

## Рабочая программа дисциплины

### 1. Физика конденсированных сред

### 2. Лекторы.

**2.1.** Д.ф.м.н., профессор, Паращук Дмитрий Юрьевич, кафедра общей физики и волновых процессов физического факультета МГУ, e-mail: [paraschuk@gmail.com](mailto:paraschuk@gmail.com), +7 (495) 939-22-28

### 3. Аннотация дисциплины.

Курс «Физика конденсированных сред» является дисциплиной профиля для магистров 2-го курса физического факультета, обучающихся по программе "«Нелинейная оптика и лазерная физика»" (направление 011200 "Физика"). Курс читается в 1 семестре магистратуры и представляет собой систематическое изложение фундаментальных основ физики конденсированных сред. Курс состоит из следующих разделов: физика химической связи, структура кристаллов, фононы, тепловые свойства, свободный электронный газ, электроны в периодическом потенциале. Представлены основные современные методы исследования структуры и свойств конденсированных сред.

### 4. Цели освоения дисциплины.

Владение современными профессиональными знаниями в области физики конденсированных сред и их применение для решения различных учебных и исследовательских задач.

### 5. Задачи дисциплины.

Овладение фундаментальными вопросами в области физики конденсированных сред по физике химической связи, структуре кристаллов и методам ее исследования, фононам, термическим свойствам конденсированных сред, моделям свободного электронного газа, слабо и сильно связанных электронов. Приобретение навыков применения полученных знаний для работы в области взаимодействия света с конденсированными средами, а также овладение необходимой теоретической и практической базы для ориентации в современном состоянии физики конденсированных сред.

### 6. Компетенции.

#### 6.1. Компетенции, необходимые для освоения дисциплины.

ОНК-4, ОНК-5, ИК-1, ИК-2, ИК-3, ИК-4, ПК-1

#### 6.2. Компетенции, формируемые в результате освоения дисциплины.

ПК-2, ПК-3, ПК-6

### 7. Требования к результатам освоения содержания дисциплины

В результате освоения дисциплины студент должен

Знать: основные понятия, приближения, модели и методы физики конденсированных сред

Уметь: использовать основные приближения и модели для решения различных задач в области физики конденсированных сред, уметь готовить и представлять научные доклады в области физики конденсированных сред.

Владеть: основными методами для анализа свойств и структуры конденсированных сред,

Иметь опыт деятельности: подготовка научных докладов и сообщений в области физики конденсированных сред.

#### 8. Содержание и структура дисциплины.

Вид работы	семестр	всего
	1	
<b>Общая трудоёмкость, акад. часов</b>	72	72
<b>Аудиторная работа:</b>		
Лекции, акад. часов	36	36
Семинары, акад. часов	-	-
Лабораторные работы, акад. часов	-	-
<b>Самостоятельная работа, акад. часов</b>	36	36
<b>Вид итогового контроля (зачёт, зачёт с оценкой, экзамен)</b>	экзамен	экзамен

N раз- дела	Наименование раздела <i>Разделы могут объединять несколько лекций</i>	Трудоёмкость (академических часов) и содержание занятий				Форм а текущ его контр оля
		Аудиторная работа			Самостоятельная работа <i>Содержание самостоятельной работы должно быть обеспечено, например, пособиями, интернет-ресурсами, домашними заданиями и т.п.</i>	
		Лекции	Семинары	Лабораторные работы		
1.	Введение	№1 2 часа Цель курса. Классификация конденсированных сред по структуре и по свойствам. Макро-, мезо- и нанообъекты. Конденсированные среды разной размерности. Поверхности и границы раздела. Кристаллические и аморфные конденсированные среды. Методы исследования конденсированных сред. Успехи и нерешенные проблемы физики конденсированных сред.			2 часа. <i>Работа с лекционным материалом. Вспомнить нобелевские премии за физику конденсированных сред.</i>	Оп, Об, ДЗ
2.	Физика химической связи	№2 2 часа Ковалентная связь. Метод молекулярных орбиталей. Молекула водорода. Метод валентных связей, кулоновский и обменный интеграл.			2 часа. <i>Работа с лекционным материалом. Вспомнить квантово-механическое решение задачи – атом водорода.</i>	Оп, Об, ДЗ, КР
		№3 2 часа Гибридизация орбиталей. Межмолекулярные силы. Потенциал Леннард-Джонса. Ковалентно-ионная связь. Ионная связь. Металлическая связь.			2 часа. <i>Работа с лекционным материалом. Вспомнить классификацию металлов и диэлектриков.</i>	
3.	Структура кристаллов	№4-5 4 часа Кристаллическая решетка. Элементарная и примитивная ячейки. Базис. Решетки Браве. Элементы симметрии. Точечная симметрия.			4 часа. <i>Работа с лекционным материалом. Вспомнить элементы точечной симметрии.</i>	Оп, Об, ДЗ, КР, Р
		№6 2 часа Индексы Миллера. Обратная решетка. Дифракция рентгеновского излучения. Условие Брэгга. Вектор рассеяния. Уравнение Лауэ.			2 часа. <i>Работа с лекционным материалом. Вспомнить явление дифракции в оптике.</i>	
		№7-9 6 часов Структурный и атомный факторы. Зоны Бриллюэна. Ячейка Вигнера-Зейтца. Дифракция фотонов, электронов и нейтронов. Примеры дифракции в различных типах конденсированных сред; монокристаллы, порошки, тонкие пленки. Источники рентгеновского излучения.			6 часов. <i>Работа с лекционным материалом. Вспомнить и сравнить свойства фотонов, электронов и нейтронов.</i>	
4.	Фононы	№10 2 часа Одномерная цепь с одинаковыми атомами. Нормальные моды. Волновой вектор. Одинаковые и различные атомы. Понятие фонона. Импульс и квазиимпульс.			2 часа. <i>Работа с лекционным материалом. Вспомнить решение задачи на собственные значения. Вспомнить задачи о связанных маятниках.</i>	Оп, Об, ДЗ, КР
		№11-12 4 часа Одномерная цепь с атомами двух типов. Акустические и оптические фононы. Примеры фононов в 3-х мерных кристаллах. Оптика фононов; резонансное взаимодействие, поляритоны, неупругое рассеяние света. Ангармонизм и время жизни фононов.			4 часа. <i>Работа с лекционным материалом. Вспомнить способы описания нелинейных динамических систем.</i>	

5.	Тепловые свойства	№13 2 часа Теплоемкость. Экспериментальные данные. Закон Дюлонга и Пти. Расчет теплоемкости. Плотность состояний в одномерном и трехмерном случаях.			2 часа. Работа с лекционным материалом. Вспомнить понятие теплоемкости и ее термодинамические характеристики.	Оп, Об, ДЗ, КР
		№14-15 4 часа Модель Дебая. Температура Дебая. Модель Эйнштейна. Теплопроводность. Модель идеального газа. Длина свободного пробега фононов. Температурная зависимость теплопроводности изоляторов. Процессы переброса.			4 часа. Работа с лекционным материалом. Вспомнить явление теплопроводности и основные уравнения теплопроводности.	
6.	Свободный электронный газ	№16-17 4 часа Модель свободного электронного газа. Энергия Ферми. Распределение Ферми-Дирака. Электронный вклад в тепловые свойства металлов. Электрическая проводимость и сопротивление. Закон Ома. Эффект Холла.			4 часа. Работа с лекционным материалом и литературой. Вспомнить определение химического потенциала.	Оп, Об, ДЗ
7.	Электроны в периодическом потенциале	№18 2 часа Теорема Блоха. Модель почти свободных электронов. Энергетические зоны. Металлы и изоляторы. Эффективная масса. Модель сильно-связанных электронов. Дырки.			2 часа. Работа с лекционным материалом. Подготовка к коллоквиуму.	Оп, Об, КР, К

Семинары и лабораторные работы указываются только при их наличии в учебном плане. Остальные позиции заполняются в обязательном порядке.

Предусмотрены следующие формы текущего контроля успеваемости.

- |  |                    |                            |                              |                               |
|--|--------------------|----------------------------|------------------------------|-------------------------------|
| 1. Защита лабораторной работы (ЛР);    | 4. Реферат (Р);    | 7. Рубежный контроль (РК); | 10. Контрольная работа (КР); | 15. Рейтинговая система (РС); |
| 2. Расчетно-графическое задание (РГЗ); | 5. Эссе (Э);       | 8. Тестирование (Т);       | 11. Деловая игра (ДИ);       | 16. Обсуждение (Об).          |
| 3. Домашнее задание (ДЗ);              | 6. Коллоквиум (К); | 9. Проект (П);             | 12. Опрос (Оп);              |                               |

## 9. Место дисциплины в структуре ООП ВПО

1. Дисциплина является дисциплиной профиля (обязательная)
2. Вариативная часть, профессиональный блок, дисциплина профиля (обязательная)
3. Курс выступает базой для следующих курсов магистерской программы «Нелинейная оптика и лазерная физика»: «Взаимодействие излучения с наноструктурированными материалами», «Материалы для органической электроники», «Основы фотоники и оптических технологий», «Физика органических полупроводников», «Терагерцовая оптоэлектроника и молекулярная спектроскопия».

3.1. Для начала освоения данной дисциплины необходимо освоить основные дисциплины бакалавриата по направлению направление 011200 "Физика", в т.ч. «Молекулярная физика», «Квантовая физика» и «Термодинамика и статистическая физика».

3.2. Освоение данной дисциплины необходимо как предшествующее для освоения дисциплин магистерской программы «Нелинейная оптика и лазерная физика»: «Взаимодействие излучения с наноструктурированными материалами», «Материалы для органической электроники», «Основы фотоники и оптических технологий», «Физика органических полупроводников», «Терагерцовая оптоэлектроника и молекулярная спектроскопия», а также научно-исследовательской практики, научно-исследовательской работы, выполнения выпускных квалификационных работ.

## 10. Образовательные технологии

Курс читается с помощью компьютерных презентаций, включающими фото и видео материалы.

## 11. Оценочные средства для текущего контроля успеваемости и промежуточной аттестации

**Текущая аттестация** проводится трижды. Критерии формирования оценки – посещаемость занятий, активность студентов на занятиях, уровень подготовки к лекциям, самостоятельное решение задач, оценки за контрольные работы.

**Примеры задач:**

1. Какая характерная энергия фотонов необходима для наблюдения дифракции в конденсированных средах?
2. Посчитайте максимально возможную плотность упаковки для объемно-центрированной кубической решетки, считая атомы твердыми шарами. Сравните результат со случаем простой(примитивной) кубической решетки.
3. Для двумерной решетки дать индексы Миллера плоскостей, представленным на прилагаемом рисунке.
4. На рисунке показана одномерная решетка. Изобразить обратную решетку и первую зону Бриллюэна.
5. Изобразите законы дисперсии фононов для одномерной цепи с одним атомом в элементарной ячейке, массы атомов отличаются в 2 раза. Как определить скорость звука по закону дисперсии? В какой из цепочек выше скорость звука и почему?
6. На рисунке показаны несколько дисперсионных зависимостей. Для каких плотность состояний будет выше? Какие (квази)частицы могут иметь данные законы дисперсии? Зависит ли плотность состояний от  $k$  для указанных законов дисперсии? Если да, то где она минимальна и максимальна?

**Промежуточная аттестация** проводится на 9 неделе по итогам текущих аттестаций,

включая оценки за контрольные работы. Критерии формирования оценки – уровень знаний пройденной части курса.

Список контрольных вопросов:

1. Что такое молекулярная орбиталь?
2. Что такое гибридизация орбиталей? Какого типа гибридизации вы знаете?
3. В чем сходства и различия методов молекулярных орбиталей и валентных связей? Какие связи они описывают?
4. В чем причины различия энергий ковалентной, ионной и металлической связей?
5. Какова характерная энергия межмолекулярных связей?
6. Какие типы межмолекулярных связей вы знаете?
7. Что такое элементарная ячейка?
8. Прimitивная и элементарная ячейка: что общего и различного?
9. Что такое решетка Браве?
10. Элементарная и примитивная ячейки. Ячейка Вигнера-Зейтца. Базис.
11. Трансляционная симметрия. Оси и плоскости симметрии.
12. Решетки Бравэ.
13. Рентгеновская дифракция (рассеяние).
14. Условия Брэгга. Вектор рассеяния.
15. Обратная решетка.
16. Структурный и атомный факторы.
17. Что такое первая зона Бриллюэна?
18. Что такое фонон?
19. В чем отличие частицы и квазичастицы?
20. Что такое квазиимпульс? Закон его сохранения.
21. В чем отличие акустических и оптических фононов?
22. Отличия продольных и поперечных фононов? Как объяснить разницу их частот?
23. В каких кристаллах возможны оптические фононы?
24. Сравните волновые вектора и частоты фононов и фотонов (для разных диапазонов частот).
25. Могут ли фононы поглощать и излучать электромагнитное излучение? Какие фононы? В каком диапазоне частот?
26. Для каких кристаллов будет отличие диэлектрических проницаемостей на частотах фононов и видимого света? Каково это отличие?
27. На каких частотах и для каких кристаллов может наблюдаться полоса отражения света?
28. Что такое поляритон?
29. Следствия ангармонизма фононов.
30. Какие вы знаете эффекты неупругого рассеяния света на фононах?
31. Что такое плотность состояний? Зависит ли она от размерности системы, размера, закона дисперсии?
32. Что такое теплоемкость? Какие бывают удельные теплоемкости?
33. Чему равна теплоемкость твердых тел в рамках классической модели, основанной на модели идеального газа? Зависит ли она от температуры?
34. Что такое частота Дебая?
35. Как зависит от температуры теплоемкость в модели Дебая?
36. Можно ли описать теплопроводность твердых тел моделью идеального газа?
37. Нужен ли для теплопроводности ангармонизм?
38. Сформируйте приближения модели свободного электронного газа
39. Что такое уровень (энергия) Ферми. Как рассчитать уровень Ферми в модели свободного электронного газа?
40. Что такое температура, волновой вектор, импульс Ферми?
41. Каков вклад электронов в теплоемкость? Как он зависит от температуры?

42. Что такое химический потенциал? Как он связан с энергией Ферми?
43. Как отличается электронная теплопроводность от решеточной? Какая больше и почему? Как они зависят от температуры?
44. Что такое эффект Холла? Что можно узнать о проводнике, измерив его константу Холла и проводимость?
45. Что такое дрейфовая скорость электрона в твердом теле?
46. Что такое подвижность носителей заряда. От чего она зависит в модели Ферми-газа?
47. Как вы понимаете процесс термализации?
48. Какие свойства твердых тел не может описать модель свободного электронного газа (Ферми газа)?
49. Докажите теорему Блоха.
50. Приближения модели слабо-связанных электронов. Что объясняет эта модель?
51. Что такое эффективная масса. Может ли она быть больше/меньше массы. свободного электрона? Может ли она быть отрицательной?
52. Металлы и изоляторы в зонной модели.
53. Что такое энергетические зоны?
54. Чем определяется щель (запрещенная зона)?
55. Что объясняет модель сильно-связанных электронов?
56. Что такое дырка? Каков заряд, импульс дырки?

Списки тем для докладов и презентаций:

1. Полупроводниковые лазеры.
2. Ультрахолодные атомы и физика твердого тела.
3. Экситоны.
4. Современные методы рентгеноструктурного анализа.
5. Зонная и прыжковый механизмы транспорта зарядов в твердых телах.
6. Материалы для нелинейной оптики.в
7. Методы спектроскопии комбинационного рассеяния для исследования конденсированных сред.
8. Методы терагерцовой спектроскопии для исследования конденсированных сред.
9. Методы зондовой микроскопии.
10. Методы фотоэлектронной спектроскопии.
11. Методы электронной микроскопии.
12. Сверхпроводимость.

**Итоговая аттестация — экзамен.**

Вопросы теоретического минимума:

1. Метод валентных связей. Метод молекулярных орбиталей. Энергия диссоциации.
2. Типы межмолекулярных связей.
3. Кристаллическая решетка. Примитивная ячейка.
4. Базис. Ячейка Вигнера-Зейтца. Решетка Браве. Индексы Миллера.
5. Обратная решетка. Зона Бриллюэна
6. Фононы. Квазичастицы. Квазиимпульс. Групповая скорость квазичастицы.
7. Оптические и акустические фононы.
8. Плотность состояний.
9. Решеточная и электронная теплоемкость/теплопроводность, их зависимость от температуры.
10. Модель Дебая. Температура Дебая.
11. Модель свободного электронного газа, ее приближения.
12. Энергия(уровень) Ферми. Химический потенциал. Распределение Ферми-Дирака.

13. Эффективная масса
14. Закон Ома.
15. Эффект Холла.
16. Электрон проводимости. Понятие дырки.
17. Теорема Блоха. Блоховские осцилляции.
18. Модель почти свободных электронов.
19. Зонная структура. Запрещенные и разрешенные зоны.
20. Диэлектрики. Полупроводники. Металлы.

Перечень вопросов к экзамену:

1. Молекулярные орбитали. Гибридизация орбиталей и ее типы.
2. Метод молекулярных орбиталей. Химическая связь.
3. Метод валентных связей. Химическая связь.
4. Типы межмолекулярных связей.
5. Примитивная и элементарная ячейки. Ячейка Вигнера-Зейтца. Базис. Решетка Браве.
6. Трансляционная симметрия. Оси и плоскости симметрии.
7. Рентгеновская дифракция. Условия Брэгга. Вектор рассеяния.
8. Обратная решетка.
9. Структурный и атомный факторы.
10. Зоны Бриллюэна.
11. Акустические и оптические фононы. Квазиимпульс. Закон сохранения квазиимпульса.
12. Взаимодействие фононов с электромагнитным излучением. Поляритоны.
13. Ангармонизм фононов. Процессы переброса. Явления, связанные с ангармонизмом фононов.
14. Рассеяние света на фононах. Комбинационное рассеяние и рассеяние Мандельштамма-Бриллюэна.
15. Плотность состояний.
16. Теплоемкость. Закон Дюлонга и Пти. Модель Дебая. Частота Дебая. Температурная зависимость теплоемкости.
17. Теплопроводность изоляторов и ее температурная зависимость.
18. Плотность состояний. Одномерный и трехмерный случаи.
19. Модель свободного электронного газа. Уровень Ферми, волновой вектор Ферми, квазиимпульс Ферми, температура Ферми. Химический потенциал.
20. Электронный вклад в теплоемкость. Его зависимость от температуры.
21. Закон Ома. Эффект Холла.
22. Движение носителей заряда в постоянном электрическом поле (модель свободного электронного газа). Электрическая проводимость. Подвижность носителей заряда. Дрейфовая скорость. Зависимость сопротивления от температуры.
23. Теорема Блоха.
24. Модель почти свободных электронов. Энергетические зоны.
25. Модель сильно-связанных электронов. Энергетические зоны.
26. Металлы и изоляторы.
27. Понятие дырки.
28. Эффективная масса носителей заряда.

**12. Учебно-методическое обеспечение дисциплины**

Основная литература

1. Ч. Киттель Ч. Введение в физику твердого тела. М.: Наука, 1978.
2. А.С. Давыдов. Теория твердого тела. М.: Наука, 1976.
3. В.Л. Бонч-Бруевич, С.Г. Калашников. Физика полупроводников. М.: Наука, 1977.



4. Дж. Займан. Принципы теории твердого тела. М.: Мир, 1966.
5. Ч. Киттель. Квантовая теория твердых тел. М.: Наука, 1967.

#### Дополнительная литература

1. А.И. Ансельм, Введение в теорию полупроводников (2-е изд.). М.: Наука, 1978
2. М.А. Порай-Кошиц, Основы структурного анализа химических соединений (изд. 2-е, перер. и доп.). М.: Высшая школа, 1989.
3. Ч. Коулсон, Валентность, М.: Мир, 1965.
4. Дж. Маррел, С.Кеттл, Дж. Теддер, Химическая связь, М.: Химия, 1980.
5. Р. Фейнман, Р. Лейтон, М. Сэндс, Фейнмановские лекции по физике: Т.8,9: Квантовая механика. М.: URSS, 2014.

#### Периодическая литература

1. Physical Review B, <http://journals.aps.org/prb/>
2. Journal of Physics: Condensed Matter, <http://iopscience.iop.org/journal/0953-8984>
3. Физика твердого тела, <http://journals.ioffe.ru/journals/1>
4. Физика и техника полупроводников, <http://journals.ioffe.ru/journals/2>

#### Интернет-ресурсы

1. Википедия (<http://ru.wikipedia.org>)
2. <http://eqworld.ipmnet.ru/ru/library/physics/solidstate.htm>

Методические указания к лабораторным занятиям —

Методические указания к практическим занятиям —

### **13. Материально-техническое обеспечение**

В соответствии с требованиями п.5.3. образовательного стандарта МГУ по направлению подготовки «Физика».

Курс может быть прочитан в любой аудитории при наличии: работающих электрических розеток, компьютера, проектора, экрана, учебной доски.