

БЕЛОРУССКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ

УТВЕРЖДАЮ
Проректор по учебной работе и
образовательным инновациям

«30» июля 2021 г.
Регистрационный № УД- 9869/уч.



ЭЛЕКТРОННАЯ ТЕОРИЯ ПОЛУПРОВОДНИКОВ

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 и учебных планов №G31-218/уч. от 20.02.2018, №G31и-219/уч. от 20.02.2018

СОСТАВИТЕЛЬ:

М.Г. Лукашевич — профессор кафедры физики полупроводников и наноэлектроники Белорусского государственного университета, доктор физико-математических наук, профессор;

РЕЦЕНЗЕНТЫ:

Ю.А. Бумай, доцент кафедры экспериментальной и теоретической физики БНТУ, кандидат физико–математических наук, доцент

А.В. Мазаник, заведующий кафедрой энергофизики Белорусского государственного университета, кандидат физико–математических наук, доцент

РЕКОМЕНДОВАНА К УТВЕРЖДЕНИЮ:

Кафедрой физики полупроводников и наноэлектроники (протокол № 9 от 06.04.2021 г.);

Научно-методическим Советом БГУ (протокол № 7 от 30.06.2021 г.).

Заведующий кафедрой



В.Б. Оджаев

ПОЯСНИТЕЛЬНАЯ ЗАПИСКА

Программа учебной дисциплины "Электронная теория полупроводников" разработана для специальности 1-31 04 07 Физика наноматериалов и нанотехнологий.

Цели и задачи учебной дисциплины

Цель учебной дисциплины — обучение студентов основам физики электронных состояний и процессов в полупроводниковых материалах.

Задачи учебной дисциплины:

1. Развитие знаний в области физики энергетического спектра электронов в полупроводниковых материалах, его изменении при наличии внешних электрического и магнитного полей и проявлении размерных эффектов.

2. Последовательное углубление полученных знаний и формирование исследовательских навыков применительно к физике электронного материаловедения.

3. Формирование у студентов представлений об основах создания полупроводниковых материалов с заранее заданными характеристиками для целенаправленного использования при производстве полупроводниковых приборов разной степени интеграции.

Место учебной дисциплины в системе подготовки специалиста с высшим образованием.

Проектирование и изготовление современных микро- и наноэлектронных устройств невозможно без глубокого понимания энергетического спектра электронов в элементарных полупроводниках и соединениях, обладающих полупроводниковыми свойствами, его изменении при наложении на них таких внешних воздействий как электрическое и магнитное поле, проявления в их классических и квантовых размерных эффектов. Это особенно актуально в условиях непрерывного уменьшения линейных размеров элементов интегральных микросхем. Глубокое понимание основ электронной теории полупроводников является необходимым условием успешной профессиональной деятельности специалиста, имеющего квалификацию «Физик. Инженер» и работающего в области микро- и наноэлектроники.

В дисциплине рассматриваются процессы формирования энергетического спектра электронов в кристалле в приближении энергетического спектра свободных и связанных электронов, энергетического спектра электронов локализованных состояний как мелких, так и глубоких. Излагаются физические основы процессов электронных процессов переноса во внешних электрическом и магнитном полях, гальваномагнитные явления и проявление классических и квантовых размерных эффектов. Кратко рассматриваются вопросы спиновой зависимости электронных процессов переноса, анализируются основные эффекты спинтроники. Рассматриваются также основные теоретические методы расчета энергетического спектра электронов и экспериментальные методы определения основных характеристик зонной структуры полупроводников и характеристик электронов.

Учебная дисциплина относится к дисциплинам специализации компонента учреждения высшего образования.

Связи с другими учебными дисциплинами (включая учебные дисциплины компонента учреждения высшего образования, дисциплины специализации): дисциплина основана на базовых знаниях и представлениях, заложенных во время изучения дисциплин «Электричество и магнетизм», «Физика атома и атомных явлений». Она является базовой для последующих дисциплин «Физика полупроводниковых приборов: неравновесные процессы», «Фундаментальные основы нанотехнологий».

Требования к компетенциям

Освоение учебной дисциплины "Электронная теория полупроводников" должно обеспечить формирование следующих компетенций:

академические компетенции:

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);

социально-личностные компетенции:

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;

профессиональные компетенции:

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-5. Применять полученные знания фундаментальных положений физики, экспериментальных, теоретических и компьютерных методов исследования, планирования, организации и ведения научно-технической и научно-педагогической работы.

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.

ПК-12. Определять цели инноваций и способы их достижения.

ПК-13. Применять методы анализа и организации внедрения инноваций в научно-производственной, научно-педагогической и научно-технической деятельности.

В результате освоения учебной дисциплины студент должен:

знать:

- основы физики зонного энергетического спектра электронов в полупроводниках,
- физические основы влияния внешних электрического и магнитного полей на электронные состояния и процессы в полупроводниках,
- Физические основы проявления размерных и спиновых эффектов в электронных свойствах полупроводников;

уметь:

- анализировать температурные зависимости проводимости полупроводников,
- анализировать электростатические и магнитостатические зависимости основных эффектов, используемых в полупроводниковой электронике;
- прогнозировать проявление размерных и спиновых эффектов в электрических и оптических свойствах полупроводников;

владеть:

- основами теоретического и экспериментального определения электронных характеристик полупроводников
- базовыми принципами моделирования проявления размерных и спиновых эффектов в системах с полупроводниковыми свойствами.

Структура учебной дисциплины

Дисциплина изучается в 7 семестре. Всего на изучение учебной дисциплины «Электронная теория полупроводников» отведено:

– для очной формы получения высшего образования — 56 часов, в том числе 28 аудиторных часов, из них: лекции — 24 часа, аудиторный контроль управляемой самостоятельной работы — 4 часа.

Трудоемкость учебной дисциплины составляет 1.5 зачетные единицы.

Форма текущей аттестации — зачет.

СОДЕРЖАНИЕ УЧЕБНОГО МАТЕРИАЛА

Раздел 1. Основы электронной теории кристаллических твердых тел

Тема 1.1 Динамические и статистические свойства электронов

Исторические этапы развития электронной теории твердых тел. Классические представления Друде-Лоренца и квантовые Зоммерфельда. Представления о квазичастицах - основной подход к описанию конденсированного состояния вещества. Статистические свойства электронов. Энергетический спектр связанного электрона. Закон дисперсии для свободных электронов. Плотность разрешенных электронных состояний.

Тема 1.2 Уравнение Шредингера для кристалла

Электроны в периодическом поле кристаллической решетки. Уравнение Шредингера для кристалла. Адиабатическое и одноэлектронное приближения. Периодичность поля кристаллической решетки. Оператор трансляции и трансляционное свойство волновой функции. Теорема Блоха. Волновая функция для электрона в идеальном кристалле.

Тема 1.3 Основные характеристики электрона в кристалле

Основные характеристики электрона в периодическом поле решетки. Квазиимпульс, эффективная масса. Скорость и ускорение электрона в периодическом поле решетки кристалла. Понятие о зонах Бриллюэна. Зоны Бриллюэна для плоской квадратной решетки и трехмерных упорядоченных структур.

Тема 1.4 Решение уравнения Шредингера для кристалла

Решение уравнения Шредингера для электрона в периодическом поле в приближении слабой и сильной связи. Металлы, полупроводники и диэлектрики с точки зрения зонной теории.

Тема 1.5 Основные теоретические и экспериментальные методы определения зонной структуры энергетического спектра электронов

Основные теоретические методы расчета и экспериментальные методы определения зонной структуры кристаллических твердых тел. Зонная структура важнейших материалов твердотельной электроники: алмаз, кремний, германий, серое олово, бинарные и многокомпонентные полупроводниковые материалы. Способы управления параметрами зонной структуры твердых тел.

Тема 1.6 Локализованные мелкие и глубокие состояния в кристалле

Локализованные электронные состояния в кристалле. Мелкие и глубокие примесные состояния в кристалле. Примесная зона. Поверхностные состояния.

Тема 1.7 Переход диэлектрик-металл

Основные механизмы переноса электронов в полупроводниках: зонный, прыжковый, режим слабой локализации. Переходы диэлектрик-металл по Мотту и Андерсону.

Раздел 2. Полупроводники в электрическом поле

Тема 2.1 Разогрев электронов

Полупроводниковые кристаллы в электрическом поле. Эффекты Зинера и Френкеля. Разогрев электронов в электрическом поле. Понятие об электронной температуре. Времена релаксации импульса и энергии.

Тема 2.2 Ударная ионизация и функция распределения в электрическом поле

Ударная ионизация в собственных и легированных полупроводниках. Нелинейные ВАХ полупроводниковых кристаллов в сильном электрическом поле. S и N-образные ВАХ. Электрические домены и токовые шнуры. Функция распределения в сильном электрическом поле. Влияние электрон-электронных столкновений на функцию распределения. Смещенное максвелловское распределение.

Раздел 3. Полупроводники в магнитном поле

Тема 3.1 Движение и энергетический спектр электронов в магнитном поле

Движение и энергетический спектр электронов в однородном постоянном магнитном поле. Плотность разрешенных состояний и энергия Ферми в магнитном поле. Представление о классически слабых, сильных и квантующих магнитных полях. Ультраквантовый предел.

Тема 3.2 Кинетические явления в магнитном поле

Кинетические явления при диффузионном механизме переноса заряда в классических и квантующих магнитных полях. Эффекты Холла, магниторезистивный, Эттингаузена и Нернста. Кинетические явления в режиме прыжковой проводимости и слабой локализации.

Тема 3.3 Осцилляционные явления в квантовом пределе

Осцилляции кинетических коэффициентов в квантовом пределе. Эффект Шубникова де Гааза, магнитофононный и спинмагнитофононный резонансы. Основные магнитооптические явления и их интерпретация. Электронный диамагнитный и парамагнитный резонансы, межзонное магнитооптическое поглощение.

Раздел 4. Размерные и спиновые эффекты в полупроводниках

Тема 4.1 Классические и квантовые размерные эффекты

Классические и квантовые размерные эффекты в ограниченных кристаллах. Основные характеристические длины для электрона в кристалле. Электронные системы пониженной размерности. Квантование энергетического спектра в электронных системах пониженной размерности.

Тема 4.2 Спиновые эффекты в явлениях переноса в полупроводниках

Магнитные примеси в немагнитных металлах и полупроводниках. Эффекты Кондо и отрицательного магнитосопротивления. Спинзависимое рассеяние и туннелирование. Физические основы спинтроники.

УЧЕБНО-МЕТОДИЧЕСКАЯ КАРТА УЧЕБНОЙ ДИСЦИПЛИНЫ
 Дневной формы получения образования

Номер раздела, темы	Название раздела, темы	Количество аудиторных часов					Количество часов УСР	Литература	Формы контроля знаний
		Лекции	Практические занятия	Семинарские занятия	Лабораторные занятия	Аудиторный контроль УСР			
1	2	3	4	5	6	7	8	9	
1	Основы электронной теории кристаллических твердых тел	12					2		
1.1	Динамические и статистические свойства электронов. Вводное занятие. Место дисциплины в физике полупроводников. Исторические этапы развития электронной теории твердых тел. Классические представления Друде-Лоренца и квантовые Зоммерфельда. Представления о квазичастицах - основной подход к описанию конденсированного состояния вещества. Статистические свойства электронов. Энергетический спектр связанного электрона. Закон дисперсии для свободных электронов. Плотность разрешенных электронных состояний.	2						[1] [2] [3] [5] [9]	Письменный опрос для определения исходного уровня знаний
1.2	Уравнение Шредингера для кристалла. Электроны в периодическом поле кристаллической решетки. Уравнение Шредингера для кристалла. Адиабатическое и одноэлектронное приближения. Периодичность поля кристаллической решетки. Оператор трансляции и трансляционное свойство волновой функции. Теорема Блоха. Волновая функция для	2						[1] [2] [3] [6]	Письменный тест Реферат

	электрона в идеальном кристалле								
1.3	Основные характеристики электрона в кристалле Основные характеристики электрона в периодическом поле решетки. Квазиимпульс, эффективная масса. Скорость и ускорение электрона в периодическом поле решетки кристалла. Понятие о зонах Бриллюэна. Зоны Бриллюэна для плоской квадратной решетки и трехмерных упорядоченных структур.	2						[1] [2] [6]	Письменный тест Реферат
1.4	Решение уравнения Шредингера для кристалла Решение уравнения Шредингера для электрона в периодическом поле в приближении слабой и сильной связи. Металлы, полупроводники и диэлектрики с точки зрения зонной теории.					2		[1] [2] [5] [8]	Устный опрос Письменный тест Реферат
1.5	Основные теоретические и экспериментальные методы определения зонной структуры энергетического спектра электронов. Основные теоретические методы расчета и экспериментальные методы определения зонной структуры кристаллических твердых тел. Зонная структура важнейших материалов твердотельной электроники: алмаз, кремний, германий, серое олово, бинарные и многокомпонентные полупроводниковые материалы. Способы управления параметрами зонной структуры твердых тел.	2						[1] [2] [5]	Ситуационное задание. Устный опрос Письменный тест Реферат
1.6	Локализованные мелкие и глубокие состояния в кристалле. Локализованные электронные состояния в кристалле. Мелкие и глубокие примесные состояния в кристалле. Примесная зона. Поверхностные состояния.	2						[1] [2] [5] [7]	Письменный тест Реферат
1.7	Переход диэлектрик-металл Основные механизмы переноса электронов в полупроводниках: зонный, прыжковый, режим слабой локализации. Перехо-	2						[1] [7] [13]	Ситуационное задание.

	ды диэлектрик-металл по Мотту и Андерсону.							[8д] [7д]	Письменный тест Реферат
2	Полупроводники в электрическом поле	4							
2.1	Разогрев электронов Полупроводниковые кристаллы в электрическом поле. Эффекты Зинера и Френкеля. Разогрев электронов в электрическом поле. Понятие об электронной температуре. Времена релаксации импульса и энергии	2						[1] [2] [4] [8]	Устный опрос Реферат
2.2	Ударная ионизация и функция распределения в электрическом поле Ударная ионизация в собственных и легированных полупроводниках. Нелинейные ВАХ полупроводниковых кристаллов в сильном электрическом поле. S и N-образные ВАХ. Электрические домены и токовые шнуры. Функция распределения в сильном электрическом поле. Влияние электрон-электронных столкновений на функцию распределения. Смещенное максвелловское распределение.	2						[5] [10д] [12]	Устный опрос
3	Полупроводники в магнитном поле	4					2		
3.1	Движение и энергетический спектр электронов в магнитном поле. Движение и энергетический спектр электронов в однородном постоянном магнитном поле. Плотность разрешенных состояний и энергия Ферми в магнитном поле. Представление о классически слабых, сильных и квантующих магнитных полях. Ультраквантовый предел.	2						[1] [2] [3] [4] [5] [14]	Письменный тест Реферат
3.2	Кинетические явления в магнитном поле. Кинетические явления при диффузионном механизме переноса заряда в классических и квантующих магнитных полях. Эф-						2	[1] [2] [3]	Устный опрос. Письмен-

ИНФОРМАЦИОННО-МЕТОДИЧЕСКАЯ ЧАСТЬ

Перечень основной литературы

1. Киреев П.С. Физика полупроводников. М. 1969.
2. Бонч-Бруевич В.Л., Калашников Ф.П. Физика полупроводников М.1990.
3. Блатт Ф. Физика электронной проводимости в твердых телах. М.: Мир, 1971.-470 с.
4. Аскеров Б.М. Электронные явления переноса в полупроводниках. М.1985.
5. Зеегер К. Физика полупроводников М. 1977.
6. Цидильковский И.М. Электроны и дырки в полупроводниках М.1972
7. Шкловский Б.И., Эфрос А.Л. Электронные свойства легированных полупроводников. М.: Наука. 1979. -416 с.
8. Смитт Р. Полупроводники. М. 1982.
9. Киттель Ч. Введение в физику твердого тела. М., 1978. -791 с.
- 10.Абрикосов А.А. Основы теории металлов. М.,1987.
- 11.Ашкрофт Н., Мермин Н. Физика твердого тела. В 2-х томах. М., 1979.
- 12.Займан Дж. Принципы теории твердого тела. М.,1974.
13. Гантмахер В.Ф. Электроны в неупорядоченных средах. М.: Физматлит, 2003. – 174 с.
14. Лукашевич, М. Г. Введение в магнитоэлектронику: курс лекций / М. Г. Лукашевич. - Минск: БГУ, 2004. – 69 с.

Перечень дополнительной литературы

- 1.Ридли Б. Квантовые процессы в полупроводниках. М.: Мир, 1986.
- 2.Туннельные явления в твердых телах / Под. ред. Э. Бурштейна и С. Лундквиста. М.: Мир, 1973. -421 с.
- 3.Фистуль В.И. Введение в физику полупроводников. М., 1984.
4. Харрисон У. Теория твердого тела. М., 1972.
5. Херман М. Полупроводниковые сверхрешетки. М.: Мир, 1989. -240 с.
6. Гантмахер В. Ф. Рассеяние носителей тока в металлах и полупроводниках. – М.: Наука, 1984. – 351 с.
7. Имри И. Введение в мезоскопическую физику. – М.: Физматлит, 2002. – 304 с.
8. Мотт, Н. Электронные процессы в некристаллических веществах / Н. Мотт, Э. Дэвис. – 2 – е изд., перераб. и доп. в 2 – х томах. – М.: Мир, 1982. – 664 с.
9. Нагаев, Э. Л. Манганиты лантана и другие магнитные полупроводники с гигантским магнитосопротивлением / Э. Л. Нагаев // УФН. – 1996. – Т. 166, № 8. – С. 833 – 858.
10. Шелль, Э. Самоорганизация в полупроводниках. Неравновесные фазовые переходы в полупроводниках, обусловленные генерационно – рекомбинационными процессами / Э. Шелль. -М.: Мир, 1991. – 460 с.

11. Полумагнитные полупроводники / Под. ред. Я. Фурдыны, Я. Коссута. – М.: Мир, 1992. – 496 с
12. Шур, М. Современные приборы на основе арсенида галлия/ М. Шур. - М.: Мир, 1991. – 632 с
13. Вонсовский, С. В. Магнетизм / С. В. Вонсовский. – М.: Наука, 1971. – 1031 с.
14. Родионов, Ю.А. Технологические процессы в микро и наноэлектронике. М. Инфра-Инженерия. 2019.-353 с.

Перечень рекомендуемых средств диагностики и методика формирования итоговой оценки

Для оценки результатов учебной деятельности, обучающихся рекомендуется использовать следующие средства диагностики:

1. Устные опросы.
2. Защита реферативных работ.
3. Ситуационные задания (мини-кейсы).
4. Письменный тест.

Контрольные мероприятия проводятся в соответствии с учебно-методической картой дисциплины. В случае неявки на контрольное мероприятие по уважительной причине студент вправе по согласованию с преподавателем выполнить его в дополнительное время. Для студентов, получивших неудовлетворительные оценки за контрольные мероприятия, либо не явившихся по неуважительной причине, по согласованию с преподавателем и с разрешения заведующего кафедрой мероприятие может быть проведено повторно.

Оценка за ответы на лекционных занятиях (опрос) может включать в себя полноту ответа, наличие аргументов, примеров из практики и т.д.

Защита реферативных работ проводится в форме индивидуальных выступлений-презентаций (докладов) с последующей дискуссией. Оценка рефератов проводится по десятибалльной шкале. При оценивании реферата (доклада) внимание обращается на: содержание и полноту раскрытия темы, структуру и последовательность изложения, источники информации (предпочтение должно отдаваться статьям в научных журналах) и корректность их использования, точность используемой терминологии и т.д.

Оценка ситуационного задания может формироваться на основе следующих критериев: оригинальность способа решения задания, самостоятельность и аргументированность суждений, грамотность изложения.

Тестирование проводится в письменной форме 2-3 раза в семестр. Каждый из письменных тестов включает в себя 20-50 тестовых заданий в открытой форме. На выполнение теста отводится 90 мин. По согласованию с преподавателем разрешается использовать справочные, научные и учебные печатные издания, электронные источники информации. Каждое задание оценивается в 1 балл (если ответ верен и точен), 0,5 балла (если в отве-

те содержаться неточности, но в целом он верен, или же в ответе присутствуют почти завершённые рассуждения, которые при их продолжении могли бы привести к верному ответу), 0 баллов (если ответ не верен или отсутствует). Оценка теста проводится по сумме баллов, набранных за все задания, в соответствии с табл. 1.

Таблица 1 — Критерии оценки теста

Оценка	10	9	8	7	6	5	4	3	2	1
Процент от максимально возможной суммы баллов	$\geq 98\%$	$\geq 96\%$, но $< 98\%$	$\geq 92\%$, но $< 96\%$	$\geq 86\%$, но $< 92\%$	$\geq 76\%$, но $< 86\%$	$\geq 68\%$, но $< 76\%$	$\geq 60\%$, но $< 68\%$	$\geq 40\%$, но $< 60\%$	$\geq 20\%$, но $< 40\%$	$< 20\%$

Оценка текущей успеваемости рассчитывается как среднее арифметическое оценок за каждое из письменных тестирований, оценки за защиту реферата. За ответы на лекциях, выполненные ситуационные задания, участие в дискуссии студентам может быть добавлено 1 или 2 балла сверх полученной расчетом оценки.

Формой текущей аттестации по дисциплине «Электронная теория полупроводников» предусмотрен зачет.

Зачет выставляется с учетом текущей успеваемости, которая учитывается с весовым коэффициентом — 0,4 и зачетной оценки — 0,6.

Примерный перечень заданий для управляемой самостоятельной работы студентов

Рекомендуемые темы для составления тестовых заданий

Тема 1.4. Решение уравнения Шредингера для кристалла (2 ч)

Примерный перечень вопросов и заданий по теме

1. Запишите волновую функцию электрона в виде плоской волны де Бройля и Блоха.
2. Запишите вид оператора квазиимпульса для электрона в кристалле.
3. Определите понятие “эффективная масса”.
4. Запишите энергию электрона в первом приближении при решении уравнения Шредингера в приближении почти свободного электрона.
5. Назовите основные теоретические и экспериментальные методы определения основных характеристик зонной структуры энергетического спектра электронов

Форма контроля - устный опрос, письменный тест, реферат.

Тема 3.2 Кинетические явления в магнитном поле (2 ч)

Примерный перечень вопросов и заданий по теме

1. Почему продольный магниторезистивный эффект в сильном магнитном поле не равен нулю?
2. Почему сопротивление полупроводника с прыжковым механизмом проводимости изменяется в магнитном поле?
3. От каких параметров полупроводника зависит коэффициент Холла?
4. Определите понятие магнитное вымораживание.
5. В чем особенность эффекта Холла в квантующем магнитном поле?
6. В чем особенность эффекта Холла в квантующем магнитном поле в случае двумерной электронной системы?
7. Назовите основные физические причины осцилляций кинетических коэффициентов в квантовом пределе.

Форма контроля – устный опрос, письменный тест, реферат

Примерные ситуационные задания

Тема 1.5. Основные теоретические и экспериментальные методы исследования определения зонной структуры энергетического спектра электронов.

Задание — Вам необходимо найти материал с максимальной чувствительностью к свету в диапазоне длин волн 1-2 мкм. Предложите оптимальный полупроводниковый материал для этой цели.

Форма отчетности — Теоретический анализ подходящих для этой цели материалов. Описание экспериментального способа нахождения такого материала. Блок-схема экспериментальной установки.

Тема 1.7. Переход диэлектрик-металл.

Задание — В рамках выполнения НИР для студентов и аспирантов БГУ Вам необходимо определить удельное сопротивление эпитаксиальной пленки арсенида галлия, выращенной на полуизолирующей подложке из того же материала. Толщина пленки 50 мкм. Предложите методику измерения удельного сопротивления.

Форма отчетности — Описание методики измерения удельного сопротивления. Блок-схема экспериментальной установки.

Описание инновационных подходов и методов к преподаванию учебной дисциплины

При организации образовательного процесса *используются методы и приемы развития критического мышления*, которые представляют собой систему, формирующую навыки работы с информацией; понимании информации как отправного, а не конечного пункта критического

мышления. Формой реализации метода может выступать подготовка и защита реферативных работ.

Желательным является применение **метода учебной дискуссии**, который предполагает участие студентов в целенаправленном обмене мнениями, идеями для предъявления и/или согласования существующих позиций по определенной проблеме. Реализацию метода рекомендуется осуществлять во время защиты реферативных работ, организовав дискуссию обучающихся, а также в ходе самих лекций. Использование метода обеспечивает появление нового уровня понимания изучаемой темы, применение знаний (теорий, концепций) при решении проблем, определение способов их решения.

При организации самостоятельной работы желательно использовать отдельные мини-задания (мини-кейсы) и соответственно **метод анализа конкретных ситуаций (кейс-метод)**, который предполагает:

- приобретение студентом знаний и умений для решения практических задач;
- анализ ситуации, используя профессиональные знания, собственный опыт, дополнительную литературу и иные источники.

Методические рекомендации по организации самостоятельной работы обучающихся

Самостоятельная работа проводится с целью:

- систематизации и закрепления, углубления и расширения полученных теоретических знаний обучающихся;
- формирования умений использовать специальную литературу;
- развития познавательных способностей и активности обучающихся: творческой инициативы, ответственности и организованности;
- формирования самостоятельности мышления, способностей к саморазвитию, самосовершенствованию и самореализации.

Аудиторная самостоятельная работа по учебной дисциплине на учебных занятиях под непосредственным руководством преподавателя и по его заданию. Внеаудиторная самостоятельная работа выполняется по заданию преподавателя без его непосредственного участия.

Основными видами аудиторной самостоятельной работы при изучении дисциплины являются подготовка ответов на тесты, решение качественных задач (вопросов) предложенных в ходе занятия, участие в дискуссии на занятиях и в ходе защит реферативных работ.

Основными видами внеаудиторной самостоятельной работы при изучении дисциплины является подготовка реферативных работ, решение ситуационных задач, предложенных преподавателем.

Темы реферативных работ студентами выбираются из предложенного преподавателем списка не позднее чем через две недели после начала занятий. Примерный перечень тем рефератов представлен ниже. Студенты

имею право по согласованию с преподавателем сформулировать тему реферативной работы самостоятельно.

В качестве ситуационных задач могут выступать расчетные задачи по физике полупроводников, и задачи на отработку планирования эксперимента по измерению характеристик полупроводниковых материалов.

При выполнении внеаудиторной самостоятельной работы обучающийся имеет право обращаться к преподавателю за консультацией.

Примерная тематика реферативных работ

1. Зонные структуры элементарных полупроводников.
2. Зонные структуры бинарных полупроводниковых соединений
3. Зонные структуры оксидов, обладающих полупроводниковыми свойствами.
4. Разогрев электронов в электрическом поле.
5. Ударная ионизация примесных состояний в полупроводниках.
6. Полупроводниковые материалы для диодов Ганна
7. Изменение функции распределения электронов по энергиям в электрическом поле.
8. Движение электрона в кристалле в магнитном поле.
9. Энергетический спектр электрона в кристалле в магнитном поле.
10. Классические и квантовые магнитные поля.
11. Механизмы переноса электронов в полупроводниках.
12. Магниторезистивный эффект при разных механизмах переноса электронов.
13. Эффект Холла при разных механизмах переноса электронов.
14. Оптические свойства прямозонных и не прямозонных полупроводников.
15. Квантовый эффект Холла.
16. Спиновый эффект Холла.
17. Проявление классических размерных эффектов в кинетических явлениях в полупроводниках.
18. Проявление квантовых размерных эффектов в кинетических явлениях в полупроводниках.
19. Осцилляционные явления в кинетических эффектах в квантовом магнитном поле.
20. Осцилляционные явления в оптических характеристиках полупроводников в квантовом магнитном поле.
21. Процессы сильной локализации электронов в полупроводниках.
22. Процессы слабой локализации электронов в полупроводниках.
23. Переход диэлектрик-металл в полупроводниках.
24. Магнитное вымораживание и магнитное вскипание в полупроводниках.
25. Спинзависимое рассеяние и спинзависимое туннелирование.
26. Эффекты гигантского и отрицательного магнитосопротивления.

Примерный перечень вопросов к зачету

1. Энергетический спектр свободного и связанного электронов.
2. Три приближения зонной теории.
3. Уравнение Шредингера для кристалла.
4. Электропроводность по Друде.
5. Механизмы проводимости в полупроводниках.
6. Примесная зона и переход диэлектрик-металл.
7. Разогрев электронов в электрическом поле.
8. Ударная ионизация мелких примесных уровней.
9. Функция распределения электронов по энергии в электрическом поле.
10. Эффект Ганна.
11. Энергетический спектр электронов в магнитном поле.
12. Классическое и квантующее магнитное поле.
13. Эффект Холла.
14. Магниторезистивный эффект.
15. Влияние магнитного поля на концентрацию электронов в полупроводнике.
16. Магнитное вымораживание носителей заряда.
17. Классические характеристические длины для электрона.
18. Квантовые характеристические длины для электрона в полупроводнике.
19. Классические размерные эффекты в кинетических явлениях в полупроводниках.
20. Квантовые размерные эффекты в кинетических явлениях в полупроводниках.
21. Квантовые размерные эффекты в оптических характеристиках полупроводников.
22. Атомы магнитных металлов в полупроводниках. Эффект Кондо.
23. Гигантский и отрицательный магниторезистивные эффекты.

ПРОТОКОЛ СОГЛАСОВАНИЯ УЧЕБНОЙ ПРОГРАММЫ УВО

Название учебной дисциплины, с которой требуется согласование	Название кафедры	Предложения об изменениях в содержании учебной программы учреждения высшего образования по учебной дисциплине	Решение, принятое кафедрой, разработавшей учебную программу (с указанием даты и номера протокола)
Физика полупроводниковых приборов: неравновесные процессы	Кафедра физики полупроводников и нанoeлектроники	нет	Вносить изменения не требуется (протокол № 9 от 06.04.2021)

