

**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:	Спектроскопия твердого тела и физика наноструктур
по направлению:	Прикладные математика и физика
профиль подготовки:	Общая и прикладная физика Физтех-школа физики и исследований им. Ландау кафедра нанооптики и спектроскопии
курс:	1
квалификация:	магистр

Семестры, формы промежуточной аттестации:

- 1 (осенний) - Зачет
- 2 (весенний) - Экзамен

Аудиторных часов: 60 всего, в том числе:

- лекции: 60 час.
- семинары: 0 час.
- лабораторные занятия: 0 час.

Самостоятельная работа: 45 час.

Подготовка к экзамену: 30 час.

Всего часов: 135, всего зач. ед.: 3

Программу составили:

- А.Г. Мальшуков, д-р физ.-мат. наук
- А.А. Соколик, канд. физ.-мат. наук

Программа обсуждена на заседании кафедры нанооптики и спектроскопии 04.06.2020

Аннотация

Курс направлен на ознакомление студентов с основными оптическими явлениями в конденсированных средах, главным образом – в кристаллических твердых телах и наноструктурах. Содержание курса рассчитано на студентов, специализирующихся в области оптики и спектроскопии, физики твердого тела, физики наноструктур и современных наноматериалов, а также физики взаимодействия излучения с веществом. Изложение курса будет опираться на базовые основы физики твердого тела и электродинамики. Курс начинается с введения в теорию взаимодействия электромагнитного поля с веществом. Будут рассмотрены оптические константы материалов, их основные свойства и базовые модели, используемые для их теоретического описания. Далее будут рассмотрены особенности оптических констант в случае металлов, полупроводников и изоляторов, а также современные методы спектроскопии. В последующих разделах будут рассмотрены электронные и оптические свойства таких интенсивно исследуемых в последнее время материалов, как графен, топологические изоляторы, дираковские и вейлевские полуметаллы и двумерные дихалькогениды переходных металлов. В весеннем семестре будет рассказываться введение в электродинамику сплошных сред и применение её основных принципов в оптике. В частности, будут даны основы теоретического описания линейных процессов распространения света в объёме и на поверхности твердых тел. Будут рассмотрены эффекты взаимодействия света с фононами и электронами. Для закрепления теоретического материала будет предложено несколько задач для домашней работы. Успешное освоение материалов данной дисциплины должно позволить студентам ориентироваться в современной оптике и спектроскопии твердого тела и наноструктур, а также разбираться в основных подходах и концепциях, используемых для интерпретации оптических эффектов в твёрдых телах. Освоение курса потребует от слушателей хорошего знания курсов электродинамики и квантовой механики на уровне, соответствующем преподаванию этих предметов в МФТИ.

1. Цели и задачи

Цель дисциплины

Цель дисциплины заключается в том, чтобы дать студентам знания об основных оптических явлениях в конденсированных средах, в том числе в новых материалах и наноструктурах. По окончании учебного курса студенты должны знать основные классические и квантовомеханические модели, описывающие оптические и спектральные свойства конденсированных сред, главные проявления процессов, происходящих в конденсированных средах, в оптических спектрах поглощения, люминесценции и комбинационного рассеяния, а также в информации, получаемой современными методами типа «накачка-зондирование».

Задачи дисциплины

- освоение студентами базовых знаний в области спектроскопии и оптики твердого тела и наноструктур;
- приобретение теоретических знаний в области спектроскопии и оптики твердого тела и физики наноструктур;
- оказание консультаций и помощи студентам в решении конкретных теоретических задач в области спектроскопии и оптики твердого тела и физики наноструктур;
- приобретение навыков самостоятельной работы в области спектроскопии и оптики твердого тела и физики наноструктур.

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-2.1 Имеет представление о современном состоянии исследований в рамках тематической области своей 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-2.2 Способен оценивать актуальность исследований в области своей профессиональной деятельности и их практическую значимость
	ОПК-2.3 Владеет профессиональной терминологией, используемой в современной научно-технической литературе, обладает навыками устного и письменного изложения результатов научной деятельности в рамках профессиональной коммуникации
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-4.1 Способен применять знания и навыки по использованию информационно-коммуникационных технологий для поиска и изучения научной литературы, применения прикладных программных продуктов
	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
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, оценивать качество разработанной модели

3. Перечень планируемых результатов обучения по дисциплине (модулю)

В результате освоения дисциплины обучающиеся должны

знать:

- базовые теоретические модели физики оптических явлений в твердых телах и наноструктурах;
- основные спектроскопические методы исследования твердых тел и наноструктур;
- современные проблемы и актуальные темы в области спектроскопии твердого тела и наноструктур;
- основы физики взаимодействия электромагнитного излучения с веществом, имеющие общезначимое значение и применяемые в различных физических дисциплинах;
- теорию основных оптических эффектов в макроскопических твердых телах и наноструктурах;

уметь:

- правильно выбирать подходящие физические модели для решения исследовательских и прикладных задач в области спектроскопии твердого тела и физики наноструктур;
- проводить на основе выбранных моделей аналитические и численные расчеты;
- анализировать экспериментальные данные в области спектроскопии твердого тела и физики наноструктур;
- интерпретировать спектры отражения, прохождения, и комбинационного рассеяния света в твердых телах и наноструктурах;
- производить расчёт линейных объёмных и поверхностных электромагнитных волн в твердых телах и наноструктурах;

владеть:

- навыками работы с современной научной литературой по тематике спектроскопии твердого тела и физики наноструктур;
- методами решения задач о распространении электромагнитных волн в конденсированных средах;
- теоретическими основами оценок эффектов взаимодействия электронов и фононов с электромагнитными волнами.

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	Теория электромагнитного отклика	7			3
2	Спектроскопия кристаллических материалов	8			4
3	Спектроскопия графена	7			4
4	Современные квантовые материалы и их оптические свойства	8			4
5	Уравнения Максвелла в среде. Решения уравнений Максвелла для плоской границы раздела	2			2
6	Поверхностные волны. Поверхностные поляритоны	3			3
7	Поверхностные плазмоны. Плазмоны в наночастицах и гетероструктурах	3			3
8	Электромагнитные свойства полупроводников. Экситоны	3			3
9	Оптические свойства электронов в полупроводниковых гетероструктурах и сверхрешетках	2			2
10	Спин-орбитальные эффекты в полупроводниковых квантовых ямах. Оптическая ориентация спинов	3			3
11	Комбинационное рассеяние света	3			3
12	Электронное комбинационное рассеяние света в полупроводниках	3			3
13	Спин-орбитальные эффекты при комбинационном рассеянии света в квантовых ямах	2			2
14	Спектр примесного центра в кристаллической матрице	3			3
15	Спин-гальванический эффект в полупроводниковых квантовых ямах	3			3
Итого часов		60			45
Подготовка к экзамену		30 час.			
Общая трудоёмкость		135 час., 3 зач.ед.			

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

1. Теория электромагнитного отклика

Классическая теория электромагнитного отклика. Оптические константы материалов. Модели Друде и Лоренца. Плазменная частота. Общие свойства оптических констант. Причинные функции отклика, соотношения Крамерса-Кронига. Правила сумм. Квантовая теория электромагнитного отклика. Формула Кубо. Спектральное представление функции отклика. Диссипация энергии в системе. Продольная и поперечная функции отклика. Расчеты функций отклика в различных калибровках. Сила осциллятора. Поляризационная функция электронного газа. Статическое и динамическое экранирование. Приближение хаотических фаз, закон дисперсии плазмонов.

2. Спектроскопия кристаллических материалов

Межзонные переходы в изоляторах и полупроводниках. Прямые переходы. Непрямые переходы с возбуждением фононов. Экситоны и центры окраски. Металлы. Плазменные колебания в толще металлов и на их поверхности. Межзонные переходы в металлах. Методы спектроскопии: спектроскопия поглощения, комбинационное рассеяние, сверхбыстрая спектроскопия с накачкой и зондированием, фотоэлектронная спектроскопия с угловым разрешением, спектроскопия энергетических потерь электронов.

3. Спектроскопия графена

Безмассовые электроны в графене, эффективное уравнение Дирака. Эффект электрического поля в графене. Электронный газ в графене. Многочастичные эффекты кулоновского взаимодействия, перенормировка скорости Ферми. Экранирование кулоновского взаимодействия и скорость затухания возбуждений. Межзонные переходы и универсальная оптическая проводимость графена. Оптическое правило сумм для графена. Фононы в графене. Спектр комбинационного рассеяния в графене, его зависимость от допирования, беспорядка и натяжения. Сверхбыстрая спектроскопия графена с оптической накачкой. Термализация и остывание носителей. Сверхбыстрая фотоэлектронная спектроскопия. Терагерцовый отклик графена. Нелинейный терагерцовый отклик и зондирование фотовозбужденного графена терагерцовыми импульсами. Спектроскопия графена в магнитном поле. Уровни Ландау в графене, сканирующая туннельная спектроскопия уровней Ландау. Циклотронный резонанс и магниторамановское рассеяние. Спектроскопия плазмонов в графене. Динамическая поляризуемость графена, закон дисперсии плазмонов. Бегущие и локализованные плазмоны. Краевые магнитоплазмоны.

4. Современные квантовые материалы и их оптические свойства

Топологические изоляторы: классификация и основные модели. Трехмерные топологические изоляторы: дираковские электроны на поверхности и их спектроскопия. Квантованный аномальный эффект Холла и топологический магнитоэлектрический эффект. Квантованные эффекты Фарадея и Керра в магнитном поле. Трехмерные дираковские и вейлевские полуметаллы, их спектроскопия. Киральная аномалия и киральный магнитный эффект, их проявления в экспериментах. Дихальогениды переходных металлов. Зонная структура и роль спин-орбитального расщепления. Экситоны и правила отбора для их возбуждения. Светлые и темные экситоны, трионы, межслойные экситоны. Искусственные квантовые материалы. Гетероинтерфейсы оксидов переходных металлов. Состояния Флоке и Флоке-Блоха в квантовой системе, подвергающейся действию периодического возмущения.

5. Уравнения Максвелла в среде. Решения уравнений Максвелла для плоской границы раздела

Уравнения Максвелла в диспергирующей среде. Отражение и преломление электромагнитных волн разной поляризации.

6. Поверхностные волны. Поверхностные поляритоны

Волны, локализованные вблизи поверхности. Смешивание поверхностных волн со светом и образование поляритонов в области частот оптических фононов.

7. Поверхностные плазмоны. Плазмоны в наночастицах и гетероструктурах

Диэлектрическая проницаемость металлов. Плазмоны в объёме и на поверхности. Плазменные колебания малых частиц. Радиационное затухание и затухание Ландау поверхностных плазмонов. Щелевые плазмоны в металлических гетероструктурах и порах.

8. Электромагнитные свойства полупроводников. Экситоны

Электронные зоны в полупроводниках. Электроны и дырки. Кулоновское взаимодействие и образование экситонов. Диэлектрическая проницаемость в области частот экситонных возбуждений.

9. Оптические свойства электронов в полупроводниковых гетероструктурах и сверхрешетках

Типы полупроводниковых гетероструктур: квантовые ямы, квантовые точки, сверхрешетки. Электронные зоны в полупроводниковых гетероструктурах. Поглощение света и экситонные состояния в гетероструктурах.

10. Спин-орбитальные эффекты в полупроводниковых квантовых ямах. Оптическая ориентация спинов

Поглощение циркулярно поляризованного света и фотоиндуцированная спиновая поляризация электронов. Спиновое расщепление электронных и дырочных зон в полупроводниковых квантовых ямах. Спиновая релаксация Дзяконова-Переля.

11. Комбинационное рассеяние света

Элементарная теория комбинационного рассеяния света. Комбинационное рассеяние на акустических фононах (рассеяние Мандельштамма-Бриллюэна). Рассеяние на электронах проводимости. Угловая и частотная зависимость комбинационного рассеяния света.

12. Электронное комбинационное рассеяние света в полупроводниках

Роль спин-орбитальных эффектов в тензоре комбинационного рассеяния света. Рассеяние с переворотом спина электрона. Зависимость спиновых эффектов от взаимной поляризации падающего и рассеянного света.

13. Спин-орбитальные эффекты при комбинационном рассеянии света в квантовых ямах

Влияние спин-орбитального расщепления зоны проводимости на спектр электронного комбинационного рассеяния циркулярно поляризованного света. Частотная асимметрия спектра.

14. Спектр примесного центра в кристаллической матрице

Форма спектра поглощения света примесью. Спектр при сильном и слабом взаимодействии примеси с фононами матрицы.

15. Спин-гальванический эффект в полупроводниковых квантовых ямах

Сила, действующая на поляризованный газ электронов в системе с расщеплённой по направлению спина зоной проводимости. Возникновение тока в газе оптически ориентированных электронов.

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

Для проведения занятий используются доска и проектор.

6.Перечень рекомендуемой литературы

Основная литература

1. Теоретическая физика [Текст] : в 10 т. Т. 8 : Электродинамика сплошных сред : учеб. пособие для ун-тов / Л. Д. Ландау, Е. М. Лифшиц .— М. : Наука, 1992, 2001, 2003, 2005 .— 662 с.
2. M. Dressel, G. Grüner, Electrodynamics of Solids, 2002.
3. G. Grosso, G.P. Parravicini, Solid State Physics, 2014.

Дополнительная литература

1. D.N. Basov et al., Graphene spectroscopy, Rev. Mod. Phys. 86, 959 (2014).
2. M. Franz, L. Molenkamp, Topological Insulators, 2013.
3. N.P. Armitage et al., Weyl and Dirac semimetals in three-dimensional solids, Rev. Mod. Phys. 90, 015001 (2018).
4. G. Wang et al., Colloquium: Excitons in atomically thin transition metal dichalcogenides, Rev. Mod. Phys. 90, 021001 (2018).
5. E.L. Ivchenko, G.E. Pikus, Superlattices and other heterostructures, symmetry and optical phenomena, Springer Series in Solid State Physics, Berlin, 1997.

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 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;
- систематической 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 преподавателю.

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 нанооптики и спектроскопии
курс:	<u>1</u>
квалификация:	магистр

Семестры, формы промежуточной аттестации:

- 1 (осенний) - Зачет
- 2 (весенний) - Экзамен

Разработчики:

А.Г. Мальшуков, д-р физ.-мат. наук
А.А. Соколик, канд. 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-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-2.2 Способен оценивать актуальность исследований в области своей профессиональной деятельности и их практическую значимость
	ОПК-2.3 Владеет профессиональной терминологией, используемой в современной научно-технической литературе, обладает навыками устного и письменного изложения результатов научной деятельности в рамках профессиональной коммуникации
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-4.1 Способен применять знания и навыки по использованию информационно-коммуникационных технологий для поиска и изучения научной литературы, применения прикладных программных продуктов
	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
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, оценивать качество разработанной модели

2. Показатели оценивания компетенций

В результате изучения дисциплины «Спектроскопия твердого тела и физика наноструктур» обучающийся должен:

знать:

- базовые теоретические модели физики оптических явлений в твердых телах и наноструктурах;
- основные спектроскопические методы исследования твердых тел и наноструктур;
- современные проблемы и актуальные темы в области спектроскопии твердого тела и наноструктур;
- основы физики взаимодействия электромагнитного излучения с веществом, имеющие общефизическое значение и применяемые в различных физических дисциплинах;
- теорию основных оптических эффектов в макроскопических твердых телах и наноструктурах;

уметь:

- правильно выбирать подходящие физические модели для решения исследовательских и прикладных задач в области спектроскопии твердого тела и физики наноструктур;
- проводить на основе выбранных моделей аналитические и численные расчеты;
- анализировать экспериментальные данные в области спектроскопии твердого тела и физики наноструктур;
- интерпретировать спектры отражения, прохождения, и комбинационного рассеяния света в твердых телах и наноструктурах;
- производить расчёт линейных объёмных и поверхностных электромагнитных волн в твердых телах и наноструктурах;

владеть:

- навыками работы с современной научной литературой по тематике спектроскопии твердого тела и физики наноструктур;
- методами решения задач о распространении электромагнитных волн в конденсированных средах;
- теоретическими основами оценок эффектов взаимодействия электронов и фононов с электромагнитными волнами.

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

В 1-м (осеннем) семестре:

В начале каждого занятия, за исключением первого, студенты пишут контрольную работу длительностью 10 минут, на которой отвечают на 4 вопроса по материалам предыдущего занятия. Пользоваться конспектами и другими материалами в течение контрольной работы студентам запрещается.

Примеры вопросов контрольной работы:

1. Запишите формулу Кубо для функции отклика величины A на оператор возмущения B на частоте ω .
2. Как выглядит спектральное представление для функции отклика на частоте ω ?
3. Что такое калибровки $E \cdot r$ и $p \cdot A$? Чем отличаются процедуры расчета проводимости в этих калибровках?
4. Запишите формулу Кубо для оптической проводимости в калибровке $p \cdot A$.

Оценка за каждую контрольную работу ставится в 8-балльной шкале и рассчитывается как сумма оценок за каждый из 4 вопросов. За каждый вопрос ставится: 2 балла – если на него дан правильный ответ, 1 балл – если дан частично верный ответ, 0 баллов – если ответа нет или он неверный. Оценка по итогам текущего контроля в 1-м (осеннем) семестре вычисляется как среднее арифметическое оценок за все контрольные работы, приведенная к 10-балльной шкале и округленная до целого числа баллов.

Во 2-м (весеннем) семестре:

Примеры задач из домашнего задания и на семинарах:

1. Вычислить поляризационную зависимость коэффициента отражения от поверхности одноосного кристалла. Ось симметрии параллельна поверхности.
2. Вычислить радиационное затухание плазмона в частице эллипсоидальной формы.
3. Вычислить спектр плазменных колебаний в плоской щели конечной глубины.
4. Вычислить спектр одночастичных и коллективных возбуждений электронов в параболической квантовой точке.
5. Найти спектр поглощения экситонов в широкой квантовой яме.

Оценка за каждую правильно решённую задачу ставится по двухбалльной шкале: 2 балла – если дано верное решение, 1 балл – если решение частично верно, 0 баллов – если решения нет или оно неверно. Оценка по итогам текущего контроля во 2-м (весеннем) семестре вычисляется как среднее арифметическое оценок за все задания, приведенная к 10-балльной шкале и округленная до целого числа баллов.

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

Примеры вопросов к зачету после 1-го (осеннего) семестра:

1. Общие свойства оптических констант.

Причинные функции отклика. Соотношения Крамерса-Кронига для диэлектрической проницаемости и оптической проводимости. Правила сумм, их физический смысл и применения.

2. Продольный и поперечный отклик.

Продольно-поперечное разложение полей и токов. Поперечная оптическая проводимость. Продольный отклик, поляризуемость. Формула Кубо для поляризуемости.

3. Дираковские электроны в графене.

Две долины для электронов. Эффективное уравнение Дирака. Сходства и различия между электронами в графене и массивными релятивистскими электронами. Двухслойный графен.

4. Квантовый эффект Холла.

Классический и квантовый эффекты Холла. Выражение холловской удельной проводимости через кривизну Берри (формула TKNN). Аномальная скорость. Краевые состояния в режиме квантового эффекта Холла.

5. Дихалькогениды переходных металлов.

Зонная структура двумерных дихалькогенидов переходных металлов. Роль спин-орбитального взаимодействия. Экситоны, правила отбора для их возбуждения. Светлые и темные экситоны. Трионы.

Примеры вопросов к экзамену после 2-го (весеннего) семестра:

1. Продольно-поперечное расщепление экситонов.
2. Спектр плазменных колебаний, локализованных вблизи узкой щели.
3. Форма спектра межзонного поглощения в полупроводниковых квантовых ямах.
4. Плоские электромагнитные волны в прозрачных и непрозрачных средах.
5. Форма спектра оптического поглощения в области полосы возбуждения экситона Ванье-Мотта.
6. Как можно наблюдать комбинационное рассеяние на флуктуациях спиновой плотности в полупроводниках.
7. Как зависит частота плазменных колебаний в малых частицах эллипсоидной формы от соотношения осей эллипсоида
8. Связь мнимой части диэлектрической проницаемости с поглощением энергии электромагнитного поля.
9. Уравнение Шредингера для экситона большого радиуса в полупроводнике.

Примеры экзаменационных билетов (заданий, тестов и др. материалов, используемых для проведения зачета, экзамена):

Билет №1

1. Продольно-поперечное расщепление экситонов.
2. Связь мнимой части диэлектрической проницаемости с поглощением энергии электромагнитного поля.

Билет №2

1. Форма спектра межзонного поглощения в полупроводниковых квантовых ямах.
2. Как можно наблюдать комбинационное рассеяние на флуктуациях спиновой плотности в полупроводниках.

Критерии оценивания

Оценка «зачтено» выставляется студенту, если он правильно отвечает на большинство контрольных вопросов (см. выше), что, в основном, определяется в процессе общения на лекциях.

Оценка «не зачтено» выставляется обучающемуся, если он плохо посещал лекции и не может ответить на подавляющее большинство контрольных вопросов.

Оценка за экзамен в конце 2-го (весеннего) семестра выставляется как доля экзаменационных вопросов, на которые студент дал правильный ответ, приведенная к 10-балльной шкале и округленная до целого числа баллов. Итоговая оценка за 2-й (весенний) семестр вычисляется как сумма оценки по итогам текущего контроля и оценки за экзамен. Если сумма больше 10, то итоговая оценка равна 10.

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

Зачет в конце 1-го (осеннего) семестра проводится по итогам текущей успеваемости путем организации специального опроса, проводимого в устной форме.

Экзамен во 2-ом (весеннем) семестре проводится в устной форме по заранее сформулированным вопросам. Каждый студент получает случайный экзаменационный билет. После 30 минут подготовки студент должен устно отвечать на полученные им вопросы, время ответа не должно превышать один астрономический час. При подготовке ответов студент может пользоваться своими конспектами.