

## **Физика конденсированного состояния и наносистем**

Составитель д.ф.-м.н., проф. А. Н. Васильев (физический факультет МГУ)

Д.ф.м.н., в.н.с. Людмила Ивановна Рябова (химический факультет МГУ)

- Лекции и контрольные занятия 1 – 9

К.ф.м.н., доц. Владимир Геннадиевич Кытин (физический факультет МГУ)

- Лекции и контрольные занятия 10 – 16

Д.ф.-м.н. Казначеев Анатолий Викторович (ИНЭОС РАН)

- Лекции и контрольные занятия 17 – 20

К.ф.м.н., с.н.с. Мария Михайловна Маркина

- Лекции и контрольные занятия 21 – 27

**Лекция 1.** Стационарные состояния и энергетический спектр электронов в кристалле. Адиабатическое приближение. Одноэлектронное приближение (метод Хартри-Фока). Самосогласованное поле. Элементарные возбуждения (квазичастицы). Функция Блоха. Обратная решетка.

**Лекция 2.** Периодичность волновых функций и энергий по квазиволновому вектору. Приближение сильно связанных электронов. Приближение слабой связи. Потенциал Кронига-Пенни. Зоны Бриллюэна. Циклические граничные условия Кармана-Борна.

**Лекция 3.** Метод эффективной массы. Эффективная масса как характеристика закона дисперсии. Понятие дырки. Определение эффективных масс электронов и дырок методом циклотронного резонанса. Водородоподобные примесные центры. Мелкие и глубокие примесные уровни в полупроводниках.

**Лекция 4.** Контрольное занятие

**Лекция 5.** Функция плотности состояний для квадратичного изотропного и неизотропного законов дисперсии. Эффективная масса плотности состояний. Функция распределения Ферми. Вырожденная и невырожденная статистики носителей заряда. Зависимость положения уровня Ферми от температуры.

**Лекция 6.** Электропроводность и подвижность. Механизмы рассеяния носителей заряда. Эффект Холла. Случаи монополярной и биполярной проводимости.

**Лекция 7.** Дебаева длина экранирования. Обедненный слой Шоттки. Работа выхода и контактная разность потенциалов. Запирающий и антизапирающий слои. Барьер Шоттки. p-n переходы в полупроводниках.

**Лекция 8.** Колебания одномерной цепочки из одинаковых атомов и атомов двух типов. Акустическая и оптическая ветви колебаний. Теплоемкость решетки и электронного газа. Модель Эйнштейна. Модель Дебая.

**Лекция 9.** Контрольное занятие

**Лекция 10.** Особенности физики низкоразмерных структур. Маштабы определяющие размерность физической системы. Размерное квантование. Энергетический спектр и плотность состояний электронов в двумерных, одномерных и нуль-мерных системах. Модель одномерного, двумерного и трехмерного потенциального ящика. Примеры

низкоразмерных структур: гетеропереходы, квантовые ямы, квантовые нити и квантовые точки.

**Лекция 11.** Свойства двумерных электронов. Особенности экранирования заряда в двумерном электронном газе. Плазменные и магнетоплазменные колебания. Краевые магнетоплазменные колебания. Энергетический спектр двумерных электронов в квантующем магнитном поле. Эффект Шубникова – де Газаа. Квантовый эффект Холла.

**Лекция 12.** Квантовые поправки к проводимости двумерного электронного газа. Слабая локализация. Квантовая поправка к проводимости связанная с электрон - электронным взаимодействием. Магнетосопротивление в области действия квантовых поправок.

**Лекция 13.** Методы получения квантовых нитей и квантовых точек. Упругое и неупругое рассеяние электронов в одномерных и нульмерных системах. Особенности оптических свойств квантовых нитей и квантовых точек. Модификация энергетического спектра электронов за счет обменного взаимодействия в квантовых нитях и точечных контактах.

**Лекция 14.** Пирозлектрики и сегнетоэлектрики. Природа спонтанной поляризации в сегнетоэлектриках. Доменная структура в сегнетоэлектриках. Особенности фазовых диаграмм сегнетоэлектрических материалов.

**Лекция 15.** Двумерные, квазидвумерные и квазиодномерные кристаллы и полимеры. Графен, графит, интеркалированные соединения графита. Кристаллы  $V_2VI_3$ . Трехмерный аналог квантового эффекта Холла. Переход Пайэрлса. Солитоны и поляроны в полиацетилене.

**Лекция 16.** Контрольное занятие

**Лекция 17.** Жидкие кристаллы – как особый тип наноструктурированных систем. Термотропные, лиотропные и полимерные жидкие кристаллы. Жидкокристаллические фазы: нематическая, холестерическая и смектические мезофазы. Параметр порядка в жидких кристаллах и фазовый переход нематическая – изотропная фазы: основы теории Онзагера и Майера – Заупе. Температурные интервалы существования жидкокристаллических фаз.

**Лекция 18.** Равновесные физические свойства жидких кристаллов: анизотропия диэлектрической проницаемости и магнитной восприимчивости, двойное лучепреломление, ориентационная упругость, флексоэлектрические коэффициенты. Ориентация жидких кристаллов на поверхности. Влияние электрического и магнитного полей на жидкие кристаллы. Переход Фредерикса – основное физическое явление, используемое в работе жидкокристаллических индикаторов. Особенности электрооптики жидких кристаллов: индикаторы, модуляторы света, эффект гость – хозяин, эффект переключения цвета. Электрооптическая ячейка.

**Лекция 19.** Композитные материалы: жидкие кристаллы, диспергированные в полимеры и жидкие кристаллы, стабилизированные полимерными сетками, сравнительный анализ их надмолекулярных структур. Электрооптика этих материалов: рассеяние, двулучепреломление, времена включения и выключения. Динамические свойства жидких кристаллов – уравнения движения и коэффициенты вязкости. Периодические микроструктуры в жидких кристаллах: флексоэлектрические домены, магнетогидродинамические домены, электрогидродинамические домены.

## **Лекция 20.** Контрольное занятие

**Лекция 21.** Основные типы магнитных состояний вещества. Изолированные магнитные ионы. Парамагнетизм и диамагнетизм. Парамагнетизм электронов проводимости (парамагнетизм Паули). Пороговый характер ферромагнетизма в металлах, критерий Стокера, сильные и слабые ферромагнетики. Энергия магнитного взаимодействия, параметр обменного взаимодействия  $J$ , его знак. Косвенный обмен и РККИ взаимодействие. Функция Рудермана-Киттеля.

**Лекция 22.** Прямое и не прямое обменное взаимодействие. Влияние кристаллического поля на магнитные ионы. Расщепление уровней в кристаллическом поле. Расщепление  $d$ -орбиталей в случае октаэдра и тетраэдра. Кристаллические поля различной симметрии. Концепция локализованного магнетизма. Соединения со структурой перовскита, шпинели, рутила, граната. Металлооксиды. Суперобмен через ионы кислорода. Правила Гуденафа-Канамори-Андерсена. Двойной обмен Зинера.

**Лекция 23.** Основное состояние твердого тела. Зарядовое орбитальное и магнитное упорядочение. Магнетизм и эффект Яна-Теллера. Спиновое и орбитальное вырождение. Ян-Теллеровские ионы. Эффект в случае одиночного иона – стабилизация одной из орбиталей с понижением симметрии кристалла. Кооперативный эффект Яна-Теллера, структурные фазовые переходы. Ферро- и антиферро-упорядочение орбиталей соседних ионов. Учет обменного взаимодействия. Модель Хаббарда. Двукратное и трехкратное вырождение орбиталей.

**Лекция 24.** Магнитное упорядочение. Законы Кюри и Кюри-Вейсса. Формирование магнитного порядка, ферромагнитное упорядочение. Доменная структура ферромагнетика. Антиферромагнитное упорядочение. Поведение магнитной восприимчивости и намагниченности выше и ниже фазового перехода. Спин флорп и спин-флип переходы. Ферримагнетизм. Взаимодействие магнитных подрешеток. Температурная зависимость магнитной восприимчивости ферримагнетика. Спонтанная намагниченность ферримагнетика. Обращение намагниченности.

**Лекция 25.** Различные механизмы формирования основного состояния в низкоразмерных металлооксидах. Квазиодномерные магнитные системы. Системы со спиновой щелью. Структура и свойства спин-Пайерлсовского магнетика  $\text{CuGeO}_3$ . Формирование немагнитного основного состояния в результате магнитоупругого взаимодействия в цепочке спинов  $S = 1/2$ . Зарядовое упорядочение. Переход Вервея в  $\text{Fe}_3\text{O}_4$ . Двойной обмен Зинера. Структура и термодинамические свойства  $\text{Fe}_3\text{O}_4$ . Зарядовое упорядочение в манганитах. Зарядовое упорядочение в  $\text{NaV}_2\text{O}_5$ . Формирование димеров и переход в немагнитное основное состояние в результате орбитального упорядочения в  $\text{NaTiSi}_2\text{O}_6$ .

**Лекция 26.** Основные свойства сверхпроводников. Эффект Мейснера. Сверхпроводники первого и второго рода. Туннельные явления в сверхпроводниках. Диборид магния. Сверхпроводимость пниктидов. Высокотемпературная сверхпроводимость в купратах.

## **Лекция 27.** Контрольное занятие

### **Основная литература**

1. Ч.Киттель “Введение в физику твердого тела”, Москва, Наука, 1978
2. В. А. Кульбачинский "Двумерные одномерные, нульмерные структуры и сверхрешетки", Москва, Физический факультет МГУ 1998 г., 161 с.
3. Е.С. Боровик, В.В. Еременко, А.С. Мильнер Лекции по магнетизму, 2005
4. И. С. Рез, Ю. М. Поплавко "Диэлектрики: основные свойства и применение в электронике" Москва, Радио и связь, 1989 г., 288 с.

### **Дополнительная литература**

5. Ч.Уэрт, Р.Томсон “Физика твердого тела”, Москва, Мир, 1969
6. Н.Б.Брандт, С.М.Чудинов “Электроны и фононы в металлах”, Изд-во МГУ, 1989
7. В.Л.Бонч-Бруевич, С.Г.Калашников “Физика полупроводников”, Москва, Наука, 1977
8. Дж.Блейкмор “Физика твердого тела”, Москва, Мир,1988.
9. Г.С. Кринчик Физика магнитных явлений, 1976
10. Н. Б. Брандт, В. А. Кульбачинский "Квазичастицы в физике конденсированного состояния" Москва, Физматлит, 2007 г., 632 с.
11. М. А. Херман, "Полупроводниковые сверхрешетки", М. Мир. 1979 г.
12. А. С. Сидоркин "Доменная структура в сегнетоэлектриках и родственных материалах", Москва, Физматлит, 2000 г., 240 с.