

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
Ионно-лучевые методы формирования
микро- и наноструктур**

Уровень высшего образования
бакалавриат

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

Квалификация (степень): бакалавр
Форма обучения: очная

Нижний Новгород, 2023

1. Место и цели дисциплины в структуре ООП

Дисциплина «Ионно-лучевые методы формирования микро- и наноструктур» относится к дисциплинам по выбору части образовательной программы по направлению подготовки 28.03.01 «Нанотехнологии и микросистемная техника», формируемой участниками образовательных отношений. Для усвоения данного курса необходимо изучить такие модули (дисциплины) в рамках образовательной программы бакалавра как «Общая физика» базовой части цикла математических и естественно-научных дисциплин, «Теоретическая механика», «Физика конденсированного состояния» базовой части профессионального цикла и иметь представления об основных физических явлениях.

Цель освоения дисциплины «Ионно-лучевые методы формирования микро- и наноструктур»:

- формирование у студентов понимания основных физических явлений при ионно-лучевом воздействии на материалы;
- формирование представлений о практической значимости ионно-лучевых методов в технологии создания микро- и наноструктур, и, в частности, в современной технологии микро- и нанoeлектроники.

Знания, полученные в ходе изучения дисциплины «Ионно-лучевые методы формирования микро- и наноструктур», необходимы для дальнейшего освоения других дисциплин учебного плана, таких как «Физико-химические основы технологии формирования микро- и наноструктур», «Материалы и методы нанотехнологий», «Твердотельная электроника», выполнения выпускной квалификационной работы.

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

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-3. Готовность применять знания о фундаментальных основах технологических процессов получения материалов нано- и микросистемной техники	ПК-3.1. Знает фундаментальные основы технологических процессов получения материалов нано- и микросистемной техники. ПК-3.2. Умеет проводить экспериментальные работы по отработке и внедрению новых технологических процессов производства материалов нано- и микросистемной техники и использовать их в производстве ПК-3.2. Владеет опытом разработки методик экспериментальной проверки технологических процессов и исследования параметров	Знать принципы и возможности ионно-лучевых методов для создания микро- и наноструктур Уметь рассчитывать режимы формирования микро- и наноструктур ионно-лучевыми методами Владеть навыками определения параметров микро- и наноструктур, сформированных ионно-лучевыми методами.	Вопросы по темам/разделам дисциплины. Комплект заданий для выполнения лабораторной работы.

	наноструктурированных материалов		
--	----------------------------------	--	--

3.1 Трудоемкость дисциплины

Общая трудоемкость	2 ЗЕТ
Часов по учебному плану	72
в том числе	
аудиторные занятия (контактная работа):	
- занятия лекционного типа	26
- занятия семинарского типа	26
- КСРИФ	1
самостоятельная работа	19 (работа в семестре)
Промежуточная аттестация	8 семестр – зачет

3.2. Содержание дисциплины

№ п/п	Раздел Дисциплины	С е м е с т р	Всего (часы)	в том числе				Самостоятельная работа обучающегося, часы
				контактная работа (работа во взаимодействии с преподавателем), часы, из них				
				Занятия лекционного типа	Занятия семинарского типа	Занятия лабораторного типа	Всего	
1	Введение. Общая структурная схема научно-технического направления, называемого ионной имплантацией. Краткая историческая справка.	8	3	2			2	1
2	Принцип действия ионно-лучевых ускорителей.	8	3	2			2	1
3	Методы исследования профилей внедренных примесей в твердых мишенях. Основные экспериментальные данные о	8	12	2		8	10	2

	распределении внедренных примесей.							
4	Принципы теории пробегов.	8	9	2		6	8	1
5	Эффект каналирования.	8	3	2			2	1
6	Процессы дефектообразования при ионном внедрении.	8	10	2		6	8	2
7	Структурное положение внедренных примесей (на примере кремния и германия).	8	10	2		6	8	2
8	Радиационно-стимулированная диффузия.	8	3	2			2	1
9	Особенности ионной имплантации в полупроводники A^3B^5 .	8	4	2			2	2
10	Создание транзисторных структур методом ионной имплантации.	8	4	2			2	2
11	Эффекты больших доз.	8	4	2			2	2
12	Ионно-лучевая модификация диэлектриков и металлов.	8	3	2			2	1
13	Современные тенденции развития ионно-лучевых методов в технологии создания микро- и наноструктур	8	3	2			2	1
	Промежуточная аттестация - зачет 1 час							

Содержание разделов дисциплины

1. Введение. Основные понятия и термины. Задачи, решаемые с помощью ионно-лучевых методов в технологии создания микро- и наноструктур. Общая структурная схема научно-технического направления, называемого ионной имплантацией. Краткая историческая справка.
2. Принцип действия ионно-лучевых ускорителей. Параметры режимов ионного внедрения. Основные типы ионных источников. Фокусирующие и ускоряющие системы. Магнитная сепарация. Системы сканирования пучка. Конструкция коллекторного устройства. Вакуумная система ускорителя. Особенности

низкоэнергетических и высокоэнергетических ускорителей. Импульсные высокодозовые имплантеры.

3. Методы исследования профилей внедренных примесей в твердых мишенях. Основные экспериментальные данные о распределении внедренных примесей. Распределение Гаусса и Пирсона, их параметры.
4. Принципы теории Линдхарда-Шарфа-Шиота (ЛШШ). Основное соотношение для потерь энергии внедряющегося иона. Электронная и ядерная тормозные способности, их зависимость от энергии, природы иона и мишени. Принципы их расчета. Подход Фирсова для определения электронной тормозной способности. Полезные соотношения для определения пробегов.
5. Эффект каналирования. Расчет критического угла каналирования. Канализованный и беспорядочный пучки, оценка доли беспорядочного пучка. Оценка глубины каналирования. Способы подавления каналирования в технологии микроэлектроники. Применение режима каналирования в методах ОРР и ХРИ.
6. Процессы дефектообразования при ионном внедрении. Основные типы дефектов, возникающих при ионном внедрении (на примере кремния). Модель Кинчина-Пиза. Понятие кластера радиационных нарушений. Особенности кластеров радиационных нарушений при внедрении «тяжелых», «легких» и «средних» ионов, количественные оценки объемной плотности смещений. Отжиг дефектов. Аморфизация и рекристаллизация ионно-легированных слоев.
7. Структурное положение внедренных примесей (на примере кремния и германия). Качественная модель. Экспериментальные данные об элементах различных групп ПСЭ, внедренных в кремний. Поведение внедренных примесей при отжигах.
8. Радиационно-стимулированная диффузия: радиационная разгонка, «горячая» имплантация, термическая разгонка. Эффективный коэффициент диффузии, его зависимость от глубины.
9. Особенности ионной имплантации в полупроводники A^3B^5 . Особенности дефектообразования в бинарных полупроводниках. Протонная изоляция, создание полуизолирующих областей в n-типе GaAs. Аморфизация; дозы аморфизации и разложения, их зависимость от ионности кристалла. Специфика процедуры отжига. Особенности ионного легирования арсенида галлия элементами II группы ПСЭ, пороговые дозы, возникновение p-i-n-структуры. Ионное легирование элементами VI группы ПСЭ. Достоинства и недостатки применения ионов IV группы ПСЭ для легирования GaAs.
10. Создание транзисторных структур методом ионной имплантации. Принцип расчета трехслойной структуры. Применение радиационно-стимулированной диффузии при создании биполярного транзистора. Авто совмещенный полевой транзистор.
11. Эффекты больших доз. Ионно-стимулированная кристаллизация аморфизованных слоев. Разогрев мишени. Эффект распыления; применение эффекта распыления при исследовании химического состава (метод ВИМС). Ионно-лучевой синтез новых

фаз, его применение для создания КНИ-структур и наноструктурированных объектов.

12. Ионно-лучевая модификация диэлектриков и металлов. Изменение оптических и электрических свойств диэлектриков, создание волноводов и токопроводящих дорожек внутри и на поверхности диэлектрика. Управление коррозионными, фрикционными и трибологическими свойствами металлов.
13. Современные тенденции развития ионно-лучевых методов в технологии создания микро- и наноструктур. Применение ионно-лучевых и ионно-плазменных методов в нанoeлектронике. Ионно-лучевая литография. Модификация рельефа поверхности ионными пучками.

4. Образовательные технологии

Занятия по дисциплине проводят в лекционной форме, в форме практических занятий (решение задач), в форме лабораторных занятий, а также в форме самостоятельной работы студентов. На лекциях студенты знакомятся с основными представлениями, моделями и теориями физики конденсированного состояния. На практических занятиях они приобретают навыки математического описания конкретных эффектов и явлений, учатся количественно оценивать важные физические параметры. В ходе лабораторных занятий студенты осваивают экспериментальные методы исследования свойств ионно-легированных полупроводниковых слоев.

5. Учебно-методическое обеспечение самостоятельной работы студентов. Оценочные средства для текущего контроля успеваемости, промежуточной аттестации по итогам освоения дисциплины.

Самостоятельная работа студентов включает в себя активное изучение лекционного материала вместе с решением задач при использовании соответствующих разделов учебных пособий.

Для прохождения аттестации по предмету проводится зачет, включающий в себя теоретические вопросы и задачи.

При подготовке к зачету по предмету используются следующие контрольные вопросы:

1. Основные узлы ионных ускорителей и принципы их работы.
2. Параметры режима ионной имплантации. Основные параметры ионно-легированных слоев в полупроводниках.
3. Принципы теории ЛШШ. Основное соотношение для потерь энергии внедряемого иона. Расчет ядерной тормозной способности.
4. Принципы теории ЛШШ. Основное соотношение для потерь энергии внедряемого иона. Подходы к расчету электронной тормозной способности по Линдхарду и по Фирсову.

5. Эффект каналирования. Расчет критического угла. Беспорядочный и каналирующий пучки. Оценки глубины проникновения внедряемых ионов в режиме каналирования.
6. Типичные дефекты, возникающие в кремнии при ионной имплантации. Их отжиг.
7. Принципы модели Кинчина-Пиза. Особенности дефектообразования при ионной имплантации в случае тяжелых и легких ионов.
8. Аморфизация ковалентных кристаллов при ионной имплантации.
9. Структурное положение и электрическая активность внедренных атомов в кремнии.
10. Основные методы контроля ионно-легированных слоев в полупроводниках.
11. Принципы метода обратного резерфордского рассеяния для исследования твердых тел.
12. Принципы методов характеристического рентгеновского излучения и ВИМС для исследования твердых тел.
13. Условия возникновения радиационно-стимулированной диффузии. Решение уравнения диффузии для случая “радиационной разгонки”.
14. Радиационно-стимулированная диффузия в условиях “горячей имплантации” и термической разгонки.
15. Особенности ионного легирования арсенида галлия.
16. Особенности ионной имплантации в диэлектрические материалы. Основные типы радиационных дефектов в SiO_2 и Si_3N_4 .
17. Ионно-лучевой синтез диэлектрических слоев в кремнии. Основные методы создания КНИ-структур.
18. Модификация свойств металлов ионными пучками.
19. Эффект распыления. Его влияние на профиль внедряемой примеси.
20. Эффект дальнего действия при ионной имплантации.

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	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, без ошибок.	Уровень знаний в объеме, превышающем программу подготовки.

	обучающего от ответа						
<u>Умения</u>	Отсутствие минимальных умений. Невозможность оценить наличие умений вследствие отказа обучающего 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 несущественным 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 обучающего 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 некоторым и 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

6.2. Описание шкал оценивания

Промежуточный контроль качества усвоения студентами содержания дисциплины проводится в виде зачета (8 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.

Критерии выставления оценки при сдаче зачета:

Зачтено	Студент отвечает полностью на вопросы, показывая удовлетворительное знание основ курса и базовых понятий. При ответе на дополнительные вопросы допускаются незначительные неточности.
---------	---

Не зачтено	Студент показывает неудовлетворительное знание основ курса и базовых понятий.
------------	---

6.3. 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* используется фронтальный опрос на занятиях;
- для оценивания результатов обучения в виде *умений* используются задачи и простые задания, включающих несколько вопросов в виде краткой формулировки действий (комплекса действий) для проведения необходимых операций и количественных оценок, которые следует выполнить, или описание результата, который можно считать достоверным.
- для оценивания результатов обучения в виде *владений* используются комплексные задания, требующие поэтапного решения в типичной ситуации и развернутого ответа.

Типовые вопросы для фронтальных опросов:

1. Назвать важнейшие параметры режимов ионной имплантации, которые необходимо контролировать оператору ускорителя.
2. Записать и прокомментировать основное соотношение для потерь энергии быстрой частицы в твердой мишени.
3. Как устранить или существенно уменьшить дефектность ионно-легированного материала?

Типовые задачи и задания:

1. Ценить глубину р-n-перехода в р-Si с $p=10^{16} \text{ см}^{-3}$ при имплантации мышьяка с энергией 100 кэВ и дозой внедрения $\Phi=10^{14} \text{ см}^{-2}$.
2. Оценить пробег ионов бора в кремнии при $E=200 \text{ кэВ}$.
3. Оценить концентрацию вакансий в ионно-легированном слое кремния при внедрении сурьмы с энергией 100 кэВ.
4. Выбрать режим ионной имплантации для создания р-n⁺-перехода на глубине 0,1 мкм в р-Si с $p=10^{16} \text{ см}^{-3}$ при имплантации сурьмы.

7. Учебно-методическое и информационное обеспечение дисциплины «Ионно-лучевые методы формирования микро- и наноструктур»

а) основная литература:

1. Е.И.Зорин, П.В.Павлов, Д.И.Тетельбаум. Ионное легирование полупроводников. - М.: Энергия, 1975.
2. Х.Риссел, И.Руге. Ионная имплантация. – М.: Наука, 1983.
3. Дж.Мейер, Л.Эриксон, Дж.Дэвис. Ионное легирование полупроводников. М.: Мир, 1973.

4. И. А. Аброян, А. Н. Андронов, А. И. Титов. Физические основы электронной и ионной технологии. - М. : ВШ, 1984.

5. А.Ф.Буренков, Ф.Ф.Комаров, М.А.Кумахов, М.М.Темкина. Таблицы параметров пространственного распределения ионно-имплантированных примесей. – Минск: изд.БГУ, 1980.

б) дополнительная литература:

1. Л. Пранявичюс, Б. Дудонис. Модификация свойств твердых тел ионными пучками. - Вильнюс: Моклас, 1980.

2. Д.И.Тетельбаум. 40 лет ионной имплантации: взгляд в историю и перспективы.// Вестник Нижегородского университета им.Н.И.Лобачевского (сер. ФТТ), 2001. Вып.2(5), с.5-11.

3. Д.И.Тетельбаум. Ионная имплантация в Нижегородском университете: с чего все начиналось.// Вестник Нижегородского университета им.Н.И.Лобачевского (сер. ФТТ), 2003. Вып.1(6), с.205-207.

4. М.А.Кумахов, Ф.Ф.Комаров. Энергетические потери и пробеги ионов в твердых телах. – Минск: изд. БГУ, 1979.

5. Б.А.Гурович и др. Управляемая трансформация электрических, магнитных и оптических свойств материалов ионными пучками. // УФН, 2001. Т.171, №1, с.105-117.

6. В.С.Вавилов, А.Р.Челядинский. Ионная имплантация примесей в монокристаллы кремния: эффективность метода и радиационные нарушения.//УФН, 1995. Т.165, №3, с.347-358.

7. А.М.Митерев. Теоретические представления о формировании и эволюции треков заряженных частиц.// УФН, 2002. Т.172, №10, с.1131-1164.

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>.

Учебно-методическое обеспечение дисциплины «Ионно-лучевые методы формирования микро- и наноструктур» обусловлено наличием необходимого количества учебников в библиотеке и на сайте ННГУ в электронном виде.

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 лабораторной работы «Ионное легирование кремния» используются лаборатория кафедры физики полупроводников, электроники и нанoeлектроники и соответствующее оборудование:

- контрольно-измерительные комплексы NI PXI 1042 Q, включающие в себя мультиметры, осциллографы, генераторы стандартных сигналов, источники постоянного тока $0-(\mp 20)$ В и $0-(+6)$ В;
- металлографический микроскоп МИМ-7;
- оптический микроскоп;
- устройство для вскрытия р-п-перехода методом шлифа;
- муфельная печь СУОЛ с набором кварцевых контейнеров;
- оснастка для четырехзондового метода измерения проводимости полупроводников,
- оснастка для определения типа проводимости полупроводников методом термо-эдс.

Программа составлена в соответствии с требованиями установленного ННГУ образовательного стандарта высшего образования по направлению подготовки 28.03.01 "Нанотехнологии и микросистемная техника".

Автор:

к.ф.-м. н., доцент кафедры физики полупроводников,
электроники и нанoeлектроники

В.В.Карзанов

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