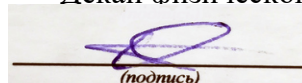


**МИНОБРНАУКИ РОССИИ**  
**Ярославский государственный университет им. П.Г. Демидова**

Базовая кафедра нанотехнологий в электронике  
В ЯФ ФГБУН «Физико-технологический институт» РАН

**УТВЕРЖДАЮ**

Декан физического факультета



И.С. Огнев

«23» мая 2023 г.

**Рабочая программа дисциплины**  
**«Физика поверхностных явлений»**

Направление подготовки  
11.03.04 Электроника и нанoeлектроника

Направленность (профиль)  
« Интегральная электроника и нанoeлектроника »

Форма обучения  
очная

Программа одобрена  
на заседании кафедры  
от «30» марта 2023 г. протокол №8

Программа одобрена НМК  
физического факультета  
протокол №5 от «25» апреля 2023г.

Ярославль

### 1. Цели освоения дисциплины

Целями освоения дисциплины «Физика поверхностных явлений» являются:

- ознакомление студентов со специфическими методами анализа поверхности, позволяющие получать информацию о химическом составе, структуре поверхностных слоев и электронных свойствах поверхности;
- рассмотрение поверхностных свойств твердого тела: движение электронов, движение атомов, адсорбция атомов и молекул.

### 2. Место дисциплины в структуре ОП бакалавриата

Дисциплина физика поверхностных явлений относится к вариативной части профессионального цикла.

Изучается после прохождения дисциплин математического и естественнонаучного цикла, а также после освоения основных дисциплин профессионального цикла. При изучении широко используются знания, умения и практические навыки указанных дисциплин.

### 3. Планируемые результаты обучения по дисциплине, соотнесенные с планируемыми результатами освоения ОП бакалавриата

Процесс изучения дисциплины направлен на формирование следующих элементов компетенций в соответствии с ФГОС ВО, ОП ВО и приобретения следующих знаний, умений, навыков и (или) опыта деятельности:

Формируемая компетенция (код и формулировка)	Индикатор достижения компетенции (код и формулировка)	Перечень планируемых результатов обучения
<b>Профессиональные компетенции</b>		
ПК-2 Способен аргументировано выбирать и реализовывать на практике эффективную методику экспериментального исследования параметров и характеристик приборов, схем, устройств и установок электроники и наноэлектроники различного функционального назначения	ИД_ПК-2.1. Знает методы разработки эффективных алгоритмов решения научно-исследовательских задач.	<b>Знать:</b> <ul style="list-style-type: none"><li>– основные мотивы, побуждающие к исследованию поверхности;</li><li>– принципы работы приборов дифракции медленных электронов, полевой ионной микроскопии, рассеяния медленных ионов, сканирующей туннельной микроскопии;</li><li>– отличительные особенности кристаллической структуры поверхности и электронной структуры от объемных свойств твердого тела;</li></ul>
	ИД_ПК-2.2. Применяет алгоритмы решения исследовательских задач с использованием современных языков программирования.	<b>Уметь:</b> <ul style="list-style-type: none"><li>– самостоятельно осваивать и грамотно применять результаты новых экспериментальных и теоретических исследований в области физики твёрдого тела и полупроводников;</li><li>– самостоятельно выбирать методы и объекты исследований;</li></ul>
	ИД_ПК-2.3. Обладает навыками разработки стратегии и методологии исследования изделий микро- и наноэлектроники	<b>Владеть:</b> <ul style="list-style-type: none"><li>– стандартной терминологией,</li></ul>

		<p>определениями и обозначениями;</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>– методами обоснованного выбора исследовательского оборудования, оценкой эффективности его работы и адекватности поставленной конкретной задаче;</li> <li>– анализом и оценкой полученных результатов и аргументацией для подтверждения сделанных на их основе выводов и принятых решений;</li> <li>– рациональными методами анализа и обработки научно-технической информации</li> </ul>
--	--	--

#### 4. Объем, структура и содержание дисциплины

Общая трудоемкость дисциплины составляет 2 зачетные единицы, 72 акад. часа.

№ п/п	Темы (разделы) дисциплины, их содержание	Семестр	Виды учебных занятий, включая самостоятельную работу студентов, и их трудоемкость (в академических часах)						Формы текущего контроля успеваемости  Форма промежуточной аттестации (по семестрам)
			Контактная работа						
			лекции	практические	лабораторные	консультации	аттестационные испытания	самостоятельная работа	
1	Введение. Задачи курса. Взаимодействие атомов в твёрдом теле. Явления на поверхности твёрдого тела	8	2					5	Фронтальный опрос
2	Химический состав поверхности. Методы анализа.	8	4		10	1		10	Фронтальный опрос
3	Структура поверхности. Поверхностные методы анализа структуры поверхности	8	4		10	1		10	Фронтальный опрос
4	Электронная структура поверхности	8	4			1		10	Фронтальный опрос
5	Движение атомов на поверхности.	8	2			1		10	Фронтальный опрос
6	Адсорбция атомов и молекул на поверхности	8	4			1		10	Фронтальный опрос
7	Лабораторные занятия	8			20				Защита отчетов по выполненным

									лабораторным работам
							0.3	28.7	Зачет
	<b>Всего</b>		<b>20</b>		<b>20</b>	<b>3</b>	<b>0.3</b>	<b>28.7</b>	

### Содержание разделов дисциплины

**1.Тема 1.** Введение. Взаимодействие атомов в объеме и на поверхности твердого тела. Мотивы, побуждающие изучать поверхность: термоионная эмиссия, выращивание кристаллов, катализ, полупроводниковая граница раздела, тонкие пленки, молекулярно-лучевая эпитаксия. Экспериментальные методы анализа поверхности.

#### **2. Тема 2.**

Методы анализа химического состава поверхности: оже электронная спектроскопия (РЭОС). основные свойства РЭОС. Физические основы рентгеновской фотоэлектронной спектроскопии (РФЭС). Вторично-ионная масс-спектрометрия (ВИМС). Сравнение ВИМС, РЭОС и РФЭС.

#### **3.Тема 3.**

Структура поверхности. Релаксация и реконструкция поверхности. Двумерные решетки Браве, описание структур верхних слоев поверхности. Методы анализа кристаллической структуры поверхности: дифракция медленных электронов (ДМЭ), полевая ионная микроскопия (ПИМ), сканирующая туннельная микроскопия (СТМ), рассеяние медленных ионов (РМИ). Примеры поверхностных структур.

#### **4. Тема 4.**

Электронная структура поверхности. Контактный потенциал и работа выхода. Измерение работы выхода. Поверхностные состояния и искривление зон. Измерение распределения плотности состояний электронов с помощью ультрафиолетовой фотоэлектронной спектроскопии (УФЭС). Плазмоны. Оптические свойства поверхности.

#### **5. Тема 5.**

Движение атомов на поверхности. Поверхностная динамика решетки: дефекты, домены, ступеньки. Поверхностная диффузия. Поверхностное плавление.

#### **6. Тема 6.**

Адсорбция атомов и молекул. Поверхностное натяжение, поверхностное натяжение и удельная свободная энергия поверхности. Адсорбционные процессы. Хемосорбция. Поверхностная сегрегация. Осаждение тонких пленок. Эпитаксиальный рост тонких плёнок Молекулярно-лучевая эпитаксия.

#### **7. Тема 7.**

Лабораторные занятия. Подготовка образцов для просвечивающей электронной микроскопии на установке. QUANTRA, Анализ структуры углеродных пленок на СТМ. Определение химического состава образцов на установке РЭОС.

### **5. Образовательные технологии, используемые при осуществлении образовательного процесса по дисциплине**

Практическая реализация концепции проблемного обучения, которое представляет собой систему методов и средств обучения, направленных на моделирование реального творческого процесса путем создания проблемной ситуации и управления поиском решения проблемы. Усвоение новых знаний при этом происходит как самостоятельное открытие их студентами с помощью преподавателя. Использование образовательных Интернет-ресурсов.

В процессе обучения используются следующие образовательные технологии:

**Вводная лекция** – дает первое целостное представление о дисциплине и ориентирует студента в системе изучения данной дисциплины. Студенты знакомятся с назначением и задачами курса, его ролью и местом в системе учебных дисциплин и в системе подготовки в целом. Дается краткий обзор курса, история развития науки и практики, достижения в этой сфере, имена известных ученых, излагаются перспективные

направления исследований. На этой лекции высказываются методические и организационные особенности работы в рамках данной дисциплины, а также дается анализ рекомендуемой учебно-методической литературы.

**Академическая лекция** (или лекция общего курса) – последовательное изложение материала, осуществляемое преимущественно в виде монолога преподавателя. Требования к академической лекции: современный научный уровень и насыщенная информативность, убедительная аргументация, доступная и понятная речь, четкая структура и логика, наличие ярких примеров, научных доказательств, обоснований, фактов.

**Лабораторное занятие** – занятие, посвященное освоению конкретных умений и навыков и закреплению полученных на лекции знаний.

На лабораторных занятиях студенты выполняют экспериментальные работы поставленные под руководством (контролем) преподавателя. Знакомятся с экспериментальными установками, проводят эксперименты, обрабатывают полученные результаты, оформляют в виде отчета и защищают их.

**Консультации** – групповые занятия, являющиеся одной из форм контроля самостоятельной работы студентов. На консультациях по просьбе студентов рассматриваются наиболее сложные моменты при освоении материала дисциплины, преподаватель отвечает на вопросы студентов, которые возникают у них в процессе самостоятельной работы, обсуждаются результаты решения заданий, выполненных студентами самостоятельно.

## **6. Перечень информационных технологий, используемых при осуществлении образовательного процесса по дисциплине, включая перечень лицензионного программного обеспечения и информационных справочных систем (при необходимости)**

В процессе осуществления образовательного процесса используются:

– для формирования текстовых и графических материалов промежуточной и текущей аттестации – программы Microsoft Office, графический редактор Inkscape;

– для поиска учебной литературы библиотеки ЯрГУ – Автоматизированная библиотечная информационная система "БУКИ-NEXT" (АБИС "Буки-Next").

## **7. Перечень основной и дополнительной учебной литературы, ресурсов информационно-телекоммуникационной сети «Интернет», необходимых для освоения дисциплины**

### **а) основная литература:**

1. Праттон М. Введение в физику поверхности [Электронный ресурс] / М. Праттон. — Электрон. текстовые данные. — Ижевск: Регулярная и хаотическая динамика, 2000. — 254 с. — 5-93972-010-2. — Режим доступа: <http://www.iprbookshop.ru/17615.html>
2. Киселев В.Ф., Козлов С.Н., Зотеев А.В. Основы физики поверхности твердого тела М. Изд-во МГУ, физ. фак.-т 1999 284 с.
3. Д. Вудраф, Т. Делчар Современные методы исследования поверхности М. Мир 1989 568 с.

### **б) дополнительная литература:**

4. Никитенков Н.Н. Основы анализа поверхности твердых тел методами атомной физики [Электронный ресурс] : учебное пособие / Н.Н. Никитенков. — Электрон. текстовые данные. — Томск: Томский политехнический университет, 2013. — 203 с. — 978-5-4387-0349-5. — Режим доступа: <http://www.iprbookshop.ru/34691.html>

### **в) программное обеспечение и Интернет-ресурсы:**

Федеральный портал «Информика» <http://www.informika.ru/> и его проекты

Сайт ЦКП «Диагностика микро и наноструктур» <http://www.nano.yar.ru>

Использование специализированного программного обеспечения не требуется

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

Материально-техническая база, необходимая для осуществления образовательного процесса по дисциплине включает в свой состав специальные помещения:

- учебные аудитории для проведения занятий лекционного типа;
- учебные аудитории для проведения практических занятий (семинаров);
- учебные аудитории для проведения групповых и индивидуальных консультаций;
- учебные аудитории для проведения текущего контроля и промежуточной

аттестации;

- помещения для самостоятельной работы;

- помещения для хранения и профилактического обслуживания технических средств обучения.

Специальные помещения укомплектованы средствами обучения, служащими для представления учебной информации большой аудитории.

Помещения для самостоятельной работы обучающихся оснащены компьютерной техникой с возможностью подключения к сети «Интернет» и обеспечением доступа к электронной информационно-образовательной среде ЯрГУ.

Аудиторный фонд физического факультета.

Мультимедийный проектор.

Оборудование Центра коллективного пользования «Диагностика микро- и наноструктур»

Компьютерные классы с доступом в Интернет.

Библиотека университета.

Автор:

Профессор базовой кафедры  
нанотехнологий в электронике, д.ф.-м.н.

*должность, ученая степень*

*подпись*

В.И. Бачурин

*И.О. Фамилия*

## **Приложение №1 к рабочей программе дисциплины «Физика поверхностных явлений»**

### **Фонд оценочных средств для проведения текущей и промежуточной аттестации студентов по дисциплине**

#### **1. Типовые контрольные задания и иные материалы, используемые в процессе текущего контроля успеваемости**

##### **Вопросы к зачету в 8 семестре**

1. Взаимодействие атомов в объеме и на поверхности твердого тела. Экспериментальные методы анализа поверхности.
2. Оже электронная спектроскопия (РЭОС). основные свойства РЭОС. Физические основы рентгеновской фотоэлектронной спектроскопии (РФЭС). Вторично-ионная масс-спектрометрия (ВИМС). Сравнение ВИМС, РЭОС и РФЭС.
3. Методы анализа кристаллической структуры поверхности: дифракция медленных электронов (ДМЭ), полевая ионная микроскопия (ПИМ), сканирующая туннельная микроскопия (СТМ), рассеяние медленных ионов (РМИ)
4. Структура поверхности. Релаксация и реконструкция поверхности. Двумерные решетки Браве, описание структур верхних слоев поверхности.
5. Примеры поверхностных структур.
6. Электронная структура поверхности. Контактный потенциал и работа выхода. Измерение работы выхода.
7. Поверхностные состояния и искривление зон. Измерение распределения плотности состояний электронов с помощью ультрафиолетовой фотоэлектронной спектроскопии (УФЭС).
8. Спектроскопия одиночных атомов и СТМ.
9. Плазмоны. Оптические свойства поверхности.
10. Движение атомов на поверхности. Поверхностная динамика решетки: дефекты, домены, ступеньки.
11. Поверхностная диффузия. Поверхностное плавление.
12. Адсорбция атомов и молекул. Адсорбционные процессы.
13. Поверхностное натяжение, поверхностное натяжение и удельная свободная энергия поверхности.
14. Экспериментальное наблюдение хемосорбции.
15. Теория хемосорбции.
16. Поверхностная сегрегация.
17. Осаждение тонких пленок.
18. Эпитаксиальный рост тонких плёнок. Молекулярно-лучевая эпитаксия.

##### **Правила выставления оценки на зачете**

В билеты на зачет включается два теоретических вопроса. На подготовку к ответу дается не менее 1 часа.

По итогам зачета выставляется одна из оценок: «зачтено», «не зачтено».

**Оценка «Зачтено»** выставляется студенту, который демонстрирует глубокое и полное владение содержанием материала и понятийным аппаратом курса «Физические методы исследования микро- и наноструктур»; осуществляет межпредметные связи; умеет связывать теорию с практикой. Студент дает развернутые, полные и четкие ответы на

вопросы экзаменационного билета и дополнительные вопросы, соблюдает логическую последовательность при изложении материала.

**Оценка «Не зачтено»** выставляется студенту, который демонстрирует разрозненные, бессистемные знания; беспорядочно и неуверенно излагает материал; не умеет выделять главное и второстепенное, не умеет соединять теоретические положения с практикой, не устанавливает межпредметные связи; допускает грубые ошибки при определении сущности раскрываемых понятий, явлений, вследствие непонимания их существенных и несущественных признаков и связей; дает неполные ответы, логика и последовательность изложения которых имеют существенные и принципиальные нарушения, в ответах отсутствуют выводы. Дополнительные и уточняющие вопросы экзаменатора не приводят к коррекции ответов студента. На основную часть дополнительных вопросов студент затрудняется дать ответ или дает неверные ответы.

Оценка «Не зачтено» выставляется также студенту, который взял билет, но отвечать отказался.



## Приложение №2 к рабочей программе дисциплины «Физика поверхностных явлений»

### Методические указания для студентов по освоению дисциплины

В ходе лекций преподаватель излагает и разъясняет основные, наиболее сложные понятия темы, а также связанные с ней теоретические и практические проблемы, дает рекомендации на выполнение самостоятельной работы. В ходе лекций обучающимся рекомендуется:

- вести конспектирование учебного материала;
- обращать внимание на определения понятий, формулировки законов и их математическое выражение, положения, раскрывающие содержание тех или иных явлений и процессов, научные выводы и практические рекомендации по их применению;
- задавать преподавателю уточняющие вопросы с целью уяснения теоретических положений.

Для успешного овладения курсом необходимо посещать все лекции, так как тематический материал взаимосвязан между собой. В случаях пропуска занятия студенту необходимо самостоятельно изучить материал и ответить на контрольные вопросы по пропущенной теме во время индивидуальных консультаций. Следует помнить, что лекционный конспект является не материалом для подготовки, а скорее развернутым планом для дальнейшей самостоятельной проработки материала.

Практические занятия – это одна из активных форм учебного процесса. Большая часть тем дисциплины носит практический характер, т.е. предполагает решение задач, анализ практических ситуаций. При подготовке к практическим занятиям обучающемуся необходимо освоить теоретическую основу по теме практического занятия, быть готовым к дискуссионному обсуждению.

Индивидуальное домашнее задание или контрольная работа представляют собой изложение в письменном виде результатов теоретического анализа или решение задачи по определенной теме. При необходимости проводятся консультации по разбору заданий для самостоятельной работы, которые вызвали затруднения.

Для проверки и контроля усвоения теоретического материала, приобретенных практических навыков работы и проведения расчетов, в течение обучения проводятся мероприятия текущей аттестации в виде проверки выполнения заданий для внеаудиторного решения и контрольной работы.

Для самостоятельного подбора литературы в библиотеке ЯрГУ рекомендуется использовать:

**1. Личный кабинет** ([http://lib.uniyl.ac.ru/opac/bk\\_login.php](http://lib.uniyl.ac.ru/opac/bk_login.php)) дает возможность получения on-line доступа к списку выданной в автоматизированном режиме литературы, просмотра и копирования электронных версий изданий сотрудников университета (учеб. и метод. пособия, тексты лекций и т.д.) Для работы в «Личном кабинете» необходимо зайти на сайт Научной библиотеки ЯрГУ с любой точки, имеющей доступ в Internet, в пункт меню «Электронный каталог»; пройти процедуру авторизации, выбрав вкладку «Авторизация», и заполнить представленные поля информации.

**2. Электронная библиотека учебных материалов ЯрГУ** ([http://www.lib.uniyl.ac.ru/opac/bk\\_cat\\_find.php](http://www.lib.uniyl.ac.ru/opac/bk_cat_find.php)) содержит более 2500 полных текстов учебных и учебно-методических материалов по основным изучаемым дисциплинам, изданных в университете. Доступ в сети университета, либо по логину/пароллю.

**3. Электронная картотека «Книгообеспеченность»** ([http://www.lib.uniyl.ac.ru/opac/bk\\_bookreq\\_find.php](http://www.lib.uniyl.ac.ru/opac/bk_bookreq_find.php)) раскрывает учебный фонд научной библиотеки ЯрГУ, предоставляет оперативную информацию о состоянии

книгообеспеченности дисциплин основной и дополнительной литературой, а также цикла дисциплин и специальностей. Электронная картотека [«Книгообеспеченность»](#) доступна в сети университета и через Личный кабинет.