

МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ

**Федеральное государственное автономное
образовательное учреждение высшего образования
«Национальный исследовательский Нижегородский государственный университет
им. Н.И. Лобачевского»**

Физический факультет

УТВЕРЖДАЮ:

Декан физического факультета
_____ Малышев А.И.

« 31 » августа 2021 г.

Рабочая программа дисциплины

«Физика поверхности полупроводников и
систем пониженной размерности»

Уровень подготовки

аспирантура

Направление подготовки

03.06.01 ФИЗИКА И АСТРОНОМИЯ

Направленность образовательной программы

01.04.10 «Физика полупроводников»

Квалификация

Исследователь, преподаватель-исследователь

Форма обучения
очная

Нижний Новгород, 2021

1. Место и цели дисциплины в структуре ОПОП

Дисциплина «Физика поверхности полупроводников и систем пониженной размерности» относится к вариативной части ОПОП, является дисциплиной по выбору и изучается на 2 году обучения в 3 семестре.

Целями освоения дисциплины являются:

- изучение теории и физики электронных явлений на поверхности полупроводника в МДП-структурах и квантово-размерных структурах.
- освоение аспирантами теоретических знаний о принципах работы ряда полупроводниковых приборов, таких как полевые транзисторы, цифровые интегральные схемы, элементы полупроводниковой памяти, приборы и интегральные схемы с переносом заряда.

2. Планируемые результаты обучения по дисциплине, соотнесенные с планируемыми результатами освоения образовательной программы (компетенциями выпускников)

Формируемые компетенции (код компетенции, этап формирования)	Планируемые результаты обучения по дисциплине (модулю), характеризующие этапы формирования компетенций
ОПК-1 Способность самостоятельно осуществлять научно-исследовательскую деятельность в соответствующей профессиональной области с использованием современных методов исследования и информационно-коммуникационных технологий	<i>З1 Знать</i> основные проблемы в своей предметной области <i>У1 Уметь</i> осуществлять научно-исследовательскую деятельность в соответствующей профессиональной области. <i>В1 Владеть</i> современными методами исследований с использованием информационных технологий
ПК-1 Способность к методически грамотному изложению материала учебных дисциплин при чтении лекций, построении практических занятий, разработке учебных пособий и к самостоятельному проведению научно-исследовательской работы, получению научных результатов, удовлетворяющих установленным требованиям к	<i>З1 (ПК-1) Знать</i> фундаментальные основы физики полупроводников и физики конденсированного состояния. <i>У1 (ПК-1) Уметь</i> самостоятельно планировать и проводить физические эксперименты в области полупроводников и полупроводниковых наноструктур и анализировать их результаты. <i>В1 (ПК-1) Владеть</i> способностями анализа, оценки и методами изложения научной информации в области физики полупроводников. <i>З2 (ПК-1) Знать</i> физические основы процессов на поверхности полупроводников и в системах пониженной размерности.

содержанию диссертаций на соискание ученой степени кандидата наук по направленности 01.04.10 «Физика полупроводников»	<p>У2 (ПК-1) Уметь разрабатывать новые модели физических процессов в области физики полупроводников и физики конденсированного состояния.</p> <p>В2 (ПК-1) Владеть навыками моделирования физических процессов в области физики полупроводников и физики конденсированного состояния.</p> <p>З3 (ПК-1) Знать физические основы технологии выращивания полупроводниковых материалов и структур на их основе.</p> <p>У3 (ПК-1) Уметь исследовать оптоэлектронные свойства полупроводниковых квантово-размерных гетеронаноструктур.</p> <p>В3 (ПК-1) Владеть навыками работы с исследовательским и контрольно-измерительным оборудованием для изучения оптических свойств полупроводниковых квантово-размерных гетеронаноструктур, в том числе при практических занятиях</p>
---	---

3. Структура и содержание дисциплины

Объем дисциплины составляет 2 зачетных единицы, всего 72 часа, из которых 37 часов составляет контактная работа обучающегося с преподавателем (36 часов занятия лекционного типа, включая 2 часа - мероприятия текущего контроля успеваемости, 1 час - мероприятия промежуточной аттестации), 35 часов составляет самостоятельная работа обучающегося.

Структура дисциплины

Наименование раздела дисциплины	Всего, часов	В том числе				
		Контактная работа, часов				Самостоятельная работа обучающегося, часов
		Занятия лекционного типа	Занятия семинарского типа	Занятия лабораторного типа	Всего	
1. Введение	4	2	0	0	2	2
2. Теория электронных явлений в полупроводниках с ОПЗ	11	6	0	0	6	5
3. Квантовые размерные эффекты на поверхности полупроводника	12	6	0	0	6	6
4. Поверхностная рекомбинация	8	4	0	0	4	4
5. Атомарно-чистая и реальная поверхность полупроводников	12	6	0	0	6	6
6. Физика МДП структур	12	6	0	0	6	6
7. Приборы с зарядовой связью	12	6	0	0	6	6
Всего	71	36	0	0	36	35

В т.ч.текущий контроль	2
Промежуточная аттестация по дисциплине. Зачет	

Содержание дисциплины

№ п/п	Наименование раздела дисциплины	Содержание раздела	Форма проведения занятия	Форма текущего контроля*
1	Введение	Роль и место поверхности полупроводников и МДП-структур в науке и технике. История развития физики полупроводников и МДП-структур. Вклад русских и зарубежных ученых. Современное состояние науки и практических применений и перспективы развития.	лекция	собеседование, тесты
2	Введение в теорию электронных явлений на поверхности полупроводников.	Поверхностные состояния и заряды. Область пространственного заряда (ОПЗ) в полупроводнике, примыкающая к поверхности. Энергетические зонные диаграммы приповерхностной области полупроводника. Феноменологическая теория ОПЗ. Плотность объемного заряда. Распределение электростатического потенциала в ОПЗ. Обогащенный, обедненный и инверсионный слои. Зависимости поверхностного и объемного зарядов от изгиба зон. Работа выхода. Потенциал поверхности. Поверхностная фотоэдс. Барьерная, барьерно-ловушечная и демберовская фотоэдс. Измерение потенциала поверхности и его изменений методом динамического и статического конденсатора. Поверхностная проводимость. Измерение поверхностной проводимости. Зависимость проводимости и подвижности от изгиба зон. Определение изгиба зон на поверхности полупроводника из измерений поверхностной проводимости. Эффект поля. Общая характеристика эффекта поля. Квазистационарный эффект поля и методика его измерения. Экспериментальные методики исследования эффекта поля в импульсных и переменных полях. Определение параметров поверхности полупроводника и поверхностных состояний из измерений эффекта поля.	лекция	собеседование, тесты
3	Квантовые размерные эффекты на поверхности полупроводника	Локализация электронов и образование двумерного газа. Двумерная поверхностная проводимость. Гигантские осцилляции проводимости в магнитном поле. Квантовый эффект Холла. Фотоэлектрическая спектроскопия квантово-размерных гетеронаноструктуры.	лекция	собеседование, тесты
4	Поверхностная рекомбинация	Скорость поверхностной рекомбинации. Локализация электронов и образование двумерного газа. Двумерная поверхностная проводимость. Гигантские осцилляции проводимости в магнитном поле. Квантовый эффект Холла. Фотоэлектрическая спектроскопия квантово-размерных гетеронаноструктуры.	лекция	собеседование, тесты
5	Атомарно-чистая и реальная поверхность полупроводников	Получение и свойства атомарно-чистых поверхностей полупроводника. Структура. Плотность и энергетический спектр поверхностных состояний. Реальная поверхность полупроводника. Способы получения. Некоторые свойства реальной поверхности. Пассивированная поверхность. Физический и химический способы пассивации.	лекция	собеседование, тесты

6	Физика МДП структур	Феноменологическая теория МДП-структуры. Поверхностная и барьерная емкости и их зависимости от изгиба зон, уровня легирования полупроводника, плотности и энергетического распределения поверхностных состояний. Эквивалентные схемы МДП-структуры. Высокочастотная и низкочастотная вольт-фарадные характеристики (ВФХ) МДП-структуры. Методы измерения. Определение основных параметров МДП-структуры из измерений высокочастотной ВФХ. Неравновесная емкость МДП-структуры. Методика измерения неравновесной емкости. Определение времени жизни и скорости поверхностной рекомбинации из анализа кинетики неравновесной емкости. Гистерезисные явления в МДП-структурах. Способы стабилизации МДП-структур при электронном и ионном типах гистерезиса. Использование явления зарядки состояний на границе раздела SiO ₂ /Si ₃ N ₄ в МНОП-структуре для создания элементов полупроводниковой памяти.	лекция	собеседование, тесты
7	Приборы с зарядовой связью	Использование явления неравновесного обеднения в полупроводнике в МДП-структуре для создания приборов с переносом заряда. Принцип работы фоточувствительных ПЗС матриц.	лекция	собеседование, тесты

4. Образовательные технологии

В процессе изучения дисциплины «Физика поверхности полупроводников и систем пониженной размерности» используются следующие образовательные технологии: на лекциях – диалоговая форма проведения лекций и проблемный метод изложения материала.

5. Учебно-методическое обеспечение самостоятельной работы обучающихся

Самостоятельная работа включает в себя теоретическую подготовку к занятиям по материалам лекций и рекомендованной литературе.

Осуществляется подготовка к зачету по вопросам

1. Феноменологическая теория области пространственного заряда полупроводника. Плотность пространственного заряда. Распределение потенциала в ОПЗ. Обогащенный, обедненный и инверсионный поверхностные слои (**ОПК 1**).
2. Феноменологическая теория области пространственного заряда полупроводника. Зависимость поверхностного и объемного зарядов от изгиба зон (**ОПК 1**).
3. Феноменологическая теория области пространственного заряда полупроводника. Заряд поверхностных состояний. Работа выхода и потенциал поверхности. Зависимость работы выхода от изгиба зон (**ОПК 1**).
4. Поверхностная фотоэдс. Фотоэдс Дембера. Барьерная поверхностная фотоэдс (зависимость от изгиба зон и от уровня фотовозбуждения) (**ПК 1**).
5. Поверхностная фотоэдс. Барьерно-ловушечная поверхностная фотоэдс (зависимость от уровня фото возбуждения) (**ПК 1**).
6. Измерение потенциала поверхности и его изменений методом динамического и статического конденсатора (**ПК 1**).
7. Поверхностная проводимость. Зависимости поверхностной проводимости и подвижности от изгиба зон (**ПК 1**).

8. Измерение поверхностной проводимости. Определение изгиба зон на поверхности полупроводника из измерений поверхностной проводимости (ПК 1).
9. Барьерная фотопроводимость полупроводников (ПК 1).
10. Эффект поля. Экспериментальные методы измерения эффекта поля на импульсных и синусоидальных сигналах. Определение характеристик поверхности полупроводника из этих измерений (ОПК 1).
11. Поверхностная емкость. Барьерная емкость. Емкость поверхностных состояний. Зависимость от частоты (ПК 1).
12. Понятие об МДП-структуре. Применяемые материалы и конструкция. Идеальная МДП-структура (ОПК 1).
13. Емкость МДП-структуры. Зависимость от изгиба зон, напряжения и частоты (ПК 1).
14. Явление неравновесного обеднения поверхности полупроводника в МДП-структуре. Определение профиля распределения примеси и времени жизни из измерений неравновесной емкости (ПК 1).
15. Феноменологическая теория поверхностной рекомбинации. Методы определения скорости поверхностной рекомбинации (ПК 1).
16. Методы получения и свойства атомарно-чистых поверхностей полупроводников (ОПК 1).
17. Методы получения и свойства реальных и пассивированных поверхностей полупроводников (ПК 1).
18. Нестабильности в МДП-структурах. Гистерезисные явления (ПК 1).
19. Феноменологическая теория явления памяти в МНОП-структурах (ОПК 1).
20. Неравновесное обеднение МДП структуры. Приборы с зарядовой связью (ПК 1)
21. Элементы памяти на квантово-размерных структурах (ПК 1).

6. Фонд оценочных средств для промежуточной аттестации по дисциплине включающий:

6.1 *Перечень компетенций выпускников образовательной программы с указанием результатов обучения (знаний, умений, владений), характеризующих этапы их формирования.*

Описание показателей и критериев оценивания компетенций приведены в приложении 1.

6.2 *Описание шкал оценивания*

«Зачтено» – владение программным материалом, понимание сущности рассматриваемых процессов и явлений, наличие хотя бы фрагментарных знаний по каждому из основных вопросов, способность критически анализировать и сравнивать получаемые научные результаты.

«Незачтено» – отсутствие ответа хотя бы на один из основных вопросов, либо грубые ошибки в ответах, полное непонимание смысла проблем, не достаточно полное владение терминологией.

6.3 Критерии и процедуры оценивания результатов обучения по дисциплине (модулю), характеризующих этапы формирования компетенций.

Для оценивания результатов обучения в виде знаний используются следующие процедуры и технологии:

- тестирование;
- индивидуальное собеседование.

Для оценивания результатов обучения в виде умений и владений используются следующие процедуры и технологии:

- практические контрольные задания, включающие один или несколько вопросов и тесты.

6.4 Типовые контрольные задания или иные материалы, необходимые для оценки результатов обучения, характеризующих этапы формирования компетенций.

Вопрос 1: Максимальная емкость МДП структуры определяется:

1. Емкостью поверхностных состояний
2. Емкостью диэлектрика
3. Барьерной емкостью области пространственного заряда

Шкала оценки:

Зачтено – ответ (2);

Незачтено – ответы (1, 3).

Вопрос 2: Емкость поверхностных состояний с ростом частоты

Уменьшается

Увеличивается

Не изменяется

Шкала оценки:

Зачтено – ответ (1);

Незачтено – ответы (2, 3).

6.5 Методические материалы, определяющие процедуры оценивания приведены в фонде оценочных средств.

7. Учебно-методическое и информационное обеспечение дисциплины

а) основная литература:

1. Шалимова, К.В. Физика полупроводников: учеб. – Санкт-Петербург: Лань, 2010. — 384 с. Доступ с компьютеров ННГУ <https://e.lanbook.com>
2. С.В. Тихов. Неравновесные процессы в МДП-структурах. Горький, ГГУ, 1985 г.
3. А.П. Горшков, С.В. Тихов. ФИЗИКА ПОВЕРХНОСТИ ПОЛУПРОВОДНИКОВ: Учебное пособие. – Нижний Новгород: Нижегородский госуниверситет, 2013. – 101 с. www.unn.ru/books/met_files/fppp.doc
4. С. Зи. Физика полупроводниковых приборов. т.2, М.. Энергия, 1984г.

б) дополнительная литература:

1. А.В. Ржанов. Электронные процессы на поверхности полупроводников. М., Наука, 1971 г.

2. В.Н. Овсянко. Электронные процессы в полупроводниках с областями пространственного заряда. Новосибирск, Наука, Сибирское отделение, 1984 г.
3. Ф.Ф. Волькинштейн. Электронные процессы на поверхности полупроводников при хемосорбции. М., Наука, 1987 г.
4. Карпович И.А., Филатов Д.О. Фотоэлектрическая диагностика квантово-размерных гетероструктур. ННГУ, 2010 г.
5. А.В. Ржанов. Свойства структур металл – диэлектрик – полупроводник. М., Наука, 1976 г.

8. Материально-техническое обеспечение дисциплины

Материально-техническое обеспечение дисциплины «Физика поверхности полупроводников и систем пониженной размерности» обусловлено наличием необходимого количества учебников в библиотеке, некоторые из них представлены в электронном виде.

Программа составлена в соответствии с требованиями ФГОС ВО по направлению подготовки 03.06.01 ФИЗИКА И АСТРОНОМИЯ (уровень подготовки кадров высшей квалификации).

Автор:

к.ф.-мат. наук, доцент кафедры

физики полупроводников и оптоэлектроники _____ А.П. Горшков

Рецензент:

заведующий кафедрой

электроники твердого тела

д.ф.-м.н. профессор _____ Е.С. Демидов

Заведующий кафедрой

физики полупроводников и оптоэлектроники

д.ф.-м.н. профессор _____ Д. А. Павлов

Программа рекомендована на заседании кафедры Физики полупроводников и

оптоэлектроники от _____ года, протокол № _____

Программа одобрена на заседании методической комиссии физического факультета от

_____ года, протокол № _____

Приложение 1

ОПК-1 Способность самостоятельно осуществлять научно-исследовательскую деятельность в соответствующей профессиональной области с использованием современных методов исследования и информационно-коммуникационных технологий.

Планируемые результаты обучения (показатели достижения заданного уровня освоения компетенций)	Критерии оценивания результатов обучения	
	Не зачтено	Зачтено
Владеть современными методами исследований с использованием информационных технологий	Не владеет современными методами исследований с использованием информационных технологий	Владеет современными методами исследований с использованием информационных технологий
Знать основные проблемы в своей предметной области	Не знает основные проблемы в своей предметной области	Знает основные проблемы в своей предметной области
Уметь осуществлять научно-исследовательскую деятельность в соответствующей профессиональной области	Не умеет осуществлять научно-исследовательскую деятельность в соответствующей профессиональной области	Умеет осуществлять научно-исследовательскую деятельность в соответствующей профессиональной области

ПК-1 Способность к методически грамотному изложению материала учебных дисциплин при чтении лекций, построении практических занятий, разработке учебных пособий и к самостоятельному проведению научно-исследовательской работы, получению научных результатов, удовлетворяющих установленным требованиям к содержанию диссертаций на соискание ученой степени кандидата наук по направленности 01.04.10 «Физика полупроводников».

Планируемые результаты обучения*(показатели достижения заданного уровня освоения компетенций)	Критерии оценивания результатов обучения	
	Не зачтено	Зачтено
31 (ПК-1) Знать фундаментальные основы физики полупроводников и физики конденсированного состояния.	Не знает фундаментальных основ физики полупроводников и физики конденсированного состояния.	Знает фундаментальные основы физики полупроводников и физики конденсированного состояния.
32 (ПК-1) Знать физические основы процессов на поверхности полупроводников.	Не знает физических основ процессов на поверхности полупроводников и в системах пониженной размерности.	Знает физические основы физических процессов на поверхности полупроводников и в системах пониженной размерности.

ЗЗ (ПК-1) Знать физические основы технологии выращивания полупроводниковых материалов и структур на их основе.	Не знает физические основы технологии выращивания полупроводниковых материалов и структур на их основе	Знает физические основы технологии выращивания полупроводниковых материалов и структур на их основе.
У1 Уметь самостоятельно планировать и проводить физические эксперименты в области полупроводников и полупроводниковых наноструктур и анализировать их результаты.	Не умеет самостоятельно планировать и проводить физические эксперименты в области полупроводников и полупроводниковых наноструктур и анализировать их результаты	Умеет самостоятельно планировать и проводить физические эксперименты в области полупроводников и полупроводниковых наноструктур и анализировать их результаты.
У2 (ПК-1) Уметь разрабатывать новые модели физических процессов в области физики полупроводников и физики конденсированного состояния.	Не умеет разрабатывать новые модели физических процессов в области физики полупроводников и физики конденсированного состояния	Умеет разрабатывать новые модели физических процессов в области физики полупроводников и физики конденсированного состояния.
УЗ (ПК-1) Уметь исследовать оптоэлектронные свойства полупроводниковых квантово-размерных гетеронаноструктур.	Не умеет исследовать оптоэлектронные свойства полупроводниковых квантово-размерных гетеронаноструктур	Умеет исследовать оптоэлектронные свойства полупроводниковых квантово-размерных гетеронаноструктур.
В1 Владеть способностями анализа, оценки и методами изложения научной информации в области физики полупроводников.	Не владеет способностями анализа, оценки и методами изложения научной информации в области физики полупроводников	Владеет способностями анализа, оценки и методами изложения научной информации в области физики полупроводников.
В2 (ПК-1) Владеть навыками моделирования физических процессов в области физики полупроводников и физики конденсированного состояния.	Не владеет навыками моделирования физических процессов в области физики полупроводников и физики конденсированного состояния	Владеет навыками моделирования физических процессов в области физики полупроводников и физики конденсированного состояния.
ВЗ (ПК-1) Владеть навыками работы с исследовательским и контрольно-измерительным оборудованием для изучения оптических свойств полупроводниковых квантово-размерных гетеронаноструктур, в том числе при практических занятиях	Не владеет навыками работы с исследовательским и контрольно-измерительным оборудованием для изучения оптических свойств полупроводниковых квантово-размерных гетеронаноструктур, в том числе при практических занятиях	Владеет навыками работы с исследовательским и контрольно-измерительным оборудованием для изучения оптических свойств полупроводниковых квантово-размерных гетеронаноструктур, в том числе при практических занятиях