

Белорусский государственный университет

**УТВЕРЖДАЮ**  
Проректор по учебной работе  
и организационным инновациям  
О.Н. Здрок  
«30» \_\_\_\_\_ 2021 г.  
Регистрационный № УД- 9814/уч.



**ЛАБОРАТОРИЯ СПЕЦИАЛИЗАЦИИ  
«ЭЛЕКТРОННЫЕ И ОПТИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА МАТЕРИАЛОВ  
МИКРО- И НАНОЭЛЕКТРОНИКИ»**

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

1-31 04 07 Физика наноматериалов и нанотехнологий

Минск, 2021

Учебная программа составлена на основе Образовательного стандарта ОСВО 1-31 04 07-2013, утвержденного и введенного в действие постановлением Министерства образования Республики Беларусь от 30.08.2013 № 88; учебных планов № G31-218/уч., № G31и-219/уч. от 20.02.2018.

#### **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 полупроводников и наноэлектроники Белорусского государственного университета;

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

#### **РЕЦЕНЗЕНТ:**

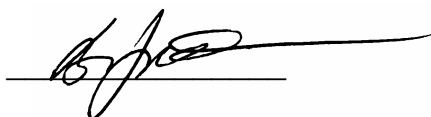
**С. П. Сернов** — доцент кафедры интеллектуальных систем приборостроительного факультета Белорусского национального технического университета, кандидат физико-математических наук, доцент.

#### **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 Лаборатория специализации «Электронные и оптические свойства материалов микро- и наноэлектроники» разработана для студентов специальности: 1-31 04 07 «Физика наноматериалов и нанотехнологий» по специализации 1-31 04 07-02 «Наноэлектроника» 1 степени обучения.

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

**Цель** учебной дисциплины Лаборатория специализации «Электронные и оптические свойства материалов микро- и наноэлектроники» — практическое освоение студентами физических методов исследования электрофизических и оптических свойств полупроводниковых материалов, используемых в электронике.

### **Задачи учебной дисциплины:**

- раскрыть физический смысл основных электрофизических и оптических свойств материалов микро- и наноэлектроники;
- показать возможности методов исследования при изучении основных свойств различных материалов полупроводниковой электроники,
- научить студента видеть области применения методов экспериментального исследования при решении конкретных задач.
- сформировать навыки творческого подхода, как в научно-исследовательской, так и в инженерной деятельности.
- дать обзор основных методов измерения и контроля параметров материалов и структур, используемых в электронике, и методические руководства по выбору и практической реализации различных методов измерений.
- показать причины возникновения различных составляющих погрешности при измерении параметров полупроводниковых структур, и установить взаимосвязь погрешности с объектом измерения.

Исследования в области наноразмерных электронных структур для развития нанотехнологий опираются на знания и достижения в классической физике полупроводников и предъявляют повышенные требования к фундаментальной подготовке специалистов. Это, в свою очередь, требует наличия у них практических навыков работы с экспериментальным оборудованием для изучения важнейших свойств материалов электронной техники. Поэтому выполнение программы учебной дисциплины Лаборатория специализации «Электронные и оптические свойства материалов микро- и наноэлектроники» предусматривает постановку как исследовательских, так и инженерных задач по изучению этих свойств на базе учебно-научного оборудования, имеющегося в наличии на кафедре. Некоторые вопросы студенты должны изучить самостоятельно при работе с рекомендуемыми учебниками и учебными пособиями.

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

Учебная дисциплина Лаборатория специализации «Электронные и оптические свойства материалов микро- и наноэлектроники» дает представление о современных и традиционных средствах измерения параметров полупроводниковых материалов, используемых в микроэлектронике и наноэлектронике, их электрофизических, оптических и магнитных свойствах, о возможных механизмах управления этими свойствами.

Учебная дисциплина Лаборатория специализации «Электронные и оптические свойства материалов микро- и наноэлектроники» относится к циклу дисциплин специализации компонента учреждения высшего образования, *основана* на знаниях и представлениях, заложенных в общих курсах атомной физики, оптики, теоретической механики, и взаимодействует с дисциплинами «Материалы микро- и наноэлектроники», «Квазичастицы в кристаллах и низкоразмерных системах».

### **Требования к компетенциям**

Освоение учебной дисциплины Лаборатория специализации «Электронные и оптические свойства материалов микро- и наноэлектроники» должно обеспечить формирование следующих академических, социально-личностных и профессиональных компетенций.

#### ***Требования к академическим компетенциям специалиста***

Специалист должен:

АК-1. Уметь применять базовые научно-теоретические знания для решения теоретических и практических задач.

АК-2. Владеть системным и сравнительным анализом.

АК-3. Владеть исследовательскими навыками.

АК-4. Уметь работать самостоятельно.

АК-7. Иметь навыки, связанные с использованием технических устройств, управлением информацией и работой с компьютером.

АК-8. Иметь лингвистические навыки (устная и письменная коммуникация).

АК-9. Уметь учиться, повышать свою квалификацию в течение всей жизни.

#### ***Требования к социально-личностным компетенциям специалиста***

Специалист должен:

СЛК-1. Обладать качествами гражданственности.

СЛК-2. Быть способным к социальному взаимодействию.

СЛК-3. Обладать способностью к межличностным коммуникациям.

СЛК-4. Владеть навыками здорового образа жизни.

СЛК-5. Быть способным к критике и самокритике (критическое мышление).

СЛК-6. Уметь работать в команде.

### ***Требования к профессиональным компетенциям специалиста***

Специалист должен быть способен:

ПК-1. Применять знания теоретических и экспериментальных основ физики наноматериалов и нанотехнологий, методов исследования физических объектов, методов измерения физических величин, методов автоматизации эксперимента, методов планирования, организации и ведения научно-производственной, научно-педагогической, производственно-технической, опытно-конструкторской работы.

ПК-3. Пользоваться компьютерными методами сбора, хранения и обработки информации, системами автоматизированного программирования, научно-технической и патентной литературой.

ПК-6. Использовать новейшие открытия в естествознании, методы научного анализа, информационные образовательные технологии, физические основы современных технологических процессов, включая нанотехнологии.

ПК-8. Пользоваться государственными языками Республики Беларусь и иными иностранными языками как средством делового общения.

ПК-9. Пользоваться глобальными информационными ресурсами.

ПК-10. Реализовывать методы защиты производственного персонала и населения в условиях возникновения аварий, катастроф, стихийных бедствий и обеспечения радиационной безопасности при осуществлении научной, производственной и педагогической деятельности.

ПК-11. Осуществлять поиск, систематизацию и анализ информации по перспективным направлениям развития отрасли, инновационным технологиям, проектам и решениям.

В результате освоения учебной дисциплины студент должен:

#### **знать:**

- основы физики полупроводников и полупроводниковых приборов;
- явления переноса заряда в материалах с различным удельным сопротивлением;
- методы контроля качества материалов электронной техники;
- конструктивные особенности измерительного оборудования;
- принципы проведения различных видов измерений;

#### **уметь:**

- прогнозировать электрические, оптические и магнитные свойства новых материалов, исходя из данных об их составе и структуре;
- проводить различные виды измерений;
- правильно подготовить образцы для измерений,

#### **владеть:**

- базовыми принципами расчета электрофизических параметров новых материалов;
- методами оценки и расчета погрешностей, вносимых при измерениях;

- теоретическими основами переноса заряда в полупроводниковых структурах.

При преподавании дисциплины рекомендуется применять активные методы обучения, основу которых составляют технологии проблемного и контекстного обучения, реализуемые на лабораторных занятиях, а также рейтинговая система оценки знаний.

### **Структура учебной дисциплины**

Дисциплина изучается в 7 семестре. Всего на изучение учебной дисциплины Лаборатория специализации «Электронные и оптические свойства материалов микро- и наноэлектроники» отведено:

– для очной формы получения высшего образования– 150 часов, в том числе 80 аудиторных часов, из них: лабораторные занятия - 80 часов.

Трудоемкость учебной дисциплины составляет 4 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 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

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

2.1. Взаимодействие света с веществом. 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. Теоретический расчет красной границы фотопроводимости чистого беспримесного германия при низкой температуре.

2.2. Спектр 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 Эттинггаузена и Нернста. Кинетические явления в квантовых магнитных полях, при прыжковом и зонном механизмах переноса заряда.

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.

#### ***Тема 5. Электролюминесценция полупроводников***

5.1. Явление электролюминесценции как метод контроля и характеристики полупроводников. Тепловое излучение в видимой области спектра. Отличительные стороны люминесценции от различных видов рассеяния света, отражения света, параметрического преобразования света, тормозного излучения и излучения Вавилова-Черенкова. Основные физические закономерности излучательной рекомбинации, определяющие свойства и параметры полупроводниковых светоизлучающих диодов. Основные механизмы излучательной рекомбинации: межзонная, экситонная, примесная, излучательная рекомбинация электрона и дырки на ловушке, донорно-акцепторная межпримесная рекомбинация. Люминесцентные методы контроля полупроводников

5.2. Спектры электролюминесценции светодиодов на основе полупроводниковых соединений и твердых растворов. Экспериментальная регистрация спектров люминесценции. Составление таблиц экспериментальных результатов. Определение ширины запрещенной зоны. Погрешность, вносимая при определении ширины запрещенной зоны полупроводника.

#### ***Тема 6. Фотоэлектромагнитный эффект в полупроводниках***

6.1. Явление фотоэлектромагнитного эффекта (ФМЭ) и возможности его применения. Определение диффузионной длины, времени жизни неосновных носителей заряда и скорости поверхностной рекомбинации в германии, содержащем точечные дефекты структуры. Фотомагнитная ЭДС, условия ее наблюдения и сопутствующие эффекты. Действие магнитного поля на



диффузионные токи электронов и дырок, приводящее к возникновению магнитодиффузионных составляющих токов в освещенном полупроводнике.

6.2. Расчет интенсивности света от светодиода с использованием результатов измерений ФМЭ на различных образцах. Определение скорости поверхностной рекомбинации на полированной поверхности образцов. Определение длины диффузии  $l_D$  и времени жизни неравновесных носителей заряда  $\tau$  в германии, легированном золотом. Построение графиков и анализ экспериментальных результатов. Определение основных электрофизических параметров полупроводниковых образцов. Оценка погрешности полученных результатов. Проведение сопоставительного анализа полученных результатов с соответствующими выводами.

### ***Тема 7. Электронный парамагнитный резонанс в полупроводниковых материалах***

7.1. 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  $g$ -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.

7.2. 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.

7.3. Экспериментальное исследование влияния параметров ионной имплантации на парамагнитные свойства полимерных пленок полиэтилентерефталата. Запись спектров ЭПР полимерных пленок, облученных ионами фосфора с энергией 60 кэВ в диапазоне доз 100 мкКл – 2000 мкКл. Расчет основных параметров спектров ЭПР, построение графиков их зависимости от величины дозы имплантируемых ионов. Оценка погрешности измерений. Анализ полученных результатов, основные выводы.

## УЧЕБНО-МЕТОДИЧЕСКАЯ КАРТА УЧЕБНОЙ ДИСЦИПЛИНЫ

Дневная форма получения образования

Номер раздела, темы, занятия	Название раздела, темы, занятия; перечень изучаемых вопросов	Количество аудиторных часов				Количество часов УСР	Иное	Формы контроля Знаний
		лекции	Практические занятия	Семинарские Занятия	Лабораторные занятия			
1	2	3	4	5	6	7	8	9
<b>1</b>	<b><i>Вводное занятие</i></b>				<b>2</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				3			Устный контрольный опрос
<b>2</b>	<b><i>Изучение спектра фотопроводимости полупроводников</i></b>				<b>12</b>			

2.1	Взаимодействие света с веществом. 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. Теоретический расчет красной границы фотопроводимости чистого беспримесного германия при низкой температуре				6			1. Устный контрольный опрос 2. Отчет по лабораторной работе
2.2	Спектр 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 2. Отчет по лабораторной работе
<b>3</b>	<b><i>Изучение магниторезистивного эффекта</i></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				6			1. Устный контрольный опрос 2. Отчет по лабораторной работе

	полупроводниках. Эффект Холла, магниторезистивный эффект. Эффекты Эттингаузена и Нернста. Кинетические явления в квантующих магнитных полях, при прыжковом и зонном механизмах переноса заряда.						
3.2	Техника эксперимента 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.				6		1. Устный контрольный опрос 2. Отчет по лабораторной работе
4	<b><i>Определение коэффициента диффузии и времени жизни неравновесных носителей заряда методом подвижного светового зонда</i></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				6		1. Устный контрольный опрос 2. Отчет по лабораторной работе

	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.				6		1. Устный контрольный опрос 2. Отчет по лабораторной работе
<b>5</b>	<b><i>Электролюминесценция полупроводников</i></b>				<b>12</b>		
5.1	Явление электролюминесценции как метод контроля и характеристики полупроводников. Тепловое излучение в видимой области спектра. Отличительные стороны люминесценции от различных видов рассеяния света, отражения света, параметрического преобразования света, тормозного излучения и излучения Вавилова-Черенкова. Основные физические закономерности излучательной рекомбинации, определяющие свойства и параметры полупроводниковых светоизлучающих диодов. Основные механизмы излучательной рекомбинации: межзонная,				6		1. Устный контрольный опрос 2. Отчет по лабораторной работе

	экситонная, примесная, излучательная рекомбинация электрона и дырки на ловушке, донорно-акцепторная межпримесная рекомбинация. Люминесцентные методы контроля полупроводников						
5.2	Спектры электролюминесценции светодиодов на основе полупроводниковых соединений и твердых растворов. Экспериментальная регистрация спектров люминесценции. Составление таблиц экспериментальных результатов. Определение ширины запрещенной зоны. Погрешность, вносимая при определении ширины запрещенной зоны полупроводника.				6		1. Устный контрольный опрос 2. Отчет по лабораторной работе
<b>6</b>	<b><i>Фотоэлектромагнитный эффект в полупроводниках</i></b>				<b>12</b>		
6.1	Явление фотоэлектромагнитного эффекта (ФМЭ) и возможности его применения. Определение диффузионной длины, времени жизни неосновных носителей заряда и скорости поверхностной рекомбинации в германии, содержащем точечные дефекты структуры. Фотомагнитная ЭДС, условия ее наблюдения и сопутствующие эффекты. Действие магнитного поля на диффузионные токи электронов и дырок, приводящее к возникновению магнитодиффузионных составляющих токов в освещенном полупроводнике.				6		1. Устный контрольный опрос 2. Отчет по лабораторной работе
6.2	Расчет интенсивности света от светодиода с использованием результатов измерений ФМЭ на различных образцах. Определение скорости				6		1. Устный контрольный опрос 2. Отчет по

	поверхностной рекомбинации на полированной поверхности образцов. Определение длины диффузии $l_D$ и времени жизни неравновесных носителей заряда $\tau$ в германии, легированном золотом. Построение графиков и анализ экспериментальных результатов. Определение основных электрофизических параметров полупроводниковых образцов. Оценка погрешности полученных результатов. Проведение сопоставительного анализа полученных результатов с соответствующими выводами.							лабораторной работе
7	<b><i>Электронный парамагнитный резонанс в полупроводниковых материалах</i></b>				18			
7.1	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 $g$ -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-спетроскопии.				6			1. Устный контрольный опрос 2. Отчет по лабораторной работе
7.2	Настройка спектрометра ЭПР, запись спектров исследуемых образцов. Расчет основных параметров спектров ЭПР в облученных нейтронами образцах природного алмаза. Проведение сравнительного анализа ширины				6			1. Устный контрольный опрос 2. Отчет по лабораторной работе

	линии, амплитуды сигнала, интенсивности линии поглощения для различных образцов. 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.						
7.3	Экспериментальное исследование влияния параметров ионной имплантации на парамагнитные свойства полимерных пленок полиэтилентерефталата. Запись спектров ЭПР полимерных пленок, облученных ионами фосфора с энергией 60 кэВ в диапазоне доз 100 мкКл – 2000 мкКл. Расчет основных параметров спектров ЭПР, построение графиков их зависимости от величины дозы имплантируемых ионов. Оценка погрешности измерений. Анализ полученных результатов, основные выводы.				6		1. Устный контрольный опрос 2. Отчет по лабораторной работе
	<b>ВСЕГО</b>				<b>80</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 гальваноманнитных 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. Протоdjяконов М.М. Электронное строение и физические свойства кристаллов / М.М.Протоdjяконов, 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. Сквайрс Дж. Практическая физика. — М.: Мир, 1971. -248 с.

2. Солимар Л., Уолш Д. Лекции по электрическим свойствам материалов. — М.: Мир, 1991. -504 с.
3. Тригг Дж. Физика XX века: ключевые эксперименты. — М.: Мир, 1978. - 376 с.;
4. Решающие эксперименты в современной физике. — М.: Мир, 1974. -160 с.
5. Фистуль В.И. Введение в физику полупроводников. М.: Высшая школа, 1975.
6. Шабалин С. А. Прикладная метрология в вопросах и ответах. — М.: Изд-во стандартов, 1990. -192 с.
7. Шалимова К.В, Физика полупроводников. М.: Энергия, 1976.
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. Villarrubia, 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 поляризующего 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. Основные пути образования кристаллов. Значение познания законов кристаллографии для развития материаловедения в электронике и технике.
2. Важнейшие свойства кристаллов. Кристаллическая и пространственная решетки. Элементы трансляции.
3. Простейшие кристаллографические структуры элементарных полупроводников и полупроводниковых соединений. Построение решеток типа алмаза, бинарных соединений типа вюрцита и сфалерита.
4. Наночастицы с гранецентрированной решеткой.
5. Основные виды химической связи в материалах.
6. Монокристаллы, поликристаллы и аморфные вещества. Изоморфизм и полиморфизм.
7. Строение реального кристалла. Идеальный и реальный кристалл. Точечные дефекты в атомной структуре кристалла.
8. Дислокации. Зависимость физико-химических свойств кристаллов от реальной структуры.
9. 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.

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

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

## ПРОТОКОЛ СОГЛАСОВАНИЯ УЧЕБНОЙ ПРОГРАММЫ УВО

Название дисциплины, с которой требуется согласование	Название Кафедры	Предложения об изменениях в содержании учебной программы по изучаемой учебной дисциплине	Решение, принятое кафедрой, разработавшей учебную программу (с указанием даты и номера протокола)
Электронная теория полупроводников	Кафедра физики полупроводников и наноэлектроники	Оставить содержание учебной дисциплины без изменения	Рекомендовать к утверждению учебную программу в представленном варианте (протокол № 9 от 06.04.2021 г.)
Квазичастицы в кристаллах и низкоразмерных системах	Кафедра физики полупроводников и наноэлектроники	Оставить содержание учебной дисциплины без изменения	Рекомендовать к утверждению учебную программу в представленном варианте (протокол № 9 от 06.04.2021 г.)



## ДОПОЛНЕНИЯ И ИЗМЕНЕНИЯ К УЧЕБНОЙ ПРОГРАММЕ УВО

на \_\_\_\_/\_\_\_\_ учебный год

№№ пп	Дополнения и изменения	Основание

Учебная программа пересмотрена и одобрена на заседании кафедры  
(протокол № \_\_\_\_ от \_\_\_\_\_ 20\_\_ г.)

Заведующий кафедрой

физики полупроводников и наноэлектроники

д.ф.-м.н., профессор

\_\_\_\_\_ В.Б. Оджаев

УТВЕРЖДАЮ

Декан физического факультета

к.ф.-м.н., доцент

\_\_\_\_\_ М.С. Тиванов