

МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ
ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ
УЧРЕЖДЕНИЕ ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
«ВОРОНЕЖСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ» (ФГБОУ ВО «ВГУ»)

УТВЕРЖДАЮ
Заведующий кафедрой
физики твердого тела и
наноструктур
(И. Середин)
01.03.2024

РАБОЧАЯ ПРОГРАММА УЧЕБНОЙ ДИСЦИПЛИНЫ
2.1.1.3 Физика конденсированного состояния

1. Код и наименование направления подготовки:

1.3.8. Физика конденсированного состояния

2. Профиль подготовки:

Физика конденсированного состояния

3. Квалификация выпускника: Исследователь. Преподаватель-исследователь

4. Форма обучения: очная

5. Кафедра, отвечающая за реализацию дисциплины:

кафедра физики твердого тела и наноструктур

6. Составители программы:

Середин Павел Владимирович, доктор физико-математических наук, профессор

7. Рекомендована:

НМС Физического факультета ВГУ, протокол №6 от 26.06.2024 г.

8. Учебный год: 2027/2028

Семестр: седьмой

9. Цели и задачи учебной дисциплины:

-

ознакомление студентов с основными приближениями, используемыми в физике твердого тела при моделировании зонного спектра в приближении Хартри-Фока с периодическим потенциалом, на основе самосогласования эффективного периодического потенциала кристалла;

- формирование знаний о фундаментальных свойствах твердых тел на основе зонной теории;

- усвоение основ атомного и электронного строения твердых тел и их определяющего влияния на оптические и электрофизические свойства.

10. Место учебной дисциплины в структуре ООП:

Дисциплина «Физика конденсированного состояния» относится к вариативной части блока Б1.

11. Компетенции обучающегося, формируемые в результате освоения дисциплины:

| Компетенция | | Планируемые результаты обучения |
|-------------|---|---|
| Код | Название | |
| ПК - 17 | владение современным методом исследования электронного строения твердотельной наноструктуры | знать основные определения и свойства конденсированных твердых тел, силы связи в твердых телах, точечную и трансляционную симметрию, взаимно обратный векторный базис решетки. Должен знать основы зонной теории и твердотельные электронные свойства металлов, полупроводников и диэлектриков, уметь правильно применять фундаментальные представления об атомном и электронном строении для объяснения оптических и электрофизических свойств различных твердых тел; знать классификацию дефектов в твердых телах и основные типы химических связей; уметь описывать различные конденсированные состояния |
| ПК - 18 | способность проводить научные исследования с учетом магнитных свойств твердых тел | |
| ПК - 19 | владение современным методом исследования в области нанотехнологий и наноматериалов | |
| ПК - 20 | владение современным методом исследования в области наносистемной техники | |

12. Объем дисциплины в зачетных единицах/час. — 4/144.

Форма промежуточной аттестации экзамен

13 Виды учебной работы

| Вид учебной работы | Грудоемкость | | | |
|--------------------|--------------|--------------|--|--|
| | Всего | По семестрам | | |
| | | 7 семестр | | |
| Аудиторные занятия | 18 | 18 | | |
| в том числе: | — | — | | |
| лекции | | | | |
| и | | | | |
| практические | — | — | | |
| лабораторные | — | — | | |

| | | | | |
|--------------------------------|-----|-----|--|--|
| ИЗ | 18 | 18 | | |
| Самостоятельная работа | 90 | 90 | | |
| Форма промежуточной аттестации | 36 | 36 | | |
| Итого: | 144 | 144 | | |

13.1. Содержание дисциплины

| № п/п | Наименование раздела дисциплины | Содержание раздела дисциплины |
|-------|--|---|
| 1. | Приближения в твердом теле. | Нерелятивистское приближение, 1-ое и 2-ое адиабатическое, одноэлектронное приближение |
| 2. | Уравнение Хартри—Фока. | Волновая функция в виде определителя Слэтера, приближения Хартри-Фока и Хартри, обменное взаимодействие, обменный потенциал, Теорема Купманса. Метод самосогласования. |
| 3. | Трансляционная симметрия и периодический потенциал в кристаллах | Группы трансляций. Эффективный периодический потенциал в кристалле. Теорема Блоха. |
| 4. | Зонное приближение и зоны Бриллюэна | Обратная решетка, взаимнообратный векторный базис решетки в матричном представлении. Зоны Бриллюэна. Эквивалентные состояния в кристалле. Граничные условия Борна-Кармана. |
| 5. | Разрешенные и запрещенные зоны. Эффективная масса квазичастиц в кристалле. | Уравнение квантования для периодической функции Блоха. Зависимость от волнового вектора. Группы волнового вектора. Приведенный и неприведенный зонный спектр. Закон дисперсии энергии в кристалле. Разрешенные и запрещенные зоны. Электроны и дырки. |
| 6. | Плотность электронных состояний. Энергия Ферми. | Функция плотности состояний. Особенности Ван-Хова. Уровень Ферми. Поверхность Ферми в металлах. |
| 7. | Методы расчета зонного спектра. | Метод слабой связи. Модель пустой решетки. Метод сильной связи. Примеры зонного спектра для 0D, 1D, 2D, 3D кристаллов. Методы присоединенных плоских волн ППВ, ортогонализированных плоских волн ОПВ, псевдопотенциала. |

| | | |
|----|--|---|
| 8. | Металлы, полупроводники и диэлектрики в зонном приближении | Зонные спектры s, p-металлоид-металлов. Зонные спектры алмаза, кремния, германия, полупроводников АЗВ5. Прямые и не прямые переходы. Прямозонные и не прямозонные полупроводники. Узкозонные и широкозонные полупроводники. |
|----|--|---|

13.2. Разделы дисциплины и виды занятий

| № п/п | Наименование раздела дисциплины | Виды занятий (часов) | | | | |
|-------|--|----------------------|--------------|----|------------------------|-------|
| | | Лекции | Практические | ИЗ | Самостоятельная работа | Всего |
| 1 | Приближения в твердом теле. | | | 2 | 1 1 | 13 |
| 2 | Уравнение Хартри—Фока. | | | 2 | 1 1 | 13 |
| 3 | Трансляционная симметрия и периодический потенциал в кристаллах | | | 2 | 1 1 | 13 |
| 4 | Зонное приближение и зоны Бриллюэна | | | 2 | 1 1 | 13 |
| 5 | Разрешенные и запрещенные зоны. Эффективная масса квазичастиц в кристалле. | | | 2 | 1 1 | 13 |

| | | | | | | |
|---|--|---|---|----|----|-----|
| 6 | Плотность электронных состояний. Энергия Ферми. | | | 3 | 11 | 14 |
| 7 | Методы расчета зонного спектра. | | | 3 | 12 | 15 |
| 8 | Металлы, полупроводники и диэлектрики в зонном приближении | | | 2 | 12 | 14 |
| | Итого: | — | — | 18 | 90 | 108 |

14. Методические указания для обучающихся по освоению дисциплины

Изучение дисциплины предусматривает осуществление учебной деятельности, состоящей из двух частей: обучения студентов преподавателем самостоятельной учебной деятельности студентов по изучению дисциплины.

В учебном процессе используются следующие образовательные технологии. По образовательным формам: лекции; лабораторные занятия; индивидуальные занятия. По преобладающим методам приема обучения: объяснительно-иллюстративные (объяснение, показ–демонстрация учебного материала и др.); активные (анализ учебной и научной литературы, составление схем и др.) и интерактивные, в том числе и групповые (взаимное обучение в форме подготовки и обсуждения докладов); информационные; компьютерные; мультимедийные (работы сайтами академических структур, научно-исследовательских организаций, электронных библиотеки др., разработка презентаций, сообщений и докладов, работы с электронными обучающими программами и т.п.).

Подготовка к лекциям является одним из видов самостоятельной работы студентов.

Чтобы хорошо овладеть учебным материалом, необходимо выработать навыки правильной и планомерной работы. Перед началом лекционных занятий надо просмотреть все, что было сделано в предыдущий раз. Это позволит сосредоточить внимание и восстановить в памяти уже имеющиеся знания по данному предмету. Кроме того, такой метод поможет лучше запомнить как старое, так и новое, углубит понимание того и другого, так как при этом устанавливаются связи нового со старым, что является не только обязательным, но и основным условием глубокого овладения материалом. Чем детальнее изучаемое ассоциируется с известным ранее, тем прочнее сохраняется в памяти и быстрее вспомнить, когда требуется.

Приступая к изучению нового материала, необходимо сосредоточиться, т.е. сконцентрировать внимание и не отвлекаться от выполняемой работы, помня, что желание запомнить является гарантией успешной работы, отсутствие же воли к запоминанию снижает эффект восприятия.

Следует помнить о том, что через лекцию передается не только систематизированный теоретический материал, но и постигается методика научного исследования

ния и умения самостоятельно работать, анализировать различного рода явления.

Записывать на лекции необходимо главное, не стремясь зафиксировать все слово в слово. Выбрать же главное без понимания предмета невозможно. Наличие собственного конспекта лекций позволяет еще раз ознакомиться, продумать, разобраться в новом материале, так как недостаточно хорошо понятое во время лекции положение может быть восстановлено в памяти, сопоставлено с другими, додумано, дополнено, уяснено и расширено с помощью учебной литературы. Записи являются пособиями для повторения, дают возможность охватить содержание лекции и всего курса в целом.

При этом хорошо овладеть содержанием лекции – это:

- знать тему;
- понимать значение и важность ее в данном курсе;
- четко представлять план;
- уметь выделить основное, главное;
- усвоить значение примеров и иллюстраций;
- связать вновь полученные сведения о предмете или явлении с уже имеющимися;
- представлять возможность и необходимость применения полученных сведений. Существует несколько общих правил работы на лекции:
- лекции по каждому предмету записывать удобнее в отдельных тетрадях, оставляя широкие поля для пометок;
- при прослушивании лекций следует готовиться, что позволит в процессе лекции выделить главное от второстепенного;

- лекции необходимо записывать с самого начала, так как оно часто бывает ключом ко всей теме;

- так как дословно записать лекцию невозможно, то необходимо в конспекте отражать: формулы, определения, схемы, трудные места, мысли, примеры, факты и положения от которых зависит понимание главного, новое и незнакомое, неопубликованные материалы отсутствующий в учебниках и т.п.;

- записывать надо сжато;

- во время лекции важно непрерывно сохранять рабочую установку, умственную активность.

Изучение теоретического материала в данном курсе не ограничивается подготовкой к лекциям и работой над данным видеозаписями. Лекционная часть курса органически взаимосвязана с иными видами работ: написанием рефератов, участием в лабораторных занятиях, подготовкой и сдачей экзамена по дисциплине, в структуре которых также большое значение имеет самостоятельная работа студента.

Самостоятельная работа обучающихся наряду с аудиторной представляет одну из форм учебного процесса и является существенной ее частью, что наиболее ярко представлено в процессе подготовки бакалавров. Последнее обусловлено тем, что самостоятельная работа предназначена для формирования навыков самостоятельной работы как вообще, так и в учебной, научной деятельности, формирование и развитие способности принимать на себя ответственность, самостоятельно решать проблему, находить конструктивные решения, выход из кризисной ситуации и т.д.

Самостоятельная работа формирует самостоятельность не только как совокупность умений и навыков, но и как черту характера, играющую существенную роль в структуре личности современного специалиста высшей квалификации. Она воспитывает самостоятельность как черту характера. Никакие знания, полученные на уровне пассивного восприятия, не ставшие объектом собственной умственной или практической работы, не могут считаться подлинным достоянием человека.

Давая возможность расширять и обогащать знания, умения по индивидуальным направлениям, самостоятельная работа обучающегося позволяет создать разносторонних специалистов. В процессе самостоятельной работы развиваются творческие возможности обучающегося, при этом самостоятельная работа завершает задачи всех видов учебной работы.

Самостоятельная работа - это планируемая работа обучающихся, выполняемая по заданию и при методическом руководстве преподавателя, но без его непосредственного участия. Преподаватель, ведущий занятия, организует, направляет самостоятельную работу обучающихся и оказывает им необходимую помощь. Однако самостоятельность обучающихся должна превышать объем работы, контролируемой преподавателем работы, и иметь в своей основе индивидуальную мотивацию обучающегося по получению знаний, необходимых и

достаточных для будущей профессиональной деятельности в избранной сфере. Преподаватель при необходимости может оказывать воздействие в выработке и коррекции данной мотивации, лежащей в основе построения самостоятельной деятельности обучающегося по изучению дисциплины, получению необходимых знаний и навыков.

Получение образования предполагает обучение и решение задач определенной сферы деятельности. Однако как бы хорошо не обучались обучающиеся способам решения задач в аудитории, сформировать средства практической деятельности не удастся, так как каждый случай практики особый и для его решения следует выработать особый профессиональный стиль мышления.

Основой самостоятельной работы служит научно-теоретический курс, комплекс полученных обучающимся знаний. Основной, наиболее экономичной формой получения и усвоения информации, теоретических знаний в вузе является лекция, позволяющая воспринять значительную сумму основных знаний и потому способствующая повышению продуктивности всех других форм учебного труда.

Результат обучения и самостоятельной работы обучающегося предполагает наличие следующих составляющих:

- понимание методологических основ построения изучаемых знаний;
- выделение главных структур учебного курса;
- формирование средств выражения в данной области;
- построение методик решения задачи ориентации в проблемах (ситуациях).

15. Перечень основной и дополнительной литературы, ресурсов интернет, необходимых для освоения дисциплины

а) основная литература:

| № п/п | Источник |
|-------|--|
| 1 | Епифанов Г.И. Физикатвердогетела: учебное пособие / Г.И. Епифанов. — Изд. 3-е, испр. — СПб: Лань, 2010. — 287 с. |

б) дополнительная литература:

| № п/п | Источник |
|-------|--|
| 1 | Павлов Г.В. Физикатвердогетела. / Г.В. Павлов, А.Ф. Хохлов. - М.: Высш. шк., 1993. |
| 2 | Делоне Н.Б. Основы физики конденсированного вещества. / Н.Б. Делоне. - М.: Физматлит. 2011 |
| 3 | Ашкрофт Н. Физикатвердогетела. Т.1, II. / Н.Ашкрофт, Н.Мермин. - М.: Мир, 1979 |
| 4 | Заиман Дж. I Принципы теории итвердогетела. / Дж. Заиман. - М.: Мир, 1974. |

в) информационные электронно-образовательные ресурсы:

| № п/п | Источник |
|-------|--|
| 1 | www.iib.vsu.ru-ЗНББИУ |

17. Информационные технологии, используемые для реализации учебной дисциплины, включая программное обеспечение и информационно-справочные системы (при необходимости)

Необходимо пользоваться возможностью интерактивного проведения лекций, задавать вопросы, высказываться по проблематике материала. На занятиях выполнение учебных заданий осуществляется в аудитории и дома. Обязательно посещение телеконференций.

18. Материально-техническое обеспечение дисциплины:

Рентгеновский дифрактометр Радан ДР-023 Рентгеновский спектрометр-монокроматор РСМ-500.

19. Фондоценочных средств:

19.1. Перечень компетенций с указанием этапов формирования и планируемых результатов обучения

| Код содержания компетенции (или ее части) | Планируемые результаты обучения (показатели достижения заданного уровня освоения компетенции посредством формирования знаний, умений, навыков) | Этапы формирования компетенции (разделы (темы) дисциплины и/или | ФО С* (средств оценки) |
|---|--|---|------------------------|
| | | | |

| | авыков) | и модуля и их наименовани е) | |
|-------------------------|---|---|--------------|
| ПК-17;ПК-18;ПК-19;ПК-20 | <p>знать основные определения свойства конденсированных твердых тел, силы связи в твердых телах, точечную и трансляционную симметрию,</p> | <p>Приближения в твердом теле.</p> | Устный опрос |
| | | <p>Уравнение Хартри—Фока.</p> | Устный опрос |
| ПК-17;ПК-18;ПК-19;ПК-20 | <p>взаимно обратный векторный базис решетки. Должен знать основы зонной теории твердых тел и основные электронные свойства металлов, полупроводников и диэлектриков, уметь правильно применять фундаментальные представления о многими электронном строении для объяснения оптических и электрофизических свойств различных твердых тел; знать классификацию дефектов в твердых телах и основные типы химических связей; уметь писать</p> | <p>Трансляционная симметрия в периодическом потенциале кристаллов</p> | Устный опрос |
| | | <p>Зонное приближение и зоны Бриллюэна</p> | Устный опрос |
| | | <p>Разрешенные</p> | Устный опрос |

| | | | |
|---|--------------------------------------|---|---------------|
| | различные конденсированные состояния | запрещенные зоны. Эффективная масса квазичастиц в кристалле. | |
| ПК-17; ПК-18; ПК-19; ПК-20 | | Плотность электронных состояний. Энергия Ферми. | Устный опрос |
| | | Методы расчета зонного спектра. | Устный опрос |
| | | Металлы, полупроводники и диэлектрики в зонном приближении | Устный опрос |
| Промежуточная аттестация форма контроля - зачет с оценкой | | | Комплекты КИМ |

19.2 Описание критериев и шкалы оценивания компетенций (результатов обучения) при промежуточной аттестации

Для оценивания результатов обучения на экзамене и зачете используются следующие показатели

- 1) знание учебного материала и владение понятиями и аппаратом данной области науки (теоретические основы дисциплины);
 - 2) умение связывать теорию с практикой;
 - 3) умение иллюстрировать ответ примерами, фактами, данными научных исследований;
 - 4) умение применять теоретические знания для выполнения тестов решения практических задач при выполнении лабораторных работ.
- Для оценивания результатов обучения на экзамене используется 4-балльная шкала: «отлично», «хорошо», «удовлетворительно», «неудовлетворительно».

Соотношение показателей, критериев и шкалы оценивания результатов обучения.

| Критерии оценивания компетенций | Уровень сформированности компетенций | Шкала оценок |
|---------------------------------|--------------------------------------|--------------|
|---------------------------------|--------------------------------------|--------------|

| | | |
|--|--------------------|---------------------|
| Обучающийся в полной мере владеет понятийным аппаратом данной области науки (теоретическим и основами дисциплины), способен иллюстрировать ответ примерами, фактами, данными научных исследований, применять теоретические знания для выполнения тестов решения практических задач при выполнении лабораторных работ | Повышенный уровень | Отлично |
| Обучающийся владеет понятийным аппаратом данной области науки (теоретическими основами дисциплины), допускает незначительные ошибки при выполнении тестов и лабораторных задач | Базовый уровень | Хорошо |
| Обучающийся владеет частично теоретическими основами дисциплины, фрагментарно способен проходить тестирование и выполнять лабораторные задания | Пороговый уровень | Удовлетворительно |
| Неудовлетворительное выполнение тестовых заданий. Обучающийся демонстрирует отрывочные, фрагментарные знания, допускает грубые ошибки при выполнении практических задач лабораторных работ | — | Неудовлетворительно |

19.3 Типовые контрольные задания или иные материалы, необходимые для оценки знаний, умений, навыков и (или) опыта деятельности, характеризующие этапы формирования компетенций в процессе освоения образовательной программы

19.3.1 Перечень вопросов к экзамену

Контрольно-измерительный материал №1

Химическая связь в твердых телах. Виды химической связи. Ковалентная, ионная, Вандер-

Вальса. Образование энергетических зон в твердых телах.

Диэлектрики. Механизмы электронной проводимости в диэлектриках. Поляроны.

Контрольно-измерительный материал №2

Уравнение Шредингера для электрона в кристалле. Адиабатическое приближение. Ионная проводимость в

диэлектриках. Суперионная проводимость.

Контрольно-измерительный материал №3

Одноэлектронное приближение. Эффективное поле электронов

Сигнетоэлектрик спонтанная поляризация в кристаллах. Полевая зависимость поляризации. Гистерезис домена.

Контрольно-измерительный материал №4

Теорема Блоха. Блохование волновых функций.

Температурная зависимость спонтанной по температуре Кюри. Переход от параэлектрика к сигнетоэлектрику

Контрольно-измерительный материал №5

Приближение слабой и сильной связи для потенциала волновой функции электрона в кристалле. Магнитные свойства твердого тела. Диа- пара- ферро- и ферримагнетики.

Контрольно-измерительный материал №6

Метод сильной связи. Характер энергетических зон. Интеграл перекрытия и обменный интеграл. Атомная природа ферро- и ферримагнетизма.

Орбитальный и силовой магнитный момент

Контрольно-измерительный материал №7

Метод присоединенных плоских волн. Маффин-

тин приближения для потенциала. Построение волновой функции.

Спонтанная намагниченность. Доменная структура и кривая намагниченности.

Контрольно-измерительный материал №8

Расчет электронной структуры, плоскости электронных состояний и рентгеновских спектров кремния и алюминия

Взаимодействие электромагнитной волны с кристаллами. Поглощение и отражение света.

Контрольно-измерительный материал №9

Электропроводность металлов. Зависимость

проводимости металлов

температуры.

Остаточная проводимость

Оптические константы. Связь коэффициента поглощения света с плотностью электронных состояний.

Контрольно-измерительный материал №10

Явления сверхпроводимости в металлах. БКШ-модель для сверхпроводимости.

Аморфные твердые тела. Ближний и дальний порядок. Функция радиального распределения атомов.

Контрольно-измерительный материал №11

Высокотемпературные сверхпроводимости. Возможности их использования в энергетике

Электрические свойства аморфного полупроводников.

Локализованные состояния. Прыжковая проводимость.

19.4. Методические материалы, определяющие процедуры оценивания знаний, умений, навыков и (или) опыта деятельности, характеризующих этапы формирования компетенций Оценка знаний, умений и навыков, характеризующая этапы формирования компетенций в рамках изучения дисциплины осуществляется в ходе текущей и промежуточной аттестаций.

Текущая аттестация проводится в соответствии с Положением о текущей аттестации обучающихся по программам высшего образования Воронежского государственного университета. Текущая аттестация проводится в форме выполнения лабораторных работ.

Критерии оценивания приведены выше.

Промежуточная аттестация проводится в соответствии с Положением о промежуточной аттестации обучающихся по программам высшего образования.

Контрольно-измерительные материалы промежуточной аттестации включают всебя теоретические вопросы, позволяющие оценить уровень полученных знаний и степень сформированности умений и навыков.

20. Фонд оценочных средств сформированности компетенций студентов, рекомендуемый для проведения диагностических работ:

Перечень заданий для оценки сформированности компетенций

1. Закрытые задания (тестовые, средний уровень сложности)

Какое из перечисленных ниже утверждений не является признаком кристалла?

- а) Анизотропия свойств.
- б) Правильность геометрической формы.
- в) Фиксированная температура плавления.
- г) *Случайное хаотическое расположение атомов.*

2. Под понятием анизотропия кристаллов понимают:

- а) различие температур плавления.
- б) *различие свойств кристалла по различным кристаллографическим направлениям.*
- в) различие типов кристаллических решёток.
- г) различие множеств, сросшихся между собой, беспорядочно ориентированных мелких кристаллов

3. По величине удельного сопротивления твердые тела можно классифицировать на:

- а) *проводники, полупроводники, диэлектрики*
- б) проводники, ферромагнетики, сегнетоэлектрики
- в) полупроводники, нанокластеры, ферромагнетики
- г) диэлектрики, антиферромагнетики, парамагнетики

4. Укажите правильную форму записи символов кристаллографических плоскостей.

- а) $[[mnp]]$
- б) $[mnp]$
- в) (m,n,p)
- г) (hkl)

5. Какой из перечисленных материалов относится к полупроводникам:

- а) Алюминий
- б) Медь
- в) Кремний
- г) Кобальт

6. Процесс превращения связанного электрона в свободный электрон носит название:

- а) рекомбинация
- б) генерация
- в) дисперсия
- г) адсорбция

7. Узлы обратной решетки кристалла.

- а) Имеют индексы, совпадающие с индексами узлов соответствующей прямой решетки кристалла.
- б) Координатные индексы узлов обратной решетки получают по формулам, в которых фигурируют координатные индексы соответствующих узлов прямой решетки.
- в) Координатные индексы узлов обратной решетки связаны с индексами Миллера кристаллографических плоскостей прямой решетки

8. Брегговское рассеяние.

- а) Это рассеяние рентгеновских волн кристаллами.
- б) Это когерентное упругое рассеяние тепловых нейтронов кристаллами.
- в) Это когерентное упругое рассеяние любых волн в кристалле, условием которого является неравенство длины волны рассеиваемого излучения и удвоенного межатомного расстояния для данного кристалла, но в пользу именно удвоенного расстояния.
- г) Это упругое когерентное рассеяние любых волн кристаллом.

9. Уравнения Лауэ.

- а) Позволяют получить соотношение Брегга при дополнительном условии.
- б) Не позволяют получить соотношение Брегга.
- в) Фактически содержат в себе соотношение Брегга.

10. Фононы.

- а) Это кванты упругих колебаний решетки кристалла в звуковом диапазоне

частот.

23

б) Это кванты упругих колебаний решетки кристалла в ультразвуковом диапазоне

частот.

в) Это кванты упругих колебаний решетки кристалла в гиперзвуковом диапазоне частот.

11. Удельная теплоемкость непроводящего кристалла при температуре вблизи абсолютного нуля по шкале Кельвина.

а) Соответствует с малой погрешностью модели Эйнштейна.

б) Сильно отличается в большую сторону от значения, соответствующего закону Дюлонга и Пти.

в) Сильно отличается в меньшую сторону от значения, соответствующего закону Дюлонга и Пти.

г) Соответствует модели Дебая для кристаллов с кубическими решетками.

д) Не соответствует модели Дебая, отклоняясь в большую сторону.

е) Соответствует модели Дебая, отклоняясь немного в меньшую сторону.

12. Фононы, квантованные упругие колебания атомов кристаллов.

а) Являются квазичастицами, подчиняющимися статистике Максвелла-Больцмана.

б) Являются квазичастицами, подчиняющимися статистике Бозе-Эйнштейна.

в) Являются квазичастицами, подчиняющимися статистике Ферми-Дирака.

13. Оптические ветви упругих колебаний атомов кристалла.

а) Наблюдаются в случае одноатомных кристаллов, прозрачных для видимого света.

б) Наблюдаются в случае любых одноатомных кристаллов.

в) Наблюдаются для многоатомных кристаллов вне зависимости от прозрачности

или непрозрачности

г) Наблюдаются в случае многоатомных кристаллов, но только при их прозрачности

для видимого света.

14. Классическая модель простого металла.

а) Достаточно хорошо объясняет тепловые свойства (теплоемкость) металла.

б) Объясняет величину и температурную зависимость парамагнитной восприимчивости простых металлов.

в) Хорошо объясняет электронную теплопроводность и электрическую проводимость в широком диапазоне температур

15. Магнитные кристаллы.

а) Мягкие ферромагнетики выстраивают магнитные моменты своих атомов в направлении напряженности приложенного внешнего магнитного поля.

б) Антиферромагнитные кристаллы выстраивают магнитные моменты своих

атомов в

направлении противоположном направлению напряженности внешнего магнитного поля.

в) Ферромагнитные и ферримагнитные кристаллы обладают собственным значительным по величине суммарным магнитным моментом.

г) Антиферромагнитные кристаллы также обладают суммарным магнитным моментом, но он существенно меньше, чем у ферромагнитных кристаллов.

16. Какие кристаллические структуры обладают простой кубической решеткой.

а) Типа алмаза. б) Типа хлористого натрия. в) Типа меди.

г) Типа хлористого цезия. д) Типа цинка.

17. Дислокации в кристаллах являются.

а) Нуль-мерными дефектами структуры кристалла.

б) Одномерными дефектами структуры кристалла.

в) Двухмерными дефектами структуры кристалла.

г) Трехмерными дефектами структуры кристалла.

18. Явление сверхпроводимости при отсутствии магнитного поля.

а) Это фазовый переход первого рода.

б) Это фазовый переход второго рода.

в) Это явление вообще не квалифицируется как фазовый переход.

2. Открытые задания (тестовые, повышенный уровень сложности)

1. *Дополните предложение.* Квантовая точка является нульмерным объектом и представляет собой фрагмент полупроводника, в котором движение электрона локализовано по _____ пространственным направлениям.

ответ: трем или 3

2. *Дополните предложение.* В квантовой точке движение электрона локализовано по всем трем пространственным направлениям. Такая локализация происходит в результате пространственного ограничения носителей из-за малых размеров фрагмента. В свою очередь это приводит к изменению _____ спектра электрона, который становится полностью дискретным.

ответ: энергетического

3. Открытые задания (мини-кейсы, средний уровень сложности)

Комментарий: поскольку мини-кейсы предполагают свободные ответы обучающихся, допускаются иные (верные), помимо указанных ниже, формулировки ответа и фактологические данные.

1. Запишите выражение полной потенциальной энергии взаимодействия двух атомов U и изобразите примерный вид зависимости полной потенциальной энергии взаимодействия $U(r)$ двух атомов А и В с радиусами r_A и r_B от расстояния между ними r , при значениях $r < r_A + r_B$.

Ответ: При уменьшении расстояния между атомами энергия системы

понижается по сравнению с суммарной энергией изолированных атомов и между атомами возникает сила притяжения, чему соответствует уменьшение потенциальной энергии системы $U(r)$.

При некотором расстоянии $r=r_0$ энергия $U(r)$ достигает минимума. При дальнейшем сближении атомов между ними начинают действовать силы отталкивания.

Полную потенциальную энергию взаимодействия атомов можно представить в виде суммы двух членов, которые представляют собой энергию сил притяжения U_{np} (отрицательный) и отталкивания U_{om} (положительный):

$$U(r) = U_{np}(r) + U_{om}(r)$$

Потенциал U_{np} носит электростатический характер и его можно представить степенной функцией:

$$U_{np} = -\frac{a}{r^m}$$

, где a – положительная константа, r – расстояние между центрами взаимодействующих атомов, m – положительный показатель степени.

При $m=1$ U_{np} соответствует обычному кулоновскому взаимодействию между противоположно заряженными ионами, а при $m=6$ – потенциалу притяжения между атомами инертных газов.

Потенциал U_{om} обусловлен прежде всего силами отталкивания ядер взаимодействующих атомов и зависит от экранировки ядер окружающими их электронами. Согласно Борну и Ланде U_{om} выглядит следующим образом:

$$U_{om} = \frac{b}{r^n}$$

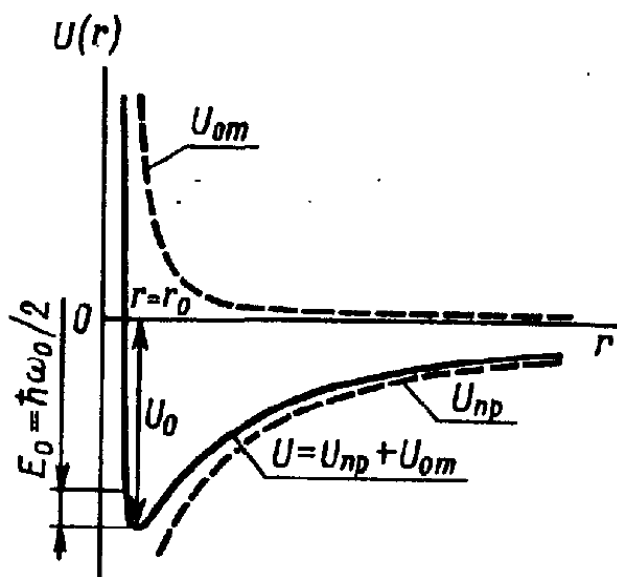
, где b и $n > 0$ – постоянные, r – расстояние между центрами взаимодействующих атомов.

Таким образом выражение для полной потенциальной энергии взаимодействия двух атомов можно записать следующим образом:

$$U = -\frac{a}{r^m} + \frac{b}{r^n}$$

, где r – расстояние между центрами взаимодействующих атомов; a , b , m и n – положительные постоянные.

Общий вид зависимости полной потенциальной энергии взаимодействия двух атомов от расстояния между ними выглядит следующим образом:



2. Чему равны расстояния между плоскостями (100), (110) и (111) в кубической решётке с параметром a ?

Ответ: Межплоскостное расстояние кубической решётки выражается формулой:

$$d(hkl) = \frac{a}{\sqrt{h^2 + k^2 + l^2}}.$$

Отсюда получим:

$$\text{— для грани (100): } d(100) = \frac{a}{\sqrt{1^2 + 0^2 + 0^2}} = a;$$

$$\text{— для грани (110): } d(110) = \frac{a}{\sqrt{1^2 + 1^2 + 0^2}} = \frac{a}{\sqrt{2}};$$

$$\text{— для грани (111): } d(111) = \frac{a}{\sqrt{1^2 + 1^2 + 1^2}} = \frac{a}{\sqrt{3}}.$$

3. Запишите уравнение Шредингера для кристалла.

Ответ: Любое твердое тело состоит из атомов, т.е. представляет собой совокупность ядер и электронов, а стационарное состояние всех частиц этой системы описывается уравнением Шредингера:

$$\hat{H}\Psi = E\Psi$$

, где \hat{H} – гамильтониан всей совокупности частиц, т.е. гамильтониан твердого тела, Ψ – собственная волновая функция, E – энергия твердого тела.

Оператор Гамильтона включает в себя:

1) оператор кинетической энергии электронов

$$\sum_i \left(-\frac{\hbar^2}{2m_0} \Delta_i \right)$$

где \hbar – постоянная Планка, m_0 – масса электрона,

2) оператор кинетической энергии ядер

$$\Delta_i = \frac{\partial^2}{\partial x_i^2} + \frac{\partial^2}{\partial y_i^2} + \frac{\partial^2}{\partial z_i^2} \text{ — оператор}$$

$$\sum_{\alpha} \left(-\frac{\hbar^2}{2M_{\alpha}} \Delta_{\alpha} \right)$$

где M_{α} – масса ядра, $\Delta_{\alpha} = \frac{\partial^2}{\partial X_{\alpha}^2} + \frac{\partial^2}{\partial Y_{\alpha}^2} + \frac{\partial^2}{\partial Z_{\alpha}^2}$

3) потенциальную энергию попарного взаимодействия электронов

$$\frac{1}{2} \sum_i \sum_{\substack{j \\ i \neq j}} \frac{e^2}{r_{ij}}$$

4) потенциальную энергию попарного взаимодействия ядер

$$V_0(R_1, R_2, \dots, R_N)$$

5) потенциальную энергию взаимодействия электронов с ядрами

$$U(r_1, r_2, \dots, r_n, R_1, R_2, \dots, R_N)$$

С учетом всех составляющих гамильтониана уравнение Шредингера примет вид:

$$\left\{ \sum_i \left(-\frac{\hbar^2}{2m_0} \Delta_i \right) + \sum_{\alpha} \left(-\frac{\hbar^2}{2M_{\alpha}} \Delta_{\alpha} \right) + \frac{1}{2} \sum_i \sum_{\substack{j \\ i \neq j}} \frac{e^2}{r_{ij}} + V_0(R_1, R_2, \dots, R_N) + U(r_1, r_2, \dots, r_n, R_1, R_2, \dots, R_N) \right\} \Psi = E\Psi$$

Волновая функция кристалла зависит от координат всех электронов r_i и всех атомных ядер R_{α} :

$$\Psi = \Psi(r_1, r_2, \dots, r_n, R_1, R_2, \dots, R_N)$$

Если на волновую функцию Ψ наложить ограничения, вытекающие из ее физического смысла (конечность, однозначность, непрерывность), то уравнение Шредингера будет иметь решение не при любых значениях энергии E , а только при некоторых. Эти значения E определяют уровни энергии (энергетический спектр) твердого тела.

Критерии и шкалы оценивания заданий ФОС:

Для оценивания выполнения заданий используется балльная шкала:

1) закрытые задания (тестовые, средний уровень сложности):

- 1 балл – указан верный ответ;
- 0 баллов – указан неверный ответ (полностью или частично неверный)

2) открытые задания (тестовые, повышенный уровень сложности).

- 2 балла – указан верный ответ,
- 0 баллов – указан неверный ответ (полностью или частично неверный)

3) открытые задания (мини-кейсы средний уровень сложности):

- 5 баллов – задание выполнено верно (получен правильный ответ, обоснован (аргументирован) ход выполнения (при необходимости));
- 2 балла – выполнение задания содержит незначительные ошибки, но приведен правильный ход рассуждений, или получен верный ответ, но отсутствует обоснование хода его выполнения (если оно было необходимым), или задание выполнено не полностью, но получены промежуточные (частичные) результаты, отражающие правильность хода выполнения задания, или в случае, если

задание состоит из нескольких подзаданий, верно выполнено 50% таких подзаданий;

- 0 баллов – задание не выполнено или выполнено неверно (получен неправильный ответ, ход выполнения ошибочен или содержит грубые ошибки).

При проведении тестирования используется следующая шкала оценки освоения компетенций (% от набранных баллов, в соответствии со шкалой оценивания, приведенной выше):

Задания раздела 20.3 рекомендуются к использованию при проведении диагностических работ с целью оценки остаточных результатов освоения данной дисциплины (знаний, умений, навыков).