

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 Ученого совета ННГУ

протокол № 6 от 31.05.2023 г.

Рабочая программа дисциплины

Ионно-лучевые методы формирования микро- и наноструктур

Уровень высшего образования

Бакалавриат

Направление подготовки / специальность

11.03.04 - Электроника и нанoeлектроника

Направленность образовательной программы

Радиофотоника и оптоэлектроника

Форма обучения

очная

г. Нижний Новгород

2021 год начала подготовки

1. Место дисциплины в структуре ОПОП

Дисциплина Б1.В.19 Ионно-лучевые методы формирования микро- и наноструктур 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: Готовность применять знания о фундаментальных основах технологических процессов получения материалов и компонентов электроники и нанoeлектроники в профессиональной деятельности	<p>ПК-3.1: ПК-3.1. Знает фундаментальные основы технологических процессов получения материалов и компонентов электроники и нанoeлектроники.</p> <p>ПК-3.2: ПК-3.2. Умеет проводить экспериментальные работы по отработке и внедрению новых технологических процессов производства изделий микроэлектроники</p> <p>ПК-3.3: ПК 3.3. Владеет опытом разработки методик экспериментальной проверки технологических процессов и исследования параметров наноструктурированных материалов</p>	<p>ПК-3.1: Знать принципы и возможности ионно-лучевых методов для создания микро- и наноструктур</p> <p>ПК-3.2: Уметь рассчитывать режимы формирования микро- и наноструктур ионно-лучевыми методами</p> <p>ПК-3.3: Владеть навыками определения параметров микро- и наноструктур, сформированных ионно-лучевыми методами.</p>	<p>Допуск к лабораторной работе</p> <p>Отчет по лабораторным работам</p> <p>Задания</p>	<p>Зачёт:</p> <p>Контрольные вопросы</p>

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	26
- занятия семинарского типа (практические занятия / лабораторные работы)	26
- КСР	1

самостоятельная работа	19
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 и краткое содержание разделов и тем дисциплины	Всего (часы)	в том числе			
		Контактная работа (работа во взаимодействии с преподавателем), часы из них			Самостоятельная работа обучающегося, часы
		Занятия лекционного типа	Занятия семинарского типа (практические занятия/лабораторные работы), часы	Всего	
	о ф о	о ф о	о ф о	о ф о	о ф о
Тема 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.	3	2		2	1
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	2		2	1
3. Методы исследования профилей внедренных примесей в твердых мишенях. Основные экспериментальные данные о распределении внедренных примесей. Распределение Гаусса и Пирсона, их параметры.	3	2		2	1
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.	11	2	8	10	1
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.	9	2	6	8	1
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.	4	2		2	2
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.	9	2	6	8	1
8. Радиационно-стимулированная диффузия: радиационная разгонка, «горячая» имплантация, термическая разгонка. Эффективный коэффициент диффузии, его зависимость от глубины.	9	2	6	8	1
9. Особенности ионной имплантации в полупроводники АЗВ5. 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.	4	2		2	2
10. Создание транзисторных структур методом ионной имплантации. Принцип расчета трехслойной структуры. Применение радиационно-стимулированной диффузии при создании биполярного транзистора. Автосовмещенный полевой транзистор.	4	2		2	2

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.	4	2		2	2
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	4	2		2	2
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	2		2	2
Аттестация	0				
КСР	1			1	
Итого	72	26	26	53	19

4. Учебно-методическое обеспечение самостоятельной работы обучающихся

Карзанов В.В., Королев Д.С. ИОННОЕ ЛЕГИРОВАНИЕ КРЕМНИЯ: Практикум. Нижний Новгород: Нижегородский государственный университет им. Н.И. Лобачевского, 2013. – 21 с.

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 - Допуск к лабораторной работе) для оценки сформированности компетенции ПК-3

Вопросы для самоподготовки к сдаче допуска:

1. Назначение и принцип действия основных узлов ионного ускорителя.
2. Основное соотношение для потерь энергии движущегося иона в мишени.
3. Принципы расчета ядерной и электронной тормозной способности.
4. Как выглядит профиль распределения внедренной примеси для аморфных и кристаллических мишеней?
5. В чем суть эффекта каналирования, как этот эффект сказывается на профиле распределения примесей? Какие еще эффекты могут влиять на профиль распределения примесей?
6. Что такое критический угол каналирования и как он зависит от энергии ионов?
7. Принципы метода Монте-Карло для расчета параметров пробега ионов в аморфных мишенях.
8. Зачем нужен отжиг ионно-легированных слоев?
9. В чем заключается эффект «отрицательного отжига»?

10. Важнейшие параметры ионно-легированных слоев. Какие существуют методы для их экспериментального определения?

11. Основные методы определения глубины p-n-перехода в полупроводниковых структурах. В чем заключается метод шарового шлифа?

Критерии оценивания (оценочное средство - Допуск к лабораторной работе)

Оценка	Критерии оценивания
зачтено	Студент отвечает полностью на вопросы допуска к выполнению лабораторного практикума, показывая удовлетворительное знание. При ответе на дополнительные вопросы допускаются незначительные неточности.
не зачтено	Студент показывает неудовлетворительное знание материала.

5.1.2 Типовые задания (оценочное средство - Отчет по лабораторным работам) для оценки сформированности компетенции ПК-3

Подготовка и представление **отчета** по результатам выполнения лабораторной работы (практикума). Отчет оформляется по структуре научной статьи и включает подразделы: введение, цель эксперимента, теоретический раздел, методику эксперимента, результаты и их обсуждение, список литературы

Критерии оценивания (оценочное средство - Отчет по лабораторным работам)

Оценка	Критерии оценивания
зачтено	сдан отчет
не зачтено	отчет не сдан

5.1.3 Типовые задания (оценочное средство - Задания) для оценки сформированности компетенции ПК-3

Типовые вопросы и задания:

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?
4. Оценить глубину p-n-перехода в p-Si с $p=10^{16} \text{ см}^{-3}$ при имплантации мышьяка с энергией 100 кэВ и дозой внедрения $\Phi=10^{14} \text{ см}^{-2}$.
5. Оценить пробег ионов бора в кремнии при $E=200 \text{ кэВ}$.

6. Оценить концентрацию вакансий в ионно-легированном слое кремния при внедрении сурьмы с энергией 100 кэВ.
7. Выбрать режим ионной имплантации для создания p-n⁺-перехода на глубине 0,1 мкм в p-Si с $p=10^{16} \text{ см}^{-3}$ при имплантации сурьмы.

Критерии оценивания (оценочное средство - Задания)

Оценка	Критерии оценивания
зачтено	Студент отвечает полностью на вопросы и выполняет задания к выполнению лабораторного практикума, показывая удовлетворительное знание. При ответе на дополнительные вопросы допускаются незначительные неточности.
не зачтено	Студент показывает неудовлетворительное знание материала.

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

Шкала оценивания сформированности компетенций

Уровень сформированности компетенций (индикатора достижения 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 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	Продемонстрированы основные умения. Решены типовые задачи с негрубыми ошибками. Выполнены все задания, но не в полном объеме	Продемонстрированы все основные умения. Решены все основные задачи с негрубыми ошибками. Выполнены все задания в полном объеме, но некоторые	Продемонстрированы все основные умения. Решены все основные задачи. Выполнены все задания в полном объеме, но некоторые с недочетами.	Продемонстрированы все основные умения. Решены все основные задачи с отдельными несущественными недочетами, выполнен	Продемонстрированы все основные умения. Решены все основные задачи. Выполнены все задания, в полном объеме без недочетов

				с недочетами		ы все задания в полном объеме	
<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 некоторым и недочетами	Продемонстрированы базовые навыки при решении стандартных задач с некоторым и недочетами	Продемонстрированы базовые навыки при решении стандартных задач без ошибок и недочетов	Продемонстрированы навыки при решении нестандартных задач без ошибок и недочетов	Продемонстрирован творческий подход к решению нестандартных задач

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

5.3.1 Типовые задания, выносимые на промежуточную аттестацию:

Оценочное средство - Контрольные вопросы

Зачёт

Критерии оценивания (Контрольные вопросы - Зачёт)

Оценка	Критерии оценивания
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.

Типовые задания (Контрольные вопросы - Зачёт) для оценки сформированности компетенции ПК-3 (Готовность применять знания о фундаментальных основах технологических процессов получения материалов и компонентов электроники и нанoeлектроники в профессиональной деятельности)

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

Основная литература:

1. Зорин Евгений Иванович. Ионное легирование полупроводников. - М. : Энергия , 1975. - 129 с. : ил. - (Библиотечка радиотехнолога ; вып. 6). - 0.39., 2 экз.
2. Аброян Измаил Артурович. Физические основы электронной и ионной технологии : учеб. пособие для студентов специальностей электронной техники вузов. - М. : Высшая школа, 1984. - 320 с. : ил. - 0.90., 19 экз.
3. Петров Н. Н. Диагностика поверхности с помощью ионных пучков. - Л. : Изд-во Ленингр. ун-та, 1977. - 160 с. : ил. - 1.66., 1 экз.
4. Кумахов Мурадин Абубекирович. Энергетические потери и пробеги ионов в твердых телах. - Минск : Изд-во БГУ, 1979. - 319 с. - 2.90., 2 экз.
5. Таблицы параметров пространственного распределения ионноимплантированных примесей : теория, метод расчета, таблицы. - Минск : Изд-во БГУ, 1980. - 350 с. : ил. - 2.70., 1 экз.
6. Риссел Х. Ионная имплантация / пер. с нем. В. В. Климова, Пальянова В. Н. ; под ред. М. И. Гусевой. - М. : Наука, 1983. - 360 с. : ил. - 4.50., 3 экз.
7. Мейер Д. Ионное легирование полупроводников : (Кремний и германий) : пер. с англ. / под ред. В. М. Гусева. - М. : Мир, 1973. - 296 с. : ил. - 4300.00., 3 экз.

Дополнительная литература:

1. Восилиус Йонас Йонович. Процессы на поверхности твердых тел, активируемые ионными пучками / Каунас. политехн. ин-т им. А. Свечкуса. - Вильнюс : Мокслас, 1987. - 214 с. : ил. - 2.60., 1 экз.
2. Праниявичюс Людвикас Йонович. Модификация свойств твердых тел ионными пучками. - Вильнюс : Мокслас, 1980. - 242 с. : ил. - 1.80., 1 экз.

3. Комаров Фадей Фадеевич. Неразрушающий анализ поверхностей твердых тел ионными пучками. - Минск : Университетское, 1987. - 255, [1] с. : ил. - 2.40., 2 экз.

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

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>.

7. Материально-техническое обеспечение дисциплины (модуля)

Учебные аудитории для проведения учебных занятий, предусмотренных образовательной программой, оснащены мультимедийным оборудованием (проектор, экран), техническими средствами обучения, компьютерами, специализированным оборудованием: 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-(\pm 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.

Ионно-лучевой ускоритель ИЛУ-3 или ИЛУ-200

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 11.03.04 - Электроника и нанoeлектроника.

Автор(ы): Карзанов Вадим Вячеславович, кандидат физико-математических наук, доцент
Ершов Алексей Валентинович, 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 20.05.2023, протокол № 6/н.