

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

УТВЕРЖДЕНО

решением президиума Ученого совета ННГУ

протокол № 1 от 16.01.2024 г.

Рабочая программа дисциплины

Физика поверхности полупроводников и систем пониженной
размерности

Уровень высшего образования
Магистратура

Направление подготовки / специальность
11.04.04 - Электроника и наноэлектроника

Направленность образовательной программы
Твердотельная электроника и наноэлектроника

Форма обучения
очная

г. Нижний Новгород

2024 год начала подготовки

1. Место дисциплины в структуре ОПОП

Дисциплина Б1.В.ДВ.01.02 Физика поверхности полупроводников и систем пониженной размерности относится к части, формируемой участниками образовательных отношений образовательной программы.

2. Планируемые результаты обучения по дисциплине, соотнесенные с планируемыми результатами освоения образовательной программы (компетенциями и индикаторами достижения компетенций)

Формируемые компетенции (код, содержание компетенции)	Планируемые результаты обучения по дисциплине (модулю), в соответствии с индикатором достижения компетенции		Наименование оценочного средства	
	Индикатор достижения компетенции (код, содержание индикатора)	Результаты обучения по дисциплине	Для текущего контроля успеваемости	Для промежуточной аттестации
ПК-3: Способность применять фундаментальные представления о физических явлениях для достижения требуемых функциональных качеств приборов, схем и устройств электроники и наноэлектроники	<p>ПК-3.1: Знает фундаментальные основы физических явлений и процессов, лежащих в основе работы приборов и устройств электроники и наноэлектроники</p> <p>ПК-3.2: Умеет проводить экспериментальные работы по отработке и внедрению новых технологических процессов производства изделий электроники и наноэлектроники</p> <p>ПК-3.3: Имеет опыт разработки методик экспериментальной проверки технологических процессов и исследования параметров наноструктурированных материалов</p>	<p>ПК-3.1:</p> <p>Знать: 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</p> <p>ПК-3.2:</p> <p>Уметь: осуществлять научно-исследовательскую деятельность в соответствующей 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</p>	Задания	Зачёт: Контрольные вопросы

		конденсированного состояния ПК-3.3: Владеть: 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		
--	--	--	--	--

3. Структура и содержание дисциплины

3.1 Трудоемкость дисциплины

	очная
Общая трудоемкость, з.е.	2
Часов по учебному плану	72
в том числе	
аудиторные занятия (контактная работа):	
- занятия лекционного типа	16
- занятия семинарского типа (практические занятия / лабораторные работы)	16
- КСР	1
самостоятельная работа	39
Промежуточная аттестация	0
	Зачёт

3.2. Содержание дисциплины

(структурированное по темам (разделам) с указанием отведенного на них количества академических часов и виды учебных занятий)

Наименование разделов и тем дисциплины	Всего (часы)	в том числе	
		Контактная работа (работа во взаимодействии с преподавателем), часы из них	Самостоятельная работа обучающегося,

		Занятия лекционного типа	Занятия семинарского типа (практические занятия/ лабора- торные работы), часы	Всего	часы
	о ф о	о ф о	о ф о	о ф о	о ф о
Введение	4	1	1	2	2
Теория электронных явлений в полупроводниках с ОПЗ	24	6	6	12	12
Квантовые размерные эффекты на поверхности полупроводника	8	2	2	4	4
Поверхностная рекомбинация	4	1	1	2	2
Атомарно-чистая и реальная поверхность полупроводников	4	1	1	2	2
Физика МДП структур	19	4	4	8	11
Приборы с зарядовой связью	8	1	1	2	6
Аттестация	0				
КСР	1			1	
Итого	72	16	16	33	39

Содержание разделов и тем дисциплины

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.

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.

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.

Поверхностная рекомбинация: Скорость поверхностной рекомбинации. Локализация электронов и образование двумерного газа. Двумерная поверхностная проводимость. Фотоэлектрическая спектроскопия квантово-размерных гетеронаноструктуры.

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.

Физика МДП структур: Феноменологическая теория МДП-структур. 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 $\text{SiO}_2/\text{Si}_3\text{N}_4$ в МНОП-структуре для создания элементов полупроводниковой памяти. Приборы с зарядовой связью: Использование явления неравновесного обеднения в полупроводнике в МДП-структуре для создания приборов с переносом заряда. Принцип работы фоточувствительных ПЗС матриц.

4. Учебно-методическое обеспечение самостоятельной работы обучающихся

Самостоятельная работа обучающихся включает в себя подготовку к контрольным вопросам и заданиям для текущего контроля и промежуточной аттестации по итогам освоения дисциплины приведенным в п. 5.

Горшков Алексей Павлович. Физика поверхности полупроводников : учебное пособие / А. П. Горшков, С. В. Тихов ; ННГУ им. Н. И. Лобачевского. - Нижний Новгород : Изд-во ННГУ, 2013. - 101 с. - Текст : электронный.

5. Фонд оценочных средств для текущего контроля успеваемости и промежуточной аттестации по дисциплине (модулю)

5.1 Типовые задания, необходимые для оценки результатов обучения при проведении текущего контроля успеваемости с указанием критериев их оценивания:

5.1.1 Типовые задания (оценочное средство - Задания) для оценки 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 п-типа вверх
2. В полупроводнике р-типа вверх, в полупроводнике п-типа вниз
3. В полупроводнике р-типа вниз, в полупроводнике п-типа вверх
4. В полупроводнике р-типа вниз, в полупроводнике п-типа вниз

Шкала оценки:

5 баллов – ответ (4);

0 баллов – ответы (1, 2, 3).

Критерии оценивания (оценочное средство - Задания)

Оценка	Критерии оценивания
зачтено	владение программным материалом, понимание сущности электронных явлений на поверхности полупроводников
не зачтено	полное непонимание сущности электронных явлений на поверхности полупроводников

5.2. Описание шкал оценивания результатов обучения по дисциплине при промежуточной аттестации

Шкала оценивания сформированности компетенций

Уровень сформированности компетенций (индикатора)	плохо	неудовлетворительно	удовлетворительно	хорошо	очень хорошо	отлично	превосходно
	не зачтено		зачтено				

достижения							
<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 несущественных ошибок	Уровень знаний в объеме, соответствующем программе подготовки. Ошибок нет.	Уровень знаний в объеме, превышающем программу подготовки.
<u>Умения</u>	Отсутствие минимальных умений. Невозможность оценить наличие умений вследствие отказа обучающегося от ответа	При решении стандартных задач не продемонстрированы основные умения. Имели место грубые ошибки	Продemonстрированы основные умения. Решены типовые задачи с негрубыми ошибками. Выполнены все задания, но не в полном объеме	Продemonстрированы все основные умения. Решены все основные задачи с негрубыми ошибками. Выполнены все задания в полном объеме, но некоторые с недочетами	Продemonстрированы все основные умения. Решены все основные задачи. Выполнены все задания в полном объеме, но некоторые с недочетами.	Продemonстрированы все основные умения. Решены все основные задачи с отдельными несущественными недочетами, выполнены все задания в полном объеме	Продemonстрированы все основные умения. Решены все основные задачи. Выполнены все задания, в полном объеме без недочетов
<u>Навыки</u>	Отсутствие базовых навыков. 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	Продemonстрированы базовые навыки при решении стандартных задач с некоторыми недочетами	Продemonстрированы базовые навыки при решении стандартных задач без ошибок и недочетов	Продemonстрированы навыки при решении нестандартных задач без ошибок и недочетов	Продemonстрирован творческий подход к решению нестандартных задач

Шкала оценивания при промежуточной аттестации

Оценка		Уровень подготовки
зачтено	превосходно	Все компетенции (части компетенций), на формирование которых направлена дисциплина, сформированы на уровне не ниже «превосходно», продемонстрированы знания, умения, владения по соответствующим компетенциям на уровне выше предусмотренного программой
	отлично	Все компетенции (части компетенций), на формирование которых направлена дисциплина, сформированы на уровне не ниже «отлично».
	очень хорошо	Все компетенции (части компетенций), на формирование которых направлена дисциплина, сформированы на уровне не ниже «очень хорошо»

	хорошо	Все компетенции (части компетенций), на формирование которых направлена дисциплина, сформированы на уровне не ниже «хорошо».
	удовлетворительно	Все компетенции (части компетенций), на формирование которых направлена дисциплина, сформированы на уровне не ниже «удовлетворительно», при этом хотя бы одна компетенция сформирована на уровне «удовлетворительно»
не зачтено	неудовлетворительно	Хотя бы одна компетенция сформирована на уровне «неудовлетворительно».
	плохо	Хотя бы одна компетенция сформирована на уровне «плохо»

5.3 Типовые контрольные задания или иные материалы, необходимые для оценки результатов обучения на промежуточной аттестации с указанием критериев их оценивания:

5.3.1 Типовые задания (оценочное средство - Контрольные вопросы) для оценки сформированности компетенции ПК-3

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

Критерии оценивания (оценочное средство - Контрольные вопросы)

Оценка	Критерии оценивания
зачтено	владение программным материалом, понимание сущности электронных явлений на поверхности полупроводников
не зачтено	полное непонимание сущности электронных явлений на поверхности полупроводников

6. Учебно-методическое и информационное обеспечение дисциплины (модуля)

Основная литература:

1. Шалимова Клавдия Васильевна. Физика полупроводников : [учеб. для вузов по специальности "Полупроводниковые и микроэлектрон. приборы"]. - 3-е изд., перераб. и доп. - М. : Энергоатомиздат, 1985. - 391 с. : ил. - 1.20., 38 экз.
2. Горшков Алексей Павлович. Физика поверхности полупроводников : учебное пособие / А. П. Горшков, С. В. Тихов ; ННГУ им. Н. И. Лобачевского. - Нижний Новгород : Изд-во ННГУ, 2013. - 101 с. - Текст : электронный., <https://e-lib.unn.ru/MegaPro/UserEntry?Action=FindDocs&ids=850699&idb=0>.
3. Тихов Станислав Викторович. Эффект поля в полупроводниках : практикум : учебно-методическое пособие / С. В. Тихов, Л. А. Истомин ; ННГУ им. Н. И. Лобачевского, Физический факультет. - Нижний Новгород : Изд-во ННГУ, 2010. - 23 с. - Текст : электронный., <https://e-lib.unn.ru/MegaPro/UserEntry?Action=FindDocs&ids=849874&idb=0>.
4. Карпович Игорь Алексеевич. Фотоэлектрическая диагностика квантово-размерных гетеронаноструктур : учеб. пособие для студентов ННГУ, обучающихся по направлениям 210600 - "Нанотехнология в электронике" и 210100 - "Электроника и микроэлектроника" / И. А. Карпович, Д. О. Филатов ; Нижегород. гос. ун-т им. Н. И. Лобачевского. - 2-е изд., перераб. и доп. - Нижний Новгород : Изд-во Нижегород. гос. ун-та, 2010. - 98 с. - ISBN 978-5-91326-156-4., 20 экз.

Дополнительная литература:

1. Ржанов Анатолий Васильевич. Электронные процессы на поверхности полупроводников. - М. : Наука, 1971. - 480 с. : ил. - (Физика полупроводников и полупроводниковых приборов). - 1.81., 4 экз.
2. Овсяк Виктор Николаевич. Электронные процессы в полупроводниках с областями пространственного заряда / отв. ред. А. В. Ржанов ; АН СССР, Сиб. отд-ние, Ин-т физики полупроводников. - Новосибирск : Наука, Сиб. отд-ние, 1984. - 253 с. : ил. - 3.00., 2 экз.

3. Волькенштейн Федор Федорович. Физико-химия поверхности полупроводников. - М. : Наука, 1973. - 399 с. - (Физика полупроводников и полупроводниковых приборов). - 1.46., 3 экз.
4. Литовченко Владимир Григорьевич. Основы физики полупроводниковых слоистых систем / АН УССР, ИН-т полупроводников. - Киев : Наукова думка, 1980. - 282 с. : ил. - 3.30., 2 экз.

Программное обеспечение и Интернет-ресурсы (в соответствии с содержанием дисциплины):

Помещения для самостоятельной работы обучающихся оснащены компьютерной техникой с возможностью подключения к сети "Интернет" и обеспечены доступом в электронную информационно-образовательную среду.

7. Материально-техническое обеспечение дисциплины (модуля)

Учебные аудитории для проведения учебных занятий, предусмотренных образовательной программой, оснащены мультимедийным оборудованием (проектор, экран), техническими средствами обучения.

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 ОС ННГУ по направлению подготовки/специальности 11.04.04 - Электроника и нанoeлектроника.

Автор(ы): Горшков Алексей Павлович, кандидат физико-математических наук, доцент.

Рецензент(ы): Бурдов Владимир Анатольевич, доктор физико-математических наук.

Заведующий кафедрой: Павлов Дмитрий Алексеевич, доктор физико-математических наук.

Программа одобрена на заседании методической комиссии от 09.01.2024, протокол № б/н.