

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**

**Введение в физику поверхности**

(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

## Место и цели дисциплины в структуре ООП

Дисциплина «Введение в физику поверхности» относится к вариативной части Блока 1 «Дисциплины, модули» ООП. Является дисциплиной по выбору в первом семестре второго года обучения в магистратуре.

### Целями освоения дисциплины являются:

- формирование у студентов современного представления об основных явлениях и эффектах, связанных с ограниченностью твердых тел;
- ознакомление студентов с основными теоретическими подходами для описания свойств поверхности твердого тела и интерфейсов;
- ознакомление студентов с основными экспериментальными методами для изучения электрофизических свойств поверхности твердых тел;
- формирование у студентов общекультурных, общепрофессиональных и профессиональных компетенций в соответствии с требованиями ФГОС ВО по направлению подготовки 03.04.02 Физика.

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

Формируемые компетенции	Планируемые результаты обучения по дисциплине (модулю), характеризующие этапы формирования компетенций
<b>ПК-4</b> Способен принимать участие в разработке новых методов и методических подходов в научно-инновационных исследованиях и инженерно-технологической деятельности	31 (ПК-4) <b>Знать</b> основные явления и эффекты, связанные с ограниченностью твердых тел. У1 (ПК-4) <b>Уметь</b> пользоваться основными подходами для описания свойств поверхности твердого тела и интерфейсов. В1 (ПК-4) <b>Владеть</b> навыками решения задач, основанными на полученных в ходе освоения дисциплины знаниях. 32 (ПК-4) <b>Знать</b> основные явления и эффекты, связанные с ограниченностью твердых тел. У2 (ПК-4) <b>Уметь</b> пользоваться основными подходами для описания свойств поверхности твердого тела и интерфейсов. В2 (ПК-4) <b>Владеть</b> навыками решения задач, основанными на полученных в ходе освоения дисциплины знаниях.

### 2. Структура и содержание дисциплины

Объем дисциплины составляет 2 з.е.т., всего 72 часа, из которых 33 часа составляет контактная работа обучающегося с преподавателем (1 час – мероприятия промежуточной аттестации; 16 часов занятия лекционного типа, 16 часов занятия семинарского типа (практические занятия), в том числе 2 часа – мероприятия текущего контроля успеваемости), 39 часов составляет самостоятельная работа обучающегося (39 часов самостоятельная работа в течение семестра).

### Содержание дисциплины (модуля)

Наименование и краткое содержание разделов и тем дисциплины,  форма промежуточной аттестации по дисциплине	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	
Основы двумерной кристаллографии	18	4		4	8	10
Электронные свойства поверхности	18	4		4	8	10
Экспериментальные методы исследования поверхности	22	6		6	12	10
Атомная структура и электронные свойства чистых поверхностей некоторых кристаллов	22	6		6	12	10
Атомная структура чистых поверхностей с адсорбатами	22	6		6	12	10
Элементарные процессы на поверхности	22	6		6	12	10
в т.ч. текущий контроль		2				
Промежуточная аттестация – Зачет						

Текущий контроль успеваемости осуществляется в виде решений и последующей проверки домашних контрольных работ, а также в рамках занятий практического и семинарского типа, групповых и индивидуальных консультаций. Итоговый контроль осуществляется на экзамене.

### 3. Образовательные технологии

При изучении дисциплины используются современные образовательные технологии. Предусматривается широкое использование в учебном процессе активных и интерактивных форм проведения занятий (разбор конкретных ситуаций, тренинги по решению практических задач) в сочетании с внеаудиторной работой с целью формирования и развития профессиональных навыков обучающихся.

Контактная работа (работа во взаимодействии с преподавателем) по дисциплине проходит в форме лекций и практических занятий, а также в виде коллективных и индивидуальных консультаций. На занятиях лекционного типа используются мультимедийные средства поддержки образовательного процесса, часть занятий проводятся в виде лекций с проблемным изложением материала. На занятиях практического типа разбираются решения задач различной степени сложности, проводятся обсуждения рассматриваемых проблем в свете последних научных

достижений в данной области. Студенты работают как индивидуально, так и коллективно.

Самостоятельная работа включает в себя выполнение домашних контрольных работ и теоретическую подготовку к занятиям по материалам лекций и рекомендованной литературе, приведенной в конце данной программы. Кроме того, студенты имеют возможность принимать участие в семинарах с представителями российских и зарубежных научных организаций, проводимых в Институте физики микроструктур Российской академии наук.

Формой итогового контроля знаний студентов по дисциплине является экзамен, в ходе которого оценивается уровень теоретических знаний и навыки решения практических задач.

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

Самостоятельная работа студента – неотъемлемая часть подготовки высококвалифицированного специалиста в соответствующей области. Ее цель – формирование у студентов способностей и навыков к непрерывному самообразованию и профессиональному совершенствованию.

Самостоятельная работа студентов подразумевает проработку лекционного и дополнительного материала, решение домашних контрольных работ с последующей проверкой навыков решения задач.

Проработка лекционного материала осуществляется еженедельно после проведения аудиторных занятий в рамках часов, отведенных студентам на самостоятельную работу. Кроме того, работа с лекционным и дополнительным материалом (рекомендованной литературой, приведенной в конце данной программы) проводится в период сессии при подготовке к экзамену по дисциплине.

Выполнение домашних работ осуществляется еженедельно или раз в две недели в соответствии с графиком изучения соответствующего лекционного материала и проведения практических занятий по соответствующей тематике.

Задачи для выполнения самостоятельных контрольных работ по каждому разделу дисциплины составляются преподавателем самостоятельно при ежегодном обновлении банка тестовых заданий. Количество вариантов зависит от числа обучающихся.

**Типовые задачи**, предлагаемые студентам в качестве домашних контрольных работ:

Задача 1. Постройте плоскости (100), (110) и (111) для кристалла с гранецентрированной кубической решеткой. Для атомных плоскостей указанных типов вычислите расстояние между плоскостями и нарисуйте расположение атомов для первого и второго атомных слоев, отсчитывая номера слоев от поверхности.

Задача 2. Для гексагональной двумерной решетки нарисуйте суперструктуры, соответствующие следующим матричным формам:  $\begin{pmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{pmatrix}$ ,  $\begin{pmatrix} 2 & 0 \\ 0 & 1 \end{pmatrix}$ ,  $\begin{pmatrix} 2 & 0 \\ -1 & 1 \end{pmatrix}$ , а также запишите эквивалентные выражения в записи Вуда.

Задача 3. Используя построение Эвальда, определите масштаб картины дифракции от поверхности с квадратной решеткой с периодом 3 А. Сколько дифракционных рефлексов будет видно на картине ДМЭ при энергии 50 эВ в системе с 120° экраном?

## 5. Фонд оценочных средств для промежуточной аттестации по дисциплине

### 5.1. Описание шкал оценивания результатов обучения по дисциплине

Промежуточной аттестацией для дисциплины «Общая теория относительности» является **экзамен**.

По итогам экзамена выставляется оценка по семибалльной шкале: оценки «Плохо» и «Неудовлетворительно» означают отсутствие аттестации, оценки «Удовлетворительно», «Хорошо», «Очень хорошо», «Отлично» и «Превосходно» выставляются при успешном прохождении аттестации.

### 5.2. Процедуры и критерии оценивания результатов обучения по дисциплине

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

- индивидуальное собеседование (промежуточная аттестация).

Контрольные вопросы для индивидуального собеседования представлены в п. 6.3 настоящей Рабочей программы дисциплины.

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

- выполнение практических заданий (текущий контроль, промежуточная аттестация).

Примеры практических заданий для проведения текущего контроля и промежуточной аттестации представлены в п. 5.3 настоящей Рабочей программы дисциплины.

Критериями оценивания являются полнота знаний, наличие умений и владений (навыков), перечисленных в п. 1 настоящей Рабочей программы дисциплины.

**«Плохо»** – обучающийся не продемонстрировал никаких знаний об основных теоретических разделах курса, не показал никаких умений и навыков выполнения практических заданий;

**«Неудовлетворительно»** – обучающийся не продемонстрировал представления об основных теоретических разделах курса, не показал минимально допустимый уровень умений и навыков выполнения практических заданий;

**«Удовлетворительно»** – обучающийся продемонстрировал изложение формулировок основных теоретических положений курса и успешно показал умения и навыки выполнения практических заданий базового уровня сложности;

**«Хорошо»** – обучающийся продемонстрировал связное изложение основных теоретических положений курса и успешно показал умения и навыки выполнения стандартных практических заданий;

**«Очень хорошо»** – обучающийся продемонстрировал связное изложение практически всех теоретических положений курса и успешно показал умения и навыки выполнения стандартных практических заданий;

**«Отлично»** – обучающийся продемонстрировал связное изложение всех теоретических положений курса и успешно показал умения и навыки выполнения практических заданий повышенного уровня сложности;

**«Превосходно»** – обучающийся продемонстрировал уровень знаний в объеме, превышающем стандартную программу подготовки, и продемонстрировал творческий подход к выполнению практических заданий повышенного уровня сложности.

5.3. Типовые контрольные задания или иные материалы, необходимые для оценки результатов обучения

5.3.1. При проведении промежуточной аттестации обучающимся предлагаются следующие контрольные вопросы, охватывающие программу дисциплины «Введение в физику поверхности»:

**Теоретические вопросы для проведения текущего контроля и промежуточной аттестации по итогам освоения дисциплины:**

1. Низкоиндексные плоскости кристаллов с решетками следующих типов: простая кубическая, гранецентрированная кубическая (г.ц.к.), объемноцентрированная кубическая (о.ц.к.), гексагональная плотноупакованная (г.п.у.) и решетки типа алмаза.
2. Двумерные решетки Бравэ и соответствующие им обратные решетки. Поверхностная зона Бриллюэна.
3. Суперструктуры на поверхности кристаллов. Матричная запись и запись Вуда для описания суперструктур.
4. Поверхностные электронные состояния в модели почти свободных электронов (состояния Шокли).
5. Поверхностные электронные состояния в модели сильной связи (состояния Тамма).
6. Интерференция электронов двумерного электронного газа вблизи границы.
7. Зарождение сверхпроводимости в неограниченном кристалле и в полуограниченном кристалле с плоской поверхностью Поверхностная сверхпроводимость.
8. Структурный фазовый переход в одномерной цепочке атомов (переход Пайерлса) и перестройка энергетического спектра.
9. Принципы работы насосов различных типов (форвакуумные, турбомолекулярные, ионные, сублимационные, масляные, криогенные). Методы измерения уровня вакуума.
10. Дифракция медленных электронов на поверхности.
11. Дифракция быстрых электронов на поверхности.
12. Задача Терсоффа-Хаманна и связь туннельной проводимости и локальной плотности электронных состояний.

13. Основные компоненты и принцип работы сканирующего туннельного микроскопа. Сканирующая туннельная микроскопия и спектроскопия.
14. Фотоэлектрический эффект и фотоэлектронная спектроскопия с угловым разрешением.
15. Реконструкция в металлах на примере реконструкции типа herring-bone на поверхности Au(111).
16. Реконструкция в полупроводниках на примере реконструкций Si(111)  $2 \times 1$  и Si(111)  $7 \times 7$ .
17. Условия равновесия двух фаз и область устойчивости для тонкой плёнки.
18. Механизмы роста тонких плёнок и островков. Теория нуклеации Беккера-Деринга-Зельдовича-Френкеля.
19. Оствальдовское созревание. Коалесценция островков.

**Типовые задачи для проведения текущего контроля и промежуточной аттестации по итогам освоения дисциплины:**

Задача 1

Постройте плоскости (100), (110) и (111) для *простого кубического* кристалла. Для атомных плоскостей указанных типов вычислите расстояние между плоскостями и нарисуйте расположение атомов для первого и второго атомных слоев, отсчитывая номера слоев от поверхности.

Задача 2

Для квадратной двумерной решетки нарисуйте суперструктуры, соответствующие следующим матричным формам:  $\begin{pmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{pmatrix}$ ,  $\begin{pmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 2 \end{pmatrix}$ ,  $\begin{pmatrix} 1 & 1 \\ -1 & 1 \end{pmatrix}$ , а также запишите эквивалентные выражения в записи Вуда.

Задача 3

Рассмотрите следующие двумерные суперструктуры: гексагональная сверхрешетка  $2\sqrt{3} \times 2\sqrt{3} - R30^\circ$ , гексагональная сверхрешетка  $\sqrt{7} \times \sqrt{7} - R \pm 19.1^\circ$  и прямоугольная сверхрешетка  $2 \times 3$ . Сколько симметричных доменов могут иметь такие суперструктуры? Схематически нарисуйте дифракционные картины медленных электронов для однодоменных и многодоменных поверхностей указанных видов.

Задача 4

Используя построение Эвальда, качественно опишите изменение числа дифракционных рефлексов при изменении энергии электронов и диаметра экрана?

Задача 5

Рассчитайте изменение толщины металлической плёнки, получаемой термическим осаждением вещества из точечного (нульмерного) или проволочного (одномерного) источников, предполагая изотропный характер испарения.

Задача 6

Рассчитайте связь периода осцилляций электронной плотности для поверхностных квазичастиц от их энергии вблизи одномерного дефекта. На основании решения предложите способ восстановления энергетического спектра по результатам наблюдения интерференционных картин методом сканирующей туннельной спектроскопии.

#### 6.4. Методические материалы, определяющие процедуры оценивания

1. Положение «О проведении текущего контроля успеваемости и промежуточной аттестации обучающихся в ННГУ», утвержденное приказом ректора ННГУ от 13.02.2014 №55-ОД.
2. Положение о фонде оценочных средств, утвержденное приказом ректора ННГУ от 10.06.2015 №247-ОД.

### **6. Учебно-методическое и информационное обеспечение дисциплины «Введение в физику поверхности»**

а) основная литература:

- 1) К. Оура, В.Г. Лифшиц, А.А. Саранин, А.В. Зотов, М. Катаяма, *Введение в физику поверхности*. М.: Наука, 2006. – 490 с.
- 2) В.Г. Дубровский, *Теория формирования эпитаксиальных наноструктур*. М.: Физматлит, 2009. – 351 с/ —

Режим доступа: сайт Российского фонда фундаментальных исследований  
[http://www.rfbr.ru/rffi/ru/books/o\\_72020](http://www.rfbr.ru/rffi/ru/books/o_72020).

- 3) Л.Д. Ландау и Е.М. Лифшиц, *Теоретическая физика: Учеб. пособ.: Для вузов. В 10 т. Т. V. Статистическая физика (часть 1)*. М.: Физматлит 2010. – 616 с.

Режим доступа: ЭБС «Консультант студента»  
<http://www.studentlibrary.ru/book/ISBN9785922100540.html>.

- 4) Л.Д. Ландау и Е.М. Лифшиц, *Теоретическая физика: Учеб. пособ.: Для вузов. В 10 т. Т. X. Физическая кинетика*. М.: Физматлит 2007. – 537 с.

б) дополнительная литература:

- 1) Н. Ашкрофт, Н. Мермин, *Физика твердого тела* [в 2-х т.]. М.: Мир, 1979.
- 2) Ч. Киттель, *Введение в физику твердого тела*. М.: Наука, 1978 – 792 с.
- 3) П.В. Павлов, А.Ф. Хохлов, *Физика твердого тела*. М.: Высш. шк., 2000 – 494 с.
- 4) Д. Вудраф, Т. Делчар, *Современные методы исследования поверхности*. М.: Мир, 1989 – 564 с.
- 5) С.С. Chen, *Introduction to Scanning Tunneling Microscopy*. Oxford University Press, 1993 – 412 с.

в) программное обеспечение и Интернет-ресурсы

- 1) Surface Science  
<https://www.journals.elsevier.com/surface-science>.

### **7. Материально-техническое обеспечение дисциплины (модуля)**

Для проведения лекций и практических занятий требуется типовое оборудование лекционной аудитории.

Для подготовки самостоятельных контрольных работ и для их графического представления (если это необходимо), а также для расширения коммуникационных возможностей студенты имеют возможность работать в компьютерных классах с соответствующим лицензионным программным обеспечением и выходом в Интернет.

Программа составлена в соответствии с требованиями федерального государственного образовательного стандарта высшего образования по направлению подготовки 03.04.02 Физика.

Автор(ы):

\_\_\_\_\_ Аладышкин А.Ю.

Рецензент(ы):

\_\_\_\_\_

Зав. межфакультетской базовой кафедрой  
«Физика наноструктур и наноэлектроника»,  
д. ф.-м. н., профессор,  
чл.-корр. РАН \_\_\_\_\_ / Красильник З.Ф. /

Программа одобрена на заседании Учебно-методической комиссии  
физического факультета ННГУ от «\_\_\_» \_\_\_\_\_ 202\_ года,  
протокол № б/н.

Председатель  
Учебно-методической комиссии  
физического факультета ННГУ \_\_\_\_\_ / Перов А.А. /