

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

УТВЕРЖДЕНО

**и.о. директора физтех-школы
физики и исследований им.
Ландау**

А.А. Воронов

Рабочая программа дисциплины (модуля)

| | |
|----------------------------|---|
| по дисциплине: | Новые квантовые материалы |
| по направлению: | Прикладные математика и физика |
| профиль подготовки: | Общая и прикладная физика Физтех-школа физики и исследований им. Ландау кафедра электродинамики сложных систем и нанофотоники |
| курс: | 1 |
| квалификация: | магистр |

Семестр, формы промежуточной аттестации: 2 (весенний) - Дифференцированный зачет

Аудиторных часов: 60 всего, в том числе:

лекции: 30 час.

семинары: 30 час.

лабораторные занятия: 0 час.

Самостоятельная работа: 30 час.

Всего часов: 90, всего зач. ед.: 2

Программу составил: А.Л. Рахманов, д-р физ.-мат. наук

Программа обсуждена на заседании кафедры электродинамики сложных систем и нанофотоники 04.06.2020

Аннотация

Важнейшим достижением современной физики конденсированного состояния и физического материаловедения явилось открытие в последние годы большого числа материалов с ранее не наблюдавшимися свойствами. К ним относится большой набор истинно двумерных материалов (графен и другие), так называемые топологические материалы [например, топологические диэлектрики и сверхпроводники, вейлевские и дираковские полуметаллы (stmi-metals)], системы с фазовым расслоением, материалы со спин-поляризованными электронами на поверхности Ферми (half-metals) и другие. В этих материалах наблюдаются необычные свойства (например, фермионы Майораны, парадокс Клейна, топологически защищенные электронные возбуждения на поверхности), которые могут быть полезны для различных приложений, в частности для квантовых вычислений.

Цель данного курса – дать достаточно широкий обзор электронных свойств этих материалов. Курс должен способствовать расширению кругозора студентов в области физики конденсированного состояния и физического материаловедения, осветить современные проблемы, стоящие перед этими дисциплинами, а также дать представление о возможных областях применения новых материалов.

1. Цели и задачи

Цель дисциплины

Цель курса – дать представление об актуальных задачах в области создания и исследования новых важных материалов, а также о возможных приложениях этих материалов. Студенты должны освоить фундаментальные знания в области теории и приложений таких материалов, как графен и другие двумерные структуры родственные графену, топологические диэлектрики и сверхпроводники.

Задачи дисциплины

- формирование базовых знаний в области физики конденсированного состояния, как дисциплины, интегрирующей общефизическую и общетеоретическую подготовку физиков;
- формирование базовых знаний в области физического материаловедения;
- формирование подходов к выполнению исследований студентами в области физики современных материалов в рамках выпускных работ на степень магистра.

2. Перечень формируемых компетенций

Освоение дисциплины направлено на формирование следующих компетенций:

| Код и наименование компетенции | Индикаторы достижения компетенции |
|---|--|
| ОПК-1 Владеет системой фундаментальных научных знаний в области физико-математических наук | ОПК-1.1 Знает и способен использовать в профессиональной деятельности фундаментальные научные знания в области физико-математических наук |
| | ОПК-1.2 Способен обобщать и критически оценивать опыт и результаты научных исследований в области профессиональной деятельности |
| | ОПК-1.3 Понимает междисциплинарные связи в области математики и физики и способен их применять при решении задач профессиональной деятельности |
| ОПК-2 Имеет представление об актуальных проблемах науки и техники в области своей профессиональной деятельности, способен на научном языке формулировать профессиональные задачи | ОПК-2.1 Имеет представление о современном состоянии исследований в рамках тематической области своей профессиональной деятельности |
| ОПК-3 Способен выбирать и (или) разрабатывать подходы к решению типовых и новых задач в области профессиональной деятельности, учитывая особенности и ограничения различных методов решения | ОПК-3.1 Способен анализировать задачу, планировать пути решения, предлагать и комбинировать способы решения |
| | ОПК-3.2 Способен использовать исследовательские методы при решении новых задач, применяя знания в различных областях науки (техники) |

| | |
|---|--|
| ОПК-4 Способен успешно реализовывать решение поставленной задачи, провести анализ результата и представить выводы, применяя знания и навыки в области физико-математических наук и информационно-коммуникационных технологий | ОПК-4.2 Способен применять знания в области физико-математических наук для решения поставленной задачи, формулирования выводов и оценки полученных результатов |
| | ОПК-4.3 Способен аргументировано выбирать способ проведения научного исследования |
| ОПК-5 Способен и готов к повышению квалификации, профессиональному росту и руководству коллективом в сфере своей профессиональной деятельности, толерантно воспринимая социальные, этнические, конфессиональные и культурные различия | ОПК-5.3 Стремится к получению новых знаний, профессиональному и личностному росту |
| 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-1.3 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:

основные свойства графена и других двумерных материалов, топологических материалов, новых сверхпроводников, полуметаллов и представлять современное состояние проблем физического материаловедения.

уметь:

пользоваться базовым математическим аппаратом, ориентироваться в современной научной литературе по проблеме

владеть:

знаниями основ квантовой физики конденсированного состояния и знаниями о современном состоянии проблемы

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 | Графен | 4 | 4 | | 2 |
| 2 | Графен, продолжение | 2 | 4 | | 2 |
| 3 | Обзор существующих двумерных систем | 4 | 2 | | 4 |
| 4 | Топологические материалы | 2 | 4 | | 2 |
| 5 | Топологические диэлектрики | 2 | 2 | | 2 |
| 6 | Топологические диэлектрики, продолжение | 2 | 2 | | 2 |
| 7 | Топологические сверхпроводники | 2 | 2 | | 2 |
| 8 | Топологические сверхпроводники, продолжение | 2 | 2 | | 2 |
| 9 | Топологические полуметаллы | 2 | 2 | | 2 |
| 10 | Системы с фазовым расслоением | 2 | 2 | | 2 |

| | | | | | |
|-----------------------|--|--------------------|----|--|----|
| 11 | Обзор последних достижений в области создания новых материалов | 4 | 2 | | 4 |
| 12 | Материалы для квантовых компьютеров | 2 | 2 | | 4 |
| Итого часов | | 30 | 30 | | 30 |
| Подготовка к экзамену | | 0 час. | | | |
| Общая трудоёмкость | | 90 час., 2 зач.ед. | | | |

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

Семестр: 2 (Весенний)

1. Графен

Графен. Кристаллическая структура. Конуса Дирака. Киральность. Парадокс Клейна. Дираковский спектр. Причины, по которым возникает дираковский спектр в кристаллах: специфическая симметрия решетки, сильное спин-орбитальное взаимодействие. Spin-momentum locking. Квантование Ландау и квантовые осцилляции в дираковских системах: отличие от «обычных» электронных систем.

2. Графен, продолжение

Однослойный и двухслойный графен (структуры типа AB, AA, скрученный). Киральность и долинный индекс. Особенности квантования Ландау и квантового эффекта Холла в однослойном графене и двухслойном графене. Электрон-электронное взаимодействие, волны спиновой и зарядовой плотности, параметры порядка.

3. Обзор существующих двумерных систем

Обзор физических свойств существующих (ван-дер-ваальсовских) двумерных систем. Общие свойства. Электронные свойства. Перспективы и применения.

4. Топологические материалы

Топологические материалы. Основные понятия. Зачем нужна топология в физике. Топологические (квантовые) фазовые переходы. Основные математические понятия: фаза Берри, кривизна и связность Берри, числа Черна. Роль симметрии.

5. Топологические диэлектрики

Топологические диэлектрики двумерные и трехмерные. Роль киральной симметрии. Адиабатическая связность. Топологические дефекты. Топологически защищенные краевые состояния.

6. Топологические диэлектрики, продолжение

Примеры существующих топологических диэлектриков. Основные свойства. Роль спин-орбитального взаимодействия.

Транспортные свойства топологических диэлектриков. Аномальная скорость. Минимальная проводимость. Топологический магнитоэлектрический эффект. Магнитные монополи. Аномальное анизотропное магнитосопротивление. Квантовый аномальный эффект Холла. Спиновые токи.

7. Топологические сверхпроводники

Топологические сверхпроводники. Симметрии и многокомпонентность параметра порядка. Сверхпроводимость, возникающая из-за эффекта близости на поверхности топологического диэлектрика. Сверхпроводимость в материале с сильным спин-орбитальным взаимодействием, сверхпроводимость в объеме допированного топологического диэлектрика. Нематическая сверхпроводимость. Сверхпроводимость в графене, в том числе в скрученном двухслойном графене.

8. Топологические сверхпроводники, продолжение

Фермион Майораны в теории поля и физике конденсированного состояния. Возможные физические реализации фермиона Майораны в топологических сверхпроводниках. Экспериментальные наблюдения фермиона Майораны.

9. Топологические полуметаллы

Вейлевские полуметаллы. Дираковские полуметаллы. Последние достижения (краткий обзор).

10. Системы с фазовым расслоением

Системы с фазовым расслоением. Роль нестинга, многозонности и сильных электрон-электронных корреляций. Системы со спин-поляризованными электронами (half-metals).

11. Обзор последних достижений в области создания новых материалов

Обзор последних достижений в области создания новых материалов, который будет дан по состоянию текущей литературы. В частности, будут освещены последние достижения в области физики и приложений графена и сверхпроводников.

12. Материалы для квантовых компьютеров

Джозефсоновские кубиты. Перспективы применения кубитов с майорановскими модами (топологически защищенные квантовые вычисления). Возможное использование топологических материалов.

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

Персональный компьютер, проектор и экран.

6. Перечень рекомендуемой литературы

Основная литература

1. Advanced quantum condensed matter physics, One-Body, Many-Body, and Topological Perspectives
Michael el-Batanouny, Boston University, Cambridge University Press (2020).
2. Topological insulators, Grigory Tkachev, 2016 by Taylor & Francis Group, LLC

Дополнительная литература

1. Zoo of quantum-topological phases of matter, Xiao-Gang Wen, arXiv:1610.03911v3
2. Identification of nematic superconductivity from the upper critical field, Jorn W. F. Venderbos, Vladyslav Kozii, and Liang Fu, arXiv:1603.03406v4
3. Nematic superconductivity in topological insulators induced by hexagonal warping, RS Akzyanov, DA Khokhlov, AL Rakhmanov, arXiv preprint arXiv:2003.05202

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. В процессе самостоятельной работы обучающихся возможно использование таких программных средств, как Mathcad, Scilab и др.

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 и понятия, 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 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 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: | Общая и прикладная физика Физтех-школа физики и исследований им. Ландау кафедра электродинамики сложных систем и нанофотоники |
| курс: | <u>1</u> |
| квалификация: | магистр |

Семестр, формы промежуточной аттестации: 2 (весенний) - Дифференцированный зачет

Разработчик: А.Л. Рахманов, д-р физ.-мат. наук

1. Компетенции, формируемые в процессе изучения дисциплины

| Код и наименование компетенции | Индикаторы достижения компетенции |
|---|--|
| ОПК-1 Владеет системой фундаментальных научных знаний в области физико-математических наук | ОПК-1.1 Знает и способен использовать в профессиональной деятельности фундаментальные научные знания в области физико-математических наук |
| | ОПК-1.2 Способен обобщать и критически оценивать опыт и результаты научных исследований в области профессиональной деятельности |
| | ОПК-1.3 Понимает междисциплинарные связи в области математики и физики и способен их применять при решении задач профессиональной деятельности |
| ОПК-2 Имеет представление об актуальных проблемах науки и техники в области своей профессиональной деятельности, способен на научном языке формулировать профессиональные задачи | ОПК-2.1 Имеет представление о современном состоянии исследований в рамках тематической области своей профессиональной деятельности |
| ОПК-3 Способен выбирать и (или) разрабатывать подходы к решению типовых и новых задач в области профессиональной деятельности, учитывая особенности и ограничения различных методов решения | ОПК-3.1 Способен анализировать задачу, планировать пути решения, предлагать и комбинировать способы решения |
| | ОПК-3.2 Способен использовать исследовательские методы при решении новых задач, применяя знания в различных областях науки (техники) |
| ОПК-4 Способен успешно реализовывать решение поставленной задачи, провести анализ результата и представить выводы, применяя знания и навыки в области физико-математических наук и информационно-коммуникационных технологий | ОПК-4.2 Способен применять знания в области физико-математических наук для решения поставленной задачи, формулирования выводов и оценки полученных результатов |
| | ОПК-4.3 Способен аргументировано выбирать способ проведения научного исследования |
| ОПК-5 Способен и готов к повышению квалификации, профессиональному росту и руководству коллективом в сфере своей профессиональной деятельности, толерантно воспринимая социальные, этнические, конфессиональные и культурные различия | ОПК-5.3 Стремится к получению новых знаний, профессиональному и личностному росту |
| 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-1.3 Способен применять теоретические и (или) экспериментальные методы исследований к конкретной научной задаче и интерпретировать полученные результаты |

2. Показатели оценивания компетенций

В результате изучения дисциплины «Новые квантовые материалы» обучающийся должен:

знать:

основные свойства графена и других двумерных материалов, топологических материалов, новых сверхпроводников, полуметаллов и представлять современное состояние проблем физического материаловедения.

уметь:

пользоваться базовым математическим аппаратом, ориентироваться в современной научной литературе по проблеме

владеть:

знаниями основ квантовой физики конденсированного состояния и знаниями о современном состоянии проблемы

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

Примеры контрольных заданий

1. Найдите, как от энергии коэффициент отражения электрона от прямоугольного барьера в графене при учете малых поправок к линейному спектру.
2. Найдите спектр возбуждений в топологическом диэлектрике при учете малых поправок к линейному спектру.
3. Оцените по порядку величины щель между майорановским состоянием и первым возбужденным состоянием в коре вихря в топологическом сверхпроводнике.
4. Найдите, как повлияет аномальная скорость на постоянную Холла.
5. С помощью теории Гинзбурга-Ландау найдите, как повлияет однородная одноосная деформация на критическую температуру нематического сверхпроводника.

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

Перечень контрольных вопросов

1. Почему спектр графена дираковский?
2. Почему в графене нет устойчивых майорановских состояний?
3. В чем отличие нулевых поверхностных состояний в топологическом диэлектрике и таммовских поверхностных уровней энергии?
4. Как могут влиять магнитные примеси на топологическую сверхпроводимость или в чем здесь отличие от обычной s-сверхпроводимости?
5. Что такое топологическая защищенность?

Билет 1

1. Кристаллическая структура графена. Конуса Дирака. Киральность. Парадокс Клейна..
2. Примеры существующих топологических диэлектриков. Основные свойства. Роль спин-орбитального взаимодействия..

Билет 2

1. Особенности квантования Ландау и квантового эффекта Холла в однослойном графене и двухслойном графене..
2. Вейлевские полуметаллы. Дираковские полуметаллы.

Билет 3

1. Системы с фазовым расслоением. Роль нестинга, многозонности и сильных электрон-электронных корреляций. Системы со спин-поляризованными электронами (half-metals).
2. Возможные физические реализации фермиона Майораны в топологических сверхпроводниках. Экспериментальные наблюдения фермиона Майораны..

Билет 4

1. Топологические сверхпроводники. Симметрии и многокомпонентность параметра порядка..
2. Основные физические свойства существующих (ван-дер-ваальсовских) двумерных систем. Перспективы и применения.

Билет 5

1. Фермион Майораны в теории поля и физике конденсированного состояния. Топологически защищенные квантовые вычисления и фермион Майораны..
2. Топологические диэлектрики двумерные и трехмерные. Роль киральной симметрии. Адиабатическая связность. Топологические дефекты. Топологически защищенные краевые состояния.

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

Дифференцированный зачет проводится в устной форме по билетам. В каждом билете представлено два теоретических вопроса. При проведении дифференцированного зачёта обучающемуся предоставляется 30 минут на подготовку. Опрос обучающегося не должен превышать одного астрономического часа.