

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 президиума Ученого совета ННГУ

протокол № 1 от 16.01.2024 г.

Рабочая программа дисциплины

Лазерно-и ионно-лучевые методы в нанотехнологии

Уровень высшего образования

Магистратура

Направление подготовки / специальность

11.04.04 - Электроника и наноэлектроника

Направленность образовательной программы

Твердотельная электроника и наноэлектроника

Форма обучения

очная

г. Нижний Новгород

2024 год начала подготовки

1. Место дисциплины в структуре ОПОП

Дисциплина Б1.В.ДВ.03.02 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-3: Способность применять фундаментальные представления о физических явлениях для достижения требуемых функциональных качеств приборов, схем и устройств электроники и нанoeлектроники	<p>ПК-3.1: Знает фундаментальные основы физических явлений и процессов, лежащих в основе работы приборов и устройств электроники и нанoeлектроники</p> <p>ПК-3.2: Умеет проводить экспериментальные работы по отработке и внедрению новых технологических процессов производства изделий электроники и нанoeлектроники</p> <p>ПК-3.3: Имеет опыт разработки методик экспериментальной проверки технологических процессов и исследования параметров наноструктурированных материалов</p>	<p>ПК-3.1: Знать фундаментальные основы технологических процессов модифицирования материалов и структур электроники и нанoeлектроники, в том числе физико-химические принципы и методы ионно-лучевого легирования полупроводников, лазерного отжига и лазерного нанесения; принципы выбора оптимальных параметров проведения технологических процессов; предельные возможности технологий, применяемых при производстве электронной компонентной базы</p> <p>ПК-3.2: Уметь объяснять сущность физических и химических явлений на всех этапах технологических процессов и обоснованно выбирать материалы получения конкретных структур</p> <p>ПК-3.3: Владеть навыками проведения технологических процессов и контроля свойств материалов и структур</p>	Отчет по лабораторным работам	Зачёт: Контрольные вопросы

--	--	--	--	--

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	16
- занятия семинарского типа (практические занятия / лабораторные работы)	16
- КСР	1
самостоятельная работа	39
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 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	
0 Ф 0	0 Ф 0	0 Ф 0	0 Ф 0	0 Ф 0	
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.

Используются авторские наработки.

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-3:

1. Ознакомиться с принципом работы программы SRIM. Для каких мишеней применяется расчет?
2. 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.
3. 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.
 4. 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, например, в Origin.
 5. Оцените достоверность полученных вами результатов расчета для конкретной предложенной задачи.

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 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	При решении стандартных	Продемонстрированы	Продемонстрированы	Продемонстрированы	Продемонстрированы	Продемонстрированы все

	умений. Невозможность оценить наличие умений вследствие отказа обучающегося от ответа	задач не продемонстрированы основные умения. Имели место грубые ошибки	основные умения. Решены типовые задачи с негрубыми ошибками. Выполнены все задания, но не в полном объеме	все основные умения. Решены все основные задачи с негрубыми ошибками. Выполнены все задания в полном объеме, но некоторые с недочетами	все основные умения. Решены все основные задачи. Выполнены все задания в полном объеме, но некоторые с недочетами	все основные умения. Решены все основные задачи с отдельными несущественными недочетами, выполнены все задания в полном объеме	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 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 с указанием критериев их оценивания:

5.3.1 Типовые задания (оценочное средство - Контрольные вопросы) для оценки сформированности компетенции ПК-3

1. Что такое фокусируемый 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?
6. Как влияет температура подложки на дефектообразование при ионной имплантации? Рассмотрите случай комнатной температуры и повышенной температуры подложки.
7. Зачем применяется отжиг ионно-имплантированного монокристаллического полупроводника? Перечислите виды отжига, применяемые в практике изготовления структур микроэлектроники.
8. Что такое коэффициент ионного распыления?
9. Как коэффициент ионного распыления зависит от энергии и массы ионов?
10. Как коэффициент ионного распыления зависит от угла наклона ионного пучка по отношению к поверхности образца?
11. Как рассчитать толщину распыленного слоя при ионной имплантации?
12. Зависит ли коэффициент ион-ионного распыления от поверхностных условий, в частности, от содержания на поверхности кислорода?
13. Какие химические приемы используются в технологии ФИП? Для чего?
14. Какие виды лазеров наиболее распространены в нанотехнологии?
15. Принцип работы эксимерного лазера.
16. Чем характеризуется каждый из 4-х уровней лазерного воздействия на твердое тело?
17. В каких процессах нанотехнологии применяются лазерные пучки?
18. Какие механизмы воздействия интенсивных лазерных пучков на металлы вы знаете?
19. Перечислите механизмы лазерного воздействия на полупроводники.
20. Что такое лазерная абляция? Какие параметры лазерных пучков приводят к абляции твердых тел?
21. Механизм формирования лазерного факела при воздействии на твердое тело. Каков состав лазерной плазмы?
22. Приведите принципиальную схему процесса импульсного лазерного нанесения в вакууме.
23. Какие условия должны быть выполнены для расплавления поверхностных слоев полупроводника при воздействии лазера?
24. Что такое реактивное лазерное нанесение тонких слоев материалов?

Критерии оценивания (оценочное средство - Контрольные вопросы)

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

Оценка	Критерии оценивания
зачтено	

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

Основная литература:

1. 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.
2. 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.

Дополнительная литература:

1. Делоне Николай Борисович. Взаимодействие лазерного излучения с веществом : курс лекций. - М. : Наука, 1989. - 277, [1] с. : ил. - ISBN 5-02-014056-2 (в пер.) : 3.00., 2 экз.

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/>.

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: Для выполнения лабораторных работ:

1. Расчет параметров ионной имплантации методом SRIM;
2. Лазерный отжиг 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;
- программное обеспечение SRIM-2008 для расчета дефектообразования в полупроводниках при ионном облучении.

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 подготовки/специальности 11.04.04 - Электроника и нанoeлектроника.

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 09.01.2024, протокол № б/н.