

Федеральное государственное бюджетное
образовательное учреждение высшего образования
«Московский государственный университет имени М.В.Ломоносова»
Физический факультет

УТВЕРЖДАЮ

И.о. декана физического факультета МГУ,
профессор, д.ф.-м.н.



В.В. Белокуров /

«21» января 2024 г.

РАБОЧАЯ ПРОГРАММА ДИСЦИПЛИНЫ (МОДУЛЯ)

Физика конденсированного состояния

Condensed State Physics

Программа (программы) подготовки
научных и научно-педагогических кадров в аспирантуре
Физика конденсированного состояния
(103-01-00-138-фмн)

Москва 2024

Рабочая программа дисциплины разработана в соответствии с Приказом по МГУ от 24 ноября 2021 года № 1216 «Об утверждении Требований к основным программам подготовки научных и научно-педагогических кадров в аспирантуре, самостоятельно устанавливаемых Московским государственным университетом имени М.В.Ломоносова».

1. Краткая аннотация:

Название дисциплины: Физика конденсированного состояния.

Цель изучения дисциплины – расширение и углубление знаний о современном состоянии и тенденциях развития в области физики конденсированного состояния.

2. Уровень высшего образования - подготовка кадров высшей квалификации.

3. Научная специальность: 1.3.8 Физика конденсированного состояния; область науки: естественные науки.

4. Место дисциплины (модуля) в структуре Программы аспирантуры: дисциплины (модули), направленные на подготовку к кандидатским экзаменам - Дисциплина, совпадающая с наименованием научной специальности.

5. Объем дисциплины (модуля) в зачетных единицах с указанием количества академических или астрономических часов, выделенных на контактную работу обучающихся с преподавателем (по видам учебных занятий) и на самостоятельную работу обучающихся:

Объем дисциплины (модуля) составляет 3 зачетных единицы, всего 108 часов, из которых 54 часа составляет контактная работа аспиранта с преподавателем (32 часа занятия лекционного типа, 22 часа мероприятия текущего контроля успеваемости и промежуточной аттестации), 54 часа составляет самостоятельная работа учащегося.

6. Входные требования для освоения дисциплины (модуля), предварительные условия.

Необходимы знания высшей математики и общей физики в объеме курсов, преподаваемых на физических специальностях классических университетов, полученных на предыдущих уровнях высшего образования.

7. Содержание дисциплины (модуля), структурированное по темам

Наименование и краткое содержание разделов и тем дисциплины (модуля), форма промежуточной аттестации по дисциплине (модулю)	Всего (часы)	В том числе								
		Контактная работа (работа во взаимодействии с преподавателем), часы из них						Самостоятельная работа обучающегося, часы из них		
		Занятия лекционного типа	Занятия семинарского типа	Групповые консультации	Индивидуальные консультации	Учебные занятия, направленные на проведение текущего контроля успеваемости, промежуточной аттестации	Всего	Выполнение домашних заданий	Подготовка к коллоквиумам	Всего
Тема 1. Силы связи в твердых телах и электронная структура атомов Типы сил связи в конденсированном состоянии: ван-дер-ваальсова связь, ионная связь, ковалентная связь, металлическая связь. Химическая связь и ближний порядок. Химическая связь и валентность.	6	2				1	3	2	1	3
Тема 2. Кристаллическая структура вещества Структура вещества с ненаправленным взаимодействием. Примеры	6	2				1	3	2	1	3

кристаллических структур, отвечающих плотным упаковкам шаров: простая кубическая, ОЦК, ГЦК, ГПУ, структура типа CsCl, типа NaCl, структура типа перовскита CaTiO_3. Основные свойства ковалентной связи. Структура веществ с ковалентными связями. Структура веществ типа селена. Гибридизация атомных орбиталей в молекулах и кристаллах. Структура типа алмаза и графита.										
Тема 3. Симметрия твердых тел Кристаллические и аморфные твердые тела. Трансляционная инвариантность. Базис и кристаллическая структура. Элементарная ячейка. Ячейка Вигнера - Зейтца. Решетка Браве. Обозначения узлов, направлений и плоскостей в кристалле. Обратная решетка, ее свойства. Зона Бриллюэна.	7	2				2	4	2	1	3
Тема 4. Элементы симметрии кристаллов Повороты, отражения, инверсия, инверсионные повороты, трансляции. Операции (преобразования) симметрии. Элементы теории групп, группы симметрии. Возможные порядки поворотных осей в кристалле.	8	2				2	4	2	2	4

Пространственные и точечные группы (кристаллические классы). Классификация решеток Браве.										
Тема 5. Дефекты в твердых телах Точечные дефекты, их образование и диффузия. Вакансии и межузельные атомы. Дефекты Френкеля и Шоттки. Линейные дефекты. Краевые и винтовые дислокации. Роль дислокаций в пластической деформации. Двумерные дефекты: плоскости двойникования, дефекты упаковки	6	2				1	3	2	1	3
Тема 6. Дифракция в кристаллах Распространение волн в кристаллах. Дифракция рентгеновских лучей, нейтронов и электронов в кристалле. Упругое и неупругое рассеяние, их особенности. Брэгговские отражения. Атомный и структурный факторы. Дифракция в аморфных веществах.	8	2				2	4	2	2	4
Тема 7. Колебания решетки Колебания кристаллической решетки. Уравнения движения атомов. Простая и сложная одномерные цепочки атомов. Закон дисперсии упругих волн.	7	2				2	4	2	1	3

Акустические и оптические колебания. Квантование колебаний. Фононы. Электрон-фононное взаимодействие.										
Тема 8. Упругие свойства твердых тел Деформация твердых тел. Закон Гука. Модуль Юнга и модуль сдвига. Коэффициент Пуассона. Тензор деформации и напряжения. Модули упругой жесткости. Анизотропное отношение.	6	2				1	3	2	1	3
Тема 9. Тепловые свойства твердых тел Теплоемкость твердых тел. Решеточная теплоемкость. Электронная теплоемкость. Температурная зависимость решеточной и электронной теплоемкости. Классическая теория теплоемкости. Закон равномерного распределения энергии по степеням свободы в классической физике. Границы справедливости классической теории. Квантовая теория теплоемкости по Эйнштейну и Дебаю. Температура Дебая.	6	2				1	3	2	1	3
Тема 10. Тепловое расширение твердых тел. Анггармонические колебания.	6	2				1	3	2	1	3

Теплопроводность решеточная и электронная. Закон Видемана - Франца для электронной теплоемкости и теплопроводности.										
Тема 11. Электронные свойства твердых тел Основные экспериментальные факты. Проводимость, эффект Холла, термоЭДС, фотопроводимость, оптическое поглощение. Трудности объяснения этих фактов на основе классической теории Друде. Основные приближения зонной теории. Граничные условия Борна - Кармана. Теорема Блоха. Блоховские функции. Квазиимпульс. Зоны Бриллюэна. Энергетические зоны. Брэгговское отражение электронов при движении по кристаллу. Полосатый спектр энергии. Приближение сильносвязанных электронов. Связь ширины разрешенной зоны с перекрытием волновых функций атомов. Закон дисперсии. Тензор обратных эффективных масс. Приближение почти свободных электронов. Брэгговские отражения электронов. Заполнение энергетических зон электронами. Поверхность Ферми.	11	4				1	5	4	2	6

Плотность состояний. Металлы, диэлектрики и полупроводники. Полуметаллы.										
Тема 12. Магнитные свойства твердых тел Намагниченность и восприимчивость. Диамагнетики, парамагнетики и ферромагнетики. Законы Кюри и Кюри - Вейсса. Парамагнетизм и диамагнетизм электронов проводимости. Природа ферромагнетизма. Фазовый переход в ферромагнитное состояние. Роль обменного взаимодействия. Точка Кюри и восприимчивость ферромагнетика. Ферромагнитные домены. Причины появления доменов. Доменные границы (Блоха, Нееля). Антиферромагнетики. Магнитная структура. Точка Нееля. Восприимчивость антиферромагнетиков. Ферромагнетики. Магнитная структура ферромагнетиков. Спиновые волны, магноны. Движение магнитного момента в постоянном и переменном магнитных полях. Электронный парамагнитный резонанс. Ядерный магнитный резонанс. Эффект Мёссбауэра.	11	4				1	5	4	2	6

Тема 13. Оптические свойства твердых тел Комплексная диэлектрическая проницаемость и оптические постоянные. Коэффициенты поглощения и отражения. Соотношения Крамерса-Кронига. Поглощения света в полупроводниках (межзонное, примесное поглощение, поглощение свободными носителями, решеткой). Определение основных характеристик полупроводника из оптических исследований.	8	2				1	3	3	2	5
Тема 14. Магнитооптические свойства твердых тел Магнитооптические эффекты (эффекты Фарадея, Фохта и Керра). Проникновение высокочастотного поля в проводник. Нормальный и аномальный скин-эффекты. Толщина скин-слоя.	8	2				1	3	3	2	5
Промежуточная аттестация: <i>допуск к кандидатскому экзамену</i>	4					4				
Итого	108	32				22	54	34	20	54

8. Образовательные технологии

Используемые формы и методы обучения: лекции и семинарские занятия, самостоятельная работа аспирантов.

В процессе преподавания дисциплины преподаватель использует как классические формы и методы обучения (лекции и семинарские занятия), так и активные методы обучения.

При проведении лекционных занятий преподаватель использует при необходимости аудиовизуальные, компьютерные и мультимедийные средства обучения, а также демонстрационные и наглядно-иллюстрационные (в том числе раздаточные) материалы.

9. Учебно-методические материалы для самостоятельной работы по дисциплине (модулю): аспирантам предоставляется программа курса, план занятий и задания для самостоятельной работы, презентации к лекционным занятиям.

10. Ресурсное обеспечение:

Основная литература

1. Киттель Ч. Введение в физику твердого тела. М.: Мир. 1978.
2. Займан Дж. Принципы теории твердого тела. М.: Мир. 1974.
3. Ашкрофт Н., Мермин Н. Физика твердого тела. Т.1, Т.2. М.: Мир. 1979.
4. Павлов П.В., Хохлов А.Ф. Физика твердого тела. М.: Высш. шк. 2000.
5. Жданов Г.С., Хунджуа А.Г. Физика реальных кристаллов М.: URSS. 2023.
6. Илюшин А.С., Орешко А.П. Дифракционный структурный анализ. Ч.1, Ч.2. М.: Юрайт. 2016.

Дополнительная литература

1. Шульце Металлофизика. М. Мир. 1971.
2. Слэтер Дж. Диэлектрики, полупроводники, металлы М.: Мир. 1969.
3. Штремель М.А. Прочность сплавов М.: МИСИС 1999.
4. Голдсмит Г.Дж. Задачи по физике твердого тела М.: Наука. 1976.

Перечень ресурсов Интернет необходимых для освоения дисциплины:

1. <http://kfft.phys.msu.ru/>
2. <https://rus-physical-enc.slovaronline.com/search?s=твердое+тело>

11. Язык преподавания – русский.

12. Преподаватели:

Д.ф.-м.н., профессор Хунджуа А.Г. a-mail: khundjua@mail.ru, тел.: +79636330142.

Фонды оценочных средств, необходимые для оценки результатов обучения

Образцы домашних заданий:

1. В модели Друде вероятность того, что электрон испытывает столкновение за бесконечно малый промежуток времени dt равна dt/τ . Найти вероятность того, что электрон, случайно выбранный в данный момент времени, не испытал столкновения в предыдущие t секунд. Является ли базоцентрированная кубическая структура решеткой Бравэ?

2. Какова решетка Бравэ, образуемая всеми точками с декартовыми координатами (p_1, p_2, p_3), когда p_i – имеют одинаковую четность?
3. Показать, что решетка, обратная ОЦК, является ГЦК, и наоборот.
4. Найти идеальное отношение базисных векторов "a/c" для гексагональной плотноупакованной структуры.
5. Чему равно координационное число для гексагональной плотноупакованной структуры с идеальным отношением базисных векторов "a/c" и при отклонении его от идеального значения в ту и в другую сторону?
6. Найдите коэффициент упаковки системы плотноупакованных сфер для ГЦК, ОЦК, примитивной кубической и решетки алмаза.
7. Показать, что для случая одномерной решетки существование энергетических разрывов на границе зоны Бриллюэна эквивалентно условию брэгговского отражения электронных волн.
8. Найти индексы плоскостей, ограничивающих первую зону Бриллюэна для кристалла, имеющего ГПУ структуру.
9. Покажите, что в кристалле одновалентного элемента с ГЦК решеткой Бравэ отношение радиуса сферы Ферми свободных электронов к расстоянию от центра до грани зоны в направлении [111] составляет $(16/3\pi^2)^{1/6}$.
10. Найти отношение числа дефектов по Шоттки к числу дефектов по Френкелю при комнатной температуре, если энергия образования вакансии равна 0,75 эВ, а энергия образования дефекта внедрения 3 эВ.
11. Оценить величину коэффициента диффузии радиоактивного натрия в обычном натрии при комнатной температуре, если высота потенциального барьера, который надо преодолеть атому, чтобы перейти в новое положение равновесия, равна 0,5 эВ (частота колебаний атома около положения равновесия 10^{12} Гц).
12. Кубический кристалл подвергнут растяжению в направлении [100]. Найти выражение для коэффициента Пуассона через упругие постоянные и модули упругости.
13. Кубический кристалл подвергнут гидростатическому сжатию. Показать, что модуль всестороннего сжатия $B = -V (\partial P / \partial V)_T$ связан с упругими постоянными соотношением: $B = (c_{11} + 2c_{12})/3$.
14. Определить закон дисперсии упругих поверхностных волн (волн Рэлея).
15. Показать, что волна кручения распространяется по стержню со скоростью $v = \rho \mu / \rho$, где $\mu = E/2(1 + \sigma)$ — модуль сдвига.
16. Оценить скорость электрона на поверхности Ферми в металле.
17. В приближении свободных электронов найти максимальную энергию электронов в натрии при $T = 0$ К.
18. Экспериментальное значение энергии Ферми для Li при $T \rightarrow 0$ равно 3,5 эВ. Каково значение эффективной массы электронов? Сравнить эту величину с массой свободного электрона.
19. Каковы вероятности того, что при комнатной температуре электрон в металле займет состояние, расположенное на 0,1 эВ выше (а) и ниже (б) уровня Ферми?

Вопросы для промежуточной аттестации – зачета:

1. Жидкие кристаллы
2. Ковалентная, ионная, металлическая связь
3. Обратная решетка.
4. Обозначения Фойгхта.
5. Тепловое расширение
6. Модель Дебая для теплоемкости.
7. Жидкие кристаллы

8. Ионная связь.
9. Принцип плотной упаковки
10. Структуры элементов *B* подгрупп.
11. Обратная решетка.
12. Анизотропное отношение
13. Обозначения Фойгхта.
14. Физический смысл упругих констант.
15. Тепловое расширение.

16. Взаимодействие излучения с колебаниями решетки.

17. Распределение Ферми – Дирака
18. Эффективная масса электрона.
19. Одно- двух- трех четырехвалентные металлы.
20. Алмазоподобные структуры
21. Молекулярные кристаллы
22. Схема заполнения квантовых ячеек.
23. Синглетные, дублетные и триплетные состояния.
24. Полный орбитальный и спиновый моменты.
25. Правила Хунда.
26. Энергия сродства к электрону и электроотрицательность.
27. Магнитострикция.
28. Диамагнетизм
29. Ферромагнетизм
30. Спектры поглощения металлов.
31. Поляризуемость диэлектриков.
32. Восходящая диффузия

Методические материалы для проведения процедур оценивания результатов обучения

Зачет проходит по билетам, включающем 3 вопроса. Уровень знаний аспиранта по каждому вопросу на «отлично», «хорошо», «удовлетворительно», «неудовлетворительно». В случае если на все вопросы был дан ответ, оцененный не ниже чем «удовлетворительно», аспирант получает общую оценку «зачтено».

Шкала оценивания знаний, умений и навыков

Результат освоения дисциплины	Критерии оценивания знаний, умений и навыков			
	2/ не зачтено	3/ зачтено	4/ зачтено	5/ зачтено
Знания	Отсутствие знаний основных законов физики конденсированного состояния	В целом успешные, но не систематические знания основных законов физики конденсированного состояния	В целом успешное, но содержащее отдельные пробелы знания основных законов физики конденсированного состояния	Успешные и систематические знания основных законов физики конденсированного состояния
Умения	Отсутствие умения применять знания	В целом успешное, но не систематическое	В целом успешное, но содержащее отдельные	Успешное и систематическое

	основных законов физики конденсированного состояния для решения научных задач	применять знания основных законов физики конденсированного состояния для решения научных задач	пробелы умение применять знания основных законов физики конденсированного состояния для решения научных задач	умение применять знания основных законов физики конденсированного состояния для решения научных задач
Навыки	Отсутствие / фрагментарное владение навыками решения научных задач в области физики конденсированного состояния	В целом успешное, но не систематическое владение навыками решения научных задач в области физики конденсированного состояния	В целом успешное, но содержащее отдельные пробелы владение навыками решения научных задач в области физики конденсированного состояния	Успешное и систематическое владение навыками решения научных задач в области физики конденсированного состояния