

МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ

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

Физический факультет

Кафедра физики полупроводников, электроники и наноэлектроники

УТВЕРЖДЕНО
решением ученого совета ННГУ
протокол № 6 от «31» мая 2023 г.

Рабочая программа дисциплины

Физико-химические основы технологии микро- и наноструктур

Уровень высшего образования
бакалавриат

Направление подготовки: 28.03.01 Нанотехнологии и микросистемная техника
Направленность (профиль): Материалы микро- и наносистемной техники

Форма обучения: очная

Нижний Новгород, 2023

1. Место и цели дисциплины в структуре ОПОП

Дисциплина «Физико-химические основы технологии микро- и наноструктур» относится к обязательной части основной образовательной программы по направлению подготовки 28.03.01 «Нанотехнологии и микросистемная техника». Для усвоения данного курса студентам необходимы знания по таким модулям и дисциплинам в рамках образовательной программы бакалавра, как обязательные модули «Общая физика» (Б1.О.06), «Математика» (Б1.О.07), и «Теоретическая физика» (Б1.О.10), курсы «Физика конденсированного состояния» (Б1.О.13) и «Физика полупроводников» (Б1.О.14), а также курсы: «Химия» (Б1.В.02), «Кристаллография» (Б1.В.06), «Основы технологии материалов» (Б1.В.08) и «Теоретические основы электро- и радиотехники» (Б1.В.09), относящиеся к вариативной части профессионального цикла.

Освоение данного курса осуществляется в седьмом семестре и является обязательным, поскольку относится к предшествующим и параллельным для изучения следующих дисциплин профессионального цикла: «Нанофизика и наноэлектроника» (Б1.О.18), «Твердотельная электроника» (Б1.В.12), «Конструирование микро- и наноструктур» (Б1.В.16), «Квантовая и оптическая электроника» (Б1.В.17) и др.

«Физико-химические основы технологии микро- и наноструктур» – естественно-научная дисциплина, в которой изучаются физические и химические закономерности подходов и принципов создания полупроводниковых приборов современной микро- и наноэлектроники.

Цель изучения дисциплины – сформировать базовое знание и навыки, необходимые для разработки, расчетов и проектирования технологических параметров процессов формирования и производства приборных микро- и наноструктур.

Задачами освоения дисциплины являются:

- изучение физических и физико-химических закономерностей, определяющих процессы современной технологии дискретных приборов и интегральных схем микро- и наноэлектроники, включая элементы оптоэлектроники;
- формирование у студентов фундаментальных знаний, умений и навыков, необходимых при разработке технологии изделий электронной техники, обеспечении высокой надежности изделий микронного и субмикронного масштаба;
- получение углубленного профессионального образования по технологии твердотельных дискретных и интегральных приборов электроники, обеспечивающего возможность быстрого и самостоятельного приобретения новых знаний для успешной профессиональной деятельности в области микро- и наноэлектроники.

2. Планируемые результаты обучения по дисциплине

Процесс изучения дисциплины направлен на формирование следующих компетенций:

- Способность принимать обоснованные технические решения в профессиональной деятельности, выбирать эффективные и безопасные технические средства и технологии (ОПК-5);
- Способность применять фундаментальные знания о физических свойствах систем с пониженной размерностью и учитывать современные тенденции развития нанотехнологий в своей профессиональной деятельности (ОПК ОС-8).

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	
ОПК-5. Способен принимать обоснованные технические решения в профессиональной деятельности, выбирать эффективные и безопасные технические средства и технологии.	ОПК-5.1. Знает современные технические средства и технологии. ОПК-5.2 Умеет выбирать эффективные и безопасные технические средства и технологии. ОПК-5.3. Владеет навыками применения технических средств и технологий в профессиональной деятельности	Студент должен знать : - общие принципы, атрибуты и этапы технологии полупроводниковых приборов; - физико-химические принципы разделения и очистки материалов; - сущность теории химического травления полупроводников; - процессы и методы эпитаксиального выращивания; - физико-химические закономерности формирования слоев диэлектрических защитных пленок; основы литографических процессов, процессов диффузионного и ионно-лучевого легирования полупроводников и диэлектриков, используемых в технологии микро- и наноструктур; - физико-химические основы проведения процессов формирования контактов и выводов полупроводниковых микро- и наноструктур; - основные принципы создания активных и пассивных элементов оптоэлектроники. Уметь объяснять сущность физических и химических явлений технологических процессов и обоснованно выбирать материалы и методы для формирования конкретных структур. Иметь навыки проведения технологических процессов и контроля свойств микро- и наноструктур	Вопросы по темам/разделам дисциплины. Комплект задач и заданий к лабораторному практикуму. Фонд тестовых вопросов и заданий
ОПК ОС-8. Способен применять фундаментальные знания о физических свойствах систем с пониженной	ОПК ОС-8.1. Знает фундаментальные основы нанотехнологий, физические свойства систем с пониженной размерностью. ОПК ОС-8.2. Знает современные тенден-	Студент должен знать : - назначение, подходы и принципы технологии низкоразмерных элементов, слоев и структур создания полупроводниковых приборов нанoeлектроники; - использование химического и ионного травления низко размерных полупроводников;	Вопросы по темам/ разделам дисциплины. Комплект задач и за-

размерностью и учитывать современные тенденции развития нанотехнологий в своей профессиональной деятельности	<p>ции развития нанотехнологий в своей профессиональной деятельности.</p> <p>ОПК ОС-8.3. Умеет применять знания об основах нанотехнологий и физических свойствах систем с пониженной размерностью в своей профессиональной деятельности</p>	<p>- процессы и методы эпитаксиального выращивания в нанотехнологии;</p> <p>- использование и формирования слоев диэлектрических низкоразмерных пленок с разной проницаемостью; основы нанолитографических процессов.</p> <p>Студент должен уметь:</p> <p>– объяснить сущность физических и химических явлений во всех этапах изготовления полупроводникового прибора по типовому технологическому процессу;</p> <p>– производить анализ и делать количественные оценки параметров процессов термического окисления кремния, диффузионного и ионно-лучевого легирования полупроводников, напыления тонких пленок физическими и физико-химическими методами;</p> <p>– экспериментально определять параметры проведения основных технологических процессов.</p> <p>Студент должен иметь навыки использования полученных знаний для решения задач применения современных технических средств и технологий создания приборов микро- и нанoeлектроники, и микросистемной техники.</p>	<p>даний к лабораторному практикуму.</p> <p>Фонд тестовых вопросов и заданий</p>
--	---	--	--

3. Структура и содержание дисциплины

3.1 Трудоемкость дисциплины

Общая трудоемкость	4 ЗЕТ
Часов по учебному плану	144
в том числе	
аудиторные занятия (контактная работа):	82
- занятия лекционного типа	32
занятия семинарского типа (лаб. практикум)	48
КСРИФ	2
самостоятельная работа	26 (работа в семестре) 36 (на подготовку к экзамену)
Промежуточная аттестация	7 семестр – экзамен

3.2. Содержание дисциплины

№ п/п	Наименование и краткое содержание разделов и тем дисциплины, форма промежуточной аттестации по дисциплине	Семестр	Всего (часы)	В том числе			Самостоятельная работа обучающегося, часы
				Контактная работа (работа во взаимодействии с преподавателем), часы из них			
				Занятия лекционного типа	Занятия лабораторного типа	Всего	
1	Введение. Актуальность и тенденции развития технологии микро- и нано-электроники. Общие принципы планарной технологии полупроводниковых приборов	7	4	2		2	2
2	Основные физико-химические методы получения материалов. Основы процессов разделения и очистки. Механическая и химическая обработка.		8	4		4	4
3	Технология получения эпитаксиальных слоев		10	4		4	6
4	Основы технологии диэлектрических защитных пленок		10	2	4	6	4
5	Физико-химические основы литографии		14	4	6	10	4
6	Ионно-плазменное травление органических и неорганических покрытий.		8	2		2	4
7	Основы диффузионного легирования полупроводников и диэлектриков		14	4	6	10	4
8	Основы легирования методом ионной имплантации		12	2	4	6	6
9	Металлизация. Элементы тонкопленочной технологии		10	2	4	6	4
10	Основы технологии сборки. Микросварка. Герметизация		10	2	4	6	4
11	Физико-химические методы формирования наноструктур		14	2	6	8	6
12	Физические процессы в технологии тонких пленок. Вакуумное испарение		10	2	4	6	4
13	Методы ионного распыления		8		4	4	4
14	Технологические приемы формирования пассивных и активных приборов оптоэлектроники и фотоники		12		6	6	6
	Промеж.аттестация Экзамен (7-й семестр) - 2 часа						
	Итого		144	32	48	80	62

Содержание разделов дисциплины:

1. Введение. Актуальность и тенденции развития технологии микро- и нанoeлектроники. Атрибутивные признаки и общие принципы планарной технологии приборов микро- и нанoeлектроники. Типовой планарный процесс. Типовые n-МОП- и КМОП-процессы. Общие подходы и особенности принципов технологии активных и пассивных элементов микро-, нано- и оптоэлектроники. Тенденции и проблемы нанотехнологий и микросистемной техники в электронике.
2. Физико-химические методы получения полупроводниковых материалов. Чистые вещества. Физические методы разделения и очистки. Элементы теории роста кристаллов. Кристаллизационные методы очистки. Распределение примесей при направленной кристаллизации. Механическая и химическая обработка полупроводниковых материалов. Физические основы механизма разрушения материалов при механической обработке.
3. Гомо- и гетероэпитаксия. Методы эпитаксиального наращивания. Физико-химические процессы при эпитаксиальном выращивании газofазными методами. Метод молекулярно-лучевой эпитаксии. Особенности МОС-гидридной эпитаксии. Практическая реализация методов. Условия проведения, связь со свойствами. Дефекты эпитаксиальных слоев.
4. Диэлектрические пленки. Физико-химические способы формирования слоев. Механизмы и кинетика термического окисления. Методы химического осаждения из газовой фазы (ХОГФ) нанесения диэлектрических пленок. Вариант атомно-слоевого осаждения. Сравнительные характеристики диэлектрических пленок, полученных разными методами. Свойства и дефектность. Контроль качества слоев.
5. Литография. Физико-химические основы фотолитографии. Фотохимические процессы в фоторезистах. Резисты. Шаблоны. Контактные и проекционные системы фотолитографии. Электронная, ионная и рентгеновская литография. Экстремальная УФ - литография.
6. Ионно-плазменное травление органических и неорганических слоев и покрытий. Реакционные газы, используемые в плазменном травлении. Ключевые моменты и особенности. Получение нанообъектов ионным травлением.
7. Группы методов легирования полупроводников и диэлектриков. Диффузия. Механизмы и математическое описание процессов. Распределение примеси. Компенсация примеси. Влияние дефектов. Контроль качества легированных слоев.
8. Ионная имплантация. Основы теории ионного внедрения. Распределение внедренных ионов. Пробег и дисперсия пробегов ионов. Эффект каналирования. Радиационные нарушения. Способы отжига легированных структур. Актуальность ионно-лучевого легирования для наномасштабирования электронных структур.
9. Металлизация. Способы формирования. Требования и свойства металлических слоев. Омические и барьерные контакты и контактные системы. Элементы тонкопленочной технологии.
10. Физические процессы при сборке полупроводниковых приборов. Крепление подложек и кристаллов. Методы присоединения выводов. Механизмы формирования физического контакта поверхностей при сварке давлением. Герметизация.

11. Физико-химические методы формирования наноструктур. Физико-химические основы формирования массивов нанокластеров и нанокристаллов полупроводников и металлов в широкозонных матрицах. Физико-химические методы формирования пористого кремния. Влияние технологических условий на свойства нанокремния.
12. Физические процессы в технологии тонких пленок. Вакуумное испарение. Элементы теории испарения. Механизмы испарения. Распределение испаряемых частиц по направлениям. Принципы технологических устройств техники вакуумного испарения. Контроль в технологии тонких пленок.
13. Методы ионного распыления. Физический механизм распыления материалов под действием ионной бомбардировки. Распыление на постоянном и переменном токе. Магнетронное распыление. Реактивное распыление. Методы плазмо-химического осаждения в микро- и нанотехнологии. Другие методы химического осаждения из газовой фазы.
14. Принципы техпроцессов создания кремниевых фотонных интегральных схем (ФИС). Смарт-техпроцесс в гибридных ФИС. Технологические принципы формирования пассивных и активных приборов в фотонных телекоммуникационных системах. Пленочные технологии для создания микрорезонаторов, модуляторов, многослойных интерференционных покрытий нанофотоники. Просветляющие, зеркальные покрытия. Оптоэлектронные МЭМС-коммутаторы.

4. Образовательные технологии

Занятия по дисциплине проводят в лекционной форме, в форме лабораторных занятий и в форме самостоятельной работы студентов. На лекциях студенты знакомятся с основными процессами технологии пассивных и активных приборов твердотельной электроники, физико-химическими основами планарной технологии, включая основы формирования полупроводниковых материалов, эпитаксиальное наращивание, легирование полупроводников и диэлектриков, формирование диэлектрических пленок, литографические процессы, ионное травление, методы формирования нанообъектов и наноструктур, пассивных элементов оптоэлектроники. Чтение лекций проводится в аудитории традиционно и с использованием медиа-демонстрации презентаций как дополнительного наглядного материала. Сложный наглядный материал презентаций предоставляется слушателям в виде распечатанных бумажных копий.

На лабораторных занятиях студенты приобретают практические навыки работы с технологическим оборудованием и оборудованием, позволяющим контролировать необходимые параметры получения и обработки, устанавливать соответствующие параметры образцов и элементов микро- и наноструктур с применением лабораторного оборудования.

5. Учебно-методическое обеспечение самостоятельной работы студентов

Самостоятельная работа студентов включает в себя активное изучение лекционного материала совместно с соответствующими разделами учебных пособий и описаний лабораторных работ и рекомендованной литературы, подготовку к выполнению лабораторного практикума, обработку практически полученных результатов, оформление отчетов и подготовку к экзамену. Оценочными средствами для контроля текущей успеваемости являются текущие оценки в ходе регулярной для каждой подгруппы студентов работы на

лабораторных занятиях и индивидуальную оценку в процессе и по завершению выполнения цикла лабораторных работ. Итоговая аттестация проводится в форме экзамена, включающего проверку знаний теоретических основ, указанных в разделе «Содержание дисциплины» и успеваемость по итогам практического выполнения лабораторных работ.

Оценочные средства для контроля текущей успеваемости включают в себя устный опрос на лабораторных занятиях. Для прохождения итоговой аттестации проводится экзамен в седьмом семестре, включающий в себя теоретические вопросы по всему курсу и темам лабораторного практикума.

Лабораторный практикум включает следующие лабораторные работы:

- Фотолитография в планарной технологии.
- Легирование полупроводников и диэлектриков методом диффузии.
- Ионное легирование кремния
- Получение маскирующих покрытий в планарной технологии
- Напыление тонких пленок методом испарения в вакууме
- Создание омических контактов и выводов к кремниевым ИМС и полупроводниковым приборам
- Изготовление выводов к полупроводниковым приборам методом ультразвуковой сварки
- Интерференционные многослойные зеркала в оптоэлектронике
- Просветляющие покрытия в оптоэлектронике. Проектирование, материалы, особенности технологии

Контрольные (экзаменационные) вопросы для проведения промежуточной аттестации (экзамена) по итогам освоения дисциплины:

1. Типовая схема планарного техпроцесса на примере изготовления биполярного *n-p-n*-транзистора.
2. Типовая схема техпроцесса на примере изготовления *n*-МОП-транзистора.
3. Типовая схема смарт-техпроцесса на примере изготовления КМОП-структур
4. Физико-химические принципы разделения и очистки. Характеристика чистоты материала.
5. Кристаллизационные методы очистки. Направленная кристаллизация как метод выращивания и очистки полупроводников.
6. Процессы получения кристаллов кремния и германия.
7. Процессы получения кристаллов арсенида галлия и сапфира.
8. Основные методы ориентации полупроводниковых пластин.
9. Шлифовка и полировка полупроводниковых пластин. Классы обработки поверхности полупроводниковых и диэлектрических подложек.
10. Химическая и электрохимическая обработка полупроводников.
11. Особенности химического травления полупроводников. Селективное и полирующее травление.
12. Ионно-плазменное и газовое травление
13. Гомо- и гетероэпитаксия. Методы газофазной эпитаксии кремния. Основные химические реакции.
14. Приемы молекулярно-лучевой эпитаксии полупроводников.
15. МОС-гидридная эпитаксия слоев полупроводников $A^{III}B^V$.
16. Дефекты, возникающие в эпитаксиальных слоях.

17. Назначение диэлектрических слоев в планарной технологии. Основные физические, физико-химические и химические методы нанесения пленок SiO_2 и Si_3N_4 .
18. Термическое окисление кремния. Практическое осуществление и основные химические реакции.
19. Кинетика процесса роста слоя диоксида кремния при термическом окислении (Модель Дила-Гроува). Линейный и параболический законы роста.
20. Факторы, влияющие на кинетику роста термических слоев SiO_2 .
21. Пиролитические методы получения SiO_2 и Si_3N_4 . Контроль качества диэлектрических защитных пленок.
22. Физико-химические свойства слоев SiO_2 , Si_3N_4 и Al_2O_3 .
23. Маскирующие свойства пленок SiO_2 при диффузионном легировании.
24. Принципы формирования ультратонких пленок диэлектриков с разной диэлектрической проницаемостью. Актуальность, достоинства и недостатки диэлектриков с высокой и низкой проницаемостью в нанoeлектронике.
25. Принципы и материалы реализации метода атомно-слоевого осаждения диэлектриков. Сравнение метода с другими способами ХОГФ. Особенности свойств микро- и нанослоев диэлектрических пленок, полученных атомно-слоевым осаждением.
26. Сущность процесса фотолитографии. Фоторезисты.
27. Процессы, протекающие в позитивных резистах при разных освещенностях актиничного излучения.
28. Практическая схема проведения фотолитографии.
29. Процессы проявления, протекающие в позитивных фоторезистах.
30. Электронно- и рентгенолитография. Основные этапы. Шаблоны. Резисты.
31. Принципы, схема и ключевые моменты реализации экстремальной УФ литографии.
32. Диффузия. Основные механизмы диффузии в полупроводниках.
33. Основные законы диффузии.
34. Диффузия как способ пост-ростового легирования полупроводников и диэлектриков. Цели легирования. Компенсация. Механизмы и математическое описание. (Законы Фика в твердых телах).
35. Атомные механизмы диффузии в твердых телах.
36. Основные случаи решения II-го уравнения Фика.
37. Причины, влияющие на распределение примесей в реальных кристаллах.
38. Влияние внутреннего электрического поля на диффузию примесей в полупроводниках.
39. Влияние комплексообразования на диффузию примесей в полупроводниках.
40. Особенности диффузии в бинарных соединениях A^3B^5 .
41. Методы проведения диффузии.
42. Ионная имплантация как метод легирования полупроводников.
43. Основные положения теории ЛШШ. Пробег и дисперсия пробегов.
44. Доза аморфизации. Схема расчета профилей в аморфном теле по $\overline{R_p}$ и $\overline{\Delta R_p}$.
45. Каналирование и его влияние на профили распределения примесей.
46. Радиационные дефекты в полупроводниках и их отжиг.
47. Металлические пленки в планарной технологии. Требования к металлизации. Материалы. Способы формирования и свойства.
48. Магнетронное распыление. Реактивное распыление. Методы плазменно-химического осаждения в микро- и нанотехнологии.
49. Этапы сборки полупроводниковых приборов. Виды сварки давлением. Этапы формирования физического контакта при термокомпрессионной и ультразвуковой сварке.

50. Основы технологии пассивных и активных элементов оптоэлектроники и фотоники. Использование КНИ процессов для кремниевых фотонных интегральных схем.
51. Основы проектирования, материалы и особенности технологии оптические многослойных покрытий как пассивных элементов ФИС и коммутационных устройств.

Методическое обеспечение:

1. Физико-химические основы процесса фотолитографии. Практикум / Сост. Ж.В. Гарусова, В.Е. Котомина, Д.А. Павлов. – Нижний Новгород: ННГУ, 2008. – 24 с.
2. Формирование слоя фоторезиста. Практикум / Сост. Ж.В. Гарусова, Д.А. Павлов. – Нижний Новгород: Нижегородский госуниверситет, 2008. – 11 с.
3. Определение кинематической вязкости фоторезиста. Практикум / Сост. Ж.В. Гарусова, Д.А. Павлов. – Нижний Новгород: ННГУ, 2008. – 11 с.
4. Курильчик Е.В. Получение маскирующих покрытий в планарной технологии. Нижний Новгород: Издательство Нижегородского госуниверситета, 2006. – 14 с.
5. Курильчик Е.В. Легирование полупроводников методом диффузии –, Нижний Новгород, Изд-во ННГУ.- 2006. – 12 с.
6. Ершов А.В., Машин А.И., Жолудев А.А. Легирование полупроводников и диэлектриков методом диффузии. – Нижний Новгород: ННГУ, 1993. – 11 с.
7. Карзанов В.В., Королев Д.С. Ионное легирование кремния –Н. Новгород: Изд-во ННГУ.- 2013. – 20 с.
8. Ершов А.В., Машин А.И., Яшанин И.Б. Напыление тонких пленок методом испарения в вакууме. – Нижний Новгород: ННГУ, 1993. – 17 с.
9. Доброхотов Э.В., Курильчик Е.В. Создание омических контактов и выводов к кремниевым ИМС и полупроводниковым приборам Н.Новгород: ННГУ, 1988.-18 с.
10. Ершов А.В., Машин А.И., Паршков В.Г. Изготовление выводов в технологии микросхем методом ультразвуковой микросварки. – Н. Новгород: ННГУ, 1993. – 23 с.
11. Просветляющие покрытия в оптоэлектронике. Проектирование, материалы, особенности технологии: Практикум / Составители: А.В. Ершов, А.И. Машин. – Нижний Новгород: Нижегородский госуниверситет, 2009. – 32 с.
12. Интерференционные многослойные зеркала в оптоэлектронике: Практикум / Составители: А.В. Ершов, И.А. Карабанова. – Нижний Новгород: Нижегородский госуниверситет, 2009. – 31 с.
13. Задачи синтеза и анализа в проектировании многослойных оптических покрытий: Практикум / Составители: А.И. Машин, А.В. Ершов, Д.А. Грачев. – Нижний Новгород: Нижегородский госуниверситет, 2014. – 35 с. – Рег. № 819.14.05 от 03.12.14. – Электронное издание http://www.unn.ru/books/met_files/dif-syn.pdf.

6. Фонд оценочных средств для промежуточной аттестации по дисциплине

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
<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 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 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	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

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

Уровень освоения компетенции	Отличительные признаки
Начальный	<ul style="list-style-type: none"> - воспроизводит термины и основные понятия технологии микро- и наноструктур; - корректно объясняет основы типовых технологических процессов микро- и нанoeлектроники; - способен сопоставлять методы технологической обработки и физико- химические, топологические свойства полупроводниковых, диэлектрических слоев, приборных микро – и наноструктур.
Базовый	<ul style="list-style-type: none"> - выявляет взаимосвязь между методами, параметрами и особенностями технологий с топологией, слоевой конфигурацией микро- и наноструктур и их стандартными свойствами или параметрами; - знает фундаментальные основы процессов получения и функционирования материалов, компонентов и устройств электроники и нанoeлектроники; - знает предельные возможности технологий, применяемых при производстве электронной компонентной базы, материалов и компонентов электроники и нанoeлектроники; - знает принципы выбора материалов для проведения технологических процессов.
Высокий	<ul style="list-style-type: none"> - знает традиционные и современные технологические методы формирования микро – и наноструктур и современные методы контроля их свойств; - применяет законы, правила, алгоритмы, теоретические модели и др.; - формулирует выводы; - оценивает соответствие теории и эксперимента; - оценивает научную и прикладную значимость результатов.

Промежуточный контроль качества усвоения студентами содержания дисциплины проводится в виде экзамена (7 семестр), на котором определяются:

- уровень усвоения студентами основного учебного материала по дисциплине;
- уровень понимания студентами изученного материала;
- способности студентов использовать полученные знания для выполнения конкретных заданий.

Форма проведения экзамена – индивидуальное собеседование. Экзаменационный билет содержит два вопроса. При выставлении экзаменационной оценки учитываются результаты сдачи студентом промежуточных отчетов по лабораторным занятиям. Контроль текущей успеваемости включают в себя текущие отчеты по лабораторным работам, обсуждение полученных данных с преподавателем. Экзаменационная оценка выставляется по принятой в ННГУ семибальной шкале. Экзаменационные оценки «превосходно» и «отлично» – соответствуют оценке 5 (отлично) по пятибальной шкале, оценки «очень хорошо» и «хорошо» – соответствуют оценке 4 (хорошо), оценка «удовлетворительно» – соответствует оценке 3 (удовлетворительно), оценки «неудовлетворительно» и «плохо» – соответствуют оценке 2 (неудовлетворительно).

Критерии выставления оценки при сдаче экзамена

Семибальная шкала	Описание семибальной шкалы	Пятибальная шкала
5,5 Превосходно	Отличная подготовка. Студент отвечает полностью на вопросы билета и дополнительные вопросы (задания), выходящие за рамки изученного объема курса и изученных алгоритмов и подходов, проявляя инициативу и творческое мышление. Все компетенции (части компетенций), на формирование которых направлена дисциплина, сформированы на уровне не ниже «превосходно»	5 отлично
5 отлично	Отличная подготовка. Студент отвечает полностью на вопросы билета в рамках изученных алгоритмов и подходов. При ответе на дополнительные вопросы допускаются незначительные неточности.	
4,5 очень хорошо	Хорошая подготовка. Студент показывает хороший уровень знания вопросов билета и отвечает с небольшими неточностями.	4 хорошо
4 хорошо	Хорошая подготовка. Студент показывает средний уровень знания вопросов билета и отвечает на некоторые дополнительные вопросы преподавателя (в рамках билета).	
3 удовлетворительно	Удовлетворительная подготовка. Студент показывает удовлетворительное знание вопросов билета и знание базовых понятий отвечая с наводящими вопросами преподавателя.	3 удовлетворительно
2 неудовлетворительно	Студент показывает неудовлетворительное знание основ курса и базовых понятий. Необходима дополнительная подготовка для успешного прохождения испытания.	2 неудовлетворительно
1 плохо	Подготовка совершенно недостаточна. Последующая пересдача возможна только с комиссией.	1 плохо

6.2. Критерии и процедуры оценивания результатов обучения по дисциплине, характеризующие этапы формирования компетенций

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

- для оценивания результатов обучения в виде **знаний** используются *тестовый* опрос теоретических знаний студентов по пройденным темам лекционного курса и выполненного практикума;

- для оценивания результатов обучения в виде **умений** используются простые задания для выполнения лабораторных работ, включающих несколько вопросов в виде краткой формулировки действий (комплекса действий) для проведения необходимых технологических операций и измерений, которые следует выполнить, или описание результата, который можно считать достоверным.

- для оценивания результатов обучения в виде **владений** используются комплексные задания лабораторных работ, требующие поэтапного решения в типичной ситуации и развернутого ответа.

- для проведения **итогового контроля** сформированности компетенции используются оформление и защита отчетов по лабораторным работам.

Оценочные средства для контроля текущей успеваемости включают в себя контрольные вопросы, содержащиеся в учебно-методических пособиях по лабораторным работам. Эти вопросы используются при допуске к выполнению экспериментальной части работ. По итогам проверки отчетов о выполнении работ заполняется контрольный лист, в котором преподаватели, проводившие лабораторные занятия выставляют отметку о выполнении. Лабораторный практикум по курсу считается пройденным, если в контрольном листе набрано необходимое число отметок о выполнении лабораторных работ.

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

Типовые контрольные задания и материалы заданий практических занятий, необходимые для оценки результатов обучения.

Типовые контрольные тестовые вопросы и задания:

Укажите правильные ответы на вопросы, в одном вопросе правильных ответов может быть **несколько**. Обведите чернилами правильные ответы.

1. Какие материалы наиболее часто используются в экстремальной ультрафиолетовой литографии для создания многослойных отражательных шаблонов-зеркал для $\lambda_e \approx 13$ нм:
 - 1) Al – Cr;
 - 2) эпитаксиальный слой n-Si;
 - 3) Mo/Si-зеркало;
 - 4) Mo/Si-зеркало + Cr-поглотитель
 - 5) другое, здесь не указанное.
2. Термин «эпитаксия» ввел Руайе и сформировал правило (правило Руайе), согласно которому эпитаксиальный рост возможен при одинаковом типе химической связи и с изоструктурными решетками слоя и подложки, но при относительном несоответствии их периодов, не превышающем:
 - 1) 5 %;
 - 2) 15 %;
 - 3) 22 %;
 - 4) 43.5 %.
3. Граница *p-n* перехода при легировании полупроводника методами диффузии или ионной имплантации определяется на уровне, где концентрации легирующей примеси (N_d ; N_a) и исходной инотипной (N_0) соотносятся как:
 - 1) $N_d = N_0$;
 - 2) $N_a = N_0$;
 - 3) $N_d > N_0$;
 - 4) $N_a \gg N_0$.

Типовые контрольные (экзаменационные) вопросы и задания

1. Дать краткую характеристику дефектам, возникающим в эпитаксиальных слоях.
 2. Решения II-го уравнения диффузии для различных начальных условий
-

1. Основные процессы, происходящие при росте термического диоксида кремния. Линеинный и параболический законы роста.
2. Причины, влияющие на распределение примесей в реальных кристаллах

-
1. Структура и свойства пленок SiO₂
 2. Типовая схема проведения фотолитографического процесса
-

7. Учебно-методическое и информационное обеспечение дисциплины

а) основная литература:

1. Королёв М.А.; Крупкина Т.Ю.; Ревелева М.А. Технология, конструкции и методы моделирования кремниевых интегральных микросхем. Ч. 1. Технологические процессы изготовления кремниевых интегральных схем и их моделирование - Москва : Лаборатория знаний, 2020. - 400 с. - ISBN 978-5-00101-814-8. Постоянная ссылка на документ: <http://e-lib.unn.ru/MegaPro/UserEntry?Action=FindDocs&ids=736528&idb=0>
УДК: 621.382.049.77.002(07)
2. Технология, конструкции и методы моделирования кремниевых интегральных микросхем : учеб. пособие для студентов вузов : в 2 ч. / под ред. Ю. А. Чаплыгина. - М. : Бином. Лаборатория знаний, 2009-. -Постоянная ссылка на документ: <http://e-lib.unn.ru/MegaPro/UserEntry?Action=FindDocs&ids=421343&idb=0> Шифры: 621.382 - Т 38
УДК: 621.382.049.77(075.)
3. Основы конструирования и технологии производства радиоэлектронных средств. Интегральные схемы / под ред. Гуляева Ю.В. - Москва : Юрайт, 2022. - 460 с. - ISBN 978-5-534-03170-6 : 1109.00. - Текст : электронный // ЭБС "Юрайт". Постоянная ссылка на документ: <http://e-lib.unn.ru/MegaPro/UserEntry?Action=FindDocs&ids=784727&idb=0>
УДК: 621.38(075.8)
4. Курносов А. И., Юдин В. В. Технология производства полупроводниковых приборов и интегральных микросхем - М. : Высшая школа, 1986. – 367.- 1.30. Постоянная ссылка на документ: <http://e-lib.unn.ru/MegaPro/UserEntry?Action=FindDocs&ids=319412&idb=0>
Шифры: 621.38 - К 93 УДК: 621.382.002
5. Аброян И. А., Андронов А. Н., Титов А. И. Физические основы электронной и ионной технологии : учеб. пособие для вузов. - М. : Высшая школа, 1984. - 320 с. - 0.90. Постоянная ссылка на документ: <http://e-lib.unn.ru/MegaPro/UserEntry?Action=FindDocs&ids=223148&idb=0> Шифры: 621.3 - А 16
УДК: 621.35(07)

б) дополнительная литература:

1. Технология СБИС : в 2 кн. Кн. 1 / под ред. С. Зи ; пер. с англ. под ред. Ю. Д. Чистякова ; пер. кн. В. М. Звероловлева [и др.]. - М. : Мир, 1986. - 404 с. - 3.00. Постоянная ссылка на документ: <http://e-lib.unn.ru/MegaPro/UserEntry?Action=FindDocs&ids=319055&idb=0>
Шифры: 621.38 - Т 38 УДК: 621.382.049.771
2. Технология СБИС : в 2 кн. Кн.2. / под ред. С. Зи ; пер. с англ. под ред. Ю. Д. Чистякова ; [авт. кн.: К. Могэб и др.] ; пер. кн.2 В. Н. Лейкина [и др.]. - М. : Мир, 1986. - 453 с. : ил. - 2.30. Постоянная ссылка на документ: <http://e-lib.unn.ru/MegaPro/UserEntry?Action=FindDocs&ids=319056&idb=0> Шифры: 621.38 - Т 38
УДК: 621.382.049.771

3. Пичугин И. Г., Таиров Ю. М. Технология полупроводниковых приборов: учеб. пособие для вузов. - М. : Высшая школа, 1984. - 288 с. : 1.10. Постоянная ссылка на документ: <http://e-lib.unn.ru/MegaPro/UserEntry?Action=FindDocs&ids=319423&idb=0> Шифры: 621.38 - П 36 УДК: 621.382.002
4. Парфенов О. Д. Технология микросхем: учеб. пособие для вузов - М. : Высшая школа, 1986. - 318, - 1.10. Постоянная ссылка на документ: <http://e-lib.unn.ru/MegaPro/UserEntry?Action=FindDocs&ids=320088&idb=0> Шифры: 621.38 - П 18 УДК: 621.382.049.77(07)
5. Таиров Ю. М., Цветков В. Ф. Технология полупроводниковых и диэлектрических материалов: учеб. для вузов - М. : Высшая школа, 1990. - 422. - ISBN 5-06-001032-5 : 1.30. Постоянная ссылка на документ: <http://e-lib.unn.ru/MegaPro/UserEntry?Action=FindDocs&ids=311786&idb=0> Шифры: 621.31 - Т 14 УДК: 621.315.592
6. Черняев В. Н. Технология производства интегральных микросхем и микропроцессоров: учеб. для вузов - М. : Радио и связь, 1987. - 463. - 1.40. Постоянная ссылка на документ: <http://e-lib.unn.ru/MegaPro/UserEntry?Action=FindDocs&ids=320100&idb=0> Шифры: 621.38 - Ч-49 УДК: 621.382.049.77(07)
7. Березин А. С., Мочалкина О. Р. Технология и конструирование интегральных микросхем: учеб. пособие для вузов. - М. : Радио и связь, 1992. - 319, - ISBN 5-256-01014-X: 15.00. Постоянная ссылка на документ: <http://e-lib.unn.ru/MegaPro/UserEntry?Action=FindDocs&ids=318756&idb=0> Шифры: 621.38 - Б 48 УДК: 621.382.049.77(07)
8. Зорин Е. И., Павлов П. В., Тетельбаум Д. И. Ионное легирование полупроводников. - М. : Энергия, 1975. - 129 с. - 0.39. Постоянная ссылка на документ: <http://e-lib.unn.ru/MegaPro/UserEntry?Action=FindDocs&ids=324627&idb=0> Шифры: 621.38 - 3-86 УДК: 621.382
9. Мейер Д., Эрикссон Л., Дэвис Д. Ионное легирование полупроводников: (Кремний и германий) : пер. с англ. / под ред. В. М. Гусева. - М. : Мир, 1973. - 296 с. Постоянная ссылка на документ: <http://e-lib.unn.ru/MegaPro/UserEntry?Action=FindDocs&ids=320994&idb=0> Шифры: 621.31 - М 45 УДК: 621.315.592
10. Риссел Х., Руге И. Ионная имплантация / пер. с нем. В. В. Климова, Пальянова В. Н. ; под ред. М. И. Гусевой. - М. : Наука, 1983. - 360 с. Постоянная ссылка: <http://e-lib.unn.ru/MegaPro/UserEntry?Action=FindDocs&ids=82922&idb=0> Шифры: 539.2 - Р 54 УДК: 539.2
11. МОП-СБИС. Моделирование элементов и технологических процессов: сб. лекций / под ред. П. Антонетти [и др.] ; пер. с англ. В. Л. Кустова [и др.] : под ред. Р. А. Сурица. - М. : Радио и связь, 1988. - 495. - ISBN 5-256-00130-2 : 4.10. Постоянная ссылка на документ: <http://e-lib.unn.ru/MegaPro/UserEntry?Action=FindDocs&ids=319033&idb=0> Шифры: 621.38 - М 78 УДК: 621.382.049.771
12. Крапухин В. В., Соколов И. А., Кузнецов Г. Д. Технология материалов электронной техники. Теория процессов полупроводниковой технологии : учеб. для вузов. - 2-е изд., перераб. и доп. - М. : МИСИС, 1995. - 493 с. Постоянная ссылка на документ: <http://e-lib.unn.ru/MegaPro/UserEntry?Action=FindDocs&ids=24720&idb=0> Шифры: 621.38 - К 77 УДК: 621.382(07)
13. Физико-технологические основы макро-, микро- и нанoeлектроники / Барыбин А.А., Томилин В.И., Шаповалов В.И. - Москва : Физматлит, 2011. Постоянная ссылка на документ: <http://e-lib.unn.ru/MegaPro/UserEntry?Action=FindDocs&ids=647014&idb=0>

8. Материально-техническое обеспечение дисциплины

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.

При выполнении лабораторных работ используются лаборатории кафедры физики полупроводников, электроники и нанoeлектроники и соответствующее оборудование:

- вакуумная установка напыления тонких пленок методом электронно-лучевого испарения ВУ-1А;
- вакуумная установка напыления тонких пленок методом магнетронного распыления ВУП-5М и/или TORR Int;
- установка вакуумного отжига и плазменной обработки в вакууме или в газовой среде на базе поста ВУП-5;
- установка ультразвуковой микросварки типа УСИММ-3;
- установка термокомпрессионной микросварки;
- спектрально-аналитический комплекс на базе спектрометра S150-1024/124;
- электропечь высокотемпературного отжига типа СУОЛ-044 с водяной баней и магистралью инертного газа;
- система механической обработки полупроводниковых пластин методом шарового шлифа;
- интерференционные микроскопы МИИ-4;
- установка совмещения и экспонирования типа ОСП-02;
- вытяжные модули и шкафы;
- спектрофотометр Cary-5000 УФ-Вид-ближнего ИК- диапазонов.

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 28.03.01 – «Нанотехнологии и микросистемная техника».

Авторы:

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

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

Рецензент:

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