

**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**

	<b>Рабочая программа дисциплины (модуля)</b>
<b>по дисциплине:</b>	Основы нанoeлектроники и ван-дер-ваальсовых материалов
<b>по направлению:</b>	Электроника и нанoeлектроника
<b>профиль подготовки:</b>	Физика перспективных технологий: микро- и нанoeлектроника Физтех-школа Электроники, Фотоники и Молекулярной Физики кафедра электроники
<b>курс:</b>	1
<b>квалификация:</b>	магистр

Семестр, формы промежуточной аттестации: 1 (осенний) - Дифференцированный зачет

Аудиторных часов: 30 всего, в том числе:

лекции: 30 час.

семинары: 0 час.

лабораторные занятия: 0 час.

Самостоятельная работа: 60 час.

Всего часов: 90, всего зач. ед.: 2

Программу составил: В.В. Еналдиев, канд. физ.-мат. наук

Программа обсуждена на заседании кафедры электроники 12.02.2024

## Аннотация

Курс посвящен изучению основ нанoeлектроники и ван-дер-ваальсовых материалов.

Основное внимание уделено следующим разделам.

Низкоразмерные полупроводниковые структуры: квантовые ямы, проволоки и точки. Баллистическая проводимость одномерных каналов. Точечные контакты двух проводников. Мезоскопические флуктуации проводимости, эффект Ааронова-Бома, понятие о слабой локализации. Туннелирование и резонансно-туннельные структуры. Сканирующий туннельный микроскоп. Кулоновская блокада резонансного туннелирования. Электрооптические свойства графена и других ван-дер-ваальсовых материалов. Ван-дер-ваальсовые гетероструктуры. Муаровая сверхрешетка.

## 1. Цели и задачи

### Цель дисциплины

- изучение физических законов, принципов работы и методик расчета наноразмерных приборов на основе полупроводниковых гетероструктур и новых материалов.

### Задачи дисциплины

- сформировать представление о низкоразмерных полупроводниковых структурах и ван-дер-ваальсовых материалах;
- изучить современную теорию электронных явлений в низкоразмерных полупроводниковых структурах и ван-дер-ваальсовых материалах;
- овладеть методами расчета энергетического спектра, волновых функций, а также подходами для описания туннельных процессов, в том числе в условиях кулоновской блокады;
- изучить методы и подходы к описанию электрооптических свойств ван-дер-ваальсовых материалов, таких как графен и монослои дихалькогенидов переходных металлов, а также гетероструктур на их основе.

## 2. Перечень формируемых компетенций

Освоение дисциплины направлено на формирование следующих компетенций:

Код и наименование компетенции	Индикаторы достижения компетенции
УК-1 Способен осуществлять критический анализ проблемных ситуаций на основе системного подхода, вырабатывать стратегию действий	УК-1.1 Анализирует проблемную ситуацию как систему, выявляя ее составляющие и связи между ними
	УК-1.2 Осуществляет поиск вариантов решения поставленной проблемной ситуации на основе доступных источников информации
	УК-1.3 Разрабатывает стратегию достижения поставленной цели как последовательность шагов, предвидя результат каждого из них и оценивая их влияние на внешнее окружение планируемой деятельности и на взаимоотношения участников этой деятельности
ПК-1 Способен ставить, формализовывать и решать задачи, в том числе разрабатывать и исследовать математические модели изучаемых явлений и процессов, системно анализировать научные проблемы, получать новые научные результаты	ПК-1.1 Способен находить, анализировать и обобщать информацию об актуальных результатах исследований в рамках тематической области своей профессиональной деятельности
	ПК-1.2 Способен выдвигать гипотезы, строить математические модели для описания изучаемых явлений и процессов, оценить качество разработанной модели
	ПК-1.3 Способен применять теоретические и (или) экспериментальные методы исследований к конкретной научной задаче и интерпретировать полученные результаты

### 3. Перечень планируемых результатов обучения по дисциплине (модулю)

В результате освоения дисциплины обучающиеся должны знать:

- основы теории низкоразмерных электронных систем, ван-дер-ваальсовых материалов и основ современной теории электронных явлений в них;
- методы и подходы для описания мезоскопических интерференционных эффектов, туннелирования, резонансного туннелирования, кулоновской блокады туннелирования.

уметь:

- использовать формализм Ландауэра-Бюттикера для расчета характеристик одномерных проводников.

владеть:

- представлениями об электронных и оптических свойствах ван-дер-ваальсовых материалов.

### 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. Низкоразмерные электронные системы в полупроводниковых гетероструктурах	2			12
2	Туннельные явления в низкоразмерных структурах	8			12
3	Мезоскопические явления	4			12
4	Слабая и сильная локализация в низкоразмерных системах с беспорядком	6			12
5	Графен и другие ван-дер-ваальсовы материалы	10			12
Итого часов		30			60
Подготовка к экзамену		0 час.			
Общая трудоёмкость		90 час., 2 зач.ед.			

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

Семестр: 1 (Осенний)

##### 1. Введение. Низкоразмерные электронные системы в полупроводниковых гетероструктурах

Методы роста полупроводниковых структур. Квантовые ямы, квантовые проволоки, квантовые точки. Спектр и плотность состояний в 2D, 1D и 0D электронных системах. Баллистическая проводимость одномерных каналов. Формализм Ландауэра–Бюттикера. Точечный контакт двух проводников.

##### 2. Туннельные явления в низкоразмерных структурах

Вероятность туннелирования под барьером. Сканирующий туннельный микроскоп. Метод матриц переноса. Резонансное туннелирование в структурах с двойным барьером и квантовой точками. Кулоновская блокада туннелирования и одноэлектронный транзистор.

### 3. Мезоскопические явления

Интерференция электронных волн: аналогия между оптикой и квантовой электроникой. Квантово интерференционные эффекты в системах с беспорядком. Влияние магнитного поля и эффект Ааронова-Бома в квантовых кольцах и точках.

### 4. Слабая и сильная локализация в низкоразмерных системах с беспорядком

Рассеяние назад в когерентных проводниках с беспорядком. Уравнение диффузии и его решение. Коэффициент и длина диффузии. Квантово-интерференционные поправки к проводимости систем с беспорядком. Подавление локализации магнитным полем.

### 5. Графен и другие ван-дер-ваальсовы материалы

Графен, дихалькогениды переходных металлов. Решетка, электронный спектр, киральность, фаза Берри. Электронные и оптические свойства графена и дихалькогенидов переходных металлов. Влияние деформаций. Ван-дер-ваальсовы гетероструктуры. Муаровая сверхрешетка и ее релаксация

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

Учебная аудитория, оснащенная мультимедиа проектором, меловой или маркерной доской.

## **6.Перечень рекомендуемой литературы**

### Основная литература

Литература выдается на базовой кафедре:

1. В. Я. Демиховский, Г.А. Вугальтер «Физика низкоразмерных структур». М., Логос, 2000, 248 стр.

### Дополнительная литература

Литература выдается на базовой кафедре:

1. «Туннельные явления в твердых телах» ред. Э. Бурштейн, С. Лундквист. изд. М.: Мир, 1972, 422 стр.
2. Дж. Займан «Принципы теории твердого тела», изд. М.: Мир, 1974. 472 стр.
3. M. I. Katsnelson, «The physics of graphene». Cambridge university press, 2020, 425 стр.

## **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)**

Не предусмотрены

## 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)**

<b>по направлению:</b>	Электроника и нанoeлектроника
<b>профиль подготовки:</b>	Физика перспективных технологий: микро- и нанoeлектроника Физтех-школа Электроники, Фотоники и Молекулярной Физики кафедра электроники
<b>курс:</b>	<u>1</u>
<b>квалификация:</b>	магистр
Семестр, формы промежуточной аттестации: 1 (осенний) - Дифференцированный зачет	
<b>Разработчик:</b>	В.В. Еналдиев, канд. физ.-мат. наук

## 1. Компетенции, формируемые в процессе изучения дисциплины

Код и наименование компетенции	Индикаторы достижения компетенции
УК-1 Способен осуществлять критический анализ проблемных ситуаций на основе системного подхода, вырабатывать стратегию действий	УК-1.1 Анализирует проблемную ситуацию как систему, выявляя ее составляющие и связи между ними
	УК-1.2 Осуществляет поиск вариантов решения поставленной проблемной ситуации на основе доступных источников информации
	УК-1.3 Разрабатывает стратегию достижения поставленной цели как последовательность шагов, предвидя результат каждого из них и оценивая их влияние на внешнее окружение планируемой деятельности и на взаимоотношения участников этой деятельности
ПК-1 Способен ставить, формализовывать и решать задачи, в том числе разрабатывать и исследовать математические модели изучаемых явлений и процессов, системно анализировать научные проблемы, получать новые научные результаты	ПК-1.1 Способен находить, анализировать и обобщать информацию об актуальных результатах исследований в рамках тематической области своей профессиональной деятельности
	ПК-1.2 Способен выдвигать гипотезы, строить математические модели для описания изучаемых явлений и процессов, оценить качество разработанной модели
	ПК-1.3 Способен применять теоретические и (или) экспериментальные методы исследований к конкретной научной задаче и интерпретировать полученные результаты

## 2. Показатели оценивания компетенций

В результате изучения дисциплины «Основы нанoeлектроники и ван-дер-ваальсовых материалов» обучающийся должен:

### знать:

- основы теории низкоразмерных электронных система, ван-дер-ваальсовых материалов и основ современной теории электронных явлений в них;
- методы и подходы для описания мезоскопических интерференционных эффектов, туннелирования, резонансного туннелирования, кулоновской блокады туннелирования.

### уметь:

- использовать формализм Ландауэра-Бюттикера для расчета характеристик одномерных проводников.

### владеть:

- представлениями об электронных и оптических свойствах ван-дер-ваальсовых материалов.

## 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. Типы 2D, 1D, 0D низкоразмерных структур. Методы получения.
2. Спектр, волновые функции и плотность электронных состояний в низкоразмерных структурах.

3. Квант проводимости. Формула Ландауэра-Бюттикера для одномерных баллистических проводников.
4. Метод матриц переноса. Прозрачность туннельного барьера.
5. Резонансное туннелирование и вольт-амперная характеристика резонансно-туннельного диода. Кулоновская блокада.
6. Интерференция электронных волн. Роль рассеяния назад.
7. Интерференционные поправки к проводимости в 3D, 2D, 1D мезоскопических электронных системах с беспорядком. Влияние магнитного поля.
8. Уравнение диффузии и его решение. Коэффициент и длина диффузии.
9. Ван-дер-ваальсовы материалы: графен, решетка, электронный спектр, фаза Берри и киральность. Универсальный коэффициент поглощения света. Влияние деформаций решетки на спектр состояний.
10. Ван-дер-ваальсовые материалы: монослои дихалькогенидов переходных металлов. Решетка, спектр электронных состояний. Долинные правила отбора для оптических переходов.
11. Ван-дер-ваальсовые гетероструктуры. Муаровая сверхрешетка. Релаксация муаровой сверхрешетки.

#### 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.