

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
протокол № 6 от «31» мая 2023 г.

Рабочая программа дисциплины
Экспериментальные методы исследования

Уровень высшего образования
бакалавриат

Направление подготовки: 11.03.04 Электроника и нанoeлектроника
Направленности (профили): твердотельная электроника и нанoeлектроника

Форма обучения
очная

Нижегород, 2023 год

1. Место и цели дисциплины «Экспериментальные методы исследования» в структуре ОПОП

Дисциплина «Экспериментальные методы исследований» относится к обязательным дисциплинам формируемой участниками образовательных отношений части основной образовательной программы по направлению подготовки 11.03.04 «Электроника и наноэлектроника». Для усвоения данного курса необходимы знания по таким модулям и дисциплинам в рамках образовательной программы бакалавра как модуль «Математика» базовой части цикла математических и естественнонаучных дисциплин, курс «Квантовая механика» модуля «Теоретическая физика», дисциплины «Физика конденсированного состояния» и «Физика полупроводников»

«Экспериментальные методы исследований» - естественно-научная дисциплина, представляющая собой раздел наноэлектроники, в котором углубленно изучаются методы измерений свойств полупроводников, полупроводниковых приборов и интегральных схем, являющихся основой элементной базы современной электроники.

Цель изучения дисциплины - сформировать фундамент знаний и навыков, необходимых для осознанного и целенаправленного использования методов измерений при разработке и создании полупроводниковых приборов и других элементов электроники.

Задачами курса являются: изучение методов исследования структуры полупроводников и их физических свойств, а также полупроводниковых приборов и интегральных схем; обучение методам расчета и измерений параметров и характеристик: создание основы для последующего практического использования при контроле производства и научных исследований.

2. Планируемые результаты обучения по дисциплине

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	
ПК-4. Способен аргументировано выбирать и реализовывать на практике эффективную методику экспериментального исследования параметров и свойств наноматериалов, наноструктур, и устройств электроники и наноэлектроники различного функционального назначения	<p>ПК 4.1. Знает методики измерений параметров и свойств наноматериалов, наноструктур и устройств электроники и наноэлектроники различного функционального назначения.</p> <p>ПК-4.2. Умеет совершенствовать и внедрять новые методы и методики</p>	<p>Знать:</p> <ul style="list-style-type: none"> – основные методы измерения свойств полупроводниковых материалов и интегральных схем; – методы определения химического состава, кристаллографической структуры и электрофизических свойств материалов. – методы, используемые при контроле полупроводниковых приборов и интегральных схем, полученных по планарно-эпитаксиальной технологии их производства. <p>Уметь:</p> <ul style="list-style-type: none"> – объяснять сущность измерений 	<p>Вопросы по темам/разделам дисциплины.</p> <p>Фонд тестовых заданий</p>

назначения.	измерений параметров и свойств наноматериалов, наноструктур и устройств электроники и наноэлектроники. ПК-4.3. Владеет навыками использования различных методов и методик измерений параметров и свойств наноматериалов и наноструктур и устройств электроники и наноэлектроники	процессов в полупроводниках и простейших полупроводниковых структурах; – производить анализ и делать количественные оценки параметров физических объектов; – экспериментально определять основные параметры полупроводника – ширину запрещенной зоны, концентрацию, подвижность, время жизни, коэффициент диффузии носителей заряда; – изучать оригинальные научные работы и обзоры в области физики и техники измерений.	
-------------	--	--	--

3. Структура и содержание дисциплины

3.1 Трудоемкость дисциплины

Общая трудоемкость	2 ЗЕТ
Часов по учебному плану	72
в том числе	
аудиторные занятия (контактная работа):	
- занятия лекционного типа	32
- контроль самостоятельной работы	1
самостоятельная работа (в том числе написание реферата).	39
Промежуточная аттестация	7 семестр – зачет

3.2. Содержание дисциплины

Наименование разделов и тем дисциплины, форма промежуточной аттестации	Всего (часы)	в том числе	
		контактная работа (работа во взаимодействии с преподавателем), часы из них	Самостоятельная работа

		Занятия лекционного типа	Занятия семинарского типа	Занятия лабораторного типа	Всего	
1. Введение	3	2			2	1
2. Способы измерения удельного сопротивления полупроводника.	12	6			6	6
3. Эффект Холла и его применение для определения типа проводимости полупроводника, подвижности и концентрации носителей заряда.	12	6			6	6
4. Применение температурных измерений эффекта Холла и удельного сопротивления для определения ширины запрещенной зоны полупроводника.	8	4			4	4
5. Оптические методы определения параметров полупроводников.	8	4			4	4
6. ИК-спектроскопия.	6	2			2	4
7. Спектроскопия комбинационного рассеяния	6	2			2	4
8. Применение явления люминесценции для определения ряда параметров прямозонных полупроводниковых материалов.	6	2			2	4
9. Вольт-фарадные методы измерения параметров полупроводников.	10	4			4	6
Промежуточная аттестация по дисциплине Зачет, 1 час						

Содержание дисциплины «Экспериментальные методы исследования»

1). Введение. Объекты контроля в производстве изделий электроники: окружающая среда, вспомогательные материалы, основные материалы (полупроводники, диэлектрики и металлы), приборы и интегральные схемы. Общие требования к методам исследования и контроля: оптимизация методов измерений и числа испытаний, возможность автоматизации, низкая стоимость, возможность применения неразрушающих и незагрязняющих способов. Современные требования к методам измерения в научных исследованиях: применение максимально информативных методов; использование нескольких независимых методов для определения одного параметра; комплексный характер исследований; автоматизация измерений.

2). Способы измерения удельного сопротивления (ρ) полупроводника. Метод амперметра и вольтметра. Двухзондовый метод измерения удельного сопротивления полупроводников. Физические эффекты и явления, которые вносят погрешность в измерения. Четырехзондовый метод измерения ρ для образцов полубесконечных и ограниченных размеров. Применение четырехзондового метода при измерении удельного сопротивления тонких слоев и тонких пластин. Применение четырехзондового метода для определения поверхностного сопротивления тонких слоев. Измерение удельного сопротивления в неоднородных образцах. Последовательное удаление слоев. Измерение удельного сопротивления пластин произвольной формы (метод Ван дер Пау).

Однозондовый метод измерения ρ . Метод контроля удельного сопротивления измерением сопротивления растекания в точечном контакте. Двухзондовая и трехзондовая схемы измерения сопротивления растекания. Бесконтактные способы определения удельного сопротивления полупроводника.

3). Эффект Холла и его применение для определения типа проводимости полупроводника, подвижности и концентрации носителей заряда. Побочные гальваномагнитные эффекты, сопутствующие эффекту Холла. Режимы ЭДС Холла. Режим тока Холла. Эффект Холла в образцах Ван дер Пау. Магниторезистивные эффекты: физический и геометрический. Методы измерения эффекта Холла: метод постоянных электрического и магнитного поля, одночастотные и многочастотные методы. Эффект Холла в неоднородном полупроводнике и его использование для определения профиля легирования. Определение подвижности носителей заряда методом тока Холла и геометрического магнитосопротивления. Квантовый эффект Холла.

4). Применение температурных измерений эффекта Холла и удельного сопротивления для определения ширины запрещенной зоны полупроводника, глубины залегания, концентрации примеси и фактора ее вырождения. Применение температурных измерений термоЭДС для определения механизма рассеяния носителей заряда.

5). Оптические методы определения параметров полупроводников. Аппаратура для исследования оптических свойств полупроводников. Характеристики оптических приборов. Механизмы взаимодействия света с веществом. Методика определения коэффициента поглощения, типа оптических переходов и ширины запрещенной зоны полупроводника. Определение концентрации носителей по спектрам поглощения и отражения.

6). ИК-спектроскопия. Общие сведения о молекулярных спектрах. Интенсивность колебаний и правило отбора в ИК спектрах. Типы колебаний. Метод определения концентрации примеси из спектров поглощения

7). Спектроскопия комбинационного рассеяния. Классическая теория комбинационного рассеяния. Колебательные спектры комбинационного рассеяния. Колебательные спектры комбинационного рассеяния. Техника спектроскопии КР. Сравнение особенностей методов ИК (средняя, ближняя области) и КР.

8). Применение явления люминесценции для определения ряда параметров прямозонных полупроводниковых материалов. Люминесцентные методы определения ширины запрещенной зоны ΔE_g , зависимости ΔE_g от состава твердого раствора, градиента ΔE_g в варизонных полупроводниках. Определение концентрации равновесных носителей, степени компенсации и параметров глубоких центров в полупроводнике. Определение диффузионной длины носителей заряда по спектральной зависимости возбуждения и излучения фотолюминесценции.

9). Вольт-фарадные методы измерения параметров полупроводников. Зависимость емкости МДП-структуры от напряжения. Экспериментальные методы измерения вольт-фарадных характеристик: квазистатический C-V метод, метод высокочастотных C-V характеристик. Определение типа проводимости полупроводника, емкости слоя диэлектрика, диэлектрической проницаемости изолирующей пленки, заряда в диэлектрике и на границе раздела диэлектрик – полупроводник, изгиба зон в полупроводнике, плотности поверхностных состояний и их энергетического распределения. Контроль основных параметров МДП-структуры из измерений ВФХ.

4. Образовательные технологии

Основные виды образовательных технологий: лекции, контроль самостоятельной работы (проверка рефератов).

5. Учебно-методическое обеспечение самостоятельной работы обучающихся

Виды самостоятельной работы. Самостоятельная работа заключается в написании рефератов. Самостоятельная работа может проводиться как в домашних условиях, так и в читальном зале библиотеки, в компьютерных классах, в учебных кабинетах (лабораториях) с доступом к лабораторному оборудованию, приборам, базам данных, к Интернет-ресурсам. Текущий контроль успеваемости сводится к контролю самостоятельной работы и осуществляется путём контрольных опросов по спискам вопросов во время проверки рефератов.

6. Фонд оценочных средств для промежуточной аттестации по дисциплине (модулю), включающий:

6.1. Описание шкал оценивания результатов обучения по дисциплине

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, превышающий 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 отдельным и незначительным недочетом, выполнены все задания в полном	Продemonстрированы все основные умения. Решены все основные задачи. Выполнены все задания, в полном объеме без недочетов

						объеме.	
<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.	Продемонстрированы творческий подход к решению нестандартных задач

Шкала оценки при промежуточной аттестации

Оценка		Уровень подготовки
зачтено	Превосходно	Все компетенции (части компетенций), на формирование которых направлена дисциплина, сформированы на уровне не ниже «превосходно»
	Отлично	Все компетенции (части компетенций), на формирование которых направлена дисциплина, сформированы на уровне не ниже «отлично», при этом хотя бы одна компетенция сформирована на уровне «отлично»
	Очень хорошо	Все компетенции (части компетенций), на формирование которых направлена дисциплина, сформированы на уровне не ниже «очень хорошо», при этом хотя бы одна компетенция сформирована на уровне «очень хорошо»
	Хорошо	Все компетенции (части компетенций), на формирование которых направлена дисциплина, сформированы на уровне не ниже «хорошо», при этом хотя бы одна компетенция сформирована на уровне «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», ни одна из компетенций не сформирована на уровне «плохо»
	Плохо	Хотя бы одна компетенция сформирована на уровне «плохо»

Критерии выставления оценки при сдаче зачета:

Зачтено	Реферат написан. Тема изложена исчерпывающе.
---------	--

	Студент отвечает полностью на вопросы зачета, показывая удовлетворительное знание основ курса и базовых понятий. При ответе на дополнительные вопросы допускаются незначительные неточности.
Не зачтено	Реферат не написан. Тема изложена недостаточно, имеются неточности. Оформление реферата не соответствует общепринятым требованиям. Студент показывает неудовлетворительное знание основ курса и базовых понятий, не отвечает на основной и дополнительные вопросы.

6.2. Типовые контрольные задания или иные материалы, необходимые для оценки результатов обучения

6.2.1 Контрольные вопросы к зачету по дисциплине «Экспериментальные методы исследования»

1. Способы измерения удельного сопротивления полупроводника. Однозондовый и двухзондовый методы измерения удельного сопротивления полупроводника
2. Четырехзондовый метод измерения для образцов полубесконечных и ограниченных размеров.
3. Применение четырехзондового метода при измерении удельного сопротивления тонких слоев и тонких пластин.
4. Измерение удельного сопротивления пластин произвольной формы (метод Ван дер Пау).
5. Метод контроля удельного сопротивления измерением сопротивления растекания в точечном контакте
6. Эффект Холла и его применение для определения типа проводимости полупроводника, подвижности и концентрации носителей заряда. Одночастотные и двухчастотные методы.
7. Определение подвижности носителей заряда методами тока Холла и геометрического магнитосопротивления.
8. Оптические методы определения параметров полупроводников.
9. Определение концентрации носителей по спектрам поглощения и отражения.
10. Метод определения ширины запрещенной зоны полупроводника из оптических измерений.
11. Метод определения ширины запрещенной зоны полупроводника из измерений температурной зависимости термоэдс.
12. Метод определения ширины запрещенной зоны полупроводника из измерений температурной зависимости эффекта Холла.
13. Методы ИК-спектроскопии и спектроскопии комбинационного рассеяния.
14. Применение фотолюминесценции для определения параметров прямозонных полупроводниковых материалов.
15. Контроль основных параметров МДП-структуры из измерений ВФХ: определение типа проводимости полупроводника, емкости слоя диэлектрика, заряда в диэлектрике и на границе раздела диэлектрик – полупроводник, плотности поверхностных состояний и их энергетического распределения.

6.2.2. Типовые тестовые задания для оценки сформированности компетенции ПК-4

1. Ошибки и погрешности измерений.
2. Определение равновесных параметров полупроводниковых материалов.
3. Определение неравновесных параметров полупроводниковых материалов.
4. Люминесцентные методы контроля.
5. Фотовольтаические методы контроля.
6. Определение энергетических параметров полупроводников.
7. Контроль параметров приборных структур (р-п переход, барьер Шоттки, гетероструктура и МДП-структура).
8. Понятие о теплопроводности и параметры, ее характеризующие.
9. Чем квантовый эффект Холла отличается от классического эффекта Холла и как их различить.
10. Трудности измерения времени жизни в полупроводниках с малой длиной диффузии.
11. Экспериментальная схема реализации измерения рамановского рассеяния и способы извлечения информации об объекте из этих измерений.
12. Какую информацию о полупроводнике можно получить из совместных температурных измерений электропроводности и эффекта Холла?

6.2.3. Темы рефератов

1. Применение сканирующей зондовой микроскопии для контроля поверхности полупроводников и определения толщины тонких слоев различных материалов.
2. Методы измерения теплопроводности тонких слоев полупроводниковых материалов.
3. Измерение квантового эффекта Холла в полупроводниках.
4. Методы определения времени жизни неравновесных носителей в полупроводниках.
5. Применение метода рамановской спектроскопии для определения химического состава твердых растворов полупроводников.
6. Эффект Холла в неоднородных полупроводниках.
7. Влияние лазерного отжига на параметры полупроводников.
8. Методы определения энергетических параметров и концентрации квантовых точек в полупроводниках.
9. Определение параметров диэлектрических материалов методом рамановского рассеяния
10. Применение метода вольт-фарадных характеристик (ВФХ) для определения параметров структур металл-диэлектрик-полупроводник.
11. Методы определения эффекта дальнего действия в полупроводниках.
12. Использование метода электронного парамагнитного резонанса для определения дефектов в диэлектрических слоях.
13. Определение параметров полупроводника из измерений эффекта Холла.
14. Методы контроля морфологии поверхности полупроводников.
15. Определение параметров дефектов в диэлектрических пленках методом люминесценции.
16. Определение малых времен жизни неравновесных носителей в полупроводниках.
17. Измерение параметров полупроводников методом Ван-дер-Пау.
18. Определение коэффициента диффузии неосновных носителей заряда.
19. Исследование эпитаксиальных периодических структур методом сканирующей просвечивающей электронной микроскопии высокого разрешения.
20. Современные методы контроля кристаллической структуры полупроводников.
21. Методы гальваномагнитных измерений.

22. Электронный парамагнитный резонанс.
23. Изготовление и методы контроля омических контактов.
24. Методы определения толщины тонких слоев диэлектриков и полупроводников.
25. Электронографические методы исследования полупроводников.
26. Методы контроля свойств спин-чувствительных полупроводниковых структур.
27. Использование эффекта Холла и проводимости для определения равновесных параметров полупроводников.
28. Исследование характеристик диодов Шоттки на основе GaAs с квантовыми ямами.
29. Методы определения времени жизни в полупроводниках.
30. Определение основных параметров диода Шоттки.
31. Электрофизические методы определения основных параметров полупроводников на основе соединений A^3B^5 .
32. Современные методы контроля кристаллической структуры полупроводников.
33. Методы гальваномагнитных измерений.
34. Электронный парамагнитный резонанс.
35. Изготовление и методы контроля омических контактов.
36. Методы определения толщины тонких слоев диэлектриков и полупроводников.
37. Методы контроля свойств спин-чувствительных полупроводниковых структур
38. Использование эффекта Холла и проводимости для определения равновесных параметров полупроводников.
39. Исследование характеристик диодов Шоттки на основе GaAs с квантовыми ямами.
40. Методы определения времени жизни в полупроводниках.
41. Методы определения ширины запрещенной зоны полупроводников.
42. Определение дрейфовой подвижности носителей заряда в полупроводнике.
43. Исследование квантово-размерных гетероструктур фотоэлектрическими методами.
44. Современные методы определения химического состава веществ.
45. Использование метода люминесценции для контроля слоистых гетероструктур.
46. Методы определения толщины относительно тонких слоев материалов.
47. Методы измерения дрейфовой подвижности неравновесных носителей заряда в полупроводниках.
48. Измерение малых времен жизни.

7. Учебно-методическое и информационное обеспечение дисциплины

а) основная литература:

1. Батавин, В.В. Измерение параметров полупроводниковых материалов / В.В. Батавин, Ю.А. Концевой, Ю.В. Федорович – М.: Радио и связь. 1985. - 264с.
2. Павлов, Л.П. Методы измерения параметров полупроводниковых материалов: Учебник для ВУЗов. – М.: Высшая школа, 1987. – 260 с.
3. Воробьев, Ю.В. Методы исследования полупроводников/ Ю.В. Воробьев, В.Н., Добровольский, В.И. Стриха – Киев: Выща школа, Головное изд-во, 1988. — 232 с.: ил. – ISBN 5-11-000230-4.

б) дополнительная литература:

1. В.Н. Овсюк. Электронные процессы в полупроводниках с областями пространственного заряда. Новосибирск, Издательство "Наука", Сибирское отделение, 1984 г. -7 экз в библиотеке НИФТИ.

2. С.В. Тихов. Методы исследования полупроводниковых материалов, приборов и интегральных схем, ГГУ, 1990, - 83с.

<http://www.lib.unn.ru/php/details.php?DocId=25209&DB=1>

в) программное обеспечение и Интернет-ресурсы.

1. Научная электронная библиотека (электронная библиотека периодических изданий - доступ через компьютеры, подключенные к сети ННГУ): <https://elibrary.ru/defaultx.asp>.

2. Электронная база данных по свойствам полупроводниковых материалов: <http://www.matprop.ru>.

3. Электронная база данных по физическим, химическим и структурным свойствам веществ и соединений (доступ через компьютеры, подключенные к сети ННГУ): <http://www.springermaterials.com>.

8. Материально-техническое обеспечение дисциплины «Экспериментальные методы исследования»

Помещения представляют собой учебные аудитории для проведения учебных занятий, предусмотренных программой, оснащенные оборудованием и техническими средствами обучения: специализированной мебелью, меловыми или магнитно-маркерными досками для представления учебной информации большой аудитории.

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 11.03.04 – «Электроника и нанoeлектроника».

Автор: доцент кафедры физики полупроводников, электроники и нанoeлектроники, к.ф.-м.н. С.М. Планкина

Рецензент: заведующий кафедрой теоретической физики д.ф.-м.н. профессор В.А. Бурдов

Заведующий кафедрой физики полупроводников, электроники и нанoeлектроники д.ф.-м.н. профессор Д. А. Павлов

Программа одобрена на заседании Учебно-методической комиссии физического факультета ННГУ, протокол б/н от «20» мая 2023 г.

Председатель Учебно-методической комиссии физического факультета ННГУ
к.ф.-м.н. А.А. Перов