

Министерство науки и высшего образования Российской Федерации  
Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение  
высшего образования  
"Амурский государственный университет"

УТВЕРЖДАЮ

Проректор по учебной и научной  
работе

                    Лейфа                    А.В. Лейфа

« 1 » сентября 2023 г.

РАБОЧАЯ ПРОГРАММА  
«ФИЗИКА ПОВЕРХНОСТИ»

Направление подготовки 03.04.01 Прикладные математика и физика

Направленность (профиль) образовательной программы – Физика твердого тела

Квалификация выпускника – Магистр

Год набора – 2023

Форма обучения – Очная

Курс     1     Семестр     2    

Экзамен 2 сем

Общая трудоемкость дисциплины 144.0 (академ. час), 4.00 (з.е)

Составитель Д.В. Фомин, доцент, канд. физ.-мат. наук

Инженерно-физический факультет

Кафедра физики

Рабочая программа составлена на основании Федерального государственного образовательного стандарта ВО для направления подготовки 03.04.01 Прикладные математика и физика, утвержденного приказом Министерства науки и высшего образования Российской Федерации от 07.08.20 № 898

Рабочая программа обсуждена на заседании кафедры физики

01.09.2023 г., протокол № 1

Заведующий кафедрой Стукова Е.В. Стукова

СОГЛАСОВАНО

Учебно-методическое управление

Чалкина Н.А. Чалкина

« 1 » сентября 2023 г.

СОГЛАСОВАНО

Научная библиотека

Петрович О.В. Петрович

« 1 » сентября 2023 г.

СОГЛАСОВАНО

Выпускающая кафедра

Стукова Е.В. Стукова

« 1 » сентября 2023 г.

СОГЛАСОВАНО

Центр цифровой трансформации и  
технического обеспечения

Тодосейчук А.А. Тодосейчук

« 1 » сентября 2023 г.

## 1. ЦЕЛИ И ЗАДАЧИ ОСВОЕНИЯ ДИСЦИПЛИНЫ

### Цель дисциплины:

Формирование углубленных знаний в области физики поверхности и методов исследования явлений и процессов, происходящих на поверхности твердых тел.

### Задачи дисциплины:

1. знакомство с особенностями атомной структуры поверхности и научными представлениями о физических явлениях, связанных с ними;
2. формирование знаний о кристаллографическом описании поверхности;
3. изучение современных экспериментальных методов анализа электронной структуры, свойств и состава поверхности твердых тел;
4. освоение экспериментальных подходов для изучения состояния поверхности и ее основных свойств на примере низкоразмерных тонкопленочных полупроводниковых структур

## 2. МЕСТО ДИСЦИПЛИНЫ В СТРУКТУРЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЙ ПРОГРАММЫ

Дисциплина «Физика поверхности» входит в часть учебного плана формируемого участниками образовательных отношений. Для освоения дисциплины «Физика поверхности» необходимо иметь знания по высшей математике, физике твердого тела и физике полупроводников.

## 3. КОМПЕТЕНЦИИ ОБУЧАЮЩЕГОСЯ, ФОРМИРУЕМЫЕ В РЕЗУЛЬТАТЕ ОСВОЕНИЯ ДИСЦИПЛИНЫ И ИНДИКАТОРЫ ИХ ДОСТИЖЕНИЯ

### 3.1 Общепрофессиональные компетенции и индикаторы их достижения

Код и наименование общепрофессиональной компетенции	Код и наименование индикатора достижения общепрофессиональной компетенции
ОПК-1 Способен применять фундаментальные и прикладные знания в области физико-математических и (или) естественных наук для решения профессиональных задач, в том числе в сфере педагогической деятельности	ИД-1 <sub>опк-1</sub> Обладает специальными знаниями и практическим опытом решения актуальных задач фундаментальной и прикладной физики. ИД-2 <sub>опк-1</sub> Умеет использовать методы решения прикладных задач в профессиональной деятельности.
ОПК-3 Способен в рамках своей профессиональной деятельности анализировать, выявлять, формализовать и находить решения фундаментальных и прикладных научно-технических, технологических и инновационных задач	ИД-1 <sub>опк-3</sub> Знает основные научные подходы к решению фундаментальных и прикладных научно[1]технических, технологических и инновационных задач. ИД-2 <sub>опк-3</sub> Умеет выбирать методы решения научно-технических задач профессиональной деятельности.

## 4. СТРУКТУРА ДИСЦИПЛИНЫ

Общая трудоемкость дисциплины составляет 4.00 зачетных единицы, 144.0 академических часов.

1 – № п/п

2 – Тема (раздел) дисциплины, курсовая работа (проект), промежуточная аттестация

3 – Семестр

4 – Виды контактной работы и трудоемкость (в академических часах)

4.1 – Л (Лекции)

4.2 – Лекции в виде практической подготовки

4.3 – ПЗ (Практические занятия)

4.4 – Практические занятия в виде практической подготовки

4.5 – ЛР (Лабораторные работы)

4.6 – Лабораторные работы в виде практической подготовки

4.7 – ИКР (Иная контактная работа)

4.8 – КТО (Контроль теоретического обучения)

4.9 – КЭ (Контроль на экзамене)

5 – Контроль (в академических часах)

6 – Самостоятельная работа (в академических часах)

7 – Формы текущего контроля успеваемости

1	2	3	4									5	6	7
			4.1	4.2	4.3	4.4	4.5	4.6	4.7	4.8	4.9			
1	Введение в предмет. Основные понятия физики поверхности.	2	1				2						8	выполнение индивидуальной работы при выполнении ЛР
2	Поверхностная энергия и равновесная форма кристаллов	2	1				2						9	выполнение индивидуальной работы при выполнении ЛР
3	Атомная структура чистых поверхностей	2	1				2						9	выполнение индивидуальной работы при выполнении ЛР
4	Электронные свойства поверхности твердого тела	2	1				2						9	выполнение индивидуальной работы при выполнении ЛР
5	Адсорбция	2	1				2						9	выполнение индивидуальной работы при выполнении ЛР
6	Тонкие пленки на поверхности твердого тела	2	1				2						9	выполнение индивидуальной работы при выполнении

														ЛР
7	Условия проведения экспериментов исследования поверхности	2	1				2						9	выполнение индивидуальной работы при выполнении ЛР
8	Методы исследования поверхности, построенные на явлении вторичной электронной эмиссии	2	2				2						9	выполнение индивидуальной работы при выполнении ЛР
9	Методы сканирующей зондовой микроскопии	2	1				2						9	выполнение индивидуальной работы при выполнении ЛР
10	Экзамен	2								0.3	35.7			Экзамен
	Итого		10.0		0.0		18.0	0.0	0.0	0.3	35.7		80.0	

## 5. СОДЕРЖАНИЕ ДИСЦИПЛИНЫ

### 5.1. Лекции

№ п/п	Наименование темы (раздела)	Содержание темы (раздела)
1	Введение в предмет. Основные понятия физики поверхности.	Цель, предмет, задачи и структура предмета. Его связь с другими курсами. Значение задач по исследованию поверхности. Методы получения чистой поверхности
2	Поверхностная энергия и равновесная форма кристаллов	Термодинамика поверхности. Анизотропия поверхностной энергии.
3	Атомная структура чистых поверхностей	Двумерная кристаллическая решетка. Обозначения поверхностей монокристаллов и атомных структур. Изменение межплоскостных расстояний у поверхности. Релаксация неполярных поверхностей ионных кристаллов. Реконструкция поверхности. Дефекты на поверхности. Колебания поверхностных атомов. Структура поверхности и ее физические свойства.
4	Электронные свойства поверхности твердого тела	Поверхностные состояния. Изменения ширины запрещенной зоны на поверхности. Экспериментальное исследование электронной структуры поверхности. Изменение потенциала и распределение электронной плотности у поверхности.
5	Адсорбция	Кинетика адсорбции. Теория Ленгмюра. Полимолекулярная адсорбция. Физическая и химическая адсорбция. Электронное состояние

		атома. Энергия связи адатомов с поверхностью. Латеральное взаимодействие адатомов. Структура адсорбированных слоев. Изменение работы выхода. Поверхностная диффузия.
6	Тонкие пленки на поверхности твердого тела	Механизмы роста пленок. Эпитаксия. Зародыши и их образование. Электропроводность диспергированных пленок. Электропроводность тонких сплошных пленок.
7	Условия проведения экспериментов исследования поверхности	Обзор теоретических и экспериментальных методов исследования поверхности. Техника сверхвысокого вакуума. Системы откачки. Сверхвысоковакуумные камеры и фланцы. Приготовление атомарно- чистой поверхности образцов. Техника термического осаждения в вакууме. Источники напыления. Измерители толщины пленок.
8	Методы исследования поверхности, построенные на явлении вторичной электронной эмиссии	Дифференциальный энергетический спектр вторичных электронов. Оже- электронная спектроскопия. Анализаторы энергии электронов. Спектроскопия характеристических потерь энергии электронами. Фотоэлектронная спектроскопия. Растровая электронная микроскопия.
9	Методы сканирующей зондовой микроскопии	Принципы сканирующей зондовой микроскопии. Сканирующая туннельная микроскопия. Атомно-силовая микроскопия. Электросиловая микроскопия. Магнитно- силовая микроскопия. Аппаратура СЗМ.

## 5.2. Лабораторные занятия

Наименование темы	Содержание темы
Введение в предмет. Основные понятия физики поверхности.	Изучение вакуумной техники предназначенной для формирования тонких плёнок
Поверхностная энергия и равновесная форма кристаллов	Изучение методов твердофазной эпитаксии
Атомная структура чистых поверхностей	Изучение методик очистки образцов
Электронные свойства поверхности твердого тела	Изучение методик расчёта параметров ячейки
Адсорбция	Изучение метода реактивной эпитаксии
Тонкие пленки на поверхности твердого тела 1	Формирование тонких пленок методом твердофазной эпитаксии
Тонкие пленки на поверхности твердого тела 2	Формирование тонких пленок методом реактивной эпитаксии
Тонкие пленки на поверхности твердого тела 3	Формирование тонких пленок соосаждением
Тонкие пленки на поверхности твердого тела 4	Формирование многослойных тонких пленок послойным осаждением

Условия проведения экспериментов исследования поверхности	Изучение устройства сверхвысоковакуумной камеры и двухуровневой системы откачки
Методы исследования поверхности, построенные на явлении вторичной электронной эмиссии 1	Исследование тонких плёнок методом ЭОС
Методы исследования поверхности, построенные на явлении вторичной электронной эмиссии 2	Исследование тонких плёнок методом СХПЭЭ
Методы исследования поверхности, построенные на явлении вторичной электронной эмиссии 3	Исследование тонких плёнок методом РЭМ
Методы сканирующей зондовой микроскопии	Исследование тонких плёнок методом АСМ

## 6. САМОСТОЯТЕЛЬНАЯ РАБОТА

№ п/п	Наименование темы (раздела)	Содержание темы (раздела)	Трудоемкость в академических часах
1	Введение в предмет. Основные понятия физики поверхности.	работа с лекционным материалом, предусматривающая проработку конспекта лекций и учебной литературы; подготовка к лабораторным занятиям	8
2	Поверхностная энергия и равновесная форма кристаллов	работа с лекционным материалом, предусматривающая проработку конспекта лекций и учебной литературы; подготовка к лабораторным занятиям	9
3	Атомная структура чистых поверхностей	работа с лекционным материалом, предусматривающая проработку конспекта лекций и учебной литературы; подготовка к лабораторным занятиям	9
4	Электронные свойства поверхности твердого тела	работа с лекционным материалом, предусматривающая проработку конспекта лекций и учебной литературы; подготовка к лабораторным занятиям	9
5	Адсорбция	работа с лекционным материалом, предусматривающая проработку конспекта лекций и учебной литературы; подготовка к лабораторным занятиям	9
6	Тонкие пленки на поверхности твердого тела	работа с лекционным материалом, предусматривающая проработку конспекта лекций и учебной литературы; подготовка к лабораторным занятиям	9
7	Условия проведения экспериментов исследования	работа с лекционным материалом, предусматривающая проработку конспекта лекций и учебной литературы;	9

	поверхности	подготовка к лабораторным занятиям	
8	Методы исследования поверхности, построенные на явлении вторичной электронной эмиссии	работа с лекционным материалом, предусматривающая проработку конспекта лекций и учебной литературы; подготовка к лабораторным занятиям	9
9	Методы сканирующей зондовой микроскопии	работа с лекционным материалом, предусматривающая проработку конспекта лекций и учебной литературы; подготовка к лабораторным занятиям	9

## 7. ОБРАЗОВАТЕЛЬНЫЕ ТЕХНОЛОГИИ

В соответствии с требованиями ФГОС ВО по направлению подготовки 03.04.01 – «Прикладная математика и физика» реализация компетентного подхода предусматривает широкое использование в учебном процессе активных и интерактивных форм проведения занятий в сочетании с внеаудиторной работой с целью формирования и развития профессиональных навыков обучающихся.

Лекционные занятия проводятся с использованием традиционной, активной и интерактивной форм обучения. Практические занятия проводятся с использованием активных и интерактивных форм обучения.

При преподавании дисциплины «Физические основы оптоэлектроники» используются как традиционные (лекция, лекция - беседа, проблемная лекция, лекция-семинар), так и инновационные технологии (применение мультимедийного проектора, семинар-дискуссия, «мозговой штурм»), использование ресурсов сети Internet и электронных учебников).

## 8. ОЦЕНОЧНЫЕ СРЕДСТВА ДЛЯ ПРОМЕЖУТОЧНОЙ АТТЕСТАЦИИ

Описание показателей и критериев оценивания компетенций на различных этапах их формирования, описание шкал оценивания, типовые контрольные задания или иные материалы, необходимые для оценки знаний, умений, навыков, характеризующих этапы формирования компетенций, а так же методические материалы, определяющие процедуры оценивания знаний, умений и навыков отражены в фонде оценочных средств по дисциплине «Физические основы оптоэлектроники».

Процедура оценивания знаний, умений, навыков и (или) опыта деятельности, характеризующие этапы формирования компетенций, включает в себя: текущий контроль и промежуточную аттестацию.

Текущий контроль осуществляется в ходе проведения лекционных и лабораторных занятий (семинаров).

Текущий контроль за аудиторной и самостоятельной работой обучаемых осуществляется во время проведения аудиторных занятий посредством устного опроса, осуществления лекции в форме диалога.

Экзамен – итоговый контроль осуществляется после успешного прохождения студентами текущего и промежуточного контроля; в билете даются ответы на два вопроса, допускаются дополнительные вопросы по желанию преподавателя.

### Критерии экзамена

При определении оценки знаний студентов во время экзаменов преподаватели руководствуются следующими критериями:

- оценка "отлично" выставляется студенту, показавшему всестороннее, систематическое и глубокое знание учебного материала, предусмотренного программой; усвоившему основную и знакомому с дополнительной литературой по программе; умеющему творчески и осознанно выполнять задания, предусмотренные программой; усвоившему взаимосвязь основных понятий дисциплины и умеющему применять их

при анализе и решении практических задач; безупречно выполнившему в процессе изучения дисциплины все задания, предусмотренные формами текущего контроля;

- оценки "хорошо" заслуживает студент, показавший полное знание учебного материала, предусмотренного программой; успешно выполнивший все задания, предусмотренные формами текущего контроля, показавшему систематический характер знаний по дисциплине и способному самостоятельно пополнять и обновлять знания в ходе учебы;
- оценка "удовлетворительно" выставляется студенту, показавшему знание основного учебного материала, предусмотренного программой, в объеме, необходимом, для дальнейшей учебы и работы по специальности, знающему основную литературу, рекомендованную программой; справляющемся с выполнением заданий, предусмотренных программой; выполнившему все задания, предусмотренные формами текущего контроля, но допустившему погрешности в ответе на экзамене или при выполнении экзаменационных заданий, и обладающему необходимыми знаниями для их устранения под руководством преподавателя;
- оценка "неудовлетворительно" выставляется студенту, имевшему пробелы в знании основного материала, предусмотренного программой, допустившему принципиальные ошибки в выполнении предусмотренных программой заданий; не выполнившему отдельные задания, предусмотренные формами итогового или текущего контроля.

Вопросы к экзамену:

1. Определение поверхности. Термодинамика поверхности.
2. Классификация наноструктур поверхности и приповерхностной области объемного тела в зависимости от их толщины.
3. Анизотропия поверхностной энергии.
4. Понятие поверхностной фазы.
5. Двумерная кристаллическая решетка. Обозначения поверхностей монокристаллов и атомных структур.
6. Реконструкция поверхности. Дефекты на поверхности.
7. Структура поверхности и ее физические свойства.
8. Поверхностные состояния. Изменения ширины запрещенной зоны на поверхности.
9. Экспериментальное исследование электронной структуры поверхности.
10. Изменение потенциала и распределение электронной плотности у поверхности.
11. Кинетика адсорбции. Теория Ленгмюра.
12. Физическая и химическая адсорбция.
13. Электронное состояние атома.
14. Энергия связи адатомов с поверхностью. Латеральное взаимодействие адатомов.
15. Структура адсорбированных слоев.
16. Изменение работы выхода.
17. Поверхностная диффузия.
18. Механизмы роста пленок. Эпитаксия.
19. Зародыши и их образование.
20. Электропроводность диспергированных пленок.
21. Электропроводность тонких сплошных пленок.
22. Обзор теоретических и экспериментальных методов исследования поверхности. Техника сверхвысокого вакуума.
23. Системы откачки. Сверхвысоковакуумные камеры и фланцы.
24. Подготовка атомарно- чистой поверхности образцов. Техника термического осаждения в вакууме.
25. Источники напыления.
26. Измерение толщины пленок.
27. Дифференциальный энергетический спектр вторичных электронов. Оже-электронная спектроскопия.
28. Анализаторы энергии электронов.

29. Спектроскопия характеристических потерь энергии электронами.
30. Фотоэлектронная спектроскопия.
31. Растровая электронная микроскопия.
32. Принципы сканирующей зондовой микроскопии. Атомно-силовая микроскопия. Сканирующая туннельная микроскопия.
33. Электросиловая микроскопия. Магнитно-силовая микроскопия.

## 9. УЧЕБНО-МЕТОДИЧЕСКОЕ И ИНФОРМАЦИОННОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ ДИСЦИПЛИНЫ

### а) литература

1. Фомин Д.В. Экспериментальные методы физики твердого тела : учебное пособие / Фомин Д.В.. — Саратов : Вузовское образование, 2017. — 185 с. — Текст : электронный // IPR SMART : [сайт]. — URL: [https:// www.iprbookshop.ru/57258.html](https://www.iprbookshop.ru/57258.html) (дата обращения: 24.06.2023). — Режим доступа: для авторизир. пользователей
2. Владимиров, Г. Г. Физика поверхности твердых тел : учебное пособие / Г. Г. Владимиров. — Санкт-Петербург : Лань, 2022. — 352 с. — ISBN 978-5-8114-1997-5. — Текст : электронный // Лань : электронно- библиотечная система. — URL: [https:// e.lanbook.com/ book/212228](https://e.lanbook.com/book/212228) (дата обращения: 24.06.2023). — Режим доступа: для авториз. пользователей.
3. Филяк М.М. Основные физические процессы в проводниках, полупроводниках и диэлектриках : учебное пособие / Филяк М.М.. — Оренбург : Оренбургский государственный университет, ЭБС АСВ, 2015. — 134 с. — ISBN 978-5-7410-1188-1. — Текст : электронный // IPR SMART : [сайт]. — URL: [https:// www.iprbookshop.ru/54132.html](https://www.iprbookshop.ru/54132.html) (дата обращения: 24.06.2023). — Режим доступа: для авторизир. пользователей

### б) программное обеспечение и Интернет-ресурсы

№	Наименование	Описание
1	MATLAB+SIMULINK	Academic classroom 25 по договору №2013.199430/949 от 20.11.2013.
2	<a href="http://www.iprbookshop.ru/">http://www.iprbookshop.ru/</a>	Электронно-библиотечная система IPRbooks – научно-образовательный ресурс для решения задач обучения в России и за рубежом. Уникальная платформа ЭБС IPRbooks объединяет новейшие информационные технологии и учебную лицензионную литературу. Контент ЭБС IPRbooks отвечает требованиям стандартов высшей школы, СПО, дополнительного и дистанционного образования. ЭБС IPRbooks в полном объеме соответствует требованиям законодательства РФ в сфере образования
3	<a href="http://www.e.lanbook.com">http://www.e.lanbook.com</a>	Электронная библиотечная система «Издательства Лань», тематические пакеты: математика, физика, инженерно-технические науки, химия

### в) профессиональные базы данных и информационные справочные системы

№	Наименование	Описание
1	<a href="http://window.edu.ru">http://window.edu.ru</a>	Единое окно доступа к образовательным ресурсам
2	<a href="http://www.prometheus.nsc.ru/sciguide/page0609.ssi">http://www.prometheus.nsc.ru/sciguide/page0609.ssi</a>	ciGuide - веб- навигатор зарубежных и отечественных научных электронных ресурсов открытого доступа, элемент поддержки научной коммуникации в Сибирском отделении РАН. Навигатор помогает вести поиск качественных научных ресурсов мирового уровня

3	<a href="https://elibrary.ru/defaultx.asp">https:// elibrary.ru/defaultx.asp</a>	Научная электронная библиотека eLIBRARY.RU - российский информационно- аналитический портал в области науки, технологии, медицины и образования
---	--	---

### **10. МАТЕРИАЛЬНО-ТЕХНИЧЕСКОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ ДИСЦИПЛИНЫ**

Занятия по дисциплине проводятся в специальных помещениях, представляющих собой учебные аудитории для проведения занятий лекционного типа, занятий семинарского типа, практических работ с лабораторным оборудованием, групповых и индивидуальных консультаций, текущего контроля и промежуточной аттестации. Специальные помещения укомплектованы специализированной мебелью и техническими средствами обучения, служащими для представления учебной информации большой аудитории. Все помещения, в которых проводятся занятия, соответствуют действующим противопожарным правилам и нормам.

Каждый обучающийся обеспечен индивидуальным неограниченным доступом к электронно- библиотечным системам и к электронной информационно-образовательной среде университета.

Самостоятельная работа обучающихся осуществляется в помещениях, оснащенных компьютерной техникой с возможностью подключения к сети «Интернет» и обеспечением доступа в электронную информационно- образовательную среду университета

На занятиях применяется следующее техническое оборудование: ПЭВМ на базе процессора Intel Pentium, проектор.