

МИНОБРНАУКИ РОССИИ
ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ
ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
«ВОРОНЕЖСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ»
(ФГБОУ ВО «ВГУ»)

УТВЕРЖДАЮ

Заведующий кафедрой
материаловедения и индустрии наносистем
Академик РАН


В.М. Иевлев
подпись, расшифровка подписи

26.03.2020 г.

РАБОЧАЯ ПРОГРАММА УЧЕБНОЙ ДИСЦИПЛИНЫ

Б1.О.16 Химическая физика твердого тела

- 1. Код и наименование направления подготовки/специальности:** 04.03.02 Химия, физика и механика материалов
- 2. Профиль подготовки/специализация:** материаловедение и индустрия наносистем
- 3. Квалификация выпускника:** бакалавр
- 4. Форма обучения:** очная
- 5. Кафедра, отвечающая за реализацию дисциплины:** кафедра материаловедения и индустрии наносистем
- 6. Составители программы:** Даринский Борис Михайлович, доктор физико-математических наук профессор
- 7. Рекомендована:** научно-методическим советом химического факультета, протокол № 3 от 19.03.2020

отметки о продлении вносятся вручную)

8. Учебный год: 2022-2023

Семестр(ы): 5

9. Цели и задачи учебной дисциплины:

1. Формирование у студентов умений и навыков использования фундаментальных законов, теорий классической и квантовой физики твердого тела в самостоятельной практической деятельности.
2. Формирование у студентов научного мировоззрения, творческого мышления и навыков самостоятельной познавательной деятельности.

10. Место учебной дисциплины в структуре ООП:

Б1. Обязательная часть.

11. Планируемые результаты обучения по дисциплине/модулю (знания, умения, навыки), соотнесенные с планируемыми результатами освоения образовательной программы (компетенциями) и индикаторами их достижения:

Код	Название компетенции	Код(ы)	Индикатор(ы)	Планируемые результаты обучения
ОПК-3	Способен использовать в профессиональной деятельности базовые знания в области математических и смежных естественных наук	ОПК-3.1	Использует базовые знания в области математики и физики при решении задач материаловедения	знать: классификацию, структуру, свойства кристаллических твердых тел, методы их исследования; уметь: использовать знания для интерпретации свойств, процессов включая объекты, полученные самостоятельно в рамках научно-исследовательской деятельности. владеть: навыками проведения самостоятельной интерпретации результатов экспериментальных исследований в области синтеза и наблюдаемых свойств твердотельных систем.
		ОПК-3.2.	Обрабатывает данные с использованием стандартных способов аппроксимации численных характеристик	знать: основные модели теоретического описания явлений и свойств твердых тел, таких как тепловых, электрических, магнитных, механических и оптических, химических реакций в твердых телах. уметь: использовать знания для интерпретации свойств, процессов включая объекты, полученные самостоятельно в рамках научно-исследовательской деятельности. владеть: навыками проведения самостоятельной интерпретации результатов исследований в области свойств твердотельных систем.
		ОПК-3.3.	Интерпретирует результаты химических наблюдений с использованием физических законов и представлений	знать: классификацию, структуру, свойства кристаллических твердых тел, методы их исследования; основные модели теоретического описания явлений и свойств твердых тел, таких как тепловых, электрических, магнитных, механических и оптических, химических реакций в твердых телах. уметь: использовать знания для интерпретации свойств, процессов включая объекты, полученные самостоятельно в рамках научно-исследовательской деятельности. владеть:

				навыками проведения самостоятельной интерпретации результатов экспериментальных исследований в области синтеза и наблюдаемых свойств твердотельных систем.
ОПК-1	Способен использовать при решении задач профессиональной деятельности понимание теоретических основ химии, физики материалов и механики материалов	ОПК-1.1.	Использует при решении задач профессиональной деятельности теоретические основы физико-химии полупроводниковых материалов	знать: классификацию, структуру, свойства кристаллических твердых тел, методы их исследования; уметь: использовать знания для интерпретации свойств, процессов включая объекты, полученные самостоятельно в рамках научно-исследовательской деятельности. владеть: навыками проведения самостоятельной интерпретации результатов экспериментальных исследований в области синтеза и наблюдаемых свойств твердотельных систем.
		ОПК-1.2.	Использует при решении задач профессиональной деятельности теоретические основы структурной химии неорганических материалов	знать: классификацию, структуру, химические свойства кристаллических твердых тел, методы их исследования; уметь: использовать знания для интерпретации свойств, процессов, происходящих в неорганических материалах владеть: навыками анализа строения неорганических материалов
		ОПК-1.3.	Использует при решении задач профессиональной деятельности теоретические основы механики материалов	знать: классификацию, структуру, механические свойства кристаллических твердых тел, методы их исследования; уметь: использовать знания для интерпретации свойств, процессов, происходящих в неорганических материалах владеть: навыками анализа механических свойств неорганических материалов
		ОПК-1.4.	Предлагает интерпретацию результатов экспериментов и расчетно-теоретических работ с использованием теоретических основ химии, физики и механики материалов	знать: основные модели теоретического описания явлений и свойств твердых тел, таких как тепловых, электрических, магнитных, механических и оптических, химических реакций в твердых телах. уметь: проводить анализ результатов экспериментов и расчетно-теоретических работ владеть: навыками проведения самостоятельной интерпретации результатов исследований в области свойств твердотельных систем

12. Объем дисциплины в зачетных единицах/час — 3/108

Форма промежуточной аттестации – зачет с оценкой.

13. Трудоемкость по видам учебной работы

Вид учебной работы	Трудоемкость			
	Всего	По семестрам		
		№ семестра	№ семестра 5	...
Контактная работа				
в том числе:	лекции	36	36	
	практические	36	36	
	лабораторные			
	курсовая работа			
Самостоятельная работа	36	36		
Промежуточная аттестация				
Итого:	108	108		

13.1. Содержание дисциплины

№ п/п	Наименование раздела дисциплины	Содержание раздела дисциплины	Реализация раздела дисциплины с помощью онлайн-курса, ЭУМК
1. Лекции			
1.1	Геометрия кристаллических решеток	Прямая и обратная решетки. Решетка Браве, примитивная ячейка Вигнера –Зейца. Классификация решеток Браве. Точечные и пространственные кристаллические группы симметрии. Представления групп.	-
1.2	Фононы	Классические колебания кристаллической решетки. Спектр Акустические и оптические волны. Квантование колебаний, фононы. Энергетическая плотность фононов. Теория решеточной теплоемкости. Модели Дебая и Эйнштейна.	-
1.3	Модель свободных электронов в кристаллах	Краевые условия Кармана-Борна. Энергетический спектр. Плотность состояний. Распределение Ферми-Дирака. Поверхность Ферми. Статическая и динамическая электропроводность. Оптические свойства. Коэффициент отражения. Электронная теплоемкость. Теплопроводность металла.	-
1.4	Волны Блоха	Уравнение для блоховских электронов. Импульс и скорость блоховского электрона. Модель Кронига-Пени. Зависимость энергии электрона от квазиимпульса в трехмерном кристалле. Зона Бриллюэна. Энергетические зоны. Метод сильной связи. Функции Ванье. Тензор эффективной массы. Спин-орбитальное взаимодействие блоховских электронов.	-
1.5	Полуклассическая динамика электронов	Свободные электроны в постоянном электромагнитном поле. Энергетический спектр электрона в однородном магнитном поле. Эффект де Гааза-ван Альфена. Осцилляции теплоемкости и проводимости.	-
1.6	Классификация твердых тел	Классификация твердых тел на основе проводимости. Одновалентные, двух валентные, трехвалентные, четырехвалентные металлы, полуметаллы,	

		переходные металлы, редкоземельные металлы.	
1.7	Диэлектрические свойства изоляторов	Теория локального поля. Механизмы поляризуемости диэлектриков. Сильные электрические поля. Электрический пробой. Пирозлектричество. Сегнетоэлектрики.	
1.8	Электронная структура и электрические свойства полупроводников	Примеры зонных структур полупроводников. Число носителей заряда в чистом полупроводнике в условиях термодинамического равновесия. Примесные уровни. Равновесная концентрация носителей в примесном полупроводнике. Проводимость по примесной зоне.	
1.9	Магнитные свойства твердых тел	Намагниченность и магнитная восприимчивость. Атомная восприимчивость. Восприимчивость диэлектриков с заполненной атомной оболочкой. Ларморовский диамагнетизм. Основное состояние ионов с частично заполненной оболочкой. Правило Хунда. Парамагнетизм диэлектриков. Парамагнетизм Паули металлов. Диамагнетизм электронов проводимости. Синглетные и триплетные состояния двухэлектронной системы. Механизмы обменного взаимодействия. Прямой обмен, косвенный обмен, сверхобмен, обмен между делокализованными электронами. Типы магнитных структур. Ферромагнетики, ферримагнетики, антиферромагнетики. Домены, доменные границы и доменные структуры.	
1.10	Сверхпроводимость	Идеальный сверхпроводник. Незатухающие токи. Магнитные свойства. Энергетическая щель. Уравнение Лондонов. Теория Гинзбурга-Ландау. Квантование магнитного потока. Сверхпроводящее тунеллирование. Эффект Джозефсона.	
1.11	Дефекты в кристаллах	Точечные дефекты в кристаллах разных классов. Центры окраски. Дислокации. Дислокационные стенки. Межкристаллитные границы.	
1.12	Возбуждения в твердых телах	Экситоны, поляроны, плазмоны, магноны, флюктуоны, электроны и дырки, тяжелые фермионы.	
2. Практические занятия			
2.1	Геометрия кристаллических решеток	Прямая и обратная решетки (простая кубическая, ГЦК, ОЦК, ГПУ). Индексы Миллера, расстояния между плоскостями.	-
2.2	Дефекты в кристаллах	Вектор Бюргерса, пластические деформации, формула Пича-Келлера.	-
2.3	Волны Блоха	Квазиимпульс, скорость движения квантового электрона, эффективная масса.	-
2.4	Электронная структура и электрические свойства полупроводников	Зонная структура полупроводников. Свободные носители зарядов. Химический потенциал.	-
2.5	Диэлектрические свойства изоляторов	Химические механизмы поляризации атомов в твердом теле	-
2.6	Магнитные свойства твердых тел	Магнитон Бора. Магнетизм атомов. Парамагнетизм зонных электронов. Обменная энергия, спин-орбитальное взаимодействие.	-
2.7	Проводимость металлов	Движение электронов в электрическом поле, длина свободного пробега	-

13.2. Темы (разделы) дисциплины и виды занятий

№ п/п	Наименование темы	Виды занятий (часов)				
		Лекции	Практичес	Лабораторные	Самостоятел	Всего

	(раздела) дисциплины		кие		ьяная работа	
1	Геометрия кристаллических решеток	2	4		1	7
2	Фононы	4	3		2	9
3	Модель свободных электронов в кристаллах	2	2		2	6
4	Волны Блоха	4	3		1	8
5	Полуклассическая динамика электронов	2	3		1	6
6	Классификация твердых тел	2	3		2	8
7	Диэлектрические свойства изоляторов	4	3		1	8
8	Электронная структура и электрические свойства полупроводников	4	3		8	15
9	Магнитные свойства твердых тел	4	3		1	8
10	Сверхпроводимость	2	3		8	13
11	Дефекты в кристаллах	2	3		1	6
12	Возбуждения в твердых телах	4	3		8	15
	Итого:	36	36		36	108

14. Методические указания для обучающихся по освоению дисциплины

Для успешного освоения дисциплины, необходимо

- изучение основных и дополнительных литературных источников;
- выполнение практического задания.

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

а) основная литература:

№ п/п	Источник
1	Готтштайн Г. Физико-химические основы материаловедения / Г. Готтштайн ; пер. с англ. К.Н. Золотовой, Д.О. Чаркина под ред. В.П. Зломанова. – М. : Бином. Лаборатория знаний, 2009. – 400 с.
2	Гуревич А.Г. Физика твердого тела : учебное пособие для студ. ун-тов и техн. ун-тов / А.Г. Гуревич ; Физ.-техн. ин-т им. А.Ф. Иоффе РАН. – СПб. : БХВ-Петербург : Невский диалект, 2004. – 318 с.
3	Бутягин П.Ю. Химическая физика твердого тела : [учебник для студ., обуч. по направлению 511700 "Химия, физика и механика материалов"] / П.Ю. Бутягин. – М. : Изд-во Моск. ун-та, 2006. – 269 с.
4	Епифанов Г.И. Физика твердого тела : учебное пособие / Г.И. Епифанов. – Изд. 3-е, испр. – СПб. : Лань, 2010. – 287с.
5	Матухин В.Л. Физика твердого тела : учебное пособие / В.Л. Матухин, В.Л. Ермаков. – СПб. : Лань, 2010. – 218 с.

б) дополнительная литература:

№ п/п	Источник
6	Ашкрофт Н. Физика твердого тела : в 2 т. / Н. Ашкрофт, Н. Мермин. – М. : Мир, 1979. – Т.1 : пер.с англ. А.С. Михайлова; под ред. М.И. Каганова. – 1979. – 399 с.; Т.2 : пер. с англ. К.И. Кугеля, А.С. Михайлова; под ред. М.И. Каганова. – 1979. – 422 с.
7	Киттель Ч. Введение в физику твердого тела / Пер. с англ. А. А. Гусева. – М. : Гос. изд-во техн.-теорет. литературы, 1957. – 523 с.
8	Давыдов А.С. Теория твердого тела : Учебное пособие для студ. физ. специальностей вузов / А.С. Давыдов. – М. : Наука, 1976. – 639с.
9	Займан Дж. Принципы теории твердого тела : Пер. со 2-го англ. изд. / Дж. Займан ; Под ред. В.Л. Бонч-Бруевича. – М. : Мир, 1974. – 472 с.
10	Брандт Н.Б. Квазичастицы в физике конденсированного состояния / Н.Б. Брандт, В.А. Кульбачинский. – Изд. 2-е, испр. – М. : ФИЗМАТЛИТ, 2007. – 631 с.

в) информационные электронно-образовательные ресурсы (официальные ресурсы интернет)*:

№ п/п	Ресурс
11	http://www.elibrary.ru – Научная электронная библиотека eLIBRARY.RU - крупнейший российский информационный портал в области науки, технологии, медицины и образования, содержащий рефераты и полные тексты более 12 млн. научных статей и публикаций. На платформе eLIBRARY.RU доступны электронные версии более 1400 российских научно-технических журналов, в том числе более 500 журналов в открытом доступе.

16. Перечень учебно-методического обеспечения для самостоятельной работы

№ п/п	Источник

17. Образовательные технологии, используемые при реализации учебной дисциплины, включая дистанционные образовательные технологии (ДОТ), электронное обучение (ЭО), смешанное обучение):

Проведение текущей аттестации и самостоятельной работы по отдельным разделам дисциплины.

18. Материально-техническое обеспечение дисциплины:

мультимедийный проектор BENQ, экран, ноутбук.

19. Оценочные средства для проведения текущей и промежуточной аттестаций

Порядок оценки освоения обучающимися учебного материала определяется содержанием следующих разделов дисциплины:

№ п/п	Наименование раздела дисциплины (модуля)	Компетенция(и)	Индикатор(ы) достижения компетенции	Оценочные средства
1	Геометрия кристаллических решеток	ОПК-1 ОПК-3	ОПК-1.1 ОПК-1.2 ОПК-1.3 ОПК-1.4 ОПК-3.1 ОПК-3.2 ОПК-3.3	Устный опрос
2	Фононы	ОПК-1 ОПК-3	ОПК-1.1 ОПК-1.2 ОПК-1.3 ОПК-1.4 ОПК-3.1 ОПК-3.2 ОПК-3.3	Устный опрос
3	Модель свободных электронов в кристаллах	ОПК-1 ОПК-3	ОПК-1.1 ОПК-1.2 ОПК-1.3 ОПК-1.4 ОПК-3.1 ОПК-3.2 ОПК-3.3	Устный опрос
4	Волны Блоха	ОПК-1 ОПК-3	ОПК-1.1 ОПК-1.2 ОПК-1.3	Устный опрос

№ п/п	Наименование раздела дисциплины (модуля)	Компетенция(и)	Индикатор(ы) достижения компетенции	Оценочные средства
			ОПК-1.4 ОПК-3.1 ОПК-3.2 ОПК-3.3	
5	Полуклассическая динамика электронов	ОПК-1 ОПК-3	ОПК-1.1 ОПК-1.2 ОПК-1.3 ОПК-1.4 ОПК-3.1 ОПК-3.2 ОПК-3.3	Устный опрос
6	Классификация твердых тел	ОПК-1 ОПК-3	ОПК-1.1 ОПК-1.2 ОПК-1.3 ОПК-1.4 ОПК-3.1 ОПК-3.2 ОПК-3.3	Устный опрос
7	Диэлектрические свойства изоляторов	ОПК-1 ОПК-3	ОПК-1.1 ОПК-1.2 ОПК-1.3 ОПК-1.4 ОПК-3.1 ОПК-3.2 ОПК-3.3	Устный опрос
8	Электронная структура и электрические свойства полупроводников	ОПК-1 ОПК-3	ОПК-1.1 ОПК-1.2 ОПК-1.3 ОПК-1.4 ОПК-3.1 ОПК-3.2 ОПК-3.3	Устный опрос
9	Магнитные свойства твердых тел	ОПК-1 ОПК-3	ОПК-1.1 ОПК-1.2 ОПК-1.3 ОПК-1.4 ОПК-3.1 ОПК-3.2 ОПК-3.3	Устный опрос
10	Сверхпроводимость	ОПК-1 ОПК-3	ОПК-1.1 ОПК-1.2 ОПК-1.3 ОПК-1.4 ОПК-3.1 ОПК-3.2 ОПК-3.3	Устный опрос
11	Дефекты в кристаллах	ОПК-1 ОПК-3	ОПК-1.1 ОПК-1.2 ОПК-1.3 ОПК-1.4 ОПК-3.1 ОПК-3.2 ОПК-3.3	Устный опрос
12	Возбуждения в твердых телах	ОПК-1 ОПК-3	ОПК-1.1 ОПК-1.2	Устный опрос

№ п/п	Наименование раздела дисциплины (модуля)	Компетенция(и)	Индикатор(ы) достижения компетенции	Оценочные средства
			ОПК-1.3 ОПК-1.4 ОПК-3.1 ОПК-3.2 ОПК-3.3	
Промежуточная аттестация форма контроля – зачет с оценкой				Комплект КИМ

20 Типовые оценочные средства и методические материалы, определяющие процедуры оценивания

Для оценивания результатов обучения на экзамене используются следующие показатели (ЗУНы из 19.1):

- 1) знание классификации твердых тел по структурам, электрическим, механическим, магнитным, оптическим характеристикам;
- 2) знание моделей процессов, лежащих в основе этих характеристик
- 3) знание моделей физических и химических процессов в твердых телах;
- 4) умение использовать знания для интерпретации процессов свойств широкого круга твердотельных объектов;
- 5) владение способностью иллюстрировать ответ примерами, фактами, данными научных исследований, применять теоретические знания для решения научных проблем.

20.2 Промежуточная аттестация

Промежуточная аттестация по дисциплине осуществляется с помощью следующих оценочных средств:

Теоретические вопросы

1. Прямая и обратная решетки кристаллов. Зона Бриллюэна.
2. Волновые функции электронов в периодическом кристаллическом поле. Волны Блоха. Энергетические зоны.
3. Модель свободных в металлах. Энергетическая плотность. Поверхность Ферми.
4. Волны Блоха в периодическом поле ионов металлов. Форма поверхности Ферми.
5. Теплопроводность и проводимость металлов.
6. Одновалентные, двухвалентные, трехвалентные, четырехвалентные металлы, полуметаллы, переходные металлы, редкоземельные металлы.
7. Волновые функции кристаллических диэлектриков.
8. Механизмы поляризуемости диэлектриков. Вектор поляризации. Диэлектрическая проницаемость.
9. Сильные электрические поля. Электрический пробой.
10. Пироэлектричество.
11. Сегнетоэлектричество.
12. Деформация кристаллов. Тензор упругих модулей.
13. Пьезоэффект. Пьезомодули.
14. Примеры зонных структур полупроводников. Носители заряда в чистом полупроводнике в условиях термодинамического равновесия.
15. Примесные уровни. Равновесная концентрация носителей в примесном полупроводнике. Проводимость по примесной зоне.
16. Pn-переходы в полупроводниках. Вольт-амперная характеристика.
17. Намагниченность и магнитная восприимчивость.
18. Парамагнетизм Паули металлов.

19. Атомная магнитная восприимчивость. Восприимчивость диэлектриков с заполненной атомной оболочкой. Ларморовский диамагнетизм.
20. Синглетные и триплетные состояния двухэлектронной системы. Механизмы обменного взаимодействия.
21. Прямой обмен, косвенный обмен, сверхобмен, обмен между делокализованными электронами.
22. Типы магнитных структур. Ферромагнетики, ферримагнетики, антиферромагнетики. Геликоидальные структуры.
23. Взаимодействие магнитного момента с решеткой в кристаллах.
24. Домены, доменные границы и доменные структуры.
25. Оптические свойства металлов.
26. Оптические свойства полупроводников и диэлектриков.
27. Идеальный сверхпроводник. Незатухающие токи. Магнитные свойства.
28. Энергетическая щель. Уравнение Лондонов.
29. Теория Гинзбурга-Ландау. Квантование магнитного потока.
30. Сверхпроводящее тунелирование. Эффект Джозефсона.
31. Точечные дефекты в кристаллах разных классов. Центры окраски.
32. Дислокации. Решеточный потенциальный рельеф. Модель дислокационной пластичности.
33. Межкристаллитные границы. Специальные границы. Дислокационные стенки.
34. Возбуждения в твердых телах. Фононы.
35. Экситоны, поляроны, плазмоны.
36. Магноны в магнетиках.
37. Электроны и дырки в полупроводниках.

Задачи

1. Определить плотность сплава FeCr, кристаллизующегося в ОЦК структуру с параметром решетки $a = 2,875 \text{ \AA}$.
2. ОЦК решетка состоит из атомов одного сорта, имеющих радиусы R . Пусть атомы, расположенные по диагонали куба, касаются друг друга. Определить плотность упаковки этой структуры.
3. Определить плотность упаковки ПК, ОЦК, ГЦК и ГПУ решеток и решетки типа алмаза, считая атомы равновеликими шарами, касающимися друг друга.
4. Определить координационные числа и радиусы первой координационной сферы для решеток: простой кубической, ОЦК, ГЦК, ГПУ, типа алмаза
5. Для Li, $m^* = 1,2 m_e$, оценить длину волны электрона на уровне Ферми.
6. Оценить скорость электрона на поверхности Ферми в металле.
7. Найти выражение для плотности состояний свободного электронного газа.
8. В приближении свободных электронов найти максимальную энергию электронов в натрии при $T = 0 \text{ K}$.
9. 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.
10. Для натрия, имеющего ОЦК структуру с параметром решетки $a = 4,23 \text{ \AA}$, найти среднюю энергию электронов при нулевой температуре, учитывая, что их эффективная масса составляет $m^* = 1,3 m_e$.

Описание технологии проведения.

После получения студентом билета КИМ и бланка листа ответа, самостоятельно выполняются задания КИМ в письменной форме. Время подготовки 40 минут.

Требования к выполнению заданий, шкалы и критерии оценивания.

Оценка "отлично" ставится если студент дает полный и правильный ответ, раскрывая теоретические и практические аспекты вопроса, анализируя литературные источники по данному вопросу, аргументирует собственную позицию по данному вопросу

Оценка "хорошо" ставится если студент допускает несущественные ошибки, испытывает трудности при определении собственной оценочной позиции

Оценка "удовлетворительно" ставится если студент допускает существенные ошибки, нарушена логика изложения материала, требуются наводящие вопросы преподавателя

Оценка "неудовлетворительно" ставится при незнании или непонимании большей или наиболее существенной части содержания учебного материала