описания явлений сверхтекучести и сверхпроводимости;
- ☐ положения квантового описания магнитных свойств твёрдых тел.

### уметь:

- ☐ применять изученные законы квантовой физики для решения конкретных задач;
- ☐ уметь пользоваться классификацией типов кристаллических решёток Браве;
- ☐ применять законы дисперсии фононов для расчёта теплоёмкости кристаллов в рамках модели Дебая и Эйнштейна;
- ☐ вычислять закон дисперсии для электронов и дырок в рамках слабой и сильной связи;
- ☐ определять уровень энергии ферми в металлах и полупроводниках относительно края зоны проводимости;
- ☐ определять вид температурной зависимости электропроводности полупроводников;
- ☐ вычислять вид вольт-амперной характеристики p-n перехода;
- ☐ анализировать физические задачи, выделяя существенные и несущественные аспекты явления, и на основе проведённого анализа строить упрощённые теоретические модели физических явлений;
- ☐ применять различные математические инструменты решения задач исходя из сформулированных физических законов, и проводить необходимые аналитические и численные расчёты.

**владеть:**

- ☐ основными методами решения задач квантовой макрофизики;
- ☐ основными математическими инструментами, характерными для задач квантовой макрофизики.

**3. Перечень типовых (примерных) вопросов, заданий, тем для подготовки к текущему контролю**

### 3. Перечень типовых контрольных заданий, используемых для оценки знаний, умений, навыков

Для выполнения каждой лабораторной работы студент должен подготовиться к выполнению работы, сдать подготовку преподавателю, выполнить экспериментальную часть работы, выполнить необходимые расчёты и оформить работу, сдать работу преподавателю. Для защиты каждой работы предусмотрены контрольные вопросы:

#### Работа 9.1

#### ЗАКОН КЮРИ-ВЕЙСА И ОБМЕННОЕ ВЗАИМОДЕЙСТВИЕ В ФЕРРОМАГНЕТИКАХ

1. Запишите уравнения, описывающие магнитное поле в среде. Дайте определение величин, входящих в эти уравнения.
2. Какие вещества относятся к диа- пара- и ферромагнетикам?
3. Какова природа диа-, пара- и ферромагнетизма?
4. Назовите необходимые условия для появления магнитной упорядоченности в ферромагнетиках?
5. С чем связано появление доменов в ферромагнетике? Какие факторы влияют на формирование доменной структуры?
6. Почему велико значение магнитной восприимчивости вещества  $\chi$  для ферромагнетиков?
7. Почему при определенной температуре ферромагнетик существенно изменяет свои магнитные свойства?
8. Что такое точка Кюри?
9. Каким образом из температурной зависимости  $\chi(T)$  можно определить температуру Кюри?
10. Как по известной температуре Кюри определить усредненную энергию обменного взаимодействия, приходящуюся на один атом?
11. Как внешнее магнитное поле влияет на доменную структуру ферромагнетиков. Какие процессы происходят в ферромагнетике с ростом напряженности магнитного поля?
12. Дайте качественное объяснение зависимости  $B(H)$  при перемагничивании ферромагнетика.
13. Как можно управлять шириной петли гистерезиса в ферромагнитных материалах?
14. Чем отличаются ферромагнетики от ферромагнетиков? Какие наиболее важные свойства ферритов?
15. Какова методика регистрации петли гистерезиса. Как Вы определяете основные параметры петли гистерезиса: остаточную намагниченность, коэрцитивную силу, потери на перемагничивание?
16. В чем заключаются магнитооптические эффекты Керра и Фарадея?
17. Какие методы регистрации и стирания магнитной записи на ферромагнитной пленке Вы можете предложить?
18. Что собой представляют лабиринтные, линейные, цилиндрические домены? Каковы их размеры?

#### Работа 10.1

#### ЭЛЕКТРОННЫЙ ПАРАМАГНИТНЫЙ РЕЗОНАНС

1. Что такое электронный парамагнитный резонанс? Почему он называется парамагнитным?

2. Как расщепляются энергетические уровни электронов в постоянном магнитном поле? Какой формулой описываются заселенности образовавшихся подуровней?
3. При каких условиях наступает насыщение парамагнитного резонанса?
4. Каким образом нарушенное тепловое равновесие восстанавливается после выключения внешнего возмущения?
5. Какие причины приводят к уширению линии электронного парамагнитного резонанса?
6. Какое взаимодействие (спин-спиновое, спин-решеточное) зависит от температуры образца? Какое взаимодействие существенно влияет на форму линии электронного парамагнитного резонанса?
7. Какова природа обменного взаимодействия? Как оно сказывается на форме линии электронного парамагнитного резонанса?
8. Что такое тонкая структура линий электронного парамагнитного резонанса?
9. Чем объясняется сверхтонкое расщепление? Как оно сказывается на спектре электронного парамагнитного резонанса?
10. Что такое  $g$ -фактор или фактор спектроскопического расщепления? Всегда ли измерения с помощью электронного парамагнитного резонанса приводят к значению  $g$ , равному 2 (как для свободного электрона)?
11. В ионе  $Mn^{+2}$  имеется 5 электронов, спины которых не спарены (на внешней  $3-d$  - оболочке). Сколько линий электронного парамагнитного резонанса можно наблюдать на ионах  $Mn^{+2}$ ?
12. Явление электронного парамагнитного резонанса можно описать классически, исследуя прецессию вектора магнитного момента электрона в магнитном поле. Чему равна круговая частота такой прецессии, если индукция магнитного поля равна  $B$  (р).
13. Из каких элементов состоит лабораторная установка для наблюдения электронного парамагнитного резонанса? Каково их назначение?
14. В радиочастотном диапазоне обычно применяются два метода измерения электронного парамагнитного резонанса: один из них - метод реакции генератора, другой основан на изменении добротности контура вследствие парамагнитных потерь. Какой из методов используется в лабораторной работе?
15. Для повышения добротности колебательного контура экспериментальной установки его детали и экран посеребрены. Как велика добротность используемого в работе контура? Добротность контура можно определить, используя генератор и осциллограф установки.
16. Для чего в установке по наблюдению электронного парамагнитного резонанса применяется модуляция магнитного поля?
17. Как должны быть взаимно ориентированы постоянное магнитное поле и магнитный вектор высокочастотного поля при наблюдении электронного парамагнитного резонанса?
18. Каким способом измеряется индукция постоянного и переменного полей в лабораторной установке?
19. Какое влияние на сигнал электронного парамагнитного резонанса оказывает неоднородность магнитного поля?
20. Экран колебательного контура хорошо выполняет свое назначение, если он образует замкнутое кольцо вокруг контура. Сказывается ли на результатах измерений  $g$ -фактора наличие такого кольца между катушками, создающими магнитное поле?
21. Для какой цели в установку по наблюдению электронного резонанса введен фазовращатель?
22. Как зависит величина сигнала электронного парамагнитного резонанса от температуры образца?
23. Оцените, как меняется величина сигнала электронного парамагнитного резонанса с ростом частоты высокочастотного поля (при выполнении условия  $hCJ = IUqB_0$ ).

24. Какие факторы вносят основной вклад в погрешность определения  $\Delta$ -фактора и ширины линии на ДФПГ?

#### Работа 11.1

#### ОПРЕДЕЛЕНИЕ ШИРИНЫ ЗАПРЕЩЕННОЙ ЗОНЫ ПОЛУПРОВОДНИКА

1. Объясните причину образования энергетических зон в твердом теле.
2. Какие вещества называются металлами, полупроводниками, диэлектриками? Чем объясняется различие между ними с точки зрения зонной теории?
3. Где расположен уровень Ферми в металлах и в полупроводниках?
4. Как образуются в кристаллах локальные энергетические уровни и примесные зоны?
5. Чем определяется ширина разрешенной зоны и число состояний в ней?
6. Какой функцией определяется вероятность заполнения электронами уровней в зоне проводимости и вероятность появления дырок в валентной зоне?
7. При каких условиях распределение Ферми может быть заменено распределением Больцмана? Не будет ли при этом нарушен принцип Паули? В каких случаях полупроводник называют невырожденным, и в каких - вырожденным?
8. Каков механизм собственной и примесной проводимости?
9. Чем объясняется различный ход температурной зависимости сопротивления у металлов и полупроводников?
10. Объясните, что такое дырка и дырочная проводимость?
11. Что называется эффективной массой носителей заряда? Каков физический смысл этого понятия?
12. Что называют подвижностью носителей заряда; как она зависит от температуры в полупроводниках? При каких условиях можно пренебречь зависимостью подвижности носителей заряда от температуры?
13. Для экспериментального определения ширины запрещенной зоны в работе исследуется зависимость проводимости полупроводника от температуры. Из каких соображений следует выбирать рабочий диапазон температур?
14. Почему измерения удельного сопротивления полупроводников производят обычно при очень слабом освещении или в темноте?
15. В чем преимущество потенциометрического метода измерения напряжения между зондами на образце перед измерением напряжения вольтметром, потребляющим ток?
16. В эксперименте используется образец полупроводникового материала прямоугольной формы. Насколько высокими должны быть требования к правильности геометрической формы образца?
17. Как исключить влияние термо ЭДС, которая может возникнуть между зондом и образцом?
18. Распределение примесей в полупроводниковых образцах может быть неоднородным. Как оценить электрическую однородность образца?
19. С какой точностью следует измерять сопротивление при выбранном способе измерения его температуры?
20. Устраняются ли влияния термо ЭДС и контактной разности потенциалов с помощью моста переменного тока?
21. В чем преимущества бесконтактного емкостного метода измерения сопротивления полупроводникового образца? Какие требования предъявляются к исследуемому образцу и к диэлектрическим прокладкам, изолирующим образец от пластин конденсатора при использовании этого метода?
22. Почему для определения ширины запрещенной зоны следует использовать часть графика  $\ln \rho$  — соответствующую более высоким температурам?

23. Какие факторы оказывают наиболее существенное влияние на точность определения ширины запрещенной зоны в проведенном Вами эксперименте.

### **Работа 11.2**

#### **ИССЛЕДОВАНИЕ СОБСТВЕННОЙ И ПРИМЕСНОЙ ФОТОПРОВОДИМОСТИ В ПОЛУПРОВОДНИКАХ**

1. В чем заключается явление внутреннего фотоэффекта в полупроводнике?
2. Какие носители тока называются равновесными и неравновесными? Какие носители обуславливают фотопроводимость?
3. Какими факторами определяется величина темнового тока?
4. Что называется красной границей фотоэффекта? Чем она определяется для собственных и примесных полупроводников?
5. Зависит ли красная граница фотоэффекта от температуры образца?
6. Объясните зависимость фотоэффекта от длины волны падающего света.
7. Объясните влияние температуры полупроводника на его фоточувствительность.
8. Поглощение света может и не приводить непосредственно к появлению свободных носителей тока. Назовите механизмы фотоэлектрически неактивного поглощения света.
9. Что такое “квантовый выход”?
10. Что называется временем жизни неравновесных носителей тока? Назовите механизмы рекомбинации, уменьшающие время жизни носителей тока.
11. Проследите за соблюдением закона сохранения энергии и импульса при взаимодействии фотона с электроном, приводящем к межзонному переходу электрона.
12. Ширина запрещенной зоны может быть определена как по спектральной зависимости фототока (указанный метод принят в лабораторной работе), так и по спектру пропускания. Какой из этих методов предпочтительнее?
13. Почему фотосопротивления изготавливаются из тонких полупроводниковых пленок, пропускающих через себя значительную часть падающего света?
14. Из каких основных частей состоит лабораторная установка для изучения фотопроводимости? Каково их назначение?
15. С какой целью перед входной щелью монохроматора располагают фокусирующую линзу?
16. Какие типы переходов наблюдаются в образце полупроводника при поглощении квантов света?
17. Почему на кривой фототока видны один или два, а не три поднимающихся участка (переход из валентной зоны в зону проводимости, переход из валентной зоны на примесный уровень, переход с примесного уровня в зону проводимости)?
18. Для чего спектральную зависимость фототока пересчитывают на постоянный поток фотонов?
19. Как определяется ширина запрещенной зоны и энергия ионизации примеси по спектральной кривой фототока?
20. Как влияет на точность определения ширины запрещенной зоны ширина входной и выходной щелей монохроматора?
21. Можно ли на лабораторной установке определить ширину запрещенной зоны германия и кремния?
22. Объясните, почему спектральная кривая фототока образца CdS при смещении от красной границы в сторону коротких длин волн после резкого подъема быстро спадает?
23. Почему показания прибора, измеряющего фототок, устанавливаются не сразу, а через некоторое время после освещения полупроводника?

24. Какие факторы вносят существенный вклад в погрешность определения ширины запрещенной зоны и энергии ионизации примеси образца CdS?

### Работа 4.3

#### ИЗМЕРЕНИЕ КОНТАКТНОЙ РАЗНОСТИ ПОТЕНЦИАЛОВ В ПОЛУПРОВОДНИКАХ

1. Почему при соприкосновении двух проводящих электрический ток материалов возникает контактная разность потенциалов?
2. Какой вид имеет функция распределения электронов в полностью заполненной валентной зоне?
3. Что такое “дырка”? Каковы ее заряд и масса? Объясните, почему с помощью “дырок” можно характеризовать коллективные состояния электронов в почти заполненных зонах?
4. Каковы размеры области, в которой локализована контактная разность потенциалов? Одинаковы ли эти размеры у разных металлов и полупроводников?
5. В какую сторону смещается уровень Ферми в полупроводниках л-типа по сравнению с беспримесными полупроводниками?
6. Какие носители заряда называются основными?
7. Возникает ли контактная разность потенциалов на границе собственного и примесного полупроводников?
8. При каких температурах и напряжениях  $p$ - $n$  переход ведет себя как выпрямитель тока?
9. Какой экспериментальный метод используется в работе для измерения активного сопротивления диода?
10. Какое физическое явление используется для охлаждения и нагревания рабочей камеры?
11. Какие токи допустимы в режиме нагрева рабочей камеры?
12. Как измеряется температура рабочей камеры в данной работе?
13.  $p$ - $n$  переход, кроме активного сопротивления, характеризуется емкостью. Ее величину можно грубо оценить как емкость конденсатора с толщиной  $=1\text{СГ}^5\text{см}$  и  $\epsilon = 16$ . Вносит ли наличие этой емкости существенную ошибку в определении  $AVI$

### Работа 11.5

#### ТУННЕЛИРОВАНИЕ В ПОЛУПРОВОДНИКАХ

1. Чем отличаются вырожденные полупроводники от невырожденных? Где располагается уровень Ферми в этих полупроводниках?
2. В каких полупроводниках допустимо использование Больцмановского распределения свободных носителей заряда по энергиям вместо Фермиевского распределения?
3. К каким физическим следствиям приводит сильное легирование полупроводников, образующих  $p$ - $n$  переход?
4. Изобразите вольтамперную характеристику туннельного диода, укажите на ней ветвь туннелирования и ветвь диффузионного тока.
5. Какие параметры ВАХ определяют положение уровней Ферми в полупроводниках  $p$ - $n$  перехода?
6. Каков механизм прохождения прямого и обратного тока в туннельном диоде?
7. Объясните работу схемы для получения ВАХ туннельного диода - статической (по точкам) и динамической (на экране осциллографа).
8. Чем объяснить, что часть вольтамперной характеристики не видна на экспериментально полученной ВАХ?

9. Какие применения туннельных диодов Вы можете предложить?
10. Изобразите схему генератора на туннельном диоде. Чем определяется частота и гармоничность колебаний этого генератора?
11. Оцените мощность излучения экспериментальной схемы генератора на туннельном диоде.

#### 4. Критерии оценивания

По результатам подготовки работу выставляется от 0 до 10 баллов согласно уровню подготовки студента. По результатам сдачи выставляется от 0 до 10 баллов согласно уровню подготовленного отчёта и знаний студента. Из полученных баллов за каждую работу рассчитывается средний балл

Оценка	Баллы
отлично	10
	9
	8
хорошо	7
	6
	5
удовлетворительно	4
	3
неудовлетворительно	2
	1

Из полученных баллов за каждую работу рассчитывается средний балл, который определяет оценку за зачёт.

Оценка «**отлично (10)**» выставляется студенту, показавшему всесторонние систематизированные глубокие знания учебной программы и за её пределами, а также умение уверенно применять их на практике при выполнении и сдаче лабораторной работы.

Оценка «**отлично (9)**» выставляется студенту, показавшему всесторонние систематизированные глубокие знания учебной программы и умение уверенно применять их на практике при решении нестандартных задач.

Оценка «**отлично (8)**» выставляется студенту, показавшему всесторонние систематизированные глубокие знания учебной программы и умение уверенно применять их на практике при выполнении и сдаче лабораторной работы, однако допустившему некоторые неточности при ответе.

Оценка «**хорошо (7)**» выставляется студенту, если он продемонстрировал твердое знание и уверенное понимание материала учебной программы и умение свободно применять физические законы на практике при выполнении и сдаче лабораторной работы.

Оценка «**хорошо (6)**» выставляется студенту, если он продемонстрировал твердое знание материала учебной программы и умение применять физические законы на практике при выполнении и сдаче лабораторной работы.



Оценка **«хорошо (5)»** выставляется студенту, если он продемонстрировал твердое знание и понимание материала учебной программы и умение применять физические законы на практике при выполнении и сдаче лабораторной работы, однако допустил при ответе ряд грубых неточностей.

Оценка **«удовлетворительно (4)»** выставляется студенту, показавшему фрагментарный характер знаний, допускавшему неточности в формулировке основных законов и базовых понятий, но при этом продемонстрировавшему способность выполнять основные задания при выполнении и сдаче лабораторной работы и владение основными разделами учебной программы, необходимыми для дальнейшего обучения.

Оценка **«удовлетворительно (3)»** выставляется студенту, показавшему сильно фрагментарный характер знаний, допускавшему грубые ошибки в формулировке основных законов и базовых понятий, но при этом продемонстрировавшему способность при этом продемонстрировавшему способность выполнять основные задания при выполнении и сдаче лабораторной работы и владение основными разделами учебной программы, необходимыми для дальнейшего обучения.

Оценка **«неудовлетворительно (2)»** или **«неудовлетворительно (1)»** выставляется студенту, который не знает значительную часть основного содержания программы, систематически допускает грубые ошибки при формулировании основных физических законов или не способен корректно применять физические законы даже для решения простых задач.

## **5. Методические материалы, определяющие процедуры оценивания знаний, умений, навыков и (или) опыта деятельности**

Промежуточная аттестация по курсу проводится в форме дифференцированного зачета. Оценка за диф. зачёт выставляется на основе оценок, полученных студентами при защите лабораторных работ. Для получения положительной оценки за зачёт студенту должен выполнить и защитить все работы, предусмотренные учебным планом.