

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

---

УТВЕРЖДАЮ:

Декан физического факультета  
\_\_\_\_\_ Малышев А.И.

« 31 » августа 2021 г.

**Рабочая программа дисциплины**

«Лазерно- и ионно-лучевые методы в нанотехнологии»

Уровень подготовки

аспирантура

Направление подготовки

03.06.01 ФИЗИКА И АСТРОНОМИЯ

Направленность образовательной программы

01.04.10 «Физика полупроводников»

Квалификация

Исследователь, преподаватель-исследова-  
тель

Форма обучения

очная

Нижний Новгород, 2021

## 1. Место и цели дисциплины в структуре ОПОП

Дисциплина «Лазерно- и ионно-лучевые методы в нанотехнологии» относится к вариативной части ОПОП, является дисциплиной по выбору и изучается на 2 году обучения в 4 семестре.

### Целями освоения дисциплины являются:

а) Формирование у обучающихся представлений о новых тенденциях использования лазерных и ионных пучков в технологии полупроводниковых структур. В рассматриваемых в курсе методах для достижения новых возможностей в создании и модифицировании наноразмерных областей используются чрезвычайно высокие плотности пучковой энергии, падающей на объекты; б) Изучение основных эффектов, происходящих в твердых телах при воздействии на них мощного лазерного излучения и ионных пучков (в первую очередь, фокусированных ионных пучков); в) Получение представлений о современной технике, позволяющей получать ионные и лазерные пучки; изучение возможностей указанных методов для создания перспективных полупроводниковых.

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

<b>Формируемые компетенции</b> (код компетенции, этап формирования)	<b>Планируемые результаты обучения по дисциплине (модулю), характеризующие этапы формирования компетенций</b>
<b>ОПК-1</b> Способность самостоятельно осуществлять научно-исследовательскую деятельность в соответствующей профессиональной области с использованием современных методов исследования и информационно-коммуникационных технологий	<i>У1 (ОПК-1) Уметь</i> применять фундаментальные представления о физических процессах, лежащих в основе современной технологии изготовления приборов полупроводниковой электроники, в самостоятельной научно-исследовательской деятельности; <i>З1 (ОПК-1) Знать</i> фундаментальные основы физических процессов, лежащих в основе современных технологических приемов формирования полупроводниковых структур; <i>В1 (ОПК-1) Владеть</i> опытом использования современных методов исследования и информационно-коммуникационных технологий для планирования экспериментов и обработки результатов исследований в научно-исследовательской деятельности.
<b>ПК-1</b> Способность к методически грамотному изложению материала учебных дисциплин при чтении лекций, построении практических	<i>У1 (ПК-1) Уметь</i> методически правильно подготовить лекционное и практическое занятие с учетом знаний, полученных при изучении предлагаемого курса; <i>З1 (ПК-1) Знать</i> основные требования к разработке и написанию учебных пособий;

занятий, разработке учебных пособий и к самостоятельному проведению научно-исследовательской работы, получению научных результатов, удовлетворяющих установленным требованиям к содержанию диссертаций на соискание ученой степени кандидата наук по направленности 01.04.10 «Физика полупроводников»	<i>В1 (ПК-1) Владеть</i> навыками проведения научно-исследовательских работ, оформления полученных научных результатов в виде отчетов о НИР и научных статей, публикуемых в изданиях из списка ВАК и необходимых для подготовки диссертации на соискание ученой степени кандидата наук по направленности 01.04.10 «Физика полупроводников».
---	---

### 3. Структура и содержание дисциплины

Объем дисциплины составляет 2 зачетных единицы, всего 72 часа, из которых 37 часов составляет контактная работа обучающегося с преподавателем (36 часов занятия лекционного типа, включая 2 часа - мероприятия текущего контроля успеваемости, 1 час - мероприятия промежуточной аттестации), 35 часов составляет самостоятельная работа обучающегося.

#### Содержание дисциплины

Наименование и краткое содержание разделов и тем дисциплины, форма промежуточной аттестации по дисциплине	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	
		Очное				
Тема 1. Введение	2	2			2	
Тема 2. Принципы построения аппаратуры для ионной бомбардировки. Процессы, происходящие при воздействии ионного пучка на твердое тело	10	4			4	6
Тема 3. Ионное распыление. Физические механизмы. Зависимости коэффициента распыления от параметров. Ионно-ионная эмиссия и ее применение.	12	6			6	4

Тема 4. Принцип работы систем с фокусированным ионным пучком. Применения.	12	6			6	4
Тема 5. Мощные лазеры для нанотехнологий. Механизмы взаимодействия лазерного излучения с веществом.	12	6			6	8
Тема 6. Классификация и применения лазерных технологических процессов.	12	6			6	8
Тема 7. Лазерная плазма. Характеристики лазерной плазмы.	11	6			6	5
<b>ВСЕГО</b>	<b>72</b>	<b>36</b>			<b>36</b>	<b>35</b>
В т.ч. текущий контроль	2					
<b>Промежуточная аттестация - зачет</b>						

### Содержание дисциплины

№ п/п	Наименование раздела дисциплины	Содержание раздела	Форма проведения занятия	Форма текущего контроля*
1	Введение	Цель и задачи курса. Основная и дополнительная литература. Основные области применения лазерных и ионных пучков в полупроводниковой технологии	Лекция	
2	Принципы построения аппаратуры для ионной бомбардировки. Процессы, происходящие при воздействии ионного пучка на твердое тело	Принципы построения аппаратуры для ионной бомбардировки. Процессы, происходящие при воздействии ионного пучка на твердое тело: распыление, дефектообразование и другие эффекты.	Лекции	Консультации
3	Ионное распыление. Физические механизмы. Зависимости коэффициента распыления от параметров. Ионно-ионная эмиссия и ее применение.	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.	Лекции	Консультации

4	Принцип работы систем с фокусированным ионным пучком. Применения.	Электронно-ионный микроскоп. Применение ФИП для формирования наноструктур. Химические приемы в методе ФИП.	Лекции	Консультации
5	Мощные лазеры для нанотехнологий. Механизмы взаимодействия лазерного излучения с веществом.	Неодимовый импульсный лазер, эксимерный лазер. Процессы передачи энергии лазерного излучения металлам. Механизмы поглощения лазерного излучения полупроводниками. Процессы нагрева материалов при воздействии лазерного излучения.	Лекции	Консультации
6	Классификация и применения лазерных технологических процессов.	Критические плотности энергии лазерного излучения для различных материалов. Классификация и применения лазерных технологических процессов: отжиг, легирование, геттерирование, образование силицидов, окисление, травление, скрайбирование, подгонка.	Лекции	Консультации
7	Лазерная плазма. Характеристики лазерной плазмы.	Осаждение тонких пленок с использованием лазерной абляции.	Лекции	Консультации

#### 4. Образовательные технологии

Основные виды образовательных технологий: лекции и контроль самостоятельной работы в виде собеседований при сдаче зачета. При чтении лекций используется проектор с демонстрацией разработанного цикла слайдов, показывающих наиболее сложные технические детали установок и литературные данные по результатам новейших исследований по тематике курса. Обучающимся предлагается установить на персональный компьютер программу SRIM (открытый доступ) для расчета профилей распределения ионов и дефектов при облучении твердых тел ускоренными ионами и провести самостоятельно расчет для конкретных предлагаемых преподавателем примеров.

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

Самостоятельная работа предусмотрена при освоении материала разделов 2-7 и включает в себя теоретическую подготовку к занятиям по материалам лекций и рекомендованной литературе. Самостоятельная работа может проводиться как в домашних условиях, так и в читальном зале библиотеки, в компьютерных классах, в учебных кабинетах (лабораториях) с доступом к базам данных, к Интернет-ресурсам. Текущий контроль успеваемости может осуществляться путём контрольных опросов по спискам вопросов, приведённым ниже.

1. Принципы построения аппаратуры для ионной бомбардировки. Основные части ускорителей ионов.
2. Принципы функционирования ионных источников. Особенности работы приемных камер ускорителей.
3. Процессы, происходящие при воздействии ионного пучка на твердое тело: распыление, дефектообразование и другие эффекты – ионно-ионная эмиссия, эмиссия электромагнитного излучения.
4. Ионное распыление. Физические механизмы (теория Зигмунда и теория Томсона).

5. Угловое и энергетическое распределение распыленных частиц. Зависимости коэффициента распыления от энергии, массы ионов, угла падения.
6. Расчет толщины распыленного слоя.
7. Ионно-ионная эмиссия и ее применение. Модели ионно-ионной эмиссии. Влияние состояния поверхности на коэффициент ионно-ионной эмиссии.
8. Метод вторичной ионной масс-спектрометрии: аппаратура, принцип работы аппарата с разрешением по времени, принципы калибровки, вклады в уширение профиля. Возможности метода.
9. Принцип работы систем с фокусированным ионным пучком (ФИП). Электронно-ионный микроскоп.
10. Применение ФИП для формирования наноструктур. Химические приемы в методе ФИП.
11. Мощные лазеры для нанотехнологий: неодимовый импульсный лазер, эксимерный лазер.
12. Процессы передачи энергии лазерного излучения металлам.
13. Механизмы поглощения лазерного излучения полупроводниками. Процессы нагрева материалов при воздействии лазерного излучения.
14. Критические плотности энергии лазерного излучения для различных материалов. Классификация и применения лазерных технологических процессов: отжиг, легирование, геттерирование, образование силицидов, окисление, травление, скрайбирование, подгонка.
15. Лазерная плазма. Характеристики лазерной плазмы.
16. Осаждение тонких пленок с использованием лазерной абляции.

**6. Фонд оценочных средств для промежуточной аттестации по дисциплине, включающий:**

*6.1 Перечень компетенций выпускников образовательной программы с указанием результатов обучения (знаний, умений, владений), характеризующих этапы их формирования.*

Описание показателей и критериев оценивания компетенций приведено в приложении 1.

*6.2 Описание шкал оценивания*

«Зачтено» – владение программным материалом, понимание сущности рассматриваемых процессов и явлений, наличие хотя бы фрагментарных знаний по каждому из основных вопросов, способность критически анализировать и сравнивать получаемые научные результаты. Приняты все отчёты.

«Незачтено» – отсутствие ответа хотя бы на один из основных вопросов, либо грубые ошибки в ответах, полное непонимание смысла проблем, недостаточно полное владение терминологией. Хотя бы один из отчётов не принят.

6.3 Критерии и процедуры оценивания результатов обучения по дисциплине (модулю), характеризующих этапы формирования компетенций.

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

- тестирование;
- индивидуальное собеседование,
- письменные ответы на вопросы.

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

- *практические контрольные задания (далее – ПКЗ), включающих одну или несколько задач (вопросов) в виде краткой формулировки действий (комплекса действий), которые следует выполнить, или описание результата, который нужно получить.*

*Типы практических контрольных заданий:*

- *задания на установление правильной последовательности, взаимосвязанности действий, выяснения влияния различных факторов на результаты выполнения задания;*

- *установление последовательности (описать алгоритм выполнения действия),*

- *указать возможное влияние факторов на последствия реализации умения и т.д.*

6.4 Типовые контрольные задания или иные материалы, необходимые для оценки результатов обучения, характеризующих этапы формирования компетенций.

### **Вопрос 9.**

**При имплантации однозарядного молекулярного иона  $\text{SiF}^+$  с энергией 100 кэВ в полупроводник (Ge) какова энергия атома кремния после диссоциации молекулы?**

**Варианты ответа:**

(1) 20 кэВ;

(2)  $\approx$  60 кэВ;

(3) 85 кэВ.

**Шкала оценки:**

5 баллов – ответ (2);

0 баллов – ответы (1, 3).

1.1. Методические материалы, определяющие процедуры оценивания приведены в фонде оценочных средств.

1. Ефремова Н.Ф. Подходы к оцениванию компетенций в высшем образовании. Учеб. пособие. М.: Исследовательский центр проблем качества подготовки специалистов. 2010. 216 с.
2. Положение о фонде оценочных средств, утверждённое приказом ректора ННГУ от 10.06.2015 г. № 247-ОД.
3. Положение о проведении текущего контроля успеваемости и промежуточной аттестации обучающихся в Нижегородском государственном университете им. Н.И. Лобачевского [Электронный ресурс]: <http://www.qa.unn.ru/files/quality/procedure/polozhenie-21-05-08.pdf>.

### **7. Учебно-методическое и информационное обеспечение дисциплины**

а) основная литература:

1. Аброян, И.А. Физические основы электронной и ионной технологий / И.А. Аброян, А.Н. Андронов, А.И. Титов // М.: Высш. шк., 1984. – 320 с. (библиотека НИФТИ ННГУ – 6 экз.)
2. Ионно-плазменная обработка материалов: Курс лекций [Электронный ресурс] / Кузнецов Г.Д., Кушхов А.Р. - М.: МИСиС, 2008. - <http://www.studentlibrary.ru/book/2227-8397-2008-02.html> - доступ с компьютеров ННГУ.

3. Малов И.Е. Лазеры в микроэлектронике / И.Е. Малов, И.Н. Шиганов. Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2012. – 73 с. (доступ с компьютеров ННГУ - [http://www.studentlibrary.ru/book/bauman\\_0558.html](http://www.studentlibrary.ru/book/bauman_0558.html))

б) дополнительная литература:

1. Макаров, Г.Н. Применение лазеров в нанотехнологии: получение наночастиц и наноструктур методами лазерной абляции и лазерной нанолитографии // Успехи физических наук. – 2013. – Т.183, в.7. – С.673-718. Доступ с компьютеров ННГУ: <http://www.ufn.ru/>
2. Хомич, В.Ю. Механизмы и модели прямого лазерного наноструктурирования материалов / В.Ю. Хомич, В.А. Шмаков // Успехи физических наук. – 2015. – Т.185, в.5. – С.489-499. Доступ с компьютеров ННГУ: <http://www.ufn.ru/>
3. Риссел, Х. Ионная имплантация / Х. Риссел, И. Руге // М.: Наука, 1983. – 360 с. (библиотека НИФТИ ННГУ – 6 экз.)
4. Делоне, Н.Б. Взаимодействие лазерного излучения с веществом. Курс лекций / Н.Б. Делоне // М.: Наука, 1989. – 280 с. (библиотека НИФТИ ННГУ – 3 экз.)

в) программное обеспечение и Интернет-ресурсы

Для углубленного изучения вопросов дисциплины рекомендуется чтение обзорных и оригинальных статей в журналах, имеющих в открытом доступе для ННГУ:

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/>.

## **7. Материально-техническое обеспечение дисциплины**

- помещения для проведения занятий: лекционного типа, групповых и индивидуальных консультаций, текущего контроля и промежуточной аттестации, а также помещения для самостоятельной работы обучающихся, оснащенные компьютерной техникой с возможностью подключения к сети "Интернет" и обеспечением доступа в электронную информационно-образовательную среду;
- материально-техническое обеспечение, необходимое для реализации дисциплины, включая лабораторное оборудование: Для демонстрации некоторых процессов (например, ионно-имплантационной изоляции слоев GaAs нанометровой толщины; и лазерного отжига ионно-имплантированного полупроводника) используется оборудование, которое постоянно применяется для проведения НИР на физическом факультете и в НИФТИ ННГУ, включая:
  - Установку исследования эффекта Холла методом Ван-дер-Пау;
  - Ускоритель ионов ИЛУ-3;
  - Импульсный мощный неодимовый лазер LQ-524
- лицензионное программное обеспечение: программное обеспечение SRIM-2008 для расчета дефектообразования в полупроводниках при ионном облучении.

Программа составлена в соответствии с требованиями ФГОС ВО по направлению подготовки 03.06.01 ФИЗИКА И АСТРОНОМИЯ (уровень подготовки кадров высшей квалификации).

Автор  
доцент кафедры

физики полупроводников и  
оптоэлектроники, к.ф.-м.н.

\_\_\_\_\_ Ю.А. Данилов

Рецензент  
Заведующий кафедрой  
электроники твердого тела  
д.ф.-м.н., профессор

\_\_\_\_\_ Е.С. Демидов

Заведующий кафедрой физики  
полупроводников и оптоэлектроники  
д.ф.-м.н. профессор

\_\_\_\_\_ Д. А. Павлов

Программа рекомендована на заседании кафедры Физики полупроводников и оптоэлектроники от \_\_\_\_\_ года, протокол № \_\_\_\_\_

Программа одобрена на заседании методической комиссии физического факультета от \_\_\_\_\_ года, протокол № \_\_\_\_\_

**ОПК-1** Способность самостоятельно осуществлять научно-исследовательскую деятельность в соответствующей профессиональной области с использованием современных методов исследования и информационно-коммуникационных технологий

Планируемые результаты обучения*(показатели достижения заданного уровня освоения компетенций)	Критерии оценивания результатов обучения				
	1	2	3	4	5
ЗНАТЬ фундаментальные основы физических процессов, лежащих в основе современных технологических приемов формирования полупроводниковых структур	Отсутствие знаний	Фрагментарное знание физических процессов, происходящих при воздействии лазерных и ионных пучков на полупроводники	В целом успешное знание физических процессов, происходящих при воздействии лазерных и ионных пучков на полупроводники	В целом успешное, но содержащее отдельные пробелы знание физических процессов, происходящих при воздействии лазерных и ионных пучков на полупроводники	Успешное и систематическое знание физических процессов, происходящих при воздействии лазерных и ионных пучков на полупроводники
УМЕТЬ применять фундаментальные представления о физических процессах, лежащих в основе современной технологии изготовления приборов полупроводниковой электроники, в самостоятельной научно-исследовательской деятельности	Отсутствие умений	Частично освоенное умение применять фундаментальные представления о физических процессах, лежащих в основе современной технологии изготовления приборов полупроводниковой электроники, в самостоятельной научно-исследовательской деятельности	В целом успешное, но не систематическое умение применять фундаментальные представления о физических процессах, лежащих в основе современной технологии изготовления приборов полупроводниковой электроники, в самостоятельной научно-исследовательской деятельности	В целом успешное, но содержащее отдельные пробелы умение применять фундаментальные представления о физических процессах, лежащих в основе современной технологии изготовления приборов полупроводниковой электроники, в самостоятельной научно-исследовательской деятельности	Сформированное умение применять фундаментальные представления о физических процессах, лежащих в основе современной технологии изготовления приборов полупроводниковой электроники, в самостоятельной научно-исследовательской деятельности
ВЛАДЕТЬ опытом использования современных методов исследования и информационно-коммуникационных технологий для планирования экспериментов и обработки результатов исследований в научно-исследовательской деятельности.	Отсутствие навыков	Фрагментарное применение современных методов исследования и информационно-коммуникационных технологий для планирования экспериментов и обработки результатов исследований в научно-исследовательской деятельности.	В целом успешное, но не систематическое применение современных методов исследования и информационно-коммуникационных технологий для планирования экспериментов и обработки результатов исследований в научно-исследовательской деятельности.	В целом успешное, но содержащее отдельные пробелы применение современных методов исследования и информационно-коммуникационных технологий для планирования экспериментов и обработки результатов исследований в научно-исследовательской деятельности.	Успешное и систематическое применение современных методов исследования и информационно-коммуникационных технологий для планирования экспериментов и обработки результатов исследований в научно-исследовательской деятельности.

**ПК-1** Способность к методически грамотному изложению материала учебных дисциплин при чтении лекций, построении практических занятий, разработке учебных пособий и к самостоятельному проведению научно-исследовательской работы, получению научных результатов, удовлетворяющих установленным требованиям к содержанию диссертаций на соискание ученой степени кандидата наук по направленности 01.04.10 «Физика полупроводников»

Планируемые результаты обучения*(показатели достижения заданного уровня освоения компетенций)	Критерии оценивания результатов обучения				
	1	2	3	4	5
ЗНАТЬ основные требования к разработке и написанию учебных пособий	Отсутствие знаний	Фрагментарное знание основных требований к разработке и написанию учебных пособий	В целом успешное знание основных требований к разработке и написанию учебных пособий.	В целом успешное, но содержащее отдельные пробелы знание основных требований к разработке и написанию учебных пособий	Успешное и систематическое знание основных требований к разработке и написанию учебных пособий
УМЕТЬ методически правильно подготовить лекционное и практическое занятие с учетом знаний, полученных при изучении предлагаемого курса	Отсутствие умений	Частично освоенное умение методически правильно подготовить лекционное и практическое занятие с учетом знаний, полученных при изучении предлагаемого курса.	В целом успешное, но не систематически осуществляемое умение методически правильно подготовить лекционное и практическое занятие с учетом знаний, полученных при изучении предлагаемого курса	В целом успешное, но содержащее отдельные пробелы умение методически правильно подготовить лекционное и практическое занятие с учетом знаний, полученных при изучении предлагаемого курса	Сформированное умение методически правильно подготовить лекционное и практическое занятие с учетом знаний, полученных при изучении предлагаемого курса
ВЛАДЕТЬ навыками проведения научно-исследовательских работ, оформления полученных научных результатов в виде отчетов о НИР и научных статей, публикуемых в изданиях из списка ВАК и необходимых для подготовки диссертации на соискание ученой степени кандидата наук по направленности 01.04.10 «Физика полупроводников».	Отсутствие навыков	Фрагментарное применение навыков проведения научно-исследовательских работ, оформления полученных научных результатов в виде отчетов о НИР и научных статей, публикуемых в изданиях из списка ВАК и необходимых для подготовки диссертации на соискание ученой степени кандидата наук по направленности 01.04.10 «Физика полупроводников».	В целом успешное, но не систематическое применение проведения научно-исследовательских работ, оформления полученных научных результатов в виде отчетов о НИР и научных статей, публикуемых в изданиях из списка ВАК и необходимых для подготовки диссертации на соискание ученой степени кандидата наук по направленности 01.04.10 «Физика полупроводников».	В целом успешное, но содержащее отдельные пробелы применение проведения научно-исследовательских работ, оформления полученных научных результатов в виде отчетов о НИР и научных статей, публикуемых в изданиях из списка ВАК и необходимых для подготовки диссертации на соискание ученой степени кандидата наук по направленности 01.04.10 «Физика полупроводников».	Успешное и систематическое применение проведения научно-исследовательских работ, оформления полученных научных результатов в виде отчетов о НИР и научных статей, публикуемых в изданиях из списка ВАК и необходимых для подготовки диссертации на соискание ученой степени кандидата наук по направленности 01.04.10 «Физика полупроводников».