

МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ

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

Радиофизический факультет

---

УТВЕРЖДЕНО

решением президиума Ученого совета ННГУ

протокол № 1 от 16.01.2024 г.

**Рабочая программа дисциплины**

Введение в физику поверхности

---

Уровень высшего образования

Магистратура

---

Направление подготовки / специальность

03.04.03 - Радиофизика

---

Направленность образовательной программы

Квантовая радиофизика и лазерная физика

---

Форма обучения

очная

---

г. Нижний Новгород

2024 год начала подготовки

## 1. Место дисциплины в структуре ОПОП

Дисциплина Б1.В.ДВ.08.03 Введение в физику поверхности 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-1: Способен анализировать и обрабатывать научную информацию и результаты исследований в области квантовой радиофизики, лазерной физики и фотоники при решении задач своей профессиональной деятельности	<p>ПК-1.1: Применяет принципы сбора и анализа информации, рассматривает и оценивает современные научные достижения, а также генерирует новые идеи при решении исследовательских и практических задач</p> <p>ПК-1.2: Работает с большим объемом данных, систематизирует и анализирует информацию, полученную из различных источников, в том числе с использованием современных информационных и коммуникационных технологий</p>	<p>ПК-1.1: Знать цели и задачи научных исследований, направленных на создание сверхмощных лазерных систем, базовые принципы их устройства, а также методы их создания. Уметь осуществлять выбор схем построения лазерных систем, планировать элементную базу установок, предлагать методы исследования с использованием сверхмощных лазерных систем. Владеть систематическими знаниями по классификации, областям применения сверхмощных лазерных систем.</p> <p>ПК-1.2: Знать цели и задачи научных исследований, направленных на создание сверхмощных лазерных систем, базовые принципы их устройства, а также методы их создания. Уметь осуществлять выбор схем построения лазерных систем, планировать элементную базу установок, предлагать методы исследования с использованием сверхмощных лазерных систем.</p>	Задачи	Зачёт: Контрольные вопросы Задачи

		Владеть систематическими знаниями по классификации, областям применения сверхмощных лазерных систем.		
ПК-2: Способен выполнять теоретические и экспериментальные исследования и разработки по отдельным разделам тем научно-исследовательских и опытно-конструкторских работ в области квантовой радиофизики, лазерной физики и фотоники и оформлять их результаты	<p>ПК-2.1: Анализирует современное состояние исследований в области квантовой радиофизики, лазерной физики и фотоники, современные подходы к описанию и моделированию различных физических явлений и оценке полученных результатов</p> <p>ПК-2.2: Выбирает и применяет аналитические, аналитико-численные, экспериментальные методы исследования в соответствии с типом поставленной задачи</p> <p>ПК-2.3: Участвует в планировании, подготовке и проведении НИР</p> <p>ПК-2.4: Анализирует полученные данные, формулирует выводы и рекомендации по отдельным разделам тем в области квантовой радиофизики, лазерной физики и фотоники</p>	<p>ПК-2.1:</p> <p>Знать новейшие достижения физики поверхности твердотельного магнетизма и современные проблемы физики наноструктур и физики поверхности;</p> <p>Уметь использовать новейшие достижения современной физики поверхности в теоретической и экспериментальной научно-исследовательской работе;</p> <p>Владеть передовыми основными методами решения практических задач физики поверхности.</p> <p>ПК-2.2:</p> <p>Знать новейшие достижения физики поверхности твердотельного магнетизма и современные проблемы физики наноструктур и физики поверхности;</p> <p>Уметь использовать новейшие достижения современной физики поверхности в теоретической и экспериментальной научно-исследовательской работе;</p> <p>Владеть передовыми основными методами решения практических задач физики поверхности.</p> <p>ПК-2.3:</p> <p>Знать новейшие достижения физики поверхности твердотельного магнетизма и современные проблемы физики наноструктур и физики поверхности;</p> <p>Уметь использовать новейшие достижения современной физики поверхности в теоретической и</p>	Задачи	Зачёт: Контрольные вопросы Задачи

		<p>экспериментальной научно-исследовательской работе; Владеть передовыми основными методами решения практических задач физики поверхности.</p> <p>ПК-2.4: Знать новейшие достижения физики поверхности твердотельного магнетизма и современные проблемы физики наноструктур и физики поверхности; Уметь использовать новейшие достижения современной физики поверхности в теоретической и экспериментальной научно-исследовательской работе; Владеть передовыми основными методами решения практических задач физики поверхности.</p>		
--	--	---	--	--

### 3. Структура и содержание дисциплины

#### 3.1 Трудоемкость дисциплины

	очная
<b>Общая трудоемкость, з.е.</b>	<b>3</b>
<b>Часов по учебному плану</b>	<b>108</b>
в том числе	
<b>аудиторные занятия (контактная работа):</b>	
- занятия лекционного типа	32
- занятия семинарского типа (практические занятия / лабораторные работы)	0
- КСР	1
<b>самостоятельная работа</b>	<b>75</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	
		Контактная работа (работа во взаимодействии с преподавателем),	Самостоятельная работа

		часы из них			обучающегося, часы
		Занятия лекционного типа	Занятия семинарского типа (практические занятия/ лабора торные работы), часы	Всего	
	О Ф О	О Ф О	О Ф О	О Ф О	О Ф О
Тема 1. Основы двумерной кристаллографии	14	4		4	10
Тема 2. Электронные свойства поверхности	17	4		4	13
Тема 3. Электронные свойства поверхности	19	6		6	13
Тема 4. Атомная структура и электронные свойства чистых поверхностей некоторых кристаллов	19	6		6	13
Тема 5. Атомная структура чистых поверхностей с адсорбатами	19	6		6	13
Тема 6. Элементарные процессы на поверхности	19	6		6	13
Аттестация	0				
КСР	1			1	
Итого	108	32	0	33	75

### Содержание разделов и тем дисциплины

Практические занятия /лабораторные работы организуются, в том числе, в форме практической подготовки, которая предусматривает участие обучающихся в выполнении отдельных элементов работ, связанных будущей профессиональной деятельностью.

Практические занятия /лабораторные работы организуются, в том числе, в форме практической подготовки, которая предусматривает участие обучающихся в выполнении отдельных элементов работ, связанных с будущей профессиональной деятельностью.

На проведение практических занятий / лабораторных работ в форме практической подготовки отводится: очная форма обучения - 4 ч.

#### 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.

Помимо ознакомления с рекомендованной литературой в процессе обучения самостоятельная работа обучающегося предполагает проработку контрольных вопросов. Текущий контроль успеваемости проводится во время занятий семинарского типа и научно-практических занятий

#### 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 - Задачи) для оценки сформированности компетенции ПК-1:

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: 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 3: Постройте плоскости (100), (110) и (111) для кристалла с объемноцентрированной 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 4: Постройте плоскости (100), (110) и (111) для кристалла с решеткой типа алмаза. 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 5: 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 6: 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 7: Покажите, что суперструктура

$$\sqrt{3} \times \sqrt{3} - R30^\circ$$

в матричной форме описывается как  $\begin{pmatrix} 2 & 1 \\ -1 & 1 \end{pmatrix}$ , если угол между векторами основных трансляций равен  $120^\circ$ .

Задача 8: Адсорбция Ni на поверхность Si(111), которая имеет гексагональную решетку, приводит к образованию суперструктуры  $\sqrt{7} \times \sqrt{7} - R\varphi$ . Определите значение угла и постройте двумерную решетку суперструктуры, наложенную на решетку  $1 \times 1$ .

Задача 9: Покажите, что изменение толщины  $d(x)$  металлической плёнки, напыленной из проволочного источника, описывается соотношением

$$d(x) = \frac{d(0)}{1 + \left(\frac{x}{L}\right)^2},$$

где  $D$  – расстояние по нормали от источника к образцу,  $x$  – расстояние от нормали до выбранной точки поверхности образца.

Задача 10: Рассмотрите следующие двумерные суперструктуры: гексагональная сверхрешетка

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

Задача 12: Используя построение Эвальда, определите масштаб картины дифракции от поверхности с квадратной решеткой с периодом 3 Å. Сколько дифракционных рефлексов будет видно на картине ДБЭ при энергии 10 кэВ в системе с углом падения 5° и расстоянием от образца до экрана 30 см и диаметром экрана 10 см?

### 5.1.2 Типовые задания (оценочное средство - Задачи) для оценки сформированности компетенции ПК-2:

Задача 1: Покажите, что волновые функции электронов с энергиями, близкими к энергии Ферми, вблизи плоской поверхности монокристаллического образца описываются выражением

$$\varphi(x, y, z) = \sum_G a_G \times e^{-z\sqrt{\tau^2 + (k_{\parallel} + G)^2}} \times e^{i(k_{\parallel} + G)R}$$

где  $G$  – вектор двумерной обратной решетки,  $R$  – двумерный радиус-вектор,  $\tau$  – волновой вектор частицы вдоль поверхности,  $z > 0$ .

Задача 2: Рассчитайте период осцилляций Фриделя для Au, который является благородным металлом и имеет г.ц.к. решетку с постоянной решетки 4.08 Å, для энергий, близких к энергии Ферми.

Задача 3: Рассчитайте период осцилляций Фриделя для Na, который является щелочным металлом и имеет о.ц.к. решетку с постоянной решетки 4.23 Å, для энергий, близких к энергии Ферми.

Задача 4: Атом Ag случайно мигрирует на поверхности Si(111) $\sqrt{3} \times \sqrt{3}$ -Ag. Оцените среднее смещение атома за 1 сек, 1 мин и 1 час при температуре 450 С, коэффициент диффузии  $D_0 = 10^{-3}$  см<sup>2</sup>/сек,  $E_{diff} = 0.33$  эВ.

Задача 5: Частота скачков атома азота по поверхности Fe(100) составляет  $10^{-3}$  1/сек при температуре 300 К и  $3 \times 10^{-3}$  1/сек при температуре 330 К. Оцените коэффициент диффузии и вычислите энергию активации, принимая во внимание, что Fe – о.ц.к. кристалл с постоянной решетки 2.87 Å.

Предположите. Что частота колебаний равна  $4 \times 10^{12}$  1/сек.

## Критерии оценивания (оценочное средство - Задачи)

Оценка	Критерии оценивания
зачтено	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 ИЛИ Все компетенции (части компетенций), на формирование которых направлена дисциплина, сформированы на уровне не ниже «отлично», при этом хотя бы одна компетенция сформирована на уровне «отлично» ИЛИ Все компетенции (части компетенций), на формирование которых направлена дисциплина, сформированы на уровне не ниже «очень хорошо», при этом хотя бы одна компетенция сформирована на уровне «очень хорошо» ИЛИ Все компетенции (части компетенций), на формирование которых направлена дисциплина, сформированы на уровне не ниже «хорошо», при этом хотя бы одна компетенция сформирована на уровне «хорошо» ИЛИ 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	Хотя бы одна компетенция сформирована на уровне «неудовлетворительно», ни одна из компетенций не сформирована на уровне «плохо» ИЛИ Хотя бы одна компетенция сформирована на уровне «плохо»

## 5.2. Описание шкал оценивания результатов обучения по дисциплине при промежуточной аттестации

### Шкала оценивания сформированности компетенций

Уровень сформированности компетенций (индикатор 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 умений. Невозможность оценить наличие умений вследствие отказа обучающегося от ответа	При решении стандартных задач не продемонстрированы основные умения. Имели место грубые ошибки	Продемонстрированы основные умения. Решены типовые задачи с негрубыми ошибками. Выполнены все задания, но не в полном объеме	Продемонстрированы все основные умения. Решены все основные задачи с негрубыми ошибками. Выполнены все задания в полном объеме, но некоторые с недочетами	Продемонстрированы все основные умения. Решены все основные задачи. Выполнены все задания в полном объеме, но некоторые с недочетами	Продемонстрированы все основные умения. Решены все основные задачи с отдельным и несущественными недочетами, выполнены все задания в полном объеме	Продемонстрированы 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 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	<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	<b>неудовлетворительно</b>	Хотя бы одна компетенция сформирована на уровне «неудовлетворительно».
	<b>плохо</b>	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-1**

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.

#### **5.3.2 Типовые задания (оценочное средство - Контрольные вопросы) для оценки сформированности компетенции ПК-2**

1. Дифракция быстрых электронов на поверхности.
2. Задача Терсоффа-Хаманна и связь туннельной проводимости и локальной плотности электронных состояний.
3. Основные компоненты и принцип работы сканирующего туннельного микроскопа. Сканирующая туннельная микроскопия и спектроскопия.
4. Фотоэлектрический эффект и фотоэлектронная спектроскопия с угловым разрешением.
5. Реконструкция в металлах на примере реконструкции типа herring-bone на поверхности Au(111).
6. Реконструкция в полупроводниках на примере реконструкций Si(111)  $2\times 1$  и Si(111)  $7\times 7$ .

7. Условия равновесия двух фаз и область устойчивости для тонкой плёнки.
8. Механизмы роста тонких плёнок и островков. Теория нуклеации Беккера-Деринга-Зельдовича-Френкеля.
9. Оствальдовское созревание. Коалесценция островков.

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

Оценка	Критерии оценивания
зачтено	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 ИЛИ Все компетенции (части компетенций), на формирование которых направлена дисциплина, сформированы на уровне не ниже «отлично», при этом хотя бы одна компетенция сформирована на уровне «отлично» ИЛИ Все компетенции (части компетенций), на формирование которых направлена дисциплина, сформированы на уровне не ниже «очень хорошо», при этом хотя бы одна компетенция сформирована на уровне «очень хорошо» ИЛИ Все компетенции (части компетенций), на формирование которых направлена дисциплина, сформированы на уровне не ниже «хорошо», при этом хотя бы одна компетенция сформирована на уровне «хорошо» ИЛИ 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	Хотя бы одна компетенция сформирована на уровне «неудовлетворительно», ни одна из компетенций не сформирована на уровне «плохо» ИЛИ Хотя бы одна компетенция сформирована на уровне «плохо»

### 5.3.3 Типовые задания (оценочное средство - Задачи) для оценки сформированности компетенции ПК-1

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: 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 3: Постройте плоскости (100), (110) и (111) для кристалла с объемноцентрированной 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 4: Постройте плоскости (100), (110) и (111) для кристалла с решеткой типа алмаза. 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 5: 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 6: 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 7: Покажите, что суперструктура

$$\sqrt{3} \times \sqrt{3} - R30^\circ$$

в матричной форме описывается как  $\begin{pmatrix} 2 & 1 \\ -1 & 1 \end{pmatrix}$ , если угол между векторами основных трансляций равен  $120^\circ$ .

Задача 8: Адсорбция Ni на поверхность Si(111), которая имеет гексагональную решетку, приводит к образованию суперструктуры  $\sqrt{7} \times \sqrt{7} - R\phi$ . Определите значение угла и постройте двумерную решетку суперструктуры, наложенную на решетку  $1 \times 1$ .

Задача 9: Покажите, что изменение толщины  $d(x)$  металлической плёнки, напыленной из проволочного источника, описывается соотношением

$$d(x) = \frac{d(0)}{1 + \left(\frac{x}{D}\right)^2},$$

где  $D$  – расстояние по нормали от источника к образцу,  $x$  – расстояние от нормали до выбранной точки поверхности образца.

Задача 10: Рассмотрите следующие двумерные суперструктуры: гексагональная сверхрешетка

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

Задача 12: Используя построение Эвальда, определите масштаб картины дифракции от поверхности с квадратной решеткой с периодом 3 А. Сколько дифракционных рефлексов будет видно на картине ДБЭ при энергии 10 кэВ в системе с углом падения 5° и расстоянием от образца до экрана 30 см и диаметром экрана 10 см?

### 5.3.4 Типовые задания (оценочное средство - Задачи) для оценки сформированности компетенции ПК-2

Задача 1: Покажите, что волновые функции электронов с энергиями, близкими к энергии Ферми, вблизи плоской поверхности монокристаллического образца описываются выражением

$$\varphi(x, y, z) = \sum_G a_G \times e^{-z \sqrt{\tau^2 + (k_{\parallel} + G)^2}} \times e^{i(k_{\parallel} + G)R}$$

где  $G$  – вектор двумерной обратной решетки,  $R$  – двумерный радиус-вектор,  $\tau$  – волновой вектор частицы вдоль поверхности,  $z > 0$ .

Задача 2: Рассчитайте период осцилляций Фриделя для Au, который является благородным металлом и имеет г.ц.к. решетку с постоянной решетки 4.08 А, для энергий, близких к энергии Ферми.

Задача 3: Рассчитайте период осцилляций Фриделя для Na, который является щелочным металлом и имеет о.ц.к. решетку с постоянной решетки 4.23 А, для энергий, близких к энергии Ферми.

Задача 4: Атом Ag случайно мигрирует на поверхности Si(111) 3×3-Ag. Оцените среднее смещение атома за 1 сек, 1 мин и 1 час при температуре 450 С, коэффициент диффузии  $D_0 = 10^{-3}$  см<sup>2</sup>/сек,  $E_{diff} = 0.33$  эВ.

Задача 5: Частота скачков атома азота по поверхности Fe(100) составляет  $10^{-3}$  1/сек при температуре 300 К и  $10^{-3}$  1/сек при температуре 330 К. Оцените коэффициент диффузии и вычислите энергию активации, принимая во внимание, что Fe – о.ц.к. кристалл с постоянной решетки 2.87 А. Предположите. Что частота колебаний равна  $4 \cdot 10^{12}$  1/сек.

### Критерии оценивания (оценочное средство - Задачи)

Оценка	Критерии оценивания
зачтено	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 ИЛИ Все компетенции (части компетенций), на формирование которых направлена дисциплина, сформированы на уровне не ниже «отлично», при этом хотя бы одна компетенция сформирована на уровне «отлично» ИЛИ Все компетенции (части компетенций), на формирование которых направлена дисциплина, сформированы на уровне не ниже «очень хорошо», при этом хотя бы одна компетенция сформирована на уровне «очень хорошо» ИЛИ Все компетенции (части компетенций), на формирование которых направлена дисциплина, сформированы на уровне не ниже «хорошо», при этом хотя бы одна компетенция сформирована на уровне «хорошо» ИЛИ Все компетенции (части компетенций), на формирование которых направлена дисциплина, сформированы на уровне не ниже «удовлетворительно», при этом хотя бы одна компетенция сформирована на уровне

Оценка	Критерии оценивания
	«удовлетворительно»
не зачтено	Хотя бы одна компетенция сформирована на уровне «неудовлетворительно», ни одна из компетенций не сформирована на уровне «плохо» ИЛИ Хотя бы одна компетенция сформирована на уровне «плохо»

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

Основная литература:

1. Ландау Лев Давидович. Теоретическая физика : учеб. пособие для студентов физ. специальностей ун-тов : в 10 т. Т. 10. Физическая кинетика / под ред. Л. П. Питаевского. - 2-е изд., испр. - М. : Физматлит, 2001. - 536 с. - ISBN 5-9221-0125-0 (т. 10). - ISBN 5-9221-0053-X : 167.00., 3 экз.

Дополнительная литература:

1. Ашкрофт Н. Физика твердого тела : в 2 т. [Т.] 2 / пер. с англ. К. И. Кугеля и А. С. Михайлова ; под ред. М. И. Каганова. - М. : Мир, 1979. - 422 с. : ил. - 2.90., 5 экз.
2. Киттель Чарлз. Введение в физику твердого тела / пер. с 4-го америк. изд.: А. А. Гусева, А. В. Пахнева ; под общ. ред. А. А. Гусева. - М. : Наука, Гл. ред. физ.-мат. лит., 1978. - 791 с. : ил. - 2.10., 28 экз.
3. Павлов Павел Васильевич. Физика твердого тела : учебник. - 3-е изд., стер. - М. : Высшая школа, 2000. - 494 с. - 78.54., 33 экз.
4. Вудраф Д. Современные методы исследования поверхности / пер. с англ. Е. Ф. Шека ; под ред. В. И. Раховского. - М. : Мир, 1989. - 568 с. : ил. - 4.90., 3 экз.

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

- 1) Л.Д. Ландау и Е.М. Лифшиц, Теоретическая физика: Учеб. пособ.: Для вузов. В 10 т. Т. V. Статистическая физика. М.: Физматлит 2010.  
<https://www.studentlibrary.ru/book/ISBN9785922100540.html>
- 2) Surface Science <https://www.journals.elsevier.com/surface-science>.

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

Учебные аудитории для проведения учебных занятий, предусмотренных образовательной программой, оснащены мультимедийным оборудованием (проектор, экран), техническими средствами обучения.

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 03.04.03 - Радиофизика.

Автор(ы): Аладышкин Алексей Юрьевич, доктор физико-математических наук.

Заведующий кафедрой: Красильник Захарий Фишелевич, доктор физико-математических наук.

Программа одобрена на заседании методической комиссии от 18.12.2023 г., протокол № 09/23.