

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 № 4 от 26.04.2024 г.

**Рабочая программа дисциплины**

Лазерно-и ионно-лучевые методы в нанотехнологии

---

Уровень высшего образования  
Магистратура

---

Направление подготовки / специальность  
28.04.01 - Нанотехнологии и микросистемная техника

---

Направленность образовательной программы  
Квантовые и нейроморфные технологии

---

Форма обучения  
очная

---

г. Нижний Новгород

2025 год начала подготовки

## 1. Место дисциплины в структуре ОПОП

Дисциплина Б1.В.04.02 Лазерно-и ионно-лучевые методы в нанотехнологии 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-11: Способен оптимизировать параметры технологических операций получения микро- и наносистем и изделий на их основе	<p>ПК-11.1: Имеет представление о современных технологических операциях получения микро- и наносистем и изделий на их основе</p> <p>ПК-11.2: Осваивает существующие технологические операции получения микро- и наносистем и изделий на их основе</p> <p>ПК-11.3: Оптимизирует параметры технологических операций получения микро- и наносистем и изделий на их основе</p>	<p>ПК-11.1: Знать фундаментальные основы технологических процессов модифицирования материалов и структур электроники и наноэлектроники, в том числе физико-химические принципы и методы ионно-лучевого легирования полупроводников, лазерного отжига и лазерного нанесения.</p> <p>Уметь объяснять сущность химических явлений на всех этапах технологических процессов получения микро- и наносистем.</p> <p>Владеть навыками контроля свойств материалов и структур.</p> <p>ПК-11.2: Знать принципы выбора оптимальных параметров проведения технологических процессов.</p> <p>Уметь объяснять сущность физических явлений на всех этапах технологических процессов получения микро- и наносистем.</p> <p>Владеть навыками проведения</p>	Отчет по лабораторным работам	Зачёт: Контрольные вопросы

		<p>технологических процессов получения микро- и наносистем.</p> <p>ПК-11.3: Знать предельные возможности технологий, применяемых при производстве электронной компонентной базы.</p> <p>Уметь обоснованно выбирать материалы получения конкретных структур.</p> <p>Владеть навыками проведения технологических процессов получения изделий на основе микро- и наносистем.</p>		
--	--	---	--	--

### 3. Структура и содержание дисциплины

#### 3.1 Трудоемкость дисциплины

	<b>очная</b>
<b>Общая трудоемкость, з.е.</b>	<b>2</b>
<b>Часов по учебному плану</b>	<b>72</b>
в том числе	
<b>аудиторные занятия (контактная работа):</b>	
- занятия лекционного типа	<b>16</b>
- занятия семинарского типа (практические занятия / лабораторные работы)	<b>16</b>
- КСР	<b>1</b>
<b>самостоятельная работа</b>	<b>39</b>
<b>Промежуточная аттестация</b>	<b>0</b> <b>Зачёт</b>

#### 3.2. Содержание дисциплины

(структурированное по темам (разделам) с указанием отведенного на них количества академических часов и виды учебных занятий)

Наименование разделов и тем дисциплины	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 (практические занятия/ лабора торные	Всего	

			работы), часы		
	О Ф О	О Ф О	О Ф О	О Ф О	О Ф О
Введение	2	2		2	
Тема 1. Принципы построения аппаратуры для ионной бомбардировки. Процессы, происходящие при воздействии ионного пучка на твердое тело	18	2	8	10	8
Тема 2. Ионное распыление. Физические механизмы. Зависимости коэффициента распыления от параметров. Ионно-ионная эмиссия и ее применение	8	4		4	4
Тема 3. Принцип работы систем с фокусированным ионным пучком. Применения	6	2		2	4
Тема 4. Мощные лазеры для нанотехнологий. Механизмы взаимодействия лазерного излучения с веществом	4	2		2	2
Тема 5. Классификация и применения лазерных технологических процессов	28	2	8	10	18
Тема 6. Лазерная плазма. Характеристики лазерной плазмы	5	2		2	3
Аттестация	0				
КСР	1			1	
Итого	72	16	16	33	39

### Содержание разделов и тем дисциплины

1. Введение. Цель и задачи курса. Основная и дополнительная литература. Основные области применения лазерных и ионных пучков в нанотехнологии.
2. Принципы построения аппаратуры для ионной бомбардировки. Процессы, происходящие при воздействии ионного пучка на твердое тело: распыление, дефектообразование и другие эффекты.
3. Ионное распыление. Физические механизмы (теория Зигмунда и теория Томсона). Угловое и энергетическое распределение распыленных частиц. Зависимости коэффициента распыления от энергии, массы ионов, угла падения. Расчет толщины распыленного слоя. Ионно-ионная эмиссия и ее применение. Модели ионно-ионной эмиссии. Влияние состояния поверхности на коэффициент ионно-ионной эмиссии. Метод вторичной ионной масс-спектрометрии: аппаратура, принцип работы аппарата с разрешением по времени, принципы калибровки, вклады в уширение профиля. Возможности метода.
4. Принцип работы систем с фокусированным ионным пучком (ФИП). Электронно-ионный микроскоп. Применение ФИП для формирования наноструктур. Химические приемы в методе ФИП.
5. Мощные лазеры для нанотехнологий: неодимовый импульсный лазер, эксимерный лазер. Процессы передачи энергии лазерного излучения металлам. Механизмы поглощения лазерного излучения полупроводниками. Процессы нагрева материалов при воздействии лазерного излучения.
6. Критические плотности энергии лазерного излучения для различных материалов. Классификация и применения лазерных технологических процессов: отжиг, легирование, геттерирование, образование силицидов, окисление, травление, скрайбирование, подгонка.
7. Лазерная плазма. Характеристики лазерной плазмы. Осаждение тонких пленок с использованием лазерной абляции.

### 4. Учебно-методическое обеспечение самостоятельной работы обучающихся

Самостоятельная работа обучающихся включает в себя подготовку к контрольным вопросам и заданиям для текущего контроля и промежуточной аттестации по итогам освоения дисциплины приведенным в п. 5.

Авторские презентации по материалам лекций.

## **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 - Отчет по лабораторным работам) для оценки сформированности компетенции ПК-11:**

#### **Лабораторная работа «Лазерный отжиг ионно-имплантированного полупроводника»**

#### **Типовые вопросы для допуска к лабораторной работе:**

1. Какие виды лазеров наиболее распространены в нанотехнологии?
2. Принцип работы эксимерного лазера. Параметры лазера в импульсном режиме.
3. Особенности работы неодимовых лазеров: режимы функционирования, достижимые мощности в импульсном режиме.
4. Критические плотности энергии излучения лазеров для нагрева, плавления и абляции в импульсном (наносекундном) режиме работы.
5. От каких параметров полупроводника зависит температура в приповерхностном слое в процессе поглощения лазерного импульса?

#### **Задания для выполнения лабораторной работы:**

1. Провести подготовку пластины полуизолирующего GaAs, облученного ионами  $Mn^{+}$ : выполнить скрайбирование на образцы размером не более  $10 \times 10 \text{ мм}^2$ , провести химическую обработку кипячением в особо чистых толуоле и ацетоне.
2. Прочитать инструкцию пользования импульсным лазером, вместе с инженером провести подготовку лазера к работе.
3. Измерить энергию лазерного импульса с использованием прибора ИМО-2.
4. Расфокусировать лазерный пучок и проверить его размер (площадь) и однородность воздействием на фотобумагу. Оценить плотность энергии в пучке лазера.
5. Выбрав энергию лазерного импульса выше критической для плавления, провести отжиг одним импульсом.
6. Изготовить индиевые контакты к поверхности GaAs и провести измерения эффекта Холла по методике Ван-дер-Пау.

7. Рассчитать слоевые параметры: сопротивление слоя, концентрацию свободных носителей и их подвижность. Определить тип проводимости слоя.

## **Лабораторная работа «Ионно-имплантационная изоляция слоев GaAs нанометровой толщины»**

### **Типовые вопросы для допуска к лабораторной работе:**

1. Что такое фокусированный ионный пучок? Типичные значения размера ионного пучка на современных ускорителях ФИП.
2. Основные параметры ионной имплантации, влияющие на параметры облученного слоя полупроводника.
3. Зачем производится наклон ионного пучка по отношению к нормали поверхности монокристаллической подложки?
4. Что такое осевое и плоскостное каналирование?
5. Какие модели ионно-имплантационной аморфизации полупроводников вы знаете?

### **Задания для выполнения лабораторной работы:**

1. Провести подготовку пластины полуизолирующего GaAs, содержащую на поверхности проводящий слой n-типа: провести химическую обработку кипячением в особо чистых толуоле и ацетоне.
2. Ознакомиться с принципом работы программы SRIM. Для каких мишеней применяется расчет?
3. Освоить программу SRIM-2008 для расчета распределений дефектов при облучении полупроводников ионами. Для предложенной вам комбинации ион-материал мишени и для выбранной энергии и выбранного угла падения ионов осуществите корректный ввод данных в программу SRIM. Обратите внимание на вид расчета (быстрый или с учетом формирования каскадов соударений), плотность мишени, пороговые энергии смещения атомов мишени из узлов.
4. Проведите пробный расчет с небольшим количеством событий и корректно выберите толщину слоя мишени. Запустите программу снова и выберите достаточно большое количество событий, чтобы получить гладкие распределения ионов по глубине.
5. Оцените достоверность полученных вами результатов расчета для конкретной предложенной задачи.
6. Научитесь корректно выводить результаты расчета распределения ионов и дефектов по глубине мишени как в виде изображения профилей, так и в виде таблиц в формате txt для последующего построения в доступном ПО.

7. Провести расчет распределений дефектов в GaAs при облучении протонами и ионами гелия. Выбрать тип и энергию ионов с условием, что весь исходный проводящий слой находится в зоне образования дефектов.
8. Создать на поверхности образца индиевые контакты для электрических измерений.
9. Написать заявку на ускоритель ионов ИЛУ-3 (выбрав три дозы ионов, соответствующие разным участкам дозовой зависимости) и закрепить образцы на мишени.
10. Провести электрические измерения (сопротивления) до и после ионной имплантации. Сделать расчет слоевого сопротивления в зависимости от дозы ионов.

По результатам выполнения лабораторной работы обучающийся обязан написать отчет. Отчет должен включать следующие обязательные элементы: содержание, цель работы, теоретическая часть, методика эксперимента, экспериментальную часть, включающую описание и обсуждение результатов, заключение и/или выводы, список использованных источников. Отчет не должен содержать неправомерных заимствований.

Объем отчета – 15-30 стр. формата А4 (шрифт Times New Roman 12 пт, междустрочный интервал – полуторный, интервал между абзацами – отсутствует, поля – верхнее 2 см, нижнее 2 см, левое 3 см, правое 1,5 см).

#### **Критерии оценивания (оценочное средство - Отчет по лабораторным работам)**

Оценка	Критерии оценивания
зачтено	Выполнены все задания лабораторной работы. Отчеты оформлены правильно, полно и аккуратно. Представлены все необходимые рисунки, схемы и графики. Оформление графиков полностью соответствует общепринятым требованиям. Могут присутствовать незначительные недочёты, которые студент после замечания преподавателя способен исправить самостоятельно.
не зачтено	Не выполнены отчеты по лабораторным работам, одно или более заданий лабораторных работ. Отчеты выполнены с ошибками, не все рисунки и схемы представлены. Оформление графиков не соответствует общепринятым требованиям. Требования к оформлению отчетов не соблюдены.

#### **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	Уровень знаний ниже	Минимально	Уровень знаний в	Уровень знаний в	Уровень знаний в	Уровень знаний в

	теоретического материала. Невозможность оценить полноту знаний вследствие отказа обучающегося от ответа	минимальных требований. Имели место грубые ошибки	допустимый уровень знаний. Допущено много негрубых ошибок	объеме, соответствующем программе подготовки. Допущено несколько негрубых ошибок	объеме, соответствующем программе подготовки. Допущено несколько несущественных ошибок	объеме, соответствующем программе подготовки. Ошибок нет.	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 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 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

### Шкала оценивания при промежуточной аттестации

Оценка		Уровень подготовки
зачтено	<b>превосходно</b>	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
	<b>отлично</b>	Все компетенции (части компетенций), на формирование которых направлена дисциплина, сформированы на уровне не ниже «отлично».
	<b>очень хорошо</b>	Все компетенции (части компетенций), на формирование которых направлена дисциплина, сформированы на уровне не ниже «очень хорошо»
	<b>хорошо</b>	Все компетенции (части компетенций), на формирование которых направлена дисциплина, сформированы на уровне не ниже «хорошо».
	<b>удовлетворительно</b>	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 с указанием критериев их оценивания:

#### 5.3.1 Типовые задания (оценочное средство - Контрольные вопросы) для оценки сформированности компетенции ПК-11

1. Основные области применения лазерных и ионных пучков в нанотехнологии.
2. Процессы, происходящие при воздействии ионного пучка на твердое тело.
3. Физические механизмы (теория Зигмунда и теория Томсона) ионного распыления.
4. Процессы передачи энергии лазерного излучения металлам.
5. Механизмы поглощения лазерного излучения полупроводниками.
6. Принцип работы систем с фокусированным ионным пучком.
7. Применение ФИП для формирования наноструктур.

#### Критерии оценивания (оценочное средство - Контрольные вопросы)

Оценка	Критерии оценивания
зачтено	Обучающийся отвечает полностью на контрольные вопросы, показывая удовлетворительное знание основ курса и базовых понятий. При ответе на дополнительные вопросы допускаются незначительные неточности.
не зачтено	Обучающийся показывает неудовлетворительное знание основ курса и базовых понятий.

### 6. Учебно-методическое и информационное обеспечение дисциплины (модуля)

#### Основная литература:

1. Аксенов А. И. Процессы лазерной и электронно-ионной технологии : учебное пособие для студентов направления подготовки 11.04.04 - «электроника и наноэлектроника», 12.04.03 фотоника и оптоинформатика / Аксенов А. И. - Москва : ТУСУР, 2018. - 123 с. - Книга из коллекции ТУСУР - Инженерно-технические науки., <https://e-lib.unn.ru/MegaPro/UserEntry?Action=FindDocs&ids=861965&idb=0>.
2. Асеев Александр Леонидович. Полупроводники и нанотехнологии : учебник для вузов / А. Л. Асеев. - Москва : Юрайт, 2024. - 152 с. - (Высшее образование). - URL: <https://urait.ru/bcode/551756> (дата обращения: 15.08.2024). - ISBN 978-5-534-18823-3 : 759.00. - Текст : электронный // ЭБС

"Юрайт"., <https://e-lib.unn.ru/MegaPro/UserEntry?Action=FindDocs&ids=907195&idb=0>.

3. Лучинин Виктор Викторович. Нанотехнология: физика, процессы, диагностика, приборы : Монография. - Москва : Издательская фирма "Физико-математическая литература" (ФИЗМАТЛИТ), 2006. - 552 с. - ВО - Магистратура. - ISBN 5-9221-0719-4., <https://e-lib.unn.ru/MegaPro/UserEntry?Action=FindDocs&ids=609797&idb=0>.

Дополнительная литература:

1. Кирчанов В. С. Наноматериалы, нанотехнологии и элементы нанонауки : учебное пособие / Кирчанов В. С. - Пермь : ПНИПУ, 2024. - 287 с. - Утверждено Редакционно-издательским советом университета в качестве учебного пособия. - Книга из коллекции ПНИПУ - Нанотехнологии. - ISBN 978-5-398-03067-9., <https://e-lib.unn.ru/MegaPro/UserEntry?Action=FindDocs&ids=899240&idb=0>.

2. Исакова И. В. Наноматериалы и нанотехнологии : учебное пособие по дисциплине «наноматериалы и нанотехнологии» для обучающихся по направлению 18.04.01 «химическая технология» / Исакова И. В., Черкасова Е. В. - Кемерово : КузГТУ имени Т.Ф. Горбачева, 2019. - 68 с. - Библиогр.: доступна в карточке книги, на сайте ЭБС Лань. - Книга из коллекции КузГТУ имени Т.Ф. Горбачева - Нанотехнологии. - ISBN 978-5-00137-058-1., <https://e-lib.unn.ru/MegaPro/UserEntry?Action=FindDocs&ids=721532&idb=0>.

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

1. Физика и техника полупроводников: <http://journals.ioffe.ru/ftp/>;
2. Физика твердого тела: <http://journals.ioffe.ru/ftt/>;
3. Успехи физических наук: <http://www.ufn.ru/>;
4. ОС Windows и пакет Office.

## **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: лабораторным оборудованием ННГУ.

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 ФГОС ВО по направлению подготовки/специальности 28.04.01 - Нанотехнологии и микросистемная техника.

Автор(ы): Данилов Юрий Александрович, кандидат физико-математических наук, старший научный сотрудник.

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 15.04.2024, протокол № б/н.