



РАБОЧАЯ ПРОГРАММА ДИСЦИПЛИНЫ

2.1.1.4 Физика конденсированного состояния

Шифр и наименование группы научных специальностей

1.3. Физические науки

Шифр и наименование научной специальности

1.3.8. Физика конденсированного состояния

Форма обучения: очная

Институт: математики, естествознания и техники

Кафедра: физики, радиотехники и электроники

Трудоёмкость в ЗЕТ - 4

Трудоёмкость в часах – 144

Разработчик: к.ф.-м.н., доц. Кузнецов Д.В.

Общие положения

Рабочая программа дисциплины «Физика полупроводников» разработана в соответствии с федеральными государственными требованиями, утвержденными приказом Министерства образования и науки высшего образования Российской Федерации от 20 октября 2021 г. № 951.

1. ЦЕЛИ И ЗАДАЧИ УЧЕБНОЙ ДИСЦИПЛИНЫ

Цель дисциплины:

теоретическое и практическое изучение основ физики конденсированного состояния, включающих общие представления об атомной структуре твердого тела, типах взаимодействия между частицами твердых тел, об энергетическом спектре носителей заряда, об основных зависимостях между атомно-электронной структурой твердых тел, их составом и различными физическими свойствами – механическими, тепловыми, электрическими, магнитными, оптическими и другими.

Задачи изучения дисциплины:

- формирование у обучающихся в аспирантуре систематических знаний по основным разделам физики конденсированного состояния необходимых для выполнения самостоятельных научных исследований, знакомство с основными методами исследования и расчета физических характеристик твердых тел;
- расширение научного кругозора и эрудиции аспирантов на базе изучения фундаментальных законов физики твердых тел, и способов практического использования их свойств;
- развитие понимания взаимосвязи структуры и состава твердых тел, и многообразия их физических свойств;
- привитие аспирантам навыков: практического овладения методами теоретического описания и основными теоретическими моделями твердого тела, постановки физического эксперимента по изучению свойств твердых тел и основными экспериментальными методиками.

2. МЕСТО ДИСЦИПЛИНЫ В СТРУКТУРЕ ПРОГРАММЫ АСПИРАНТУРЫ

Дисциплина относится к образовательному компоненту программы подготовки научных и научно-педагогических кадров в аспирантуре.

3. ТРЕБОВАНИЯ К РЕЗУЛЬТАТАМ ОСВОЕНИЯ ДИСЦИПЛИНЫ

По окончании изучения дисциплины аспиранты должны:

знать:

- современные тенденции и проблематику научных исследований в области физики конденсированного состояния;

- методологические подходы к планированию и осуществлению научных исследований в области физики конденсированного состояния;
- основы оценки качества научных исследований в области физики конденсированного состояния.

уметь:

- планировать и осуществлять самостоятельную научно-исследовательскую деятельность в области физики конденсированного состояния;
- составлять и оформлять программу научного исследования, отчетную документацию по итогам проведения научно-исследовательской деятельности;
- осуществлять внедрение результатов собственной научно-исследовательской деятельности в практику в области физики конденсированного состояния

владеть:

- навыками планирования и выполнения самостоятельной научно-исследовательской деятельности в области физики конденсированного состояния;
- методикой планирования и проведения опытно-экспериментальной работы в области физики конденсированного состояния;
- навыками оформления научной работы, ее презентации и защиты в области физики конденсированного состояния.

4. СТРУКТУРА, ОБЪЕМ И СОДЕРЖАНИЕ ДИСЦИПЛИНЫ

4.1. Объем дисциплины и виды учебной работы

Трудоёмкость в ЗЕТ – 4

Трудоёмкость в часах – 144

Лекций – 36 ч.

Практических занятий – 36 ч.

Самостоятельная работа – 63 ч.

Контроль – 9 ч.

4.2. Разделы дисциплины и виды занятий

№	Наименование раздела дисциплины	Виды учебной нагрузки и их трудоемкость, академ. часы			
		аудиторные			
		Всего часов	Лекции	практические (лабораторные)	
1	Раздел 1. Элементы кристаллографии. Дифракция и интерференция в кристаллах. Фононы.	72	18	18	36
2	Тема 1. Физические механизмы образования	12	3	3	6

	кристаллов. Энергия. Типы связей в кристаллах.				
3	Тема 2. Основы кристаллографии. Методы описания структуры кристаллических решеток. Ячейка Вигнера-Зейца. Направление в кристаллической решетке. Кристаллографические плоскости.	12	3	3	6
4	Тема 3. Дифракция и интерференция волн в кристаллах. Условие дифракции Вульфа-Брэгга.	12	3	3	6
5	Тема 4. Основные экспериментальные методы наблюдения дифракции	12	3	3	6
6	Тема 5. Колебания решетки, фононы. Фазовая и групповая скорости	12	3	3	6
7	Тема 6. Дисперсионные соотношения. Акустическая и оптическая ветви колебаний.	12	3	3	6
8	Форма отчетности:зачет с оценкой – 3 семестр				
9	Итого за 3 семестр	72	18	18	36
10	Раздел 2. Элементы теории твердого тела. Электрические и магнитные свойства твердых тел.	63	18	18	27
11	Тема 7. Теплоемкость твердых тел. Модели Эйнштейна и Дебая.	10	3	3	4
12	Тема 8. Основы зонной теории твердых тел. Классификация твердых тел по величине электропроводности.	10	3	3	4
13	Тема 9. Уравнение Шредингера для твердого тела. Одноэлектронное приближение.	10	3	3	4
14	Тема 10. Электрические свойства твердых тел. Электропроводность металлов. Собственная проводимость полупроводников.	10	3	3	4
15	Тема 11. Проводимость примесных полупроводников. Физические свойства p-n перехода. Эффект Холла.	10	3	3	4
16	Тема 12. Свойства диэлектриков. Электропроводность диэлектриков. Влияние поверхностных уровней на электрические свойства твердых тел.	13	3	3	7
	Промежуточная аттестация				9
	Форма отчетности экзамен – 4 семестр				
ИТОГО:		144	36	36	72

5. ОЦЕНОЧНЫЕ СРЕДСТВА ДЛЯ ТЕКУЩЕГО КОНТРОЛЯ И ПРОМЕЖУТОЧНОЙ АТТЕСТАЦИИ

5.1. Текущий контроль по дисциплине осуществляется в форме контрольной работы

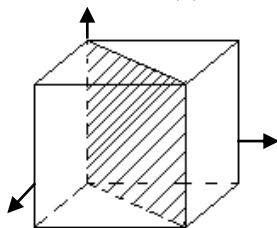
Типовой вариант к/р

- Какое из перечисленных ниже веществ не относится к кристаллам?
А) стекло Б) поваренная соль В) железо Г) молибден
- Определить индексы направления прямой, проходящей через следующие узлы $[[111]]$ и $[[100]]$.
А) $[101]$ Б) $[011]$ В) $[100]$ Г) $[001]$
- Определить угол между направлениями $[100]$ и $[010]$
А) 60° Б) 30° В) 90° Г) 45°
- Сколько атомов приходится на примитивную кубическую элементарную

ячейку?

А) 1 Б) 2 В) 4 Г) 14

5. Каковы индексы плоскости изображенной на рисунке?



А) (001) Б) $(1\bar{1}0)$ В) $(\bar{1}11)$ Г) (000)

6. Медь кристаллизуется в ОЦК решетке. Ее плотность 8930 кг/м^3 . Атомная масса $63,5 \text{ г/моль}$. Определить период элементарной ячейки. (Постоянная Авогадро $6 \cdot 10^{23} \text{ моль}^{-1}$)

А) 0.288 нм Б) 0.361 нм В) 34 мкм Г) 12.3 нм

7. Какие из нижеперечисленных дефектов являются

линейными?

А) вакансии Б) границы зерен В) атомы примеси Г) дислокации

8. Известно, что монокристаллы кремния имеют различное удельное сопротивление в разных направлениях. Чем обусловлено данное явление.

А) анизотропией кристаллов кремния Б) наличием в кремнии дефектов В) тем, что кремний имеет простую кубическую элементарную ячейку Г) нет правильного ответа

9. Определить значение температуры Дебая, если молярная теплоемкость кристалла при температуре 6 К равна $0,42 \text{ Дж/(моль} \cdot \text{К)}$.

А) 10 Б) 20 В) 100 Г) 700

10. Согласно теории теплоемкости Эйнштейна молярная теплоемкость с уменьшением температуры в области низких температур

А) уменьшается по кубическому закону Б) остается постоянной и равной $3R$ В) уменьшается по экспоненте Г) уменьшается по линейному закону

11. Характеристическая температура Дебая для хлорида калия 230 К, а для хлорида натрия 280 К. Во сколько раз удельная теплоемкость хлорида калия больше удельной теплоемкости хлорида натрия

А) 0,22 Б) 0,5 В) 1 Г) 1,4

12. При увеличении средней длины свободного пробега теплопроводность

А) уменьшается Б) не изменяется В) увеличивается Г) изменяется по закону $1/\lambda$

13. Объем металла увеличили в 4 раза. Как при этом изменится энергия Ферми?

А) возрастет в 4 раза Б) уменьшится в 4 раза В) увеличится в 16 раз Г) не изменится

14. Чему равна вероятность того, что в состоянии с энергией, равной энергии Ферми, будет находиться свободный электрон?

А) $1/4$ Б) $1/2$ В) $3/4$ Г) 1

15. К полупроводникам относят вещества, у которых

А) валентная зона заполнена не полностью Б) валентная зона перекрывается с зоной проводимости В) полностью заполненная валентная зона отделена от следующей полностью свободной широкой запрещенной зоной Г) полностью заполненная валентная зона отделена от следующей полностью свободной узкой запрещенной зоной

16. Какова вероятность заполнения электронами энергетических уровней расположенных на 0,02 эВ ниже уровня Ферми, если $E_F = 3,12 \text{ эВ}$, при температуре 27°C .

А) 0,16 Б) 0,32 В) 0,48 Г) 0,68

17. Полагая, что на каждый атом меди приходится по одному электрону определить энергию Ферми при абсолютном нуле

А) 7 эВ Б) 8 эВ В) 9 эВ Г) 10 эВ

18. Определите потенциал выхода электронов из вольфрама, если при температуре $3 \cdot 10^4$ К средняя кинетическая энергия электронов классического электронного газа равна работе выхода из металла.

А) 0,26 Б) 0,82 В) 4,5 Г) 3,9

19. В донорных п/п уровень Ферми лежит

А) около «дна» зоны проводимости Б) посередине запрещенной зоны В) около «потолка» валентной зоны Г) совпадает с последним занятым электронами уровнем

20. Вырожденность полупроводников:

А) заполнены все электронные состояния на дне зоны проводимости донорного п/п Б) уменьшается ширина запрещенной зоны В) уменьшается вероятность зарождения пары электрон-дырка Г) нет занятых электронных состояний вблизи верхней границы акцепторного п/п

21. Удельное сопротивление и постоянная Холла п/п с дырочной проводимостью равны 0,03 Ом·м и $3 \cdot 10^{-4}$ м³/Кл. Определите подвижность носителей заряда

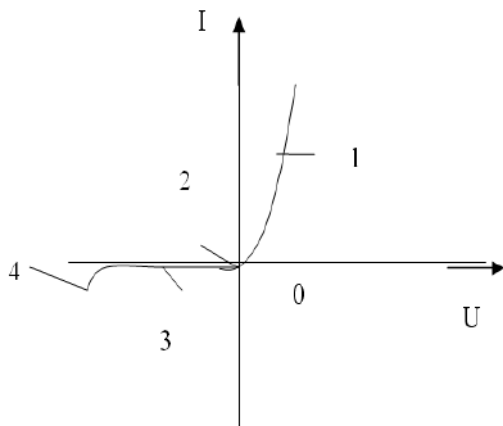
А) 0,08 Б) 0,06 В) 0,04 Г) 0,03

22. В некотором п/п подвижности носителей заряда отличаются в 3 раза. Найти отношение концентраций дырок и электронов, если эффект Холла не наблюдается.

А) 9 Б) 3 В) 0,33 Г) 0,11

23. Определите длину волны излучения соответствующую красной границе, если ширина запрещенной зоны 1,7 эВ.

А) 1 мкм Б) 2 мкм В) 2,7 мкм Г) 300 нм



24. На ВАХ диода начальному участку запирающего направления соответствует

А) 1 Б) 2 В) 3 Г) 4

25. Для ферромагнетиков магнитная восприимчивость

А) $\chi < 1$, отрицательна Б) $\chi < 1$, положительна

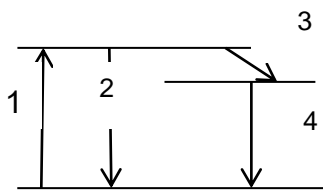
В) $\chi \gg 1$, отрицательна Г) $\chi \gg 1$, положительна

26. К ферромагнетикам не относятся:

А) железо Б) медь В) алюминий Г) никель

27. В каком случае невозможен переход электрона из донорной зоны в зону проводимости в донорном полупроводнике при поглощении фотона (E_g – энергия запрещенной зоны, E_d – энергия донорного уровня, ν – частота фотона)

А) $h\nu > E_d$ Б) $h\nu < E_d$ В) $E_g > h\nu > E_d$ Г) $h\nu < E_g$



28. В трехуровневом лазере переход, сопровождающийся излучением

А) 1 Б) 2 В) 3 Г) 4

29. Процесс выделения или поглощения тепла при прохождении электрического тока через контакт двух разнородных проводников называется эффектом

А) Зеебека Б) Томсона В) Пельтье Г) Фарадея

30. Эффект Мейснера в сверхпроводниках:

А) полное вытеснение магнитного поля из материала при переходе в сверхпроводящее состояние Б) полное вытеснение электрического поля из материала при переходе в сверхпроводящее состояние В) полное вытеснение гравитационного поля из материала при переходе в сверхпроводящее состояние Г) полное вытеснение магнитного поля из материала при выходе из сверхпроводящего состояния.

Вопросы к зачету с оценкой (3 семестр)

1. Электронная структура атомов. Химическая связь и валентность. Типы сил связи в конденсированном состоянии: ван-дер-ваальсова связь, ионная связь, ковалентная связь, металлическая связь.
2. Химическая связь и ближний порядок. Структура вещества с ненаправленным взаимодействием. Примеры кристаллических структур, отвечающих плотным упаковкам шаров: простая кубическая, ОЦК, ГЦК, ГПУ, структура типа CsCl, типа NaCl, структура типа перовскита CaTiO_3 .
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.
4. 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.
5. Элементы симметрии кристаллов: повороты, отражения, инверсия, инверсионные повороты, трансляции. Операции (преобразования) симметрии.
6. Элементы теории групп, группы симметрии. Возможные порядки поворотных осей в кристалле. Пространственные и точечные группы (кристаллические классы). Классификация решеток Браве.
7. Точечные дефекты, их образование и диффузия. Вакансии и межузельные атомы. Дефекты Френкеля и Шоттки.
8. Линейные дефекты. Краевые и винтовые дислокации. Роль дислокаций в пластической деформации.
9. Распространение волн в кристаллах. Дифракция рентгеновских лучей, нейтронов и электронов в кристалле. Упругое и неупругое рассеяние, их особенности.
10. Брэгговские отражения. Атомный и структурный факторы. Дифракция в

аморфных веществах.

11. Колебания кристаллической решетки. Уравнения движения атомов. Простая и сложная одномерные цепочки атомов. Закон дисперсии упругих волн. Акустические и оптические колебания.

12. Квантование колебаний. Фононы. Электрон-фононное взаимодействие.

13. Теплоемкость твердых тел. Решеточная теплоемкость. Электронная теплоемкость. Температурная зависимость решеточной и электронной теплоемкости.

14. Классическая теория теплоемкости. Закон равномерного распределения энергии по степеням свободы в классической физике. Границы справедливости классической теории.

15. Квантовая теория теплоемкости по Эйнштейну и Дебаю. Предельные случаи высоких и низких температур. Температура Дебая.

16. Тепловое расширение твердых тел. Его физическое происхождение. Ангармонические колебания.

17. Теплопроводность решеточная и электронная. Закон Видемана – Франца для электронной теплоемкости и теплопроводности.

Вопросы к экзамену (4 семестр)

1. Электронные свойства твердых тел: основные экспериментальные факты. Проводимость, эффект Холла, термоЭДС, фотопроводимость, оптическое поглощение. Трудности объяснения этих фактов на основе классической теории Друде.

2. Основные приближения зонной теории. Граничные условия Борна – Кармана. Теорема Блоха. Блоховские функции. Квазиимпульс. Зоны Бриллюэна. Энергетические зоны.

3. Брэгговское отражение электронов при движении по кристаллу. Полосатый спектр энергии.

4. Приближение сильносвязанных электронов. Связь ширины разрешенной зоны с перекрытием волновых функций атомов. Закон дисперсии. Тензор обратных эффективных масс.

5. Приближение почти свободных электронов. Брэгговские отражения электронов.

6. Заполнение энергетических зон электронами. Поверхность Ферми. Плотность состояний. Металлы, диэлектрики и полупроводники. Полуметаллы.

7. Намагниченность и восприимчивость. Диамагнетики, парамагнетики и ферромагнетики. Законы Кюри и Кюри – Вейсса. Парамагнетизм и диамагнетизм электронов проводимости.

8. Природа ферромагнетизма. Фазовый переход в ферромагнитное состояние. Роль обменного взаимодействия. Точка Кюри и восприимчивость ферромагнетика.

9. Ферромагнитные домены. Причины появления доменов. Доменные

границы (Блоха, Нееля).

10. Антиферромагнетики. Магнитная структура. Точка Нееля. Восприимчивость антиферромагнетиков. Ферромагнетики. Магнитная структура ферромагнетиков.

11. Спиновые волны, магноны.

12. Движение магнитного момента в постоянном и переменном магнитных полях. Электронный парамагнитный резонанс. Ядерный магнитный резонанс.

13. Комплексная диэлектрическая проницаемость и оптические постоянные. Коэффициенты поглощения и отражения. Соотношения Крамерса—Кронига.

14. Поглощения света в полупроводниках (межзонное, примесное поглощение, поглощение свободными носителями, решеткой). Определение основных характеристик полупроводника из оптических исследований.

15. Магнитооптические эффекты (эффекты Фарадея, Фохта и Керра).

16. Проникновение высокочастотного поля в проводник. Нормальный и аномальный скин-эффекты. Толщина скин-слоя.

17. Сверхпроводимость. Критическая температура. Высокотемпературные сверхпроводники. Эффект Мейснера. Критическое поле и критический ток.

18. Сверхпроводники первого и второго рода. Их магнитные свойства. Вихри Абрикосова. Глубина проникновения магнитного поля в образец.

19. Эффект Джозефсона.

20. Куперовское спаривание. Длина когерентности. Энергетическая щель.

Оценочные средства для проведения текущей и промежуточной аттестации по дисциплине

Критерии оценивания для зачета с оценкой/экзамена.

Оценка «отлично» - наличие глубоких исчерпывающих знаний (в объеме утвержденной программы дисциплины в соответствии с поставленными программой курса целями и задачами обучения); грамотное и логически стройное изложение материала, усвоение основной и знакомство с дополнительной литературой.

Оценка «хорошо» - наличие твердых и достаточно полных знаний (в объеме утвержденной программы дисциплины в соответствии с целями обучения), правильные действия по применению знаний, умений, владений на практике, четкое изложение материала, допускаются отдельные логические и стилистические погрешности, сдающий усвоил основную литературу, рекомендованную в программе дисциплины;

Оценка «удовлетворительно» - наличие недостаточно полных знаний (в объеме утвержденной программы), изложение материала с отдельными ошибками, правильные в целом действия по применению знаний на практике.

Оценка «неудовлетворительно» - тема реферата не раскрыта, наличие грубых ошибок, непонимание сущности излагаемого вопроса, неумение применять знания на практике.

6. УЧЕБНО-МЕТОДИЧЕСКОЕ И ИНФОРМАЦИОННОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ УЧЕБНОЙ ДИСЦИПЛИНЫ

6.1. Основная литература

1. Физика твердого тела: учебное пособие / А.А. Корнилович, В.И. Ознобихин, И.И. Суханов, В.Н. Холявко. - Новосибирск: НГТУ, 2012. - 71 с. - ISBN 978-5-7782-2160-4; То же [Электронный ресурс]. - URL: <http://biblioclub.ru/index.php?page=book&id=228969>. (Дата обращения 01.09.2022.)
2. Фомин, Д.В. Экспериментальные методы физики твердого тела: учебное пособие / Д.В. Фомин. - Москва; Берлин: Директ-Медиа, 2014. - 186 с.: ил., схем., табл. - Библиогр. в кн. - ISBN 978-5-4475-2829-4 ; То же [Электронный ресурс]. - URL: <http://biblioclub.ru/index.php?page=book&id=259074>. (Дата обращения 01.09.2022.)
3. Гуртов, В.А. Физика твердого тела для инженеров: учебное пособие / В.А. Гуртов, Р.Н. Осауленко; науч. ред. Л.А. Алешина. - 2-е изд., испр. и доп. - Москва: Техносфера, 2012. - 560 с. - (Мир физики и техники). - ISBN 978-5-94836-327-1; То же [Электронный ресурс]. - URL: <http://biblioclub.ru/index.php?page=book&id=233466> (Дата обращения 01.09.2022.)

6.2. Дополнительная литература

1. Филимонова, Н. И. Физика конденсированного состояния: учебное пособие: [16+] / Н. И. Филимонова, Р. П. Дикарева; Новосибирский государственный технический университет. – Новосибирск: Новосибирский государственный технический университет, 2016. – 136 с.: ил., табл., схем., граф. – Режим доступа: по подписке. – URL: <https://biblioclub.ru/index.php?page=book&id=576197> (дата обращения: 01.09.2022). – Библиогр. в кн. – ISBN 978-5-7782-2960-0. – Текст: электронный.
2. Гольдаде, В. А. Физика конденсированного состояния / В. А. Гольдаде, Л. С. Пинчук; ред. Н. К. Мышкин; Институт механики металлополимерных систем им. В. А. Белого. – Минск: Белорусская наука, 2009. – 648 с. – Режим доступа: по подписке. – URL: <https://biblioclub.ru/index.php?page=book&id=93309> (дата обращения: 01.09.2022). – Библиогр.: с. 647-648. – Текст: электронный.

6.3. Электронные образовательные ресурсы

1.	www.biblioclub.ru	Электронно-библиотечная система (ЭБС) Университетская библиотека онлайн	Регистрация через любой университетский компьютер. В дальнейшем предоставляется неограниченный индивидуальный доступ из любой точки, в которой имеется доступ к сети Интернет
----	--	--	---

2.	www.elibrary.ru	Российский информационный портал в области науки, технологии, медицины и образования	Свободный доступ
----	--	--	------------------

7. МАТЕРИАЛЬНО-ТЕХНИЧЕСКОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ УЧЕБНОЙ ДИСЦИПЛИНЫ

Материально-техническая база, информационные технологии, программное обеспечение и информационные справочные системы.