

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  
Кафедра физики полупроводников, электроники и нанoeлектроники

УТВЕРЖДЕНО  
решением ученого совета ННГУ прото-  
кол № 13 от «30» ноября 2022 г.

**Рабочая программа дисциплины**

**Физика поверхности полупроводников и систем пониженной  
размерности**

Уровень высшего образования  
магистратура

Направление подготовки: 11.04.04 Электроника и нанoeлектроника  
Направленности (профили): твердотельная электроника и нанoeлектроника

Форма обучения  
очная

Нижний Новгород, 2023

## 1. Место и цели дисциплины в структуре ООП

Дисциплина «Физика поверхности полупроводников и систем пониженной размерности» относится к выборным дисциплинам части основной образовательной программы по направлению подготовки 11.04.04 - Электроника и нанoeлектроника, формируемой участниками образовательных отношений. Для усвоения данного курса необходимо сначала освоить математический и естественнонаучный цикл дисциплин, а также модуль базовой части профессиональной подготовки «Материалы электронной техники» состоящий из дисциплин: «Физика конденсированного состояния», «Физические основы электроники», «Нанoeлектроника», «Основы проектирования электронной компонентной базы», «Основы технологии электронной компонентной базы», «Схемотехника». Очень важно, чтобы в перечень предшествующих теоретических дисциплин входили также «Электродинамика», «Квантовая механика», «Кристаллография», «Физика полупроводников», «Физика низкоразмерных систем».

**Целью освоения дисциплины «Физика поверхности полупроводников и систем пониженной размерности» является**

- изучение теории и физики электронных явлений на поверхности полупроводника в МДП-структурах и квантово-размерных структурах.
- освоение 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)

<b>Формируемые компетенции</b> (код, содержание компетенции)	<b>Планируемые результаты обучения по дисциплине (модулю), в соответствии с индикатором достижения компетенции</b>		<b>Наименование оценочного средства</b>
	<b>Индикатор достижения компетенции</b> (код, содержание индикатора)	<b>Результаты обучения по дисциплине</b>	
ПК-3. Способность применять фундаментальные представления о физических явлениях для достижения требуемых функциональных качеств приборов, схем и устройств электроники и нанoeлектроники	ПК-3.1. Знает фундаментальных основ физических явлений и процессов, лежащих в основе работы приборов и устройств электроники и нанoeлектроники.  ПК-3.2. Умение проводить экспериментальные работы по отработке и внедрению новых технологических процессов производства изделий	<b>Знать:</b> основные проблемы в своей предметной области, базовую информацию в области физики полупроводников, методы проведения физического эксперимента в области полупроводников и полупроводниковых наноструктур, физические основы процессов в области физики полупроводников и физики конденсированного состояния. <b>Уметь:</b> осуществлять научную исследовательскую деятельность в соответствующей	Вопросы по темам/разделам дисциплины.  Комплект заданий к семинарским занятиям.  Фонд тестовых заданий

	<p>электроники и нано-электроники</p> <p>ПК-3.3. Опыт разработки методик экспериментальной проверки функциональных качеств приборов, схем и устройств электроники и нано-электроники</p>	<p>профессиональной области, самостоятельно планировать и проводить физические эксперименты в области полупроводников и полупроводниковых наноструктур и анализировать их результаты, разрабатывать новые модели физических процессов в области физики полупроводников и физики конденсированного состояния</p> <p><b>Владеть:</b> современными методами исследований с использованием информационных технологий, способностями анализа и оценки научной информации в области физики полупроводников, методами обработки экспериментальных данных и/или методами численного моделирования физических процессов в наноструктурах, навыками моделирования физических процессов в области физики полупроводников и физики конденсированного состояния</p>	
--	--	--	--

### 3. Структура и содержание дисциплины «Физика поверхности полупроводников и систем пониженной размерности»

#### 3.1 Трудоемкость дисциплины

Общая трудоемкость	2 ЗЕТ
Часов по учебному плану	72
в том числе	
аудиторные занятия (контактная работа):	
- занятия лекционного типа	16
- занятия семинарского типа	16
-КСРИФ	1
самостоятельная работа	39 (работа в семестре)
Промежуточная аттестация	1 семестр – зачет

### 3.2.Содержание дисциплины

Наименование раздела дисциплины	Всего, часов	В том числе					Самостоятельная работа обучающегося, часов
		Контактная работа, часов					
		Занятия лекционного типа	Занятия семинарского типа	Занятия лабораторного типа	Консультации, КСР	Всего	
1. Введение	4	1	1			2	2
2. Теория электронных явлений в полупроводниках с ОПЗ	24	6	6			12	12
3. Квантовые размерные эффекты на поверхности полупроводника	8	2	2			4	4
4. Поверхностная рекомбинация	4	1	1			2	2
5. Атомарно-чистая и реальная поверхность полупроводников	4	1	1			2	2
6. Физика МДП структур	19	4	4			8	11
7. Приборы с зарядовой связью	8	1	1			2	6
Промежуточный контроль	1	0	0	0		1	
Промежуточная аттестация по дисциплине. Зачет							

#### Содержание разделов 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.	лекции, семинарские занятия	Контроль посещаемости, выполнение практических заданий

2	Введение в теорию электронных явлений на поверхности полупроводников.	<p>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.</p>	лекции, семинарские занятия	Контроль посещаемости, выполнение практических заданий
3	Квантовые размерные эффекты на поверхности полупроводника	<p>Локализация электронов и образование двумерного газа. Двумерная поверхностная проводимость. Гигантские осцилляции проводимости в магнитном</p>	лекции, семинарские занятия	Контроль посещаемости, выполнение практических

		поле. Квантовый эффект Холла. Фотоэлектрическая спектроскопия квантово-размерных гетеронаноструктуры.		заданий
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.	лекции, семинарские занятия	Контроль посещаемости, выполнение практических заданий
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.	лекции, семинарские занятия	Контроль посещаемости, выполнение практических заданий
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	лекции, семинарские занятия	Контроль посещаемости, выполнение практических заданий

		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 <sub>2</sub> /Si <sub>3</sub> N <sub>4</sub> в МНОП-структуре для создания элементов полупроводниковой памяти.		
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.	лекции, семинарские занятия	Контроль посещаемости, выполнение практических заданий

Практические занятия (семинарские занятия) организуются, в том числе в форме практической подготовки, которая предусматривает участие обучающихся в выполнении отдельных элементов работ, связанных с будущей профессиональной деятельностью.

Практическая подготовка предусматривает проведение семинарских работ по профилю профессиональной деятельности и направленности образовательной программы. На проведение практических занятий в форме практической подготовки отводится 16 часов.

Практическая подготовка направлена на формирование и развитие:

- практических навыков в соответствии с профилем ОП: навыков расчета электронных характеристик приповерхностных областей полупроводника и анализа влияния поверхностных состояний на работу полупроводниковых приборов;
- компетенций, относящихся к физическим принципам явлений и процессов, лежащих в основе работы приборов и устройств электроники и наноэлектроники.

Текущий контроль успеваемости реализуется в рамках занятий семинарского типа.

#### 4. Образовательные технологии

В процессе изучения дисциплины «Физика поверхности полупроводников и систем пониженной размерности» используются следующие образовательные технологии: на лекциях – диалоговая форма проведения лекций; на практических занятиях – выполнение заданий. Самостоятельная работа включает в себя выполнение домашних заданий и теоретическую подготовку к практическим занятиям и зачету по материалам лекций и рекомендованной литературе, приведенной в конце данной программы.

## **5. Учебно-методическое обеспечение, формы организации и контроля самостоятельной работы обучающихся**

Самостоятельная работа предусматривает теоретическую подготовку к занятиям по материалам лекций и рекомендованной литературе, приведенной в конце данной программы.

*В практической части студенты должны решить нижеуказанные задачи и ответить на вопросы по разделам курса:*

1. Расчет плотности объемного заряда по известной плотности поверхностных состояний.
2. Расчет энергетического спектра треугольной квантовой ямы.
3. Определение скорости поверхностной рекомбинации фотоэлектрическим методом.
4. Реконструкция поверхности.
5. Расчет высокочастотной и низкочастотной вольт-фарадной характеристики МДП структуры.
6. Влияние параметров полупроводника на фоточувствительные характеристики ПЗС-матрицы.

*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.
2. Феноменологическая теория области пространственного заряда полупроводника. Зависимость поверхностного и объемного зарядов от изгиба зон.
3. Феноменологическая теория области пространственного заряда полупроводника. Заряд поверхностных состояний. Работа выхода и потенциал поверхности. Зависимость работы выхода от изгиба зон.
4. Поверхностная фотоэдс. Фотоэдс Дембера. Барьерная поверхностная фотоэдс (зависимость от изгиба зон и от уровня фотовозбуждения).
5. Поверхностная фотоэдс. Барьерно-ловушечная поверхностная фотоэдс (зависимость от уровня фото возбуждения).
6. Измерение потенциала поверхности и его изменений методом динамического и статического конденсатора.
7. Поверхностная проводимость. Зависимости поверхностной проводимости и подвижности от изгиба зон.
8. Измерение поверхностной проводимости. Определение изгиба зон на поверхности полупроводника из измерений поверхностной проводимости.
9. Барьерная фотопроводимость полупроводников.
10. Эффект поля. Экспериментальные методы измерения эффекта поля на импульсных и синусоидальных сигналах. Определение характеристик поверхности полупроводника из этих измерений.
11. Поверхностная емкость. Барьерная емкость. Емкость поверхностных состояний. Зависимость от частоты.
12. Понятие об МДП-структуре. Применяемые материалы и конструкция. Идеальная МДП-структура.



13. Емкость МДП-структуры. Зависимость от изгиба зон, напряжения и частоты.
14. Явление неравновесного обеднения поверхности полупроводника в МДП-структуре. Определение профиля распределения примеси и времени жизни из измерений неравновесной емкости.
15. Феноменологическая теория поверхностной рекомбинации. Методы определения скорости поверхностной рекомбинации.
16. Методы получения и свойства атомарно-чистых поверхностей полупроводников.
17. Методы получения и свойства реальных и пассивированных поверхностей полупроводников.
18. Нестабильности в МДП-структурах. Гистерезисные явления.
19. Феноменологическая теория явления памяти в МНОП-структурах.
20. Неравновесное обеднение МДП структуры. Приборы с зарядовой связью
21. Элементы памяти на квантово-размерных структурах

## 6. Фонд оценочных средств для промежуточной аттестации по дисциплине

**6.1.** Перечень компетенций выпускников образовательной программы, в формировании которых участвует дисциплина, с указанием результатов обучения (знаний, умений, владений) приведён выше (раздел 2). Ниже приведена таблица образовательных дескрипторов (отличительных признаков уровней освоения компетенций).

Уровень сформированности компетенций (индикатора достижения компетенций)	Шкала оценивания сформированности компетенций						
	плохо	неудовлетворительно	удовлетворительно	хорошо	очень хорошо	отлично	превосходно
	Не зачтено		зачтено				
<u>Знания</u>	Отсутствие знаний теоретического материала.  Невозможность оценить полноту знаний вследствие отказа обучающегося от ответа	Уровень знаний ниже минимальных требований. Имели место грубые ошибки.	Минимально допустимый уровень знаний. Допущено много негрубых ошибок.	Уровень знаний в объеме, соответствующем программе подготовки. Допущено несколько негрубых ошибок	Уровень знаний в объеме, соответствующем программе подготовки. Допущено несколько незначительных ошибок	Уровень знаний в объеме, соответствующем программе подготовки, без ошибок.	Уровень знаний в объеме, превышающем программу подготовки.
<u>Умения</u>	Отсутствие минимальных умений . Невозможность оценить наличие умений вследствие отказа обучающегося	При решении стандартных задач не продемонстрированы основные умения.  Имели место грубые	Продемонстрированы основные умения. Решены типовые задачи с негрубыми ошибками. Выполнены все задания	Продемонстрированы все основные умения. Решены все основные задачи с негрубыми ошибками.	Продемонстрированы все основные умения. Решены все основные задачи . Выполнены все задания, в полном объ-	Продемонстрированы все основные умения, решены все основные задачи с отдельными несущес-	Продемонстрированы все основные умения,. Решены все основные задачи. Выполнены все задания, в

	от ответа	ошибки.	но не в полном объеме.	Выполнены все задания, в полном объеме, но некоторые с недочетами.	еме, но некоторые с недочетами.	ственным недочетами, выполнены все задания в полном объеме.	полном объеме без недочетов
<u>Навыки</u>	Отсутствие владения материалом. Невозможность оценить наличие навыков вследствие отказа обучающегося от ответа	При решении стандартных задач не продемонстрированы базовые навыки.  Имели место грубые ошибки.	Имеется минимальный набор навыков для решения стандартных задач с некоторыми недочетами	Продемонстрированы базовые навыки  при решении стандартных задач с некоторыми недочетами	Продемонстрированы базовые навыки  при решении стандартных задач без ошибок и недочетов.	Продемонстрированы навыки  при решении нестандартных задач без ошибок и недочетов.	Продемонстрирован творческий подход к решению нестандартных задач

## 6.2. Описание шкал оценивания

Используется шкала оценивания «зачет-незачет»

## 6.3. Критерии и процедуры оценивания результатов обучения по дисциплине, характеризующих этапы формирования компетенций

Аттестация по дисциплине проходит в виде зачета по результатам первого семестра в виде индивидуального собеседования.

Критерии оценок зачета:

**зачтено** - владение программным материалом, понимание сущности рассматриваемых процессов и явлений в полупроводниках с областями пространственного заряда

**незачтено** - полное непонимание сущности электронных процессов и явлений в полупроводниках с областями пространственного заряда

Вопросы для подготовки к зачету содержатся в Пункте 5.

## 6.4. Типовые контрольные задания или иные материалы, необходимые для оценки результатов обучения, характеризующих этапы формирования компетенций и (или) для итогового контроля сформированности компетенции.

### ПК-3

#### Вопрос 1

В полупроводнике с высокой плотностью поверхностных состояний при увеличении частоты подвижность в эффекте поля

1. Уменьшается
2. Увеличивается
3. Не изменяется

#### Шкала оценки:

Зачтено – ответ (2);

Незачтено – ответы (1, 3).

## Вопрос 2

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 3

При положительном заряде на поверхностных состояниях изгиб зон в области пространственного заряда

1. В полупроводнике р-типа вверх, в полупроводнике n-типа вверх
2. В полупроводнике р-типа вверх, в полупроводнике n-типа вниз
3. В полупроводнике р-типа вниз, в полупроводнике n-типа вверх
4. В полупроводнике р-типа вниз, в полупроводнике n-типа вниз

### Шкала оценки:

5 баллов – ответ (4);

0 баллов – ответы (1, 2, 3).

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, 2021. — 384 с. <https://e-lib.unn.ru/MegaPro/Web/SearchResult/ToPage/1>
2. С.В. Тихов. Неравновесные процессы в МДП-структурах. Горький, ГГУ, 1985 г.- 68 с. <https://e-lib.unn.ru/MegaPro/Web/SearchResult/ToPage/1>
3. А.П. Горшков, С.В. Тихов. ФИЗИКА ПОВЕРХНОСТИ ПОЛУПРОВОДНИКОВ: Учебное пособие. – Нижний Новгород: Нижегородский госуниверситет, 2013. – 101с. [www.unn.ru/books/met\\_files/fppp.doc](http://www.unn.ru/books/met_files/fppp.doc) .
4. С. Зи. Физика полупроводниковых приборов. т.2, – М..Мир, 1984г. – 455 с. <http://e-lib.unn.ru/MegaPro/UserEntry?Action=FindDocs&ids=324624&idb=0>

### *б) дополнительная литература:*

1. А.В. Ржанов. Электронные процессы на поверхности полупроводников. М., Наука, 1971 г.
2. В.Н. Овсяк. 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. В.Г. Литовченко. Основы физики слоистых систем. Киев, Наукова думка, 1990 г.

5. Карпович И.А., Филатов Д.О. Фотоэлектрическая диагностика квантово-размерных гетероструктур. ННГУ, 2010 г.
6. А.В. Ржанов. Свойства структур металл – диэлектрик – полупроводник. М., Наука, 1976 г.

## **8. Материально-техническое обеспечение дисциплины**

Помещения представляют собой учебные аудитории для проведения учебных занятий, предусмотренных программой, оснащенные оборудованием и техническими средствами обучения. Материально-техническое обеспечение дисциплины «Физика поверхности полупроводников и систем пониженной размерности» обусловлено наличием необходимого количества учебников в библиотеке, некоторые из них представлены на сайте физического факультета в электронном виде. Помещения для самостоятельной работы обучающихся оснащены компьютерной техникой с возможностью подключения к сети "Интернет" и обеспечены доступом в электронную информационно-образовательную среду.

Программа составлена в соответствии с требованиями установленного ННГУ образовательного стандарта высшего образования по направлению подготовки 11.04.04 – «Электроника и наноэлектроника».

Автор:

к.ф.-мат. наук, доцент кафедры  
физики полупроводников и оптоэлектроники

А.П. Горшков

Рецензент:

заведующий кафедрой  
теоретической физики, д.ф.-м.н.

В.А. Бурдов

Заведующий кафедрой

физики полупроводников, электроники  
и наноэлектроники д.ф.-м.н. профессор

Д. А. Павлов

Программа одобрена на заседании Учебно-методической комиссии физического факультета ННГУ, протокол б/н от «17» ноября 2022 г.

Председатель

Учебно-методической комиссии  
физического факультета ННГУ

Перов А.А.