

Белорусский государственный университет

**УТВЕРЖДАЮ**

Проректор по учебной работе  
и образовательным инновациям

\_\_\_\_\_ И. Здрок  
«30» мая 2021

Регистрационный № УД 9825/уч.



**ЛАБОРАТОРНЫЙ СПЕЦПРАКТИКУМ  
«ПАРАМЕТРЫ СТРУКТУР И МАТЕРИАЛОВ»**

**Учебная программа учреждения высшего образования  
по учебной дисциплине для специальности**

1-31 04 08 Компьютерная физика

Минск, 2021

Учебная программа составлена на основе Образовательного стандарта ОСВО 1-31 04 08 - 2018, учебного плана №G31-220/уч. от 13.07.2018, №G31и-231/уч от 20.03.2019

**СОСТАВИТЕЛИ:**

**Н. М. Лапчук** — доцент кафедры физики полупроводников и наноэлектроники Белорусского государственного университета, кандидат физико-математических наук, доцент.

**Т. М. Лапчук** — заведующая учебной лабораторией кафедры физики полупро-водников и наноэлектроники Белорусского государственного университета

**А. Н. Олешкевич** — инженер второй категории кафедры физики полупро-водников и наноэлектроники Белорусского государственного университета

**РЕЦЕНЗЕНТ:**

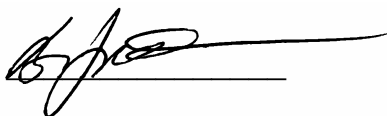
**С. П. Сернов** — доцент кафедры интеллектуальных систем приборостроительного факультета Белорусского национального технического университета, кандидат физико-математических наук, доцент

**РЕКОМЕНДОВАНА К УТВЕРЖДЕНИЮ:**

Кафедрой физики полупроводников и наноэлектроники физического факультета Белорусского государственного университета (протокол № 9 от 06 апреля 2021 г.)

Научно-методическим Советом БГУ  
(протокол № 5 от 24 мая 2021 г.)

Заведующий кафедрой



Оджаев В.Б.

## ПОЯСНИТЕЛЬНАЯ ЗАПИСКА

Программа учебной дисциплины Лабораторный спецпрактикум «Параметры структур и материалов» разработана для студентов специальности 1-31 04 08 «Компьютерная физика» по специализации 1-31 04 08-02 «Физическая информатика» первой степени высшего образования.

### **Цели и задачи учебной дисциплины**

**Цель** учебной дисциплины Лабораторный спецпрактикум «Параметры структур и материалов» — закрепление теоретического материала учебного курса «Измерение параметров структур в электронной промышленности», выработка умения применять на практике полученные знания и активизация познавательной деятельности студентов.

### **Задачи учебной дисциплины:**

- приобретение навыков работы на реальном оборудовании, с аналогами которого будущему специалисту, возможно, придется иметь дело в своей практической деятельности;
- углубить и закрепить знания теоретического курса путем практического изучения изложенных в лекции законов и положений по физике полупроводниковых материалов в лабораторных условиях;
- привить навыки в научном экспериментировании, анализе полученных результатов при исследовании свойств материалов полупроводниковой электроники;
- практически ознакомить с измерительной аппаратурой и методами работы на ней;
- сформировать первичные навыки организации, планирования и проведения научных исследований в области электронного материаловедения.
- научить студента видеть области применения методов, понимать их прикладные возможности при решении конкретных задач

Содержание дисциплины Лабораторный спецпрактикум «Параметры структур и материалов» охватывает круг вопросов, которые будут рассмотрены в процессе чтения лекций и реализованы на лабораторных занятиях, предусматривающих применение разнообразной аппаратуры в условиях, близких к реальным, в которых будет работать будущий специалист.

Поскольку ни одна из форм учебной деятельности не требует от студентов такого проявления инициативы, наблюдательности и самостоятельности в принимаемых решениях, как работа в лаборатории, учебная дисциплина «Лаборатория специализации «Физика материалов микроэлектроники»» обеспечивает обоснованный отбор содержания лекционного материала, подлежащего практическому усвоению. В то же время этот материал раскрывает методику современных научных исследований применительно к специальной подготовке студентов. В дисциплине осуществлено согласование понятий, определений и

обозначений физических величин для того, чтобы они составляли единую систему во всех дисциплинах.

**Место учебной дисциплины** в системе подготовки специалиста с высшим образованием.

Учебная дисциплина Лабораторный спецпрактикум «Параметры структур и материалов» дает представление об основных свойствах материалов, используемых в традиционной микроэлектронике, о возможных механизмах управления этими свойствами, о гармоничном сочетании материалов с полупроводниковыми, диэлектрическими и проводящими свойствами в электронике.

Учебная дисциплина Лабораторный спецпрактикум «Параметры структур и материалов» входит в модуль «Диагностика материалов», относится к **циклу** дисциплин специализации компонента учреждения высшего образования, **основана** на знаниях и представлениях, заложенных в общих курсах электричества, атомной физики, оптики, теоретической механики, и **взаимодействует** с дисциплиной «Измерение параметров структур в электронной промышленности».

#### **Требования к компетенциям**

Освоение учебной дисциплины Лабораторный спецпрактикум «Параметры структур и материалов» должно обеспечить формирование следующих базовых профессиональных и специализированных компетенций:

Требования к **базовым профессиональным** компетенциям специалиста

Специалист должен:

БПК-6. Владеть методами теории вероятностей и математической статистики для обработки экспериментальных данных и результатов мониторинга технологических процессов; демонстрировать способность применять аппарат математической физики для моделирования и решения стандартных задач в области прикладной физики.

БПК-8. Владеть основными понятиями и базовыми законами электромагнетизма, навыками расчетов и практической работы с электрическими цепями и устройствами.

БПК-11. Владеть базовыми представлениями об электромагнитных свойствах материалов, методами решения задач электродинамики и теоретического описания полей систем зарядов и токов.

БПК-12. Быть способным интерпретировать проявления корпускулярно-волнового дуализма в атомных явлениях, уметь связывать структуру атомных и молекулярных систем с их физическими и химическими свойствами.

Требования к **специализированным** компетенциям специалиста

Специалист должен:

СК-1. Быть способным выбрать необходимый метод компьютерного моделирования для решения физической задачи в предметной области, уметь реализовывать на современных языках программирования численные

алгоритмы решения нелинейных, дифференциальных уравнений, уравнений в частных производных и систем уравнений.

СК-4. Быть способным демонстрировать систематизированные знания и умения в области радиоэлектроники аналоговых устройств; владеть знаниями о физических принципах работы элементов твердотельной электроники; владеть базовыми знаниями принципов работы оптических квантовых генераторов; уметь проводить основные измерения параметров полупроводниковых приборов, электронных схем и оптических квантовых генераторов с помощью стандартных измерительных приборов.

СК-6. Владеть навыками работы с компьютером, как средством сбора измерительной информации, управления физическим экспериментом или технологическим процессом; быть способным обрабатывать экспериментальные данные и данные мониторинга технологических процессов современными методами.

СК-8. Быть способным разрабатывать физико-математическую модель исследуемого явления, уметь моделировать на компьютере физические процессы различной природы.

СК-13. Владеть классическими и полуклассическими моделями конденсированного состояния вещества; уметь рассчитывать их электрофизические и оптические параметры, исходя из значения внутренних параметров вещества.

В результате освоения учебной дисциплины студент должен:

**знать:**

- проблематику, цель, объем, содержание лабораторных занятий и методику их проведения;
- основной теоретический материал, который закрепляется в каждой лабораторной работе;
- правила пользования приборами; меры безопасности и порядок их выполнения в работе;

**уметь:**

- обрабатывать и анализировать экспериментальные данные;
- оценивать допустимые разбросы результатов экспериментов;
- решать типовые кристаллографические задачи;
- рассчитывать устойчивость кристаллических решеток ионных бинарных соединений с различными координационными числами;
- прогнозировать электрические, оптические и магнитные свойства новых материалов, исходя из данных об их составе и структуре;

**владеть:**

- навыками сравнительного анализа экспериментально полученных величин с величинами и характеристиками, полученными расчетным путем;
- базовыми принципами расчета электрофизических параметров материалов микроэлектроники.

### **Структура учебной дисциплины**

Дисциплина Лабораторный спецпрактикум «Параметры структур и материалов» изучается в 5 семестре. Всего на изучение учебной дисциплины отведено:

– для очной формы получения высшего образования – 108 часов, в том числе 54 аудиторных часа, из них: лабораторные занятия – 54 часа.

Трудоемкость учебной дисциплины составляет 3 зачетные единицы.

Форма текущей аттестации – зачет.

## СОДЕРЖАНИЕ УЧЕБНОГО МАТЕРИАЛА

### ***Тема 1. Вводное занятие***

1.1 Оборудование лаборатории специализации. Техника безопасности при работе на учебном оборудовании. Методические рекомендации по организации и выполнению самостоятельной работы студентов. Сроки проведения контролирующих мероприятий в процессе освоения дисциплины. О рейтинговой десятибалльной шкале оценок по текущему контролю знаний. Рекомендации по контролю качества усвоения знаний и проведению итоговой аттестации. Практические рекомендации по работе на научном оборудовании при выполнении заданий Предварительный устный контрольный опрос по основным физическим свойствам полупроводниковых материалов и структур и методам их экспериментального определения.

### ***Тема 2. Изучение спектра фотопроводимости полупроводников***

2.1. Взаимодействие света с веществом. Увеличение электропроводности полупроводников под действием электромагнитного излучения. Основные виды поглощения света в полупроводниках: закон Бугера-Ламберта, коэффициент поглощения. Фундаментальное поглощение в прямозонных и непрямозонных полупроводниках. Поглощение света носителями заряда и кристаллической решеткой. Экситоны. Поглощение света примесями. Фотопроводимость. Квантовый выход фотоэффекта. Красная граница внутреннего фотоэффекта. Теоретический расчет красной границы фотопроводимости чистого беспримесного германия при низкой температуре.

2.2. Регистрация спектра поглощения света полупроводниками. Методика измерения спектра фотопроводимости. Принципиальная схема установки для регистрации эффекта фотопроводимости. Основные параметры полупроводникового материала, определяемые из спектра фотопроводимости. Исследование спектров фотопроводимости полупроводниковых кристаллов CdS и CaSe. Построение графиков и анализ экспериментальных результатов. Определение ширины запрещенной зоны по экспериментальным спектрам фотопроводимости. Оценка погрешности полученных результатов.

### ***Тема 3. Изучение магниторезистивного эффекта***

3.1. Полупроводниковые кристаллы в однородном постоянном магнитном поле. Изменение энергетического спектра. Плотность разрешенных состояний и энергии Ферми в магнитном поле. Представление о классических и квантовых магнитных полях. Кинетические явления в полупроводниках. Эффект Холла, магниторезистивный эффект. Эффекты Эттингаузена и Нернста. Кинетические явления в квантовых магнитных полях, при прыжковом и зонном механизмах переноса заряда. Расчет

основных электрофизических параметров для металлического и полупроводникового образцов с заданными размерами.

3.2. Техника и методика измерения магнитосопротивления полупроводниковых образцов с различными свойствами. Техника и методика измерения ЭДС Холла и определения концентрации и подвижности носителей зарядов в зависимости от величины протекаемого через образцы тока. Магнитосопротивление и ЭДС Холла полупроводниковых структур. Построение графиков и анализ экспериментальных результатов. Определение основных электрофизических параметров полупроводниковых образцов. Оценка погрешности полученных результатов.

#### ***Тема 4. Определение коэффициента диффузии и времени жизни неравновесных носителей заряда методом подвижного светового зонда***

4.1. Неравновесные носители заряда в полупроводниках. Методы возбуждения полупроводника для получения неравновесных носителей заряда. Основные механизмы рекомбинации неравновесных носителей заряда в полупроводниках. Время жизни и длина диффузии неравновесных носителей заряда. Основные причины, влияющие на рекомбинационные процессы в полупроводниковых кристаллах. Вывод основных формул, описывающих процессы рекомбинации.

4.2. Методика определения основных характеристик неравновесных носителей заряда, определение длины диффузии  $l_D$  и времени жизни неравновесных носителей заряда  $\tau$  для различных полупроводниковых материалов. Генерация с помощью светового луча в освещённой части образца неравновесных носителей заряда и их диффузия в не освещённые области. Измерение скорости движения светового луча по образцу. Распределение концентрации неравновесных носителей заряда по образцу в полупроводнике при точечном возбуждении светом. Качество выпрямляющего контакта, режим формовки контакта. Построение графиков и анализ экспериментальных результатов. Определение основных электрофизических параметров полупроводниковых образцов. Оценка погрешности полученных результатов.

#### ***Тема 5. Электронный парамагнитный резонанс в полупроводниках***

5.1. Бесконтактный метод исследования квантоворазмерных эффектов в полупроводниковых и диэлектрических материалах. Основные термины и определения. Орбитальный магнитный момент атома и спин электрона. Эффект Зеемана. Фактор спектроскопического расщепления или  $g$ -фактор. Анизотропия  $g$ -фактора, тонкая структура спектров ЭПР. Сверхтонкая структура спектров ЭПР. Ширина и форма линий ЭПР, спин-спиновая и спин-решеточная релаксации. История развития ЭПР спектроскопии. Техника ЭПР-спектроскопии.

5.2. Настройка спектрометра ЭПР, запись спектров исследуемых образцов. Расчет основных параметров спектров ЭПР в образцах природного алмаза, облученного нейтронами: ширины линии, амплитуды сигнала,



интенсивность линии поглощения. Определение величины фактора спектроскопического расщепления и концентрации парамагнитных центров в исследуемых парамагнетиках с использованием метода сравнения с эталоном Mn в  $Mg_2O_3$ . Расчет формы контура линии ЭПР.

## УЧЕБНО-МЕТОДИЧЕСКАЯ КАРТА УЧЕБНОЙ ДИСЦИПЛИНЫ

Дневная форма получения образования

Номер раздела, темы	Название раздела, темы	Количество аудиторных часов					Иное	Формы контроля Знаний
		Лекции	Практические занятия	Семинарские занятия	Лабораторные занятия	Количество часов УСР		
1	2	3	4	5	6	7		9
<b>1</b>	<b>Вводное занятие</b>				<b>6</b>			
1.1.	Оборудование лаборатории специализации. Техника безопасности при работе на учебном оборудовании. Методические рекомендации по организации и выполнению самостоятельной работы студентов. Сроки проведения контролируемых мероприятий в процессе освоения дисциплины. О рейтинговой десятибалльной шкале оценок по текущему контролю знаний. Рекомендации по контролю качества усвоения знаний и проведению итоговой аттестации. Практические рекомендации по работе на научном оборудовании при выполнении заданий Предварительный устный контрольный опрос по основным физическим свойствам полупроводниковых материалов и структур и методам их экспериментального определения.				6			1. Устный контрольный опрос
<b>2</b>	<b>Изучение спектра фотопроводимости полупроводников</b>				<b>12</b>			
2.1	Взаимодействие света с веществом. Увеличение электропроводности полупроводников под действием электромагнитного излучения. Основные виды поглощения света в полупроводниках: закон Бугера-Ламберта,				6			1. Устный контрольный опрос 2. Отчет по лабораторной

	коэффициент поглощения. Фундаментальное поглощение в прямозонных и непрямозонных полупроводниках. Поглощение света носителями заряда и кристаллической решеткой. Экситоны. Поглощение света примесями. Фотопроводимость. Квантовый выход фотоэффекта. Красная граница внутреннего фотоэффекта. Теоретический расчет красной границы фотопроводимости чистого беспримесного германия при низкой температуре.							работе
2.2	Регистрация спектра поглощения света полупроводниками. Методика измерения спектра фотопроводимости. Принципиальная схема установки для регистрации эффекта фотопроводимости. Основные параметры полупроводникового материала, определяемые из спектра фотопроводимости. Исследование спектров фотопроводимости полупроводниковых кристаллов CdS и CaSe. Построение графиков и анализ экспериментальных результатов. Определение ширины запрещенной зоны по экспериментальным спектрам фотопроводимости. Оценка погрешности полученных результатов.				6			1. Устный контрольный опрос
<b>3</b>	<b>Изучение магниторезистивного эффекта</b>				<b>12</b>			
3.1	Полупроводниковые кристаллы в однородном постоянном магнитном поле. Изменение энергетического спектра. Плотность разрешенных состояний и энергии Ферми в магнитном поле. Представление о классических и квантовых магнитных полях. Кинетические явления в полупроводниках. Эффект Холла, магнито-резистивный эффект. Эффекты Эттинггаузена и Нернста. Кинетические явления в квантовых магнитных полях, при прыжковом и зонном механизмах переноса заряда. Расчет основных электрофизических параметров для металлического и полупроводникового образцов с заданными размерами.				6			1. Устный контрольный опрос
3.2	Техника и методика измерения магнитосопротивления				6			1. Устный

	полупроводниковых образцов с различными свойствами. Техника и методика измерения ЭДС Холла и определения концентрации и подвижности носителей зарядов в зависимости от величины протекаемого через образцы тока. Магнитосопротивление и ЭДС Холла полупроводниковых структур. Построение графиков и анализ экспериментальных результатов. Определение основных электрофизических параметров полупроводниковых образцов. Оценка погрешности полученных результатов.							контрольный опрос 2. Отчет по лабораторной работе
4	<b>Определение коэффициента диффузии и времени жизни неравновесных носителей заряда методом подвижного светового зонда</b>				12			
4.1	Неравновесные носители заряда в полупроводниках. Методы возбуждения полупроводника для получения неравновесных носителей заряда. Основные механизмы рекомбинации неравновесных носителей заряда в полупроводниках. Время жизни и длина диффузии неравновесных носителей заряда. Основные причины, влияющие на рекомбинационные процессы в полупроводниковых кристаллах. Вывод основных формул, описывающих процессы рекомбинации.				6			1. Устный контрольный опрос
4.2	Методика определения основных характеристик неравновесных носителей заряда, определение длины диффузии $l_D$ и времени жизни неравновесных носителей заряда $\tau$ для различных полупроводниковых материалов. Генерация с помощью светового луча в освещенной части образца неравновесных носителей заряда и их диффузия в неосвещенные области. Измерение скорости движения светового луча по образцу. Распределение концентрации неравновесных носителей заряда по образцу в полупроводнике при точечном возбуждении светом. Качество выпрямляющего контакта, режим формовки контакта. Построение графиков и анализ экспериментальных результатов. Определение основных				6			1. Устный контрольный опрос 2. Отчет по лабораторной работе

	электрофизических параметров полупроводниковых образцов. Оценка погрешности полученных результатов.							
<b>5</b>	<b>Электронный парамагнитный резонанс в полупроводниках</b>				<b>12</b>			
5.1	Безконтактный метод исследования квантоворазмерных эффектов в полупроводниковых и диэлектрических материалах. Основные термины и определения. Орбитальный магнитный момент атома и спин электрона. Эффект Зеемана. Фактор спектроскопического расщепления или <i>g</i> -фактор. Анизотропия <i>g</i> -фактора, тонкая структура спектров ЭПР. Сверхтонкая структура спектров ЭПР. Ширина и форма линий ЭПР, спин-спиновая и спин-решеточная релаксации. История развития ЭПР спектроскопии. Техника ЭПР-спектроскопии				6			1. Устный контрольный опрос
5.2.	Настройка спектрометра ЭПР, запись спектров исследуемых образцов. Расчет основных параметров спектров ЭПР в образцах природного алмаза, облученного нейтронами: ширины линии, амплитуды сигнала, интенсивность линии поглощения. Определение величины фактора спектроскопического расщепления и концентрации парамагнитных центров в исследуемых парамагнетиках с использованием метода сравнения с эталоном Mn в Mg <sub>2</sub> O <sub>3</sub> . Расчет формы контура линии ЭПР				6			1. Устный контрольный опрос 2. Отчет по лабораторной работе
	<b>Всего</b>				<b>54</b>			
	<b>Текущая аттестация</b>							<b>Зачет</b>

## ИНФОРМАЦИОННО-МЕТОДИЧЕСКАЯ ЧАСТЬ

### Перечень основной литературы

1. Оджаев, В.Б. Современные методы исследования конденсированных материалов / В.Б. Оджаев, Д.В. Свиридов, И.А. Карпович, В.В. Понарядов – Мн.: БГУ, 2003. – 82 с.
2. Поклонский Н.А., Горбачук Н.И. Основы импедансной спектроскопии композитов: курс лекций / Н.А. Поклонский, Н.И. Горбачук. —Мн.: БГУ, 2005. — 130 с.
3. Лукашевич, М.Г. Изучение гальваномагнитных явлений / М.Г. Лукашевич, А.А. Мазаник, Д.А. Скрипка – Мн.: БГУ, 2004. – 39 с.
4. Исследование переходных процессов в полупроводниковых структурах: пособие / Н.А. Поклонский, Н.И. Горбачук, А.И. Сягло, С.В. Шпаковсикй. — Мн.: БГУ, 2009. — 103 с.
5. Современная кристаллография (в четырех томах) под редакцией Б.К. Вайнштейна – М.: Наука. 1979.
6. Протодьяконов М.М. Электронное строение и физические свойства кристаллов / М.М.Протодьяконов, И.Л. Герловин – Л.: Наука, 1975. – 356 с.
7. Ашкрофт Н., Мермин Н. Физика твердого тела. В 2-х томах. М., 1979.
8. Займан Дж. Принципы теории твердого тела. М.: Мир, 1974. – 472 с.
9. Пасынков В.В., Сорокин В.С. Материалы электронной техники. —СПб.: Лань, 2001.
10. Фистуль, В.И. Введение в физику полупроводников / В.И. Фистуль.— М.: Высшая школа, 1975.— 352 с.
11. Бонч-Бруевич, В.Л. Физика полупроводников / В.Л. Бонч-Бруевич , С.Г. Калашников — М.: Наука, 1990.— 688 с.
12. Орешкин, П.Т. Физика полупроводников и диэлектриков / П.Т. Орешкин.— М.: Высшая школа, 1977.— 448 с.
13. Ландсберг, Г.С. Оптика / Г.С. Ландсберг.— М.: Наука, 1976.— 926 с.
14. Пихтин, А.Н. Оптическая и квантовая электроника / А.Н. Пихтин.— М.: Мир, 2001.— 573 с.
15. Зеегер, К. Физика полупроводников / К. Зеегер.— М.: Мир, 1977.— 615 с.
16. Пилипенко, В. А. Инновационные технологии и оборудование микроэлектронного производства / В.А. Пилипенко, А.П. Достанко, С.М. Аваков, В.И. Плебанович, С.Н. Мельников, Д.А. Голосов, С.М. Завадский, Е.В. Телеш, В.А. Солодуха, И.Б. Петухов, И.Б. Ковальчук, С.Б. Школык, В.Л. Ланин, А.И. Лаппо, А.Н. Петлицкий - Минск: Беларуская навука, 2020. –368 с.

## Перечень дополнительной литературы

1. Блатт Ф. Физика электронной проводимости в твердых телах. М., 1971.
2. Келли А., Гровс Г. Кристаллография и дефекты в кристаллах. М., 1974.
3. Н.Н. Леденцов, В.М. Устинов, В.А. Щукин, П.С. Копьев, Ж.И. Алферов, Д. Бимберг. Гетероструктуры с квантовыми точками: получение, свойства, лазеры //ФТП, т.32, №4, с.385 (1998).
4. В.К. Неволин. Основы туннельно-зондовой нанотехнологии. М.: МИЭТ, 1996 –90 с. (Переработанное и дополненное пособие размещено на сайте: [www.nanotube.ru](http://www.nanotube.ru))
5. В.Л. Бонч-Бруевич, И.П.Звягин, И.В. Карпенко, А.Г.Миронов Сборник задач по физике полупроводников М. 1987
6. Солимар Л., Уолш Д. Лекции по электрическим свойствам материалов. — М.: Мир, 1991. -504 с
7. Тригг Дж. Физика XX века: ключевые эксперименты. — М.: Мир, 1978. - 376 с.;
8. Шульц Ю. Электроизмерительная техника: 1000 понятий для практиков. — М.: Энергоатомиздат, 1989. — 288 с.
9. Tondare, V. N. Three–Dimensional (3D) Nanometrology Based on Scanning Electron Microscope (SEM) Stereophotogrammetry / V. N. Tondare, J. S. Villa-rrubia, A. E. Vladár // Microscopy and Microanalysis. – 2017. – Vol. 23(5). – P. 967–977. – <http://dx.doi.org/10.1017/s1431927617012521>.

### Перечень рекомендуемых средств диагностики и методика формирования итоговой оценки

Для текущего контроля знаний по дисциплине рекомендуется использовать устные контрольные опросы и защиту письменных отчетов о выполнении лабораторных работ. Устные опросы проводятся перед выполнением каждой лабораторной работы и используются для контроля знаний техники безопасности, а также правил эксплуатации оборудования. Оценивание знаний студентов на устных опросах проводится по десятибалльной системе. К выполнению лабораторных работ студенты могут быть допущены только при положительной оценке не ниже четырех баллов.

Оценка выполнения лабораторных работ проводится на основе защиты письменных отчетов о выполнении лабораторных работ. Оценивание знаний студентов проводится по десятибалльной системе. Лабораторная работа считается выполненной только при положительной оценке за защиту отчета. Оценка текущего контроля знаний рассчитывается как среднее арифметическое оценок за все выполненные работы. При неявке на занятия по уважительной причине преподаватель самостоятельно по согласованию со студентом определяет дату и время выполнения пропущенной работы в течении учебного семестра. При неявке на занятия по неуважительной причине заведующий кафедрой на основании письменного заявления студента рассматривает возможность выполнения пропущенной работы. В

случае наличия такой возможности заведующий кафедрой по согласованию с преподавателем определяет дату и время выполнения пропущенной работы в течении учебного семестра. При отсутствии возможности проведения занятий в течении учебного семестра решением кафедры оформляется недопуск обучающегося к экзаменационной сессии, и заведующий кафедрой по согласованию с преподавателем определяет дату и время выполнения пропущенной работы после окончания учебного семестра.

Текущая аттестация проводится в форме зачета. К зачету допускаются студенты, выполнившие все индивидуально определенные для них лабораторные работы. По решению преподавателя (группы преподавателей) при оценке текущей успеваемости 7 (семь) баллов и более определение результатов итоговой аттестации по дисциплине может проводиться на основании результатов текущего контроля знаний без проведения дополнительного опроса на зачете. При этом явка студента на зачет является обязательной.

### *Рекомендуемые вопросы для устного контрольного опроса*

#### 1. Техника лабораторных работ:

Основное назначение измерительных приборов.

Оптимальный выбор режимов измерений.

Разрешающая способность оптических приборов.

Необходимость модуляции светового луча при измерении фотопроводимости.

Принцип работы монохроматора.

Принцип работы осциллографа.

#### 2. Изучение спектра фотопроводимости полупроводников:

Основные виды поглощения света полупроводниками.

Неравновесные носители заряда.

Примесная и собственная проводимость полупроводника.

Определение ширины запрещенной зоны полупроводника и глубины залегания примесного уровня в запрещенной зоне полупроводника по спектрам его фотопроводимости.

#### 3. Изучение магниторезистивного эффекта:

Зависимость удельного сопротивления полупроводника от величины приложенного поляризирующего магнитного поля.

Поведение заряженной частицы в магнитном поле.

Основные условия, необходимые для наблюдения эффекта Холла.

Основные отличительные особенности наблюдения магниторезистивного эффекта в полупроводниках и эффекта Холла.



4. Определение коэффициента диффузии и времени жизни неравновесных носителей заряда методом подвижного светового зонда:

Основные механизмы генерации и рекомбинации неравновесных носителей заряда в полупроводниках.

Модуляция светового луча и изменение скорости скольжения луча по поверхности полупроводника.

Основные требования к качеству поверхности полупроводника.

5. Электронный парамагнитный резонанс полупроводниковых материалов:

Орбитальный магнитный момент атома и спин электрона.

Эффект Зеемана.

Фактор спектроскопического расщепления или  $g$ -фактор. Анизотропия  $g$ -фактора, тонкая структура спектров ЭПР. Сверхтонкая структура спектров ЭПР.

Ширина и форма линий ЭПР.

Спин-спиновая и спин-решеточная релаксации.

История развития ЭПР спектроскопии.

Техника ЭПР спектроскопии.

### ***Рекомендуемые методические указания по оформлению отчета по лабораторной работе***

Отчет по лабораторной работе – технический документ, который содержит систематизированные данные о лабораторной работе, описывает теорию, используемую в лабораторной работе, ход лабораторной работы, расчеты и результаты, полученные в ходе лабораторной работы. Отчет составляется по результатам выполнения студентом лабораторной работы. Отчет по лабораторной работе подлежит обязательной проверке, осуществляемой преподавателем кафедры. Структурными элементами отчета по лабораторной работе являются:

- титульный лист, на котором обязательно приводятся следующие данные: наименование вышестоящей организации; наименование учебного заведения; кафедра, проводящая лабораторные работы; номер лабораторной работы; название лабораторной работы; данные о группе и студенте, выполнявшего лабораторную работу; данные о преподавателе, проверяющего отчет студента по лабораторной работе;
- цель работы;
- теоретические сведения;
- расчетно-графическая часть;
- выводы по работе, которые должны отражать факт достижения цели лабораторной работы.
- список используемой литературы.

## **Описание инновационных подходов и методов к преподаванию учебной дисциплины**

При организации образовательного процесса используются *проблемно-аналитический метод и приемы развития критического мышления*, которые представляют собой систему, формирующую навыки работы с информацией в процессе изучения и представления материала, включающую понимание поставленной цели, анализ особенностей рассматриваемого явления, построение физической модели, получение выражений для количественного описания и рассмотрение путей практического выполнения изучаемой темы.

## **Методические рекомендации по организации самостоятельной работы студентов**

При изучении учебной дисциплины рекомендуется использовать следующие формы самостоятельной работы:

- изучение электронных материалов по дисциплине, представленных в разделе info сайта физического факультета ([www/physics.bsu.by/info](http://www/physics.bsu.by/info));
- использование информационного ресурса [vk.com/kafedrafizikipr](http://vk.com/kafedrafizikipr): размещение учебно-методических материалов, включая, вопросы для подготовки к зачету, список рекомендуемой литературы.
- поиск и ознакомление с литературой и электронными источниками по изучаемой проблеме курса.

## **Примерный перечень вопросов к зачету**

1. Простейшие кристаллографические структуры элементарных полупроводников и полупроводниковых соединений. Построение решеток типа алмаза, бинарных соединений типа вюрцита и сфалерита.
2. Наночастицы с гранецентрированной решеткой.
3. Основные виды химической связи в материалах.
4. Монокристаллы, поликристаллы и аморфные вещества. Изоморфизм и полиморфизм.
5. Строение реального кристалла. Идеальный и реальный кристалл. Точечные дефекты в атомной структуре кристалла.
6. Дислокации. Зависимость физико-химических свойств кристаллов от реальной структуры.
7. Расщепление энергетических уровней атомов в энергетические зоны при образовании твердого тела. Ширина зоны разрешенных энергий

- и число уровней в ней. Зонные структуры проводника, полупроводника и диэлектрика.
8. Статистики носителей заряда в конденсированных средах. Понятие различимости частиц. Статистика Максвелла-Больцмана. Статистика Бозе-Эйнштейна. Статистика Ферми-Дирака.
  9. Физический смысл уровня Ферми. Электронный газ в состоянии вырождения.
  10. Физико-химические особенности наноструктурированных материалов. Виды наноматериалов, их свойства и применение.
  11. Общие сведения о проводниках. Типичные свойства металлов. Физическая природа электропроводности металлов.
  12. Классическая теория электропроводности Друде-Лоренца. Экспериментальные законы и электронная теория.
  13. Зависимость удельного сопротивления металлических проводников от температуры. История открытия сверхпроводимости. Физическая природа сверхпроводимости. Высокотемпературные сверхпроводящие материалы.
  14. Влияние примесей на удельное сопротивление металлов. Правило Маттиссена. Определение степени чистоты металлов от примесей.
  15. Сопротивление тонких металлических пленок. Размерные эффекты.
  16. Квантово-механическая природа электрона. Волна де-Бройля. Поведение подвижных носителей заряда (электронов и дырок) в наноразмерных структурах.
  17. Три группы фундаментальных явлений: квантовое ограничение, баллистический транспорт и туннелирование.
  18. Собственные и примесные полупроводники. Примеси в ковалентных полупроводниках.
  19. Основные и неосновные носители заряда. Соотношение между концентрациями электронов и дырок в невырожденном полупроводнике при термодинамическом равновесии.
  20. Зависимость концентрации носителей заряда в полупроводниках от температуры.
  21. Механизмы рассеяния и подвижность носителей заряда в полупроводниках. Температурная зависимость электропроводности полупроводников.
  22. Влияния света на полупроводниковые материалы. Основные механизмы поглощения света в полупроводниках.
  23. Неравновесные носители заряда. Рекомбинационные ловушки заряда, ловушки захвата.
  24. Время жизни, диффузионная длина неравновесных носителей заряда и факторы, от которых они зависят.
  25. Оптические и фотоэлектрические явления в полупроводниках. Явление фотопроводимости. Прямые и не прямые оптические переходы.

26. Основные виды люминесценции полупроводников. Фотоэлектромагнитные явления. Эффект Кикоина-Носкова.
27. Основные свойства диэлектриков. Механизмы поляризации: мгновенные и замедленные. Поляризуемость диэлектрика и ее зависимость от частоты.
28. Токи смещения и электропроводность диэлектриков. Удельное объемное и удельное поверхностное сопротивления диэлектриков. Потери в диэлектриках.
29. Пассивные и активные диэлектрики, их классификация.
30. Общие сведения о магнетизме. Поведение твердых тел в магнитном поле. Намагничивание. Зависимость магнитной индукции от напряженности магнитного поля.
31. Классификация веществ по магнитным свойствам. Диамагнетики, ферромагнетики, парамагнетики, антиферромагнетики, ферримагнетики. Магнетизм в тонких пленках.
32. Природа ферромагнитного состояния. Магнитная анизотропия; кривая намагничивания; магнитный гистерезис; магнитная проницаемость; магнитострикция.

## ПРОТОКОЛ СОГЛАСОВАНИЯ УЧЕБНОЙ ПРОГРАММЫ УВО

<p>Название учебной дисциплины, с которой требуется согласование</p>	<p>Название кафедры</p>	<p>Предложения об изменениях в содержании учебной программы учреждения высшего образования по учебной дисциплине</p>	<p>Решение, принятое кафедрой, разработавшей учебную программу (с указанием даты и номера протокола)</p>
<p>Измерение параметров структур в электронной промышленности</p>	<p>Кафедра физики полупроводников и нанoeлектроники</p>	<p>Нет</p>	<p>Оставить содержание учебной дисциплины без изменения (протокол № 9 от 06.04.2021)</p>

