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 наноэлектроники

Утверждено

решением ученого совета ННГУ

(протокол от 16.06.2021 г. №8)

**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, 2021

Набор 2021 года**Лист актуализации**

|  |
| --- |
|  |
|  |  |  |
|  |
|  |  |  |
|  |
|  |  |  |
| **Визирование РПД для исполнения в очередном учебном году** |
|  |  |  |
| Председатель МК |  |
| \_\_ \_\_\_\_\_\_\_\_\_\_ 2019 г. |
|  |  |  |
| Рабочая программа пересмотрена, обсуждена и одобрена дляисполнения в 2019-2020 учебном году на заседании кафедры |
| **\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_** |
|  |  |  |
|  | Протокол от \_\_ \_\_\_\_\_\_\_\_\_\_ 20\_\_\_ г. № \_\_Зав. кафедрой \_\_\_\_\_\_\_ |
|  |  |  |
|  |
|  |  |  |
|  |
|  |  |  |
| **Визирование РПД для исполнения в очередном учебном году** |
|  |  |  |
| Председатель МК |  |
| \_\_ \_\_\_\_\_\_\_\_\_\_ 20\_\_ г. |
|  |  |  |
| Рабочая программа пересмотрена, обсуждена и одобрена дляисполнения в 2020-2021 учебном году на заседании кафедры |
| **\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_** |
|  |  |  |
|  | Протокол от \_\_ \_\_\_\_\_\_\_\_\_\_ 20\_\_ г. № \_\_Зав. кафедрой \_\_\_\_\_\_\_ |
|  |  |  |
|  |
|  |  |  |
|  |
|  |  |  |
| **Визирование РПД для исполнения в очередном учебном году** |
|  |  |  |
| Председатель МК |  |
| \_\_ \_\_\_\_\_\_\_\_\_\_ 20\_\_\_ г. |
|  |  |  |
| Рабочая программа пересмотрена, обсуждена и одобрена дляисполнения в 2021-2022 учебном году на заседании кафедры |
| **\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_** |
|  |  |  |
|  | Протокол от \_\_ \_\_\_\_\_\_\_\_\_\_ 20\_\_\_ г. № \_\_Зав. кафедрой \_\_\_\_\_\_\_ |
|  |  |  |
|  |
|  |  |  |
|  |
|  |  |  |
| **Визирование РПД для исполнения в очередном учебном году** |
|  |  |  |
| Председатель МК |  |
| \_\_ \_\_\_\_\_\_\_\_\_\_ 20\_\_\_ г. |
|  |  |  |
| Рабочая программа пересмотрена, обсуждена и одобрена дляисполнения в 2022-2023 учебном году на заседании кафедры |
| **\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_** |
|  |  |  |
|  | Протокол от \_\_ \_\_\_\_\_\_\_\_\_\_ 20\_\_\_ г. № \_\_Зав. кафедрой \_\_\_\_\_\_\_ |

**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 нанострктур, и, в частности, в современной технологии микро- и наноэлектроники.

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** |
| ПКО-3. Готовность применять знания о фундаментальных основах технологических процессов получения материалов и компонентов электроники и наноэлектроники, использовать их в производстве, работать на современном технологическом оборудовании. | ПКО-3.1. Знание фундаментальных основ технологических процессов получения материалов и компонентов электроники и наноэлектроники.ПКО-3.2. Умение проводить экспериментальные работы по отработке и внедрению новых технологических процессов производства изделий микроэлектроники ПКО-3.3. Опыт разработки методик экспериментальной проверки технологических процессов и исследования параметров наноструктурированных материалов | ***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. Фонд тестовых заданий |

**3.1 Трудоемкость дисциплины**

|  |  |
| --- | --- |
| Общая трудоемкость | 2 ЗЕТ  |
| Часов по учебному плану | 72 |
| в том числе |  |
| аудиторные занятия (контактная работа):- занятия лекционного типа- занятия семинарского типа  | 2626 |
| самостоятельная работа | 19 (работа в семестре) |
| Промежуточная аттестация  | 8 семестр – зачет |

**3.2.** **Содержание дисциплины**

|  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- |
| **№****п/п** | **Раздел Дисциплины** | **Семестр** | **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** |  **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 | 4 | 2 |  |  | 2 | 2 |
| 3 | Методы исследования профилей внедренных примесей в твердых мишенях. Основные экспериментальные данные о распределении внедренных примесей. | 8 | 6 | 2 |  | 8 | 2 | 4 |
| 4 | Принципы теории пробегов. | 8 | 6 | 2 |  | 6 | 2 | 4 |
| 5 | Эффект каналирования. | 8 | 6 | 2 |  |  | 2 | 4 |
| 6 | Процессы дефектообразования при ионном внедрении. | 8 | 8 | 2 |  | 6 | 2 | 6 |
| 7 | Структурное положение внедренных примесей (на примере кремния и германия). | 8 | 6 | 2 |  | 6 | 2 | 4 |
| 8 | Радиационно-стимулированная диффузия. | 8 | 6 | 2 |  |  | 2 | 4 |
| 9 | Особенности ионной имплантации в полупроводники А3В5. | 8 | 6 | 2 |  |  | 2 | 4 |
| 10 | Создание транзисторных структур методом ионной имплантации. | 8 | 6 | 2 |  |  | 2 | 4 |
| 11 | Эффекты больших доз. | 8 | 6 | 2 |  |  | 2 | 4 |
| 12 | Ионно-лучевая модификация диэлектриков и металлов. | 8 | 4 | 2 |  |  | 2 | 2 |
| 13 | Современные тенденции развития ионно-лучевых методов в технологии создания микро- и наноструктур | 8 | 4 | 2 |  |  | 2 | 2 |
|  | 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. Каналированный 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 А3В5. Особенности дефектообразования в бинарных полупроводниках. Протонная изоляция, создание полуизолирующих областей в n-типе GaAs. Аморфизация; дозы аморфизиции 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 коррозийными, 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 наноэлектронике. 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 пособи.

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 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 SiO2 и Si3N4.
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 дальнодействия при ионной имплантации.

**6. Фонд оценочных средств для промежуточной аттестации по дисциплине**

6.1 Перечень компетенций выпускников образовательной программы, в формировании которых учувствует 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 |
| Знания | 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 ошибки. | 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.  |
| Умения | 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 с недочетами. | 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 несущественным недочетами, выполнены все задания в полном объеме.  | Продемонстрированы все основные умения,. Решены все основные задачи. Выполнены все задания, в полномобъеме без недочетов |
| Навыки | 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. | Продемонстрирован 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 p-n-перехода в p-Si с p=1016 см-3 при имплантации мышьяка с энергией 100 кэВ и дозой внедрения Ф=1014 см-2.
2. Оценить пробег ионов бора в кремнии при Е=200 кэВ.
3. Оценить концентрацию вакансий в ионно-легированном слое кремния при внедрении сурьмы с энергией 100 кэВ.
4. Выбрать режим ионной имплантации для создания p-n+-перехода на глубине 0,1 мкм в p-Si с p=1016 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 наноэлектроники и соответствующее оборудование:

* контрольно-измерительные комплексы NI PXI 1042 Q, влючающие в себя мультиметры, осциллографы, генераторы стандартных сигналов, источники постоянного тока 0-(∓20)В и 0-(+6)В;
* металлографический микроскоп МИМ-7;
* оптический микроскоп;
* устройство для вскрытия p-n-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 наноэлектроники \_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_ В.В.Карзанов

Рецензент:

заведующий кафедрой

теоретической физики, д.ф.-м.н. \_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_ В.А. Бурдов

Заведующий кафедрой

физики полупроводников, электроники

и наноэлектроники д.ф.-м.н. профессор \_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_ Д. А. Павлов

Программа одобрена на заседании Учебно-методической комиссии физического факультета ННГУ, протокол б/н от «12» апреля 2021 г.

Председатель Учебно-методической комиссии

физического факультета ННГУ \_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_ А.А. Перов