

МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ

**Федеральное государственное автономное
образовательное учреждение высшего образования
«Национальный исследовательский Нижегородский государственный университет им.
Н.И. Лобачевского»**

УТВЕРЖДЕНО
решением
Ученого совета ННГУ
протокол от
« ____ » _____ 202_ г. № ____

Рабочая программа дисциплины

Лазерно- и ионно-лучевые методы в нанотехнологии

(наименование дисциплины (модуля))

Уровень высшего образования

магистратура

(бакалавриат / магистратура / специалитет)

Направление подготовки / специальность

03.04.02 Физика

(указывается код и наименование направления подготовки / специальности)

Направленность образовательной программы

магистерская программа "Квантовые и нейроморфные технологии"

(указывается профиль / магистерская программа / специализация)

Квалификация (степень)

магистр

(бакалавр / магистр / специалист)

Форма обучения

очная

(очная / очно-заочная / заочная)

Год начала обучения

2023

(для обучающихся какого года начала обучения разработана Рабочая программа)

Нижегород

1. Место и цели дисциплины в структуре ОПОП

Дисциплина «Лазерно- и ионно-лучевые методы в нанотехнологии» относится к выборным дисциплинам формируемой участниками образовательных отношений части образовательной программы по направлению подготовки магистров 03.04.02 Физика.

«Лазерно- и ионно-лучевые методы в нанотехнологии» - дисциплина, в которой углубленно изучаются физические основы взаимодействия мощного лазерного излучения и ионных пучков с твердыми телами, процессы, приводящие к модифицированию или формированию наноструктур.

Цель изучения дисциплины состоит в том, чтобы дать студентам магистратуры представления о новых тенденциях использования лазерных и ионных пучков в технологии наноструктур. В этих методах для достижения новых возможностей в создании и модифицировании наноразмерных областей используются чрезвычайно высокие плотности пучковой энергии, падающей на объекты.

Задачами курса являются: изучение основных эффектов, происходящих в твердых телах при воздействии на них мощного лазерного излучения и ионных пучков (в первую очередь, фокусированных ионных пучков); получение представлений о современной технике, позволяющей получать ионные и лазерные пучки; изучение возможностей указанных методов для создания перспективных приборов электроники и наноэлектроники.

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

Процесс изучения дисциплины направлен на формирование следующей компетенции:

ПК-3. Способность применять фундаментальные представления о физических явлениях для достижения требуемых функциональных качеств приборов, схем и устройств электроники и наноэлектроники

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	
ПК-3. Способен Способен свободно владеть разделами физики и применять результаты научных исследований в профильных областях для решения научно-	ПК-3.1. Знание основных законов физики ПК-3.2. Умение решать научно-практические и научно-технологические задачи в своей	Знать фундаментальные основы технологических процессов модифицирования материалов и структур электроники и наноэлектроники, в том числе физико-химические принципы и методы ионно-лучевого легирования	Вопросы по темам/разделам дисциплины. Комплект задач и заданий к лабораторному

практических и научно-технологических задач	профессиональной деятельности ПК-3.3 Навыки применения результатов научных исследований при решении научно-практических и научно-технологических задач	полупроводников, лазерного отжига и лазерного нанесения; принципы выбора оптимальных параметров проведения технологических процессов; предельные возможности технологий, применяемых при производстве электронной компонентной базы. Уметь объяснять сущность физических и химических явлений на всех этапах технологических процессов и обоснованно выбирать материалы получения конкретных структур; Владеть навыками проведения технологических процессов и контроля свойств материалов и структур	практикуму. Фонд тестовых заданий
---	---	---	--------------------------------------

В результате освоения дисциплины студент должен **знать**:

- особенности эффектов в кристаллических материалах, происходящих при воздействии ионных пучков (распыление, легирование, изолирование за счет формирования радиационных дефектов);
- особенности воздействия мощных лазерных пучков на материалы электроники (нагрев, плавление, абляция);
- принципы функционирования и характеристики источников ионных и лазерных пучков (ускоритель ионов, источник фокусированного ионного пучка, эксимерный лазер, мощный твердотельный лазер).

Студент должен **уметь**:

- выбрать методику воздействия на твердотельную структуру для получения того или иного эффекта (например, тип иона и энергию для распыления);
- выбрать режим ионно-имплантационной изоляции полупроводника.

Студент должен **овладеть навыками** применения полученных знаний для решения конкретных задач, возникающих как в научно-исследовательской работе, так и в производственно-технологическом процессе.

3. Структура и содержание дисциплины «Лазерно- и ионно-лучевые методы в нанотехнологии»

3.1 Трудоемкость дисциплины

Общая трудоемкость	2 ЗЕТ
--------------------	-------

Часов по учебному плану	72
в том числе	
аудиторные занятия (контактная работа):	33
- занятия лекционного типа	16
- лабораторные занятия	16
самостоятельная работа	39
контроль самостоятельной работы	1
Промежуточная аттестация	2 семестр – зачет

3.2. Содержание дисциплины

Наименование разделов и тем дисциплины, форма промежуточной аттестации	Всего (часы)	в том числе					Самостоятельная работа обучающегося, часы
		контактная работа (работа во взаимодействии с преподавателем), часы					
		из них				Всего	
Занятия лекционного типа	Занятия семинарского типа	Занятия лабораторного типа	Консультации				
1. Введение	2	2				2	
2. Принципы построения аппаратуры для ионной бомбардировки. Процессы, происходящие при воздействии ионного пучка на твердое тело	18	2		8		10	8
3. Ионное распыление. Физические механизмы. Зависимости коэффициента распыления от параметров. Ионно-ионная эмиссия и ее применение.	8	4				4	4
4. Принцип работы систем с фокусированным ионным пучком. Применения.	6	2				2	4
5. Мощные лазеры для нанотехнологий. Механизмы взаимодействия лазерного излучения с веществом	4	2				2	2
6. Классификация и применения лазерных технологических процессов.	28	2		8		10	18

7. Лазерная плазма. Характеристики лазерной плазмы.	5	2				2	3
Контроль самостоятельной работы	1					1	
Промежуточная аттестация - зачет							

Содержание разделов 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. Образовательные технологии

Занятия по дисциплине проходят в лекционной форме и в форме лабораторного практикума, позволяющего формировать у студентов навыки работы с программами расчета параметров ионно-имплантационной обработки полупроводников. При чтении лекций используются учебные презентации в формате MSO PowerPoint.

5. Учебно-методическое обеспечение самостоятельной работы студентов. Оценочные средства для текущего контроля успеваемости, промежуточной аттестации по итогам освоения дисциплины

Виды самостоятельной работы. Самостоятельная работа предусмотрена при освоении материала разделов 2-7. Она связана с теоретической подготовкой к допуску и с

написанием отчётов по лабораторным работам. Самостоятельная работа может проводиться как в домашних условиях, так и в читальном зале библиотеки, в компьютерных классах, в учебных кабинетах (лабораториях) с доступом к лабораторному оборудованию, приборам, базам данных, к Интернет-ресурсам. Текущий контроль успеваемости осуществляется путём контрольных опросов при подготовке к выполнению лабораторной работы, а также путём проверки отчётов по выполненным работам.

Перечень лабораторных работ:

- Расчет параметров ионной имплантации методом SRIM;
- Лазерный отжиг ионно-имплантированного полупроводника.

Контрольные вопросы для проведения аттестации (зачета) по итогам освоения дисциплины:

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. Описание шкал оценивания результатов обучения по дисциплине

Уровень сформированности компетенций (индикатора достижения компетенций)	Шкала оценивания сформированности 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 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.
<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 отдельным и несущественным 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 владения материалом. Невозможность оценить наличие навыков вследствие отказа обучающегося	При решении стандартных задач не продемонстрированы базовые навыки. Имели место грубые	Имеется минимальный набор навыков для решения стандартных задач с некоторыми	Продemonстрированы базовые навыки при решении стандартных задач с некоторым и недочетами	Продemonстрированы базовые навыки при решении стандартных задач без ошибок и недочетов.	Продemonстрированы навыки при решении нестандартных задач без ошибок и	Продemonстрирован творческий подход к решению нестандартных задач

	я от ответа	ошибки.	недочетами			недочетов.	
--	-------------	---------	------------	--	--	------------	--

Перечень компетенций выпускников образовательной программы, в формировании которых участвует дисциплина, с указанием результатов обучения (знаний, умений, владений) приведён выше (раздел 2). Ниже приведена таблица образовательных дескрипторов (отличительных признаков уровней освоения компетенций).

Уровень освоения компетенции	Отличительные признаки
Начальный	<ul style="list-style-type: none"> - воспроизводит термины и основные понятия лучевой технологии полупроводниковых материалов; - корректно объясняет суть технологических процессов.
Базовый	<ul style="list-style-type: none"> - знает фундаментальные основы процессов получения и модифицирования материалов и структур электроники и наноэлектроники; - знает предельные возможности технологий, применяемых при производстве электронной компонентной базы, материалов и компонентов электроники и наноэлектроники; - знает принципы выбора приемов и оборудования для проведения технологических процессов.
Высокий	<ul style="list-style-type: none"> - знает современные технологические методы формирования и модифицирования наноструктурированных материалов и современные методы контроля и диагностики их свойств; - формулирует выводы; - оценивает соответствие теории и эксперимента; - оценивает научную и прикладную значимость результатов.

Промежуточный контроль качества усвоения студентами содержания дисциплины проводится в виде зачета (2 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.

Зачет проводится по итогам выполнения лабораторных работ и знания теоретических разделов дисциплины, запланированных для изучения в осеннем семестре.

Критерии выставления оценки при сдаче зачета:

Зачтено	Выполнены все задания лабораторной работы. Отчеты оформлены правильно, полно и аккуратно. Представлены все необходимые рисунки, схемы и графики. Оформление графиков полностью соответствует общепринятым
---------	---

	<p>требованиям. Могут присутствовать незначительные недочёты, которые студент после замечания преподавателя способен исправить самостоятельно.</p> <p>Студент отвечает полностью на вопросы зачета, показывая удовлетворительное знание основ курса и базовых понятий. При ответе на дополнительные вопросы допускаются незначительные неточности.</p>
Не зачтено	<p>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.</p> <p>Студент показывает неудовлетворительное знание основ курса и базовых понятий.</p>

6.2. 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* используются фронтальный опрос на лабораторных работах;
- для оценивания результатов обучения в виде *умений* используются простые задания для выполнения лабораторных работ, включающих несколько вопросов в виде краткой формулировки действий (комплекса действий) для проведения необходимых технологических операций и измерений, которые следует выполнить, или описание результата, который можно считать достоверным.
- для оценивания результатов обучения в виде *владений* используются комплексные задания лабораторных работ, требующие поэтапного решения в типичной ситуации и развернутого ответа.
- для проведения *итогового контроля* сформированности компетенции используются оформление и защита отчетов по лабораторным работам.

Оценочные средства для контроля текущей успеваемости включают в себя контрольные вопросы, содержащиеся в учебно-методических пособиях по лабораторным работам. Эти вопросы используются при допуске к выполнению экспериментальной части работ. По итогам проверки отчётов о выполнении работ заполняется контрольный лист, в котором преподаватели, проводившие лабораторные занятия выставляют отметку о выполнении. Лабораторный практикум по курсу считается пройденным, если в контрольном листе набрано 2 отметки о выполнении лабораторных работ.

6.3. Типовые контрольные задания для оценки сформированности компетенции ПК-3

Типовые вопросы для фронтальных опросов:

- 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?
- 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?

Типовые задания лабораторного практикума:

- 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.

7. Учебно-методическое и информационное обеспечение дисциплины «Лазерно- и ионно-лучевые методы в нанботехнологии»

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. (Есть 6 экз. в библиотеке НИФТИ ННГУ)
2. Делоне, Н.Б. Взаимодействие лазерного излучения с веществом. Курс лекций / Н.Б. Делоне // М.: Наука, 1989. – 280 с. (Есть 2 экз. в библиотеке НИФТИ ННГУ)

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. Перспективные радиационно-пучковые технологии обработки материалов / В.А. Грибков, Ф.И. Григорьев, Б.А. Калинин, В.Л. Якушин // М.: Круглый год, 2001. – 528 с.
4. Риссел, Х. Ионная имплантация / Х. Риссел, И. Руге // М.: Наука, 1983. – 360 с.
5. 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.

в) программное обеспечение и Интернет-ресурсы

Для углубленного изучения вопросов дисциплины рекомендуется чтение обзорных и оригинальных статей в журналах, имеющихся 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/>.

Учебно-методическое обеспечение дисциплины «Материалы и методы нанотехнологии» 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.

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 федерального государственного образовательного стандарта высшего образования по направлению подготовки 03.04.02 Физика.

Автор(ы):

доцент кафедры физики полупроводников, электроники и нанoeлектроники
физического факультета ННГУ

к.ф.-м.н., с.н.с. _____ Ю.А. Данилов

Рецензент(ы):

заведующий кафедрой теоретической физики
физического факультета ННГУ

д.ф.-м.н., доцент _____ В.А. Бурдов

Заведующий кафедрой физики полупроводников, электроники и нанoeлектроники
физического факультета ННГУ

д.ф.-м.н., профессор _____ Д.А. Павлов

Программа одобрена на заседании Учебно-методической комиссии физического факультета
ННГУ, протокол б/н от « » _____ 202_ г.

Председатель Учебно-методической комиссии
физического факультета ННГУ

к.ф.-м.н., доцент _____ А.А. Перов