

**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>	Физика и моделирование приборов наноэлектроники
<b>по направлению:</b>	Электроника и наноэлектроника
<b>профиль подготовки:</b>	Физика перспективных технологий: микро- и наноэлектроника Физтех-школа Электроники, Фотоники и Молекулярной Физики кафедра наноэлектроники и квантовых компьютеров
<b>курс:</b>	1
<b>квалификация:</b>	магистр

Семестр, формы промежуточной аттестации: 1 (осенний) - Экзамен

Аудиторных часов: 30 всего, в том числе:

лекции: 30 час.

семинары: 0 час.

лабораторные занятия: 0 час.

Самостоятельная работа: 75 час.

Подготовка к экзамену: 30 час.

Всего часов: 135, всего зач. ед.: 3

Программу составил: В.В. Вьюрков, канд. физ.-мат. наук, старший научный сотрудник

Программа обсуждена на заседании кафедры наноэлектроники и квантовых компьютеров 12.02.2024

## Аннотация

Курс "Физика и моделирование приборов нанoeлектроники" предусматривает передачу представления о физических принципах работы приборов нанoeлектроники и методах их моделирования.

### 1. Цели и задачи

#### Цель дисциплины

- дать представление о физических принципах работы приборов нанoeлектроники и методах их моделирования.

#### Задачи дисциплины

- рассмотреть физические процессы, лежащие в основе работы различных приборов нанoeлектроники;
- научить правильному выбору модели для расчета характеристик приборов;
- дать представление о построении вычислительных схем и особенностях их использования.

### 2. Перечень формируемых компетенций

Освоение дисциплины направлено на формирование следующих компетенций:

Код и наименование компетенции	Индикаторы достижения компетенции
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:

- физические принципы работы приборов нанoeлектроники.

уметь:

- выбирать физическую модель для расчета характеристик приборов.

владеть:

- навыками разработки программ моделирования приборов нанoeлектроники.

### 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	Уравнение Шредингера	4			8
2	Метод матриц плотности	2			8

3	Метод функций Грина	2			9
4	Метод функций Вигнера	4			8
5	Метод Ландауэра-Бюттикера	4			8
6	Постановка граничных условий	2			8
7	Квантовые гидродинамические уравнения	4			9
8	Кинетические модели для сложного спектра	4			8
9	Спиновые системы	4			9
Итого часов		30			75
Подготовка к экзамену		30 час.			
Общая трудоёмкость		135 час., 3 зач.ед.			

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

Семестр: 1 (Осенний)

##### 1. Уравнение Шредингера

Стационарное и нестационарное уравнение Шредингера. Метод среднего поля (метод Хартри): совместное решение уравнения Шредингера и уравнения Пуассона для описания многочастичных систем. Проблемы в численном решении уравнения Шредингера для канала транзистора. Методы S- и T-матриц. Нераспространяющиеся моды. Уравнение Шредингера для одного электрона с учетом поляризации среды. Исключение собственного поля электрона.

##### 2. Метод матриц плотности

Матрица плотности (оператор плотности, оператор матрица плотности, статистический оператор) — один из способов описания состояния квантовомеханической системы.

##### 3. Метод функций Грина

Для решения уравнения Пуассона. Нахождение стационарных и нестационарных решений, в том числе при разнообразных граничных условиях.

##### 4. Метод функций Вигнера

Кинетическое уравнение Мойла. Отсутствие положительной определенности функции распределения Вигнера.

##### 5. Метод Ландауэра-Бюттикера

Вывод уравнений. Связь с описанием одномерных проводников и квантованием проводимости. Постановка и методы численного решения задачи рассеяния для уравнения Шредингера с целью определения коэффициента прохождения.

##### 6. Постановка граничных условий

Постановка граничных условий в кинетическом моделировании открытых систем. Роль контактов. Обоснование применимости баллистических методов.

##### 7. Квантовые гидродинамические уравнения

Квантовые гидродинамические уравнения для моделирования транзисторов на основе графена. Амбиполярная плазма графена. Независимость проводимости графена от температуры (теория скейлинга).

#### 8. Кинетические модели для сложного спектра

Кинетические модели для описания каналов со сложной зонной структурой (двойной графен). Скачок проводимости при низкой температуре. Состояния с отрицательной массой. Управление зонной структурой электрическим полем.

#### 9. Спиновые системы

Описание спиновых систем. Взаимодействие спинов (модели Гейзенберга и Изинга). Теорема Либа-Маттиса. Обменное взаимодействие. Спин-орбитальное взаимодействие. Спин-орбитальное взаимодействие Рашбы. Спиновый транзистор. Спиновые кубиты.

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

Необходимое оборудование для лекций: учебная аудитория, оснащенная компьютером и мультимедийным оборудованием (проектор, звуковая система).  
Обеспечение самостоятельной работы: доступ в сеть Интернет, доступ к рекомендованной литературе.

### **6. Перечень рекомендуемой литературы**

#### Основная литература

Литература выдается на базовой кафедре:

1. К. Зеегер. Физика полупроводников. Москва, Мир, 1977.
2. Д. В. Негров, А. Ю. Озёрин, Д. А. Свинцов, В. В. Вьюрков, А. А. Орликовский, И. А. Семенихин. Математическое и компьютерное моделирование наносистем. Издательство МФТИ, 2011.
3. К.А. Валиев, В.В. Вьюрков, В.А.Гридчин, В.П. Драгунов, А.А.Кокин, И.Г. Неизвестный, А. А. Орликовский, Ю.С. Протасов, И.А. Семенихин. Нанoeлектроника. Изд. МВТУ им. Баумана, 2009.
4. С. Зи. Физика полупроводниковых приборов. Москва, Мир, 1984 (в 2-х томах).

#### Дополнительная литература

Литература выдается на базовой кафедре:

1. К. А. Валиев, В. В. Вьюрков, А. А. Орликовский. Кремниевая наноэлектроника: проблемы и перспективы. Успехи современной радиоэлектроники, в. 6, сс. 7-22, 2010.
2. К. А. Валиев. Квантовые компьютеры и квантовые вычисления. УФН, т. 175(1), сс. 1-39, 2005.

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

1. <http://en.wikipedia.org>
2. <http://ru.arxiv.org>
3. <http://scholar.google.ru/>

### **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, прослушавший курс лекций должен овладеть общим понятийным аппаратом и научиться применять теоретические знания на практике.

Успешное освоение курса требует:

- 1) посещения всех лекций, предусмотренных учебным планом; ведение конспектов занятий; активное участие в обсуждении лекций;
- 2) важно добиться понимания изучаемого материала, а не механического его запоминания. При затруднении изучения отдельных тем, вопросов, следует обращаться за консультацией к преподавателю на лекции.

**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 нанoeлектроники и квантовых компьютеров
<b>курс:</b>	<u>1</u>
<b>квалификация:</b>	магистр
Семестр, формы промежуточной аттестации: 1 (осенний) - Экзамен	
<b>Разработчик:</b>	В.В. Вьюрков, канд. физ.-мат. наук, старший научный сотрудник

## 1. Компетенции, формируемые в процессе изучения дисциплины

Код и наименование компетенции	Индикаторы достижения компетенции
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 «Физика и моделирование приборов нанoeлектроники» обучающийся должен:

### знать:

- физические принципы работы приборов нанoeлектроники.

### уметь:

- выбирать физическую модель для расчета характеристик приборов.

### владеть:

- навыками разработки программ моделирования приборов нанoeлектроники.

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

С целью контроля освоения обучающимися учебного материала проводится устный опрос в начале занятия по теме прошлой лекции или в конце занятия по пройденной теме.

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

Вопросы для подготовки к экзамену:

1. Уравнение Шредингера для графена.
2. Уравнение Пуассона для одномерного канала.
3. Силовые линии поля в системе одного, двух и трех точечных электронов.
4. Матрица плотности для чистого и смешанного состояния.
5. Функция Грина свободного электрона.
6. Доказать отсутствие положительной определенности функции Вигнера.
7. Получить квант проводимости одномерного баллистического канала.
8. Написать явную разностную схему для решения задачи рассеяния для одномерного уравнения Шредингера.
9. Показать, что явная разностная схема для решения задачи рассеяния для двумерного и трехмерного уравнения Шредингера всегда расходится.
10. Где можно поставить граничные условия на функцию распределения?
11. Доказать независимость проводимости графена от температуры с помощью теории скейлинга.
12. В каких случаях химические потенциалы электронов и дырок в графене совпадают?
13. Нарисовать спектр двойного графена и указать области с разным знаком эффективной массы.

14. Двойной графен помещен в постоянное электрическое поле. Показать движение электрона по спектру.
15. Графен помещен в постоянное электрическое поле. Показать движение электрона по спектру.
16. Металлическая нанотрубка помещена в переменное электрическое поле. Показать движение электрона по спектру. Написать уравнение для скорости.
17. Написать спиновый гамильтониан Гейзенберга.
18. Написать спиновый гамильтониан Изинга.
19. Написать общий вид гамильтониана спин-орбитального взаимодействия.
20. Что такое «обменное взаимодействие»?
21. Какие состояния имеет кубит на основе двойной квантовой точки?
22. Какие состояния имеет кубит на основе спина электрона?
23. Написать пример запутанного состояния двух фотонов.
24. Написать пример запутанного состояния двух электронов

Примеры экзаменационных билетов.

Пример 1.

1. Доказать отсутствие положительной определенности функции Вигнера.
2. Какие состояния имеет кубит на основе двойной квантовой точки?

Пример 2.

1. Нарисовать спектр двойного графена и указать области с разным знаком эффективной массы.
2. Двойной графен помещен в постоянное электрическое поле. Показать движение электрона по спектру.

Критерии оценивания

10 баллов — (ПРЕВОСХОДНО):

- систематизированные, глубокие и полные знания по всем разделам учебной программы, а также по основным вопросам, выходящим за ее пределы;
- точное использование научной терминологии (в том числе на иностранном языке), стилистически грамотное, логически правильное изложение ответа на вопросы;
- безупречное владение инструментарием учебной дисциплины, умение его эффективно использовать в постановке и решении научных и профессиональных задач;
- выраженная способность самостоятельно и творчески решать сложные проблемы в нестандартной ситуации;
- полное и глубокое усвоение основной и дополнительной литературы, рекомендованной учебной программой дисциплины;
- умение ориентироваться в теориях, концепциях и направлениях по изучаемой дисциплине и давать им критическую оценку, использовать научные достижения других дисциплин;
- творческая самостоятельная работа на практических, лабораторных занятиях, активное участие в групповых обсуждениях, высокий уровень культуры исполнения заданий.

9 баллов — (ОТЛИЧНО):

- систематизированные, глубокие и полные знания по всем разделам учебной программы;
- точное использование научной терминологии (в том числе на иностранном языке), стилистически грамотное, логически правильное изложение ответа на вопросы;
- владение инструментарием учебной дисциплины, умение его эффективно использовать в постановке и решении научных и профессиональных задач;
- способность самостоятельно и творчески решать сложные проблемы в нестандартной ситуации в рамках учебной программы, полное усвоение основной и дополнительной литературы, рекомендованной учебной программой дисциплины;
- умение ориентироваться в основных теориях, концепциях и направлениях по изучаемой дисциплине и давать им критическую оценку;
- самостоятельная работа на практических, лабораторных занятиях, творческое участие в групповых обсуждениях, высокий уровень культуры исполнения заданий.

8 баллов — (ПОЧТИ ОТЛИЧНО):



- систематизированные, глубокие и полные знания по всем поставленным вопросам в объеме учебной программы;
- использование научной терминологии, стилистически грамотное, логически правильное изложение ответа на вопросы, умение делать обоснованные выводы;
- владение инструментарием учебной дисциплины (методами комплексного анализа, техникой информационных технологий), умение его использовать в постановке и решении научных и профессиональных задач; способность самостоятельно решать сложные проблемы в рамках учебной программы;
- усвоение основной и дополнительной литературы, рекомендованной учебной программой дисциплины;
- умение ориентироваться в основных теориях, концепциях и направлениях по изучаемой дисциплине и давать им критическую оценку с позиций государственной идеологии (по дисциплинам социально-гуманитарного цикла);
- активная самостоятельная работа на практических, лабораторных занятиях, систематическое участие в групповых обсуждениях, высокий уровень культуры исполнения заданий.

7 баллов — (ОЧЕНЬ ХОРОШО):

- систематизированные, глубокие и полные знания по всем разделам учебной программы;
- использование научной терминологии (в том числе на иностранном языке), лингвистически и логически правильное изложение ответа на вопросы, умение делать обоснованные выводы;
- владение инструментарием учебной дисциплины, умение его использовать в постановке и решении научных и профессиональных задач;
- усвоение основной и дополнительной литературы, рекомендованной учебной программой дисциплины;
- умение ориентироваться в основных теориях, концепциях и направлениях по изучаемой дисциплине и давать им критическую оценку;
- самостоятельная работа на практических, лабораторных занятиях, участие в групповых обсуждениях, высокий уровень культуры исполнения заданий.

6 баллов — (ХОРОШО):

- достаточно полные и систематизированные знания в объеме учебной программы;
- использование необходимой научной терминологии, стилистически грамотное, логически правильное изложение ответа на вопросы, умение делать обоснованные выводы;
- владение инструментарием учебной дисциплины, умение его использовать в решении учебных и профессиональных задач; способность самостоятельно применять типовые решения в рамках учебной программы;
- усвоение основной литературы, рекомендованной учебной программой дисциплины;
- умение ориентироваться в базовых теориях, концепциях и направлениях по изучаемой дисциплине и давать им сравнительную оценку; активная самостоятельная работа на практических, лабораторных занятиях, периодическое участие в групповых обсуждениях, высокий уровень культуры исполнения заданий.

5 баллов — (ПОЧТИ ХОРОШО):

- достаточные знания в объеме учебной программы;
- использование научной терминологии, стилистически грамотное, логически правильное изложение ответа на вопросы, умение делать выводы;
- владение инструментарием учебной дисциплины, умение его использовать в решении учебных и профессиональных задач;
- способность самостоятельно применять типовые решения в рамках учебной программы;
- усвоение основной литературы, рекомендованной учебной программой дисциплины;
- умение ориентироваться в базовых теориях, концепциях и направлениях по изучаемой дисциплине и давать им сравнительную оценку;
- самостоятельная работа на практических, лабораторных занятиях, участие в групповых обсуждениях, высокий уровень культуры исполнения заданий.

4 балла — (УДОВЛЕТВОРИТЕЛЬНО), ЗАЧТЕНО:

- достаточный объем знаний в рамках образовательного стандарта;
- усвоение основной литературы, рекомендованной учебной программой дисциплины;
- использование научной терминологии, стилистическое и логическое изложение ответа на вопросы, умение делать выводы без существенных ошибок;

- владение инструментарием учебной дисциплины, умение его использовать в решении стандартных (типовых) задач;
- умение под руководством преподавателя решать стандартные (типовые) задачи;
- умение ориентироваться в основных теориях, концепциях и направлениях по изучаемой дисциплине и давать им оценку;
- работа под руководством преподавателя на практических, лабораторных занятиях, допустимый уровень культуры исполнения заданий.

3 балла — (НЕУДОВЛЕТВОРИТЕЛЬНО), НЕЗАЧТЕНО:

- недостаточно полный объем знаний в рамках образовательного стандарта;
- знание части основной литературы, рекомендованной учебной программой дисциплины;
- использование научной терминологии, изложение ответа на вопросы с существенными лингвистическими и логическими ошибками;
- слабое владение инструментарием учебной дисциплины, некомпетентность в решении стандартных (типовых) задач;
- неумение ориентироваться в основных теориях, концепциях и направлениях изучаемой дисциплины;
- пассивность на практических и лабораторных занятиях, низкий уровень культуры исполнения заданий.

2 балла — (НЕУДОВЛЕТВОРИТЕЛЬНО):

- фрагментарные знания в рамках образовательного стандарта;
- знания отдельных литературных источников, рекомендованных учебной программой дисциплины;
- неумение использовать научную терминологию дисциплины, наличие в ответе грубых стилистических и логических ошибок;
- пассивность на практических и лабораторных занятиях, низкий уровень культуры исполнения заданий.

1 балл — (НЕУДОВЛЕТВОРИТЕЛЬНО):

- отсутствие знаний и компетенций в рамках образовательного стандарта или отказ от ответа.

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

При проведении экзамена обучающемуся предоставляется 30 минут на подготовку. Опрос обучающегося по билету не должен превышать двух астрономических часов в устной и (или) письменной форме.