

**Федеральное государственное автономное образовательное
учреждение высшего образования
«Московский физико-технический институт
(национальный исследовательский университет)»**

УТВЕРЖДЕНО

**Директор физтех-школы
электроники, фотоники и
молекулярной физики
А.С. Батурин**

| | |
|----------------------------|--|
| | Рабочая программа дисциплины (модуля) |
| по дисциплине: | Физика поверхности и границ раздела |
| по направлению: | Прикладные математика и физика |
| профиль подготовки: | Физика перспективных технологий: электроника и квантовые технологии Физтех-школа Электроники, Фотоники и Молекулярной Физики кафедра нанометрологии и наноматериалов |
| курс: | 4 |
| квалификация: | бакалавр |

Семестр, формы промежуточной аттестации: 8 (весенний) - Дифференцированный зачет

Аудиторных часов: 30 всего, в том числе:

лекции: 30 час.

семинары: 0 час.

лабораторные занятия: 0 час.

Самостоятельная работа: 15 час.

Всего часов: 45, всего зач. ед.: 1

Программу составил: А.А. Чуприк, канд. физ.-мат. наук, доцент

Программа обсуждена на заседании кафедры нанометрологии и наноматериалов 03.03.2023

Аннотация

Курс посвящен изучению способов диагностики состояния и модификации поверхности и границ раздела.

В курсе рассматриваются следующие разделы:

Основные понятия о поверхности как об объекте физических исследований

Явления на границе раздела твёрдое тело – газ

Электронные свойства границы раздела полупроводник-диэлектрик

Методы исследования состояния поверхности и границ раздела

1. Цели и задачи

Цель дисциплины

- изучение основ физики поверхности и границ раздела.

Задачи дисциплины

- изучение роли поверхности в физических свойствах наноматериалов;
- изучение влияния границ раздела на характеристики электронных приборов;
- изучение способов диагностики состояния и модификации поверхности и границ раздела.

2. Перечень формируемых компетенций

Освоение дисциплины направлено на формирование следующих компетенций:

| Код и наименование компетенции | Индикаторы достижения компетенции |
|---|--|
| ПК-1 Способен планировать и проводить научные эксперименты (в избранной предметной области) и (или) теоретические (аналитические и имитационные) исследования | ПК-1.1 Владеет фундаментальными понятиями, законами и теориями современной физики |
| | ПК-1.3 Владеет культурой постановки научной задачи и моделирования естественнонаучных объектов и систем |
| ПК-3 Способен выбирать и применять подходящее оборудование, инструменты и методы исследований для решения задач в избранной предметной области | ПК-3.2 Знает области и критерии применимости используемых теоретических подходов и умение оценивать точность приближенных аналитических методов вычислений |
| ПК-4 Способен критически оценивать применимость используемых методик и методов | ПК-4.3 Способен обосновать причинно-следственные отношения используемых понятий и моделей |

3. Перечень планируемых результатов обучения по дисциплине (модулю)

В результате освоения дисциплины обучающиеся должны

знать:

- классификацию поверхностей и границ раздела, теорию их свойств и методы измерения основных параметров, роль границ раздела в электронных приборах, коллоидных системах и при взаимодействии нанообъектов.

уметь:

- определять параметры поверхности и границ раздела в электронных приборах, коллоидных системах и при взаимодействии нанообъектов.

владеть:

- теоретическими моделями и методами измерений, используемыми для расчётов параметров поверхности и границ раздела.

4. Содержание дисциплины (модуля), структурированное по темам (разделам) с указанием отведенного на них количества академических часов и видов учебных занятий

4.1. Разделы дисциплины (модуля) и трудоемкости по видам учебных занятий

| № | Тема (раздел) дисциплины | Трудоемкость по видам учебных занятий, включая самостоятельную работу, час. | | | |
|-----------------------|---|---|----------|-----------------|----------------|
| | | Лекции | Семинары | Лаборат. работы | Самост. работа |
| 1 | Введение. Основные понятия о поверхности как об объекте физических исследований | 2 | | | |
| 2 | Явления на границе раздела твёрдое тело – газ | 10 | | | 5 |
| 3 | Электронные свойства границы раздела полупроводник-диэлектрик | 10 | | | 5 |
| 4 | Методы исследования состояния поверхности и границ раздела | 8 | | | 5 |
| Итого часов | | 30 | | | 15 |
| Подготовка к экзамену | | 0 час. | | | |
| Общая трудоёмкость | | 45 час., 1 зач.ед. | | | |

4.2. Содержание дисциплины (модуля), структурированное по темам (разделам)

Семестр: 8 (Весенний)

1. Введение. Основные понятия о поверхности как об объекте физических исследований

Поверхностный слой как граница раздела фаз. Чистые поверхности. Структура поверхности, релаксация и реконструкция. Примеры релаксации и реконструкции поверхности металлов. Реконструкция поверхности элементарных и бинарных полупроводников. Структурные дефекты поверхности.

2. Явления на границе раздела твёрдое тело – газ

атмосферы в вакуумной камере. Роль поверхности во взаимодействии нанообъектов в идеальном вакууме. Влияние поверхности на характеристики вакуумных электронных приборов.

Поверхностное натяжение. Свободная поверхностная энергия. Поверхностная энергия твёрдых тел и методы её вычисления. Коэффициент поверхностного натяжения для границы раздела двух фаз одного и того же вещества и для различных веществ.

Термодинамическое описание поверхностных явлений. Коэффициент поверхностного натяжения и свободная энергия. Уравнение Гиббса-Гельмгольца для поверхностных явлений. Полная поверхностная энергия. Формула Лапласа. Зависимость давления насыщенного пара от радиуса кривизны жидкой капли.

Краевой угол. Уравнение Юнга. Адгезия и когезия. Связь работы адгезии с краевым углом смачивания. Особенности адгезионного взаимодействия расплавов. Капиллярные явления.

Понятие о коллоидах. Типы коллоидных систем. Роль поверхностных явлений в коллоидных системах.

3. Электронные свойства границы раздела полупроводник-диэлектрик

Атомарно-чистая поверхность полупроводника. Реальная поверхность. Электронная структура поверхности. Поверхностные состояния. Модели Тамма и Шокли. Распределение поверхностных состояний по энергии. Поверхностный захват и рекомбинация. Модель Шокли-Рида. Скорость поверхностной рекомбинации.

Емкость МДП-структуры. Вольт-фарадная характеристика (ВФХ). ВФХ в присутствии поверхностных состояний. Определение плотности поверхностных состояний из измерений ВФХ. Влияние поверхностных состояний на характеристики полупроводниковых приборов.

4. Методы исследования состояния поверхности и границ раздела

Атомно-силовая микроскопия. Сканирующая туннельная микроскопия. Атомные манипуляции с помощью СТМ для формирования наноструктур.

Электронная оже-спектроскопия, фотоэлектронная спектроскопия. Электронная дифракция медленных и быстрых электронов. Рассеяние ионов поверхностью, EXAFS- подобные методы. Методы Термана и Берглунда. Спектроскопия глубоких уровней.

5. Описание материально-технической базы, необходимой для осуществления образовательного процесса по дисциплине (модулю)

Учебная аудитория, оснащенная мультимедиа проектором, экраном и микрофоном.

6. Перечень рекомендуемой литературы

Основная литература

1. Э. Зенгуил «Физика поверхности». М., Мир, 1990, 536 стр.
2. Ф. Бехштедт, Р.Эндерлайн «Поверхности и границы раздела полупроводников». М., Мир, 1990, 484 с.

Дополнительная литература

1. В.И. Ролдугин «Физикохимия поверхности». Долгопрудный: Издательский дом «Интеллект», 2008, 565 стр.
2. С. Зи «Физика полупроводниковых приборов», в 2-х книгах. 2-е перераб. и доп. изд. М.: Мир, 1984. 456 с.

7. Перечень ресурсов информационно-телекоммуникационной сети "Интернет", необходимых для освоения дисциплины (модуля)

Не используются

8. Перечень информационных технологий, используемых при осуществлении образовательного процесса по дисциплине (модулю), включая перечень необходимого программного обеспечения и информационных справочных систем (при необходимости)

На лекционных занятиях используются мультимедийные технологии, включая демонстрацию презентаций.

9. Методические указания для обучающихся по освоению дисциплины (модуля)

Студент, изучающий дисциплину, должен с одной стороны, овладеть общим понятийным аппаратом, а с другой стороны, должен научиться применять теоретические знания на практике. В результате изучения дисциплины студент должен знать основные определения дисциплины, уметь применять полученные знания для решения различных задач.

Успешное освоение курса требует:

- посещения всех занятий, предусмотренных учебным планом по дисциплине;
- ведения конспекта занятий;
- напряжённой самостоятельной работы студента.

Самостоятельная работа включает в себя:

- чтение рекомендованной литературы;

- проработку учебного материала, подготовку ответов на вопросы, предназначенных для самостоятельного изучения;
- решение задач, предлагаемых студентам на занятиях;
- подготовку к выполнению заданий текущей и промежуточной аттестации.

Показателем владения материалом служит умение без конспекта отвечать на вопросы по темам дисциплины.

Важно добиться понимания изучаемого материала, а не механического его запоминания. При затруднении изучения отдельных тем, вопросов, следует обращаться за консультациями к преподавателю.

Возможен промежуточный контроль знаний студентов в виде решения задач в соответствии с тематикой занятий.

ОЦЕНОЧНЫЕ МАТЕРИАЛЫ ПО ДИСЦИПЛИНЕ (МОДУЛЮ)

| | |
|--|--|
| по направлению: | Прикладные математика и физика |
| профиль подготовки: | Физика перспективных технологий: электроника и квантовые технологии Физтех-школа Электроники, Фотоники и Молекулярной Физики кафедра нанометрологии и наноматериалов |
| курс: | 4 |
| квалификация: | бакалавр |
| Семестр, формы промежуточной аттестации: 8 (весенний) - Дифференцированный зачет | |
| Разработчик: | А.А. Чуприк, канд. физ.-мат. наук, доцент |

1. Компетенции, формируемые в процессе изучения дисциплины

| Код и наименование компетенции | Индикаторы достижения компетенции |
|---|--|
| ПК-1 Способен планировать и проводить научные эксперименты (в избранной предметной области) и (или) теоретические (аналитические и имитационные) исследования | ПК-1.1 Владеет фундаментальными понятиями, законами и теориями современной физики |
| | ПК-1.3 Владеет культурой постановки научной задачи и моделирования естественнонаучных объектов и систем |
| ПК-3 Способен выбирать и применять подходящее оборудование, инструменты и методы исследований для решения задач в избранной предметной области | ПК-3.2 Знает области и критерии применимости используемых теоретических подходов и умение оценивать точность приближенных аналитических методов вычислений |
| ПК-4 Способен критически оценивать применимость используемых методик и методов | ПК-4.3 Способен обосновать причинно-следственные отношения используемых понятий и моделей |

2. Показатели оценивания компетенций

В результате изучения дисциплины «Физика поверхности и границ раздела» обучающийся должен:

знать:

- классификацию поверхностей и границ раздела, теорию их свойств и методы измерения основных параметров, роль границ раздела в электронных приборах, коллоидных системах и при взаимодействии нанообъектов.

уметь:

- определять параметры поверхности и границ раздела в электронных приборах, коллоидных системах и при взаимодействии нанообъектов.

владеть:

- теоретическими моделями и методами измерений, используемыми для расчётов параметров поверхности и границ раздела.

3. Перечень типовых (примерных) вопросов, заданий, тем для подготовки к текущему контролю

В начале каждого занятия проводится краткий опрос по теме предыдущего занятия

4. Перечень типовых (примерных) вопросов и тем для проведения промежуточной аттестации обучающихся

Вопросы к дифференцированному зачету:

1. Поверхностный слой как граница раздела фаз.
2. Роль поверхности во взаимодействии нанообъектов в идеальном вакууме.
3. Поверхностное натяжение. Свободная поверхностная энергия. Поверхностная энергия твёрдых тел и методы её вычисления.
4. Коэффициент поверхностного натяжения для границы раздела двух фаз одного и того же вещества и для различных веществ.
5. Термодинамическое описание поверхностных явлений. Коэффициент поверхностного натяжения и свободная энергия. Уравнение Гиббса-Гельмгольца для поверхностных явлений.
6. Полная поверхностная энергия. Формула Лапласа. Зависимость давления насыщенного пара от радиуса кривизны жидкой капли.
7. Краевой угол. Уравнение Юнга. Адгезия и когезия. Связь работы адгезии с краевым углом смачивания. Особенности адгезионного взаимодействия расплавов. Капиллярные явления.
8. Понятие о коллоидах. Типы коллоидных систем. Роль поверхностных явлений в коллоидных системах.
9. Атомарно-чистая поверхность полупроводника. Реальная поверхность. Электронная структура поверхности.

10. Поверхностные состояния. Модели Тамма и Шокли. Распределение поверхностных состояний по энергии. Поверхностный захват и рекомбинация. Модель Шокли-Рида. Скорость поверхностной рекомбинации.
11. Емкость МДП-структуры. Вольт-фарадная характеристика (ВФХ). ВФХ в присутствии поверхностных состояний. Определение плотности поверхностных состояний из измерений ВФХ.
12. Атомно-силовая микроскопия. Сканирующая туннельная микроскопия. Атомные манипуляции с помощью СТМ для формирования наноструктур.
13. Электронная оже-спектроскопия, фотоэлектронная спектроскопия. Электронная дифракция медленных и быстрых электронов. Рассеяние ионов поверхностью, EXAFS- подобные методы.
14. Методы Термана и Берглунда. Спектроскопия глубоких уровней.
15. Реконструкция поверхности элементарных и бинарных полупроводников. Структурные дефекты поверхности.

Критерии оценивания

Оценка отлично 10 баллов - выставляется студенту, показавшему всесторонние, систематизированные, глубокие знания учебной программы дисциплины, проявляющему интерес к данной предметной области, продемонстрировавшему умение уверенно и творчески применять их на практике при решении конкретных задач, свободное и правильное обоснование принятых решений.

Оценка отлично 9 баллов - выставляется студенту, показавшему всесторонние, систематизированные, глубокие знания учебной программы дисциплины и умение уверенно применять их на практике при решении конкретных задач, свободное и правильное обоснование принятых решений.

Оценка отлично 8 баллов - выставляется студенту, показавшему всесторонние, систематизированные, глубокие знания учебной программы дисциплины и умение уверенно применять их на практике при решении конкретных задач, правильное обоснование принятых решений, с некоторыми недочетами.

Оценка хорошо 7 баллов - выставляется студенту, если он твердо знает материал, грамотно и по существу излагает его, умеет применять полученные знания на практике, но недостаточно грамотно обосновывает полученные результаты.

Оценка хорошо 6 баллов - выставляется студенту, если он твердо знает материал, грамотно и по существу излагает его, умеет применять полученные знания на практике, но допускает в ответе или в решении задач некоторые неточности.

Оценка хорошо 5 баллов - выставляется студенту, если он в основном знает материал, грамотно и по существу излагает его, умеет применять полученные знания на практике, но допускает в ответе или в решении задач достаточно большое количество неточностей.

Оценка удовлетворительно 4 балла - выставляется студенту, показавшему фрагментарный, разрозненный характер знаний, недостаточно правильные формулировки базовых понятий, нарушения логической последовательности в изложении программного материала, но при этом он освоил основные разделы учебной программы, необходимые для дальнейшего обучения, и может применять полученные знания по образцу в стандартной ситуации.

Оценка удовлетворительно 3 балла - выставляется студенту, показавшему фрагментарный, разрозненный характер знаний, допускающему ошибки в формулировках базовых понятий, нарушения логической последовательности в изложении программного материала, слабо владеет основными разделами учебной программы, необходимыми для дальнейшего обучения и с трудом применяет полученные знания даже в стандартной ситуации.

Оценка неудовлетворительно 2 балла - выставляется студенту, который не знает большей части основного содержания учебной программы дисциплины, допускает грубые ошибки в формулировках основных принципов и не умеет использовать полученные знания при решении типовых задач.

Оценка неудовлетворительно 1 балл - выставляется студенту, который не знает основного содержания учебной программы дисциплины, допускает грубейшие ошибки в формулировках базовых понятий дисциплины и вообще не имеет навыков решения типовых практических задач.

5. Методические материалы, определяющие процедуры оценивания знаний, умений, навыков и (или) опыта деятельности

Оценка за семестр выставляется по результатам устного дифференцированного зачета, проводимого в конце семестра. Опрос студента не должен превышать 40 минут.