

Документ подписан простой электронной подписью  
Информация о владельце:  
ФИО: Смирнов Сергей Николаевич  
Должность: врио ректора  
Дата подписания: 10.07.2024 12:02:42  
Уникальный программный ключ:  
69e375c64f7e975d4e8830e7b4fcc2ad1bf35f08

**МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ  
РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ**  
**ФГБОУ ВО «ТВЕРСКОЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ»**

Утверждаю:



Руководитель ООП

*[Handwritten signature]*

Б.Б.Педько

«21» мая 2024 г.

Рабочая программа дисциплины

**Физика нано- и гетероструктур**

Закреплена за кафедрой: **Прикладной физики**

Направление подготовки: **03.03.02 Физика**

Направленность (профиль): **Физика, технологии и компьютерное моделирование функциональных материалов**

Квалификация: **Бакалавр**

Форма обучения: **очная**

Семестр: **6**

Программу составил(и):

*канд. физ.-мат. наук, доц., Васильев Сергей Александрович*

*[Handwritten signature]*

Тверь, 2024

## 1. ЦЕЛИ И ЗАДАЧИ ДИСЦИПЛИНЫ

### Цели освоения дисциплины (модуля):

Усвоение современных представлений о физических процессах и технологиях, лежащих в основе создания субмикронных структур гетеро- и наноэлектроники, в том числе современных представлений о физических, химических и биологических свойствах различных наноматериалов, а также о возможности использования нанообъектов в перспективных областях промышленности

### Задачи:

Получение сведений о классификации наноструктур; ознакомление со способами получения наноструктур и гетероструктур; определение областей техники, в которых наноструктуры набирают популярность; умение ориентироваться в современной научно-технической литературе, связанной с физикой гетеро- и наноструктур.

## 2. МЕСТО ДИСЦИПЛИНЫ В СТРУКТУРЕ ООП

Цикл (раздел) ОП: Б1.В

### Требования к предварительной подготовке обучающегося:

Молекулярная физика

Электричество и магнетизм

Атомная физика

Электродинамика

Квантовая механика

Методы математической физики

**Дисциплины (модули) и практики, для которых освоение данной дисциплины (модуля) необходимо как предшествующее:**

Квантовая механика

Физика лазеров и лазерные технологии

Методы и средства лучевой диагностики

Взаимодействие излучения с веществом

Физика полупроводников

## 3. ОБЪЕМ ДИСЦИПЛИНЫ

<b>Общая трудоемкость</b>	4 ЗЕТ
Часов по учебному плану	144
<b>в том числе:</b>	
аудиторные занятия	56
самостоятельная работа	51
часов на контроль	27

## 4. ПЛАНИРУЕМЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ ОБУЧЕНИЯ ПО ДИСЦИПЛИНЕ, СООТНЕСЕННЫЕ С ПЛАНИРУЕМЫМИ РЕЗУЛЬТАТАМИ ОСВОЕНИЯ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЙ ПРОГРАММЫ

ПК-3.1: Осуществляет анализ структуры материалов

ПК-3.2: Оценивает влияние технологических факторов типовых режимов термической и химической обработки на свойства и структуру материалов

## 5. ВИДЫ КОНТРОЛЯ

Виды контроля в семестрах:	
экзамены	6
курсовые работы	6

**6. ЯЗЫК ПРЕПОДАВАНИЯ**

Язык преподавания: русский.

**7. СТРУКТУРА И СОДЕРЖАНИЕ ДИСЦИПЛИНЫ (МОДУЛЯ)**

Код занят.	Наименование разделов и тем	Вид занятия	Семестр / Курс	Часов	Источники	Примечание
	Раздел 1. Классификация нанообъектов					
1.1	<p>Наноструктурированные материалы и наночастицы. Классификация В. Оствальда по агрегатному состоянию фаз. Классификация по размерам. Классификация по мерности. Классификация Г. Глейтера основных типов структур неполимерных наноматериалов по химическому составу, распределению фаз и форме. Наноматериалы: функциональные, интеллектуальные, нанообъекты, содержащие специфические группы атомов, молекул нанометровых размеров (до 100 нм). Функциональные наноматериалы: низкоразмерные объекты; тонкие слои, пленки; нанопроволоки, полимерные наноматериалы. Интеллектуальные наноматериалы: объемные, полимерные и биоматериалы.</p>	Лек	6	2	Л1.1 Л1.2Л2.1 Л2.2	

1.2	<p>Наноструктурированные материалы и наночастицы. Классификация В. Оствальда по агрегатному состоянию фаз. Классификация по размерам. Классификация по мерности. Классификация Г. Глейтера основных типов структур неполимерных наноматериалов по химическому составу, распределению фаз и форме. Наноматериалы: функциональные, интеллектуальные, нанообъекты, содержащие специфические группы атомов, молекул нанометровых размеров (до 100 нм). Функциональные наноматериалы: низкоразмерные объекты; тонкие слои, пленки; нанопроволоки, полимерные наноматериалы. Интеллектуальные наноматериалы: объемные, полимерные и биоматериалы.</p>	Пр	6	2	Л1.1 Л1.2Л2.1 Л2.2	
	Раздел 2. Относительная роль физических и химических связей и взаимодействий применительно к нанообъектам					
2.1	<p>Относительная роль гравитационных, электростатических, электродинамических и магнитных взаимодействий на наноуровне. Природа сил притяжения и отталкивания. Когезионная энергия твердых тел. Природа межмолекулярных взаимодействий Ориентационное, индукционное и дисперсионные взаимодействия. Природа водородной связи и ее особенности</p>	Лек	6	2	Л1.1 Л1.2Л2.1 Л2.2	

2.2	Относительная роль гравитационных, электростатических, электродинамических и магнитных взаимодействий на наноуровне. Природа сил притяжения и отталкивания. Когезионная энергия твердых тел. Природа межмолекулярных взаимодействий Ориентационное, индукционное и дисперсионные взаимодействия. Природа водородной связи и ее особенности	Пр	6	2	Л1.1 Л1.2Л2.1 Л2.2	
	Раздел 3. Особые физические и химические свойства наночастиц и наноструктурированных материалов. Зависимость свойств от размера частиц					
3.1	Особые свойства нанообъектов, обусловленные соизмеримостью их размеров и характерной длиной физических свойств Особые свойства нанообъектов, обусловленные огромной поверхностной энергией: доля поверхности в наноматериалах, величина поверхностной энергии в наноматериалах. Поверхности и геометрические размеры кристаллов. Поверхность и геометрические размеры нанообъектов.	Лек	6	4	Л1.1 Л1.2Л2.1 Л2.2	
3.2	Особые свойства нанообъектов, обусловленные соизмеримостью их размеров и характерной длиной физических свойств Особые свойства нанообъектов, обусловленные огромной поверхностной энергией: доля поверхности в наноматериалах, величина поверхностной энергии в наноматериалах. Поверхности и геометрические размеры кристаллов. Поверхность и геометрические размеры нанообъектов.	Пр	6	4	Л1.1 Л1.2Л2.1 Л2.2	

	Раздел 4. Идеальная и реальная кристаллические структуры наноразмерных материалов					
4.1	Структурные и электронные магические числа. Зависимость периода решетки от размеров наноматериала. Дефекты кристаллической решетки наноматериалов. Точечные дефекты в наночастицах. Линейные дефекты в наноматериалах. Микроискажения кристаллической решетки.	Лек	6	2	Л1.1 Л1.2Л2.1 Л2.2	
4.2	Структурные и электронные магические числа. Зависимость периода решетки от размеров наноматериала. Дефекты кристаллической решетки наноматериалов. Точечные дефекты в наночастицах. Линейные дефекты в наноматериалах. Микроискажения кристаллической решетки.	Пр	6	2	Л1.1 Л1.2Л2.1 Л2.2	
	Раздел 5. Физико-химические основы формирования наноструктурированных материалов					
5.1	Формирования наноструктур по механизму «снизу – вверх» Термодинамические аспекты гомогенного зародышеобразования. Расчет критического размера и изменения свободной энергии зародышей разной формы. Термодинамические аспекты гетеро-генного зародышеобразования на поверхности кристалла. Кинетика гетерогенного зародышеобразования Формирования наноструктур по механизму «сверху – вниз».	Лек	6	4	Л1.1 Л1.2Л2.1 Л2.2	

5.2	Формирования наноструктур по механизму «снизу – вверх» Термодинамические аспекты гомогенного зародышеобразования. Расчет критического размера и изменения свободной энергии зародышей разной формы. Термодинамические аспекты гетеро-генного зародышеобразования на поверхности кристалла. Кинетика гетерогенного зародышеобразования Формирования наноструктур по механизму «сверху – вниз».	Пр	6	4	Л1.1 Л1.2Л2.1 Л2.2	
	Раздел 6. Физико-химические основы планарной технологии.					
6.1	Основные операции планарной технологии. Технологические маршруты производства различных типов интегральных схем. «Критические» операции, определяющие минимальные размеры элементов. Переход с нанораз-мерным элементам.	Лек	6	4	Л1.1 Л1.2Л2.1 Л2.2	
6.2	Основные операции планарной технологии. Технологические маршруты производства различных типов интегральных схем. «Критические» операции, определяющие минимальные размеры элементов. Переход с нанораз-мерным элементам.	Пр	6	4	Л1.1 Л1.2Л2.1 Л2.2	
	Раздел 7. Авто-и гетероэпитаксия					
7.1	Механизмы эпитаксиального роста тонких пленок. Автоэпитаксия кремния. Эпитаксия из газовой фазы. Молекулярнолучевая эпитаксия. Формирование наноразмерных структур. Гетероэпитаксия. Получения структур «кремний-на-диэлектрике».	Лек	6	4	Л1.1 Л1.2Л2.1 Л2.2	

7.2	Механизмы эпитаксиального роста тонких пленок. Автоэпитаксия кремния. Эпитаксия из газовой фазы. Молекулярнолучевая эпитаксия. Формирование наноразмерных структур. Гетероэпитаксия. Получения структур «кремний-на-диэлектрике».	Пр	6	4	Л1.1 Л1.2Л2.1 Л2.2	
	Раздел 8. Процессы металлизации интегральных схем.					
8.1	Процессы формирования межсоединений и их вклад в быстродействие интегральных схем. Требования к материалам для межсоединений. Физические и химические методы получения тонких пленок. Удельное сопротивление, контактное сопротивление различных материалов, применяемых в кремниевой технологии. Химическая и физическая адгезия. Эффект электромиграции. Стойкость к электромиграции. Недостатки алюминиевой металлизации. Силициды тугоплавких металлов. Системы металлизации на основе меди. Многоуровневая металлизация	Лек	6	2	Л1.1 Л1.2Л2.1 Л2.2	
8.2	Процессы формирования межсоединений и их вклад в быстродействие интегральных схем. Требования к материалам для межсоединений. Физические и химические методы получения тонких пленок. Удельное сопротивление, контактное сопротивление различных материалов, применяемых в кремниевой технологии. Химическая и физическая адгезия. Эффект электромиграции. Стойкость к электромиграции. Недостатки алюминиевой металлизации. Силициды тугоплавких металлов. Системы металлизации на основе меди. Многоуровневая металлизация	Пр	6	2	Л1.1 Л1.2Л2.1 Л2.2	



	Раздел 9. Сканирующая атомно-силовая микроскопия					
9.1	Силовое взаимодействие между зондом и поверхностью. Датчик силового взаимодействия – кантеливер. Задача Герца. Силы Ван-Дер-Ваальса. Энергия ориентационного взаимодействия. Энергия индукционного взаимодействия. Энергия дисперсионного взаимодействия. Влияние консервативных сил на решение задачи Герца. Методы атомно-силовой микроскопии. Формирование изображения в атомно-силовой микроскопии.	Лек	6	2	Л1.1 Л1.2Л2.1 Л2.2	
9.2	Силовое взаимодействие между зондом и поверхностью. Датчик силового взаимодействия – кантеливер. Задача Герца. Силы Ван-Дер-Ваальса. Энергия ориентационного взаимодействия. Энергия индукционного взаимодействия. Энергия дисперсионного взаимодействия. Влияние консервативных сил на решение задачи Герца. Методы атомно-силовой микроскопии. Формирование изображения в атомно-силовой микроскопии.	Пр	6	2	Л1.1 Л1.2Л2.1 Л2.2	
	Раздел 10. Сканирующая туннельная микроскопия					
10.1	Туннельный эффект. Распределение электронов в приграничной области твердого тела. Потенциальный барьер. Плотность туннельного тока между зондом и образцом. Разрешающая способность туннельного микроскопа. Режимы работы сканирующего туннельного микроскопа	Лек	6	2	Л1.1 Л1.2Л2.1 Л2.2	

10.2	Туннельный эффект. Распределение электронов в приграничной области твердого тела. Потенциальный барьер. Плотность туннельного тока между зондом и образцом. Разрешающая способность туннельного микроскопа. Режимы работы сканирующего туннельного микроскопа	Пр	6	2	Л1.1 Л1.2Л2.1 Л2.2	
	Раздел 11. Самостоятельная работа					
11.1	Самостоятельная работа	Ср	6	51	Л1.1 Л1.2Л2.1 Л2.2	
	Раздел 12. Экзамен					
12.1	Экзамен	Экзамен	6	27	Л1.1 Л1.2Л2.1 Л2.2	

### Список образовательных технологий

1	Активное слушание
2	Информационные (цифровые) технологии
3	Проектная технология
4	Дискуссионные технологии (форум, симпозиум, дебаты, аквариумная дискуссия, панельная дискуссия, круглый стол, фасилитированная и т.д.)

## 8. ОЦЕНОЧНЫЕ МАТЕРИАЛЫ ДЛЯ ПРОВЕДЕНИЯ ТЕКУЩЕЙ И ПРОМЕЖУТОЧНОЙ АТТЕСТАЦИИ

### 8.1. Оценочные материалы для проведения текущей аттестации

См. Приложение 1

### 8.2. Оценочные материалы для проведения промежуточной аттестации

См. Приложение 1

### 8.3. Требования к рейтинг-контролю

Оценка знаний студентов осуществляется по результатам успеваемости и оценивается по 100 – бальной системе. Семестр делится на два модуля.

Согласно нормативно – методическим материалам рейтинговой системы оценки качества учебной работы студентов ТвГУ, студент по предмету для сдачи экзамена должен набрать за семестр не менее 40 баллов.

1 контрольная точка. По текущей работе студента – 21 балл. Итоговый контроль за модуль – 9 баллов. Всего 30 баллов.

2 контрольная точка. По текущей работе студента – 11 баллов. Итоговый контроль за модуль – 9 баллов. Выступление с докладом – 10 баллов. Всего 60 баллов.

Баллы по текущей работе студента начисляются за следующие виды работ:

- выступление с докладом – 10 баллов;
- модульная контрольная работа – максимум 9 баллов.

Итоговый контроль проводится в форме экзамена, который включает устные ответы

на теоретические вопросы. В билете 2 вопроса, каждый из них оценивается до 20 баллов.

## 9. УЧЕБНО-МЕТОДИЧЕСКОЕ И ИНФОРМАЦИОННОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ ДИСЦИПЛИНЫ (МОДУЛЯ)

### 9.1. Рекомендуемая литература

#### 9.1.1. Основная литература

Шифр	Литература
Л1.1	Смирнов, Нано- и гетероструктуры в электронике, Тверь: Тверской государственный университет, 2008, ISBN: , URL: <a href="http://texts.lib.tversu.ru/texts/02054ogl.pdf">http://texts.lib.tversu.ru/texts/02054ogl.pdf</a>
Л1.2	Колосько А. Г., Поздняков А. В., Разинова А. А., Макаров Л. М., Биологические системы (краткий экскурс). Наноструктуры, Санкт-Петербург: СПбГПМУ, 2020, ISBN: 978-5-907321-74-8, URL: <a href="https://e.lanbook.com/book/174530">https://e.lanbook.com/book/174530</a>

#### 9.1.2. Дополнительная литература

Шифр	Литература
Л2.1	Итальянцев, Шульга, Мамкина, Каплунова, Магниточувствительные твердотельные гетероструктуры на основе пьезокерамических и магнитострикционных элементов, Тверь: Тверской государственный университет, 2011, ISBN: , URL: <a href="http://eprints.tversu.ru/4662/">http://eprints.tversu.ru/4662/</a>
Л2.2	Учреждение Рос. акад. наук, Ин-т СВЧ полупроводниковой электроники РАН (ИСВЧПЭ РАН), Наногетероструктуры в сверхвысокочастотной полупроводниковой электронике, Москва: Техносфера, 2010, ISBN: 978-5-94836-255-7, URL: <a href="http://texts.lib.tversu.ru/texts/973017ogl.pdf">http://texts.lib.tversu.ru/texts/973017ogl.pdf</a>

#### 9.3.1 Перечень программного обеспечения

1	Adobe Acrobat Reader
2	Google Chrome
3	WinDjView

#### 9.3.2 Современные профессиональные базы данных и информационные справочные системы

1	ЭБС «ZNANIUM.COM»
2	ЭБС «ЮРАИТ»
3	ЭБС «Университетская библиотека онлайн»
4	ЭБС «Лань»
5	ЭБС ТвГУ
6	Научная электронная библиотека eLIBRARY.RU (подписка на журналы)

## 10. МАТЕРИАЛЬНО-ТЕХНИЧЕСКОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ ДИСЦИПЛИНЫ (МОДУЛЯ)

Аудит-я	Оборудование
3-218	комплект учебной мебели, переносной ноутбук, проектор, экран
3-226	комплект учебной мебели, Микшерный пульт, Аудиокомплект, Интерактивная система, проектор, Телекоммуникационные шкафы, экран, компьютер

3-227	комплект учебной мебели, переносной ноутбук, проектор, экран
3-228	комплект учебной мебели, переносной ноутбук, проектор, экран
3-28	комплект учебной мебели, переносной ноутбук, проектор, экран настенный

## 11. МЕТОДИЧЕСКИЕ МАТЕРИАЛЫ ДЛЯ ОБУЧАЮЩИХСЯ ПО ОСВОЕНИЮ ДИСЦИПЛИНЫ

Предметом оценки является подготовка студентов к занятиям, работа студентов на практических занятиях.

Оценки успеваемости студентов проходит в модульную неделю в соответствии с графиков учебного процесса.

Практические задания по демонстрации компетенций заключаются в устных или письменных ответах на поставленные преподавателем или составленным самими студентами вопросы (традиционные или в форме тестов). При этом оценивается обоснованность ответа, ясность и последовательность изложения мысли. Такая демонстрация компетенций проверяет уровень владения теоретическим и практическим материалом.

### Задание:

1. Сделать доклад на тему "Особые свойства нанообъектов".
2. Сделать доклад на тему "Физические и химические методы получения тонких пленок".

### Задание:

Выполнить тест:

1. Почему зародыш, отвечающий максимуму работы нуклеации  $W$  называют критическим?
  - Потому что он отвечает критической температуре
  - Потому что только при размере зародыша больше критического возможен его самопроизвольный рост
  - Термин «критический зародыш» в теории фазовых переходов не используется
  - Потому что при превышении критического размера зародыш исчезает
  - Потому что только критический зародыш является стабильным
2. Выберите правильное утверждение
  - Температура плавления наночастиц возрастает с уменьшением их размера
  - Температура плавления наночастиц не зависит от их размера
  - Температура плавления наночастиц уменьшается с уменьшением их размера
  - Понятие температуры плавления к наночастицам неприменимо
  - Температура плавления изменяется по гармоническому закону

### Вопросы к экзамену

Основные тенденции развития микро-и нанотехнологий создания устройств электронной техники.

- Закон Мура. Основные причины замедления темпов роста степени интеграции.
- Квантовые ограничения для приборов классической электроники.
- Физические ограничения минимальных размеров ИС.
- Схемотехнические и технологические ограничения минимальных размеров ИС.
- Базовые операции и основные принципы планарной технологии. Изменения набора базовых операций при переходе к наноразмерным приборам.
- Бездислокационный кремний. Геттерирование примесей. Внутреннее и внешнее геттерирование.
- Термическое окисление. Основные методы. Получение сверхтонких слоев.
- Анизотропия ионного легирования. Температурные режимы. Применения ионного легирования в технологии субмикронных СБИС.
- Автоэпитаксия кремния. Методы автоэпитаксии.

- Молекулярно-лучевая эпитаксия в технологии наноразмерных структур электроники.
- Основные требования к подложкам в процессах гетероэпитаксии.
- Эпитаксия соединений АЗБ5. Мос-гидридная эпитаксия.
- Предельная разрешающая способность различных методов литографии.
- Оптическая литография в дальнем УФ-диапазоне.
- Рентгенолитография.
- Электронно-лучевая литография. Эффект близости.
- Электронно-проекторная литография.
- Ионная литография.
- Основные требования к материалам для межсоединений. Многоуровневые системы металлизации.
- Сравнительная характеристика алюминиевой и медной систем металлизации.
- Виды классификации нанобъектов. Определение дисперсности. Характеристики дисперсности наноматериалов. Классификация по мерности.
- Наноструктурные материалы. Функциональные и интеллектуальные наноматериалы. Приведите примеры их использования.
- Особые физические, химические и биологические свойства нанобъектов и наноструктурированных систем. Размерные эффекты.
- Относительная роль гравитационных, электростатических, электродинамических и магнитных взаимодействий на наноуровне. Природа сил притяжения и отталкивания.
- Поверхности и геометрические размеры кристаллов и других нанобъектов
- Идеальная кристаллические структуры наноразмерных материалов. Структурные и электронные магические числа. Зависимость периода решетки от размеров наноматериала.
- Реальная кристаллическая структура наноструктурированных материалов. Дефекты кристаллической решетки, характерные для наноматериалов. Возможность существования вакансий и дислокаций в наноматериалах.
- Микроискажения кристаллической решетки в наноматериалах.
- Поверхность, границы, морфология наноматериалов. Доля поверхности в наноматериалах.
- Величина поверхностной энергии. Поверхностный потенциал Гиббса.
- Границы зерен в наноструктурных материалах. Морфология наночастиц.
- Механизмы формирования наноструктур, их принципиальное различие. Гомогенное зародышеобразование наночастиц. Энергия Гиббса конкретных процессов получения наноматериалов и для зародышей разной формы.
- Гетерогенного зародышеобразования наночастиц на поверхности кристалла и в реакциях восстановления.
- Особенности формирования наноструктуры по механизму «сверху-вниз»
- Квазиравновесие в наносистемах; устойчивость нанобъектов. Изменение фазовых равновесий в наноразмерных системах. Уравнение Лапласа.
- Фазовое равновесие в наносистемах. Изменение температуры плавления в наноматериалах. Уравнение Томсона. Модели, описывающие понижение температуры плавления наносистем.
- Особенности полиморфных превращений в наносистемах. Устойчивость нанобъектов. Образование твердых растворов.
- Квантоворазмерные эффекты в металлах, полупроводниках и молекулярных кристаллах.
- Особенности зонной структуры металлов, полупроводников в нанокристаллическом состоянии.
- Эффекты, обусловленные размерами и размерностью нанобъектов: размерные эффекты. Задача о частице в потенциальном ящике. Частичная локализация. Поведение электронов в тонкой пленке.
- Квантовое ограничение. Квантовая яма. Квантовая проволока. Квантовая точка.
- Размерность объекта и электроны проводимости. Ферми-газ и плотность состояний. Свойства, зависящие от плотности состояний. Условия, при которых наблюдаются квантовые эффекты.
- Оптические свойства полупроводников. Спектры поглощения и люминесценции, их связь с зонной структурой полупроводников. Оценка размеров наночастиц по спектральным данным.

- Методы синтеза разупорядоченных твердотельных структур. Влияния наномасштабности зерен на объемную структуру и свойства разупорядоченных твердотельных материалов

- Линейные дефекты: трещины и дислокации в разупорядоченных композиционных материалах. Определение дислокации и вектора Бюргерса. - Особенности и свойства дислокации. Различие величин модулей упругости и пределов прочности: наноструктурированного материала и объемного материала с микронным размером зерна.