

**ГОУ ВПО РОССИЙСКО-АРМЯНСКИЙ (СЛАВЯНСКИЙ)
УНИВЕРСИТЕТ**

Составлен в соответствии с государственными требованиями к минимуму содержания и уровню подготовки выпускников по направлению 11.03.04 Электроника и нанoeлектроника и Положением «Об УМКД РАУ».



УТВЕРЖДАЮ:

**Директор
А.А. Саркисян**

«21» июля 2023г.

Инженерно-физический институт

Кафедра Общей физики и квантовых наноструктур

Автор(ы): *к.ф.-м.н., ст. преподаватель Костанян Артавазд Арамович*

УЧЕБНО-МЕТОДИЧЕСКИЙ КОМПЛЕКС

Дисциплина: Б1.О.17 «Физика твердого тела»

Направление: 11.03.04 «Электроника и нанoeлектроника»

ЕРЕВАН

1. Аннотация

Программа спец. курса соответствует гос. стандарту направления 11.03.04 – Электроника и нанoeлектроника. По дисциплине предусмотрены лекции, решение задач и курсовая работа.

2. Требования к исходным уровням знаний и умений студентов

Знать: общий курс физики; основы теоретической физики

Уметь: оперировать матрицами, вычислять интегралы, решать дифференциальные уравнения

Владеть: математическим аппаратом на уровне соответствующем объему курсов предшествующим данному – основ дифференциального и интегрального исчисления; линейной алгеброй; аналитической геометрией

3. Цели и задачи дисциплины

Цель дисциплины: целью дисциплины является обеспечение фундаментальных знаний и навыков в области физики твёрдого тела.

Задачи дисциплины: знание основ физики твёрдого тела

- формирование фундаментальных представлений о симметрии кристаллов, их атомной структуре, способе их представления и описания, а также о связи симметрии кристаллов с их свойствами.
- понимание физической сущности процессов, протекающих в проводящих, полупроводниковых, диэлектрических, магнитных материалах, сверхпроводниках, и в структурах, созданных на основе этих материалов, в том числе и при воздействии внешних полей и изменении температуры.
- опыт проведения количественных оценок величины эффектов и характеристических параметров с учётом особенностей кристаллической структуры, электронного и фононного спектров.
- понимание современных тенденций в развитии физики твёрдого тела.
- готовность к самостоятельному освоению и грамотному использованию результатов новых экспериментальных и теоретических исследований в области физики твёрдого тела, а также к самостоятельному выбору метода и объекта исследования.

4. Требования к уровню освоения содержания дисциплины

После изучения дисциплины студент должен:

- *знать* основные типы кристаллических структур, особенности симметрии, структур и свойств кристаллов, основы теории электронного газа (модель Друде, модель

Зоммерфельда), законы дисперсии одномерной простой и сложной решеток, теорию теплоемкости (теория Эйнштейна, теория Дебая), основы теории магнетизма и сверхпроводимости твердых тел;

- *уметь* определять и вычислять основные характеристические величины твердых тел;

- *иметь* представления о применениях методов теории твердых тел в микро- и наноэлектронике;

- *владеть* физическими и математическими методами расчета физических характеристик твердых тел.

5. Трудоемкости дисциплины и видов учебной работы по учебному плану

Вид учебной работы	Всего Часов I-ый семестр	Всего Часов II-ой семестр
Общая трудоемкость дисциплины	144 (4 кр.)	180 (5 кр.)
1. Аудиторные занятия	68	86
1.1. Лекции	34	52
1.2. Практические занятия	34	34
1.3. Курсовая работа		
2. Самостоятельная работа	76	85
Вид итогового контроля (зачет, экзамен)	Зачет с оценкой	Экзамен 36

6. Распределение весов по формам контроля I-ый семестр

	Вес формы текущего контроля в результирующей оценке текущего контроля			Вес формы промежуточного контроля и результирующей оценки текущего контроля в итоговой оценке промежуточного контроля			Вес итоговых оценок промежуточных контролей в результирующей оценке промежуточного контроля	Вес оценки результирующей оценки промежуточных контролей и оценки итогового контроля в результирующей оценке итогового контроля
	M1	M2	M3	M1	M2	M3		
Вид учебной работы / контроля								
Контрольная работа				0	0	0,5		
Тест								
Курсовая работа								
Лабораторные работы								
Письменные домашние задания	0	0	0,5					
Эссе								
Устный опрос	0	0	0,5					
Другие формы (добавить)								
Другие формы (добавить)								
Вес результирующей оценки текущего контроля в итоговых оценках промежуточных контролей				0	0	0,5		
Вес итоговой оценки 1-го промежуточного контроля в результирующей оценке промежуточных контролей							0	
Вес итоговой оценки 2-го промежуточного контроля в результирующей оценке промежуточных контролей							0	
Вес итоговой оценки 3-го промежуточного контроля в результирующей оценке промежуточных контролей							1	
Вес результирующей оценки промежуточных контролей в результирующей оценке итогового контроля								1
Вес оценки экзамена/зачета в результирующей оценке итогового контроля								0
	$\Sigma = 0$	$\Sigma = 0$	$\Sigma = 1$	$\Sigma = 0$	$\Sigma = 0$	$\Sigma = 1$	$\Sigma = 1$	$\Sigma = 1$

6. Распределение весов по формам контроля I-ый семестр

Вид учебной работы / контроля	Вес формы текущего контроля в результирующей оценке текущего контроля			Вес формы промежуточного контроля и результирующей оценки текущего контроля в итоговой оценке промежуточного контроля			Вес итоговых оценок промежуточных контролей в результирующей оценке промежуточного контроля	Вес оценки результирующей оценки промежуточных контролей и оценки итогового контроля в результирующей оценке итогового контроля
	M1	M2	M3	M1	M2	M3		
Контрольная работа				0	0	0,5		
Тест								
Курсовая работа								
Лабораторные работы								
Письменные домашние задания	0	0	0,5					
Эссе								
Устный опрос	0	0	0,5					
Другие формы (добавить)								
Другие формы (добавить)								
Вес результирующей оценки текущего контроля в итоговых оценках промежуточных контролей				0	0	0,5		
Вес итоговой оценки 1-го промежуточного контроля в результирующей оценке промежуточных контролей							0	
Вес итоговой оценки 2-го промежуточного контроля в результирующей оценке промежуточных контролей							0	
Вес итоговой оценки 3-го промежуточного контроля в результирующей оценке промежуточных контролей							1	
Вес результирующей оценки промежуточных контролей в результирующей оценке итогового контроля								0.5
Вес оценки экзамена/зачета в результирующей оценке итогового контроля								0.5
	$\Sigma = 0$	$\Sigma = 0$	$\Sigma = 1$	$\Sigma = 0$	$\Sigma = 0$	$\Sigma = 1$	$\Sigma = 1$	$\Sigma = 1$

7. Содержание дисциплины

7.1 Тематический план и трудоемкости аудиторных занятий

Разделы и темы дисциплины	Лекционные занятия (ак. часов)	Практические занятия (ак. часов)	Всего(ак. часов)
<i>1</i>	2	3	4
МОДУЛЬ 1. КРИСТАЛЛОГРАФИЯ			
Введение	2	2	4
<i>Предмет физики твердого тела. Многообразие физических явлений в твердых телах, их технические приложения. Структура и задачи курса</i>	2	2	
Раздел 1. Основные понятия геометрии кристаллического пространства	6	6	12
<i>Тема 1.1. Аналитическое описание пространственной решетки</i>	2	2	
<i>Тема 1.2. Обратная решетка</i>	2	2	
<i>Тема 1.3. Кристаллографические проекции</i>	2	2	
Раздел 2. Точечная симметрия твердых тел	4	4	8
<i>Тема 2.1. Понятие о симметрии и теория групп</i>	2	2	
<i>Тема 2.2. Симметричные преобразования</i>	2	2	
Раздел 3. Элементы симметрии кристаллических многогранников	7	7	14
<i>Тема 3.1. Элементы симметрии</i>	3	3	
<i>Тема 3.2. Кристаллографические группы симметрии</i>	2	2	
<i>Тема 3.3. Предельные группы симметрии</i>	2	2	
Раздел 4. Пространственная симметрия кристаллических структур	4	4	8
<i>Тема 4.1. Решетки Браве</i>	2	2	
<i>Тема 4.2. Операции симметрии атомных структур кристаллов</i>	2	2	
Раздел 5. Основы кристаллохимии	7	7	14
<i>Тема 5.1. Химические связи в кристаллах</i>	3	3	
<i>Тема 5.2. Принцип плотнейшей упаковки</i>	2	2	
<i>Тема 5.3. Основные типы структур</i>	2	2	
Раздел 6. Основы кристаллофизики	4	4	8
<i>Тема 6.1 Тензорное описание физических свойств кристаллов</i>	2	2	
<i>Тема 6.2. Примеры физических законов</i>	2	2	
СЕМЕСТР I	34	34	68

Разделы и темы дисциплины	Лекционные занятия (ак. часов)	Практические занятия (ак. часов)	Всего (ак. часов)
МОДУЛЬ 2. МОДЕЛЬ СВОБОДНЫХ ЭЛЕКТРОНОВ. КОЛЕБАНИЯ РЕШЕТКИ			
Раздел 7. Межатомные силы различных классов твердых тел	5	4	9
<i>Тема 7.1. Энергия связи. Природа сил отталкивания. Силы связи Ван дер Ваальса</i>	2	2	
<i>Тема 7.2. Молекулярные кристаллы. Ионная связь. Ионные кристаллы. Постоянная Маделунга</i>	2	1	
<i>Тема 7.3. Ковалентная связь. Металлы. Водородная связь</i>	1	1	
Раздел 8. Модель Друде	9	6	15
<i>Тема 8.1. Электропроводность. Закон Ома. Пределы применимости закона Ома</i>	2	2	
<i>Тема 8.2. Динамическая (высокочастотная) электропроводность</i>	2	1	
<i>Тема 8.3. Эффект Холла. Магнетосопротивление</i>	2	1	
<i>Тема 8.4. Циклотронный (диамагнитный) резонанс</i>	1	1	
<i>Тема 8.5. Теплопроводность металлов. Закон Видемана-Франца</i>	2	1	
Раздел 9. Модель Зоммерфельда	6	4	10
<i>Тема 9.1. Распределение Ферми-Дирака. Уровень Ферми. Электронный газ в основном состоянии</i>	2	1	
<i>Тема 9.2. Функция плотности состояний.</i>	2	1	
<i>Тема 9.3. Теплоемкость электронного газа. Диэлектрическая реакция электронного газа. Плазмоны</i>	2	2	
Раздел 10. Колебания кристаллической решетки	8	6	14
<i>Тема 10.1. Одномерная простая решетка. Зоны Бриллюэна</i>	2	2	
<i>Тема 10.2. Условия Борна Кармана. Фазовая и групповая скорости</i>	2	1	
<i>Тема 10.3. Одномерная сложная решетка. Оптические и акустические ветви колебаний</i>	2	2	
<i>Тема 10.4. Понятие о нормальных колебаниях</i>	2	1	
МОДУЛЬ 3. ТЕПЛОВЫЕ, МАГНИТНЫЕ СВОЙСТВА. СВЕРХПРОВОДИМОСТЬ			
Раздел 11. Тепловые свойства	8	5	13
<i>Тема 11.1. Классическая теория теплоемкости. Закон Дюлонга-Пти</i>	2	1	
<i>Тема 11.2. Теория теплоемкости Эйнштейна. Квантовый осциллятор</i>	1		
<i>Тема 11.3. Теория теплоемкости Дебая. Температура Дебая</i>	1	1	
<i>Тема 11.4. Ангармонизм. Тепловое расширение</i>	2	1	
<i>Тема 11.5. Теплоемкость электронного газа. Температурная зависимость удельного сопротивления металлов. Правило Матиссена</i>	2	2	
Раздел 12. Магнитные свойства твердых тел	7	5	12
<i>Тема 12.1. Классификация твердых тел по магнитным свойствам. Магнитная восприимчивость. Атомный диамагнетизм</i>	2	1	
<i>Тема 12.2. Диамагнетизм электронного газа</i>	1		
<i>Тема 12.3. Парамагнетизм газов</i>	1	1	
<i>Тема 12.4. Парамагнетизм Паули</i>	1	1	
<i>Тема 12.5. Ферромагнетизм. Доменная структура ферромагнетиков. Антиферромагнетизм и ферримагнетизм. Обменное взаимодействие</i>	2	2	

Раздел 13. Сверхпроводимость	9	4	13
<i>Тема 13.1. Сверхпроводимость. Основные экспериментальные факты. Критическая температура. Эффект Мейснера (идеальный диамагнетизм). Критическое магнитное поле</i>	2	2	
<i>Тема 13.2. Теория Лондонов</i>	2		
<i>Тема 13.3. Квантование магнитного потока</i>	1	1	
<i>Тема 13.4. Изотопический эффект. Электронный вклад в теплоемкость. Поглощение электромагнитного излучения</i>	2	1	
<i>Тема 13.5. Теория БКШ</i>	2		
СЕМЕСТР II	52	34	86

7.2 Содержание разделов и тем дисциплины

Введение

Предмет физики твердого тела. Многообразие физических явлений в твердых телах, их технические приложения. Структура и задачи курса; предполагаемые виды и методы подготовки итогового контроля. Рекомендуемая литература.

Симметрия кристаллов

Аналитическое описание пространственной решетки. Обратная решетка, кристаллографические проекции. Понятие о симметрии и теория групп. Симметрические преобразования. Элементы симметрии. Кристаллографические группы. Предельные группы симметрии. Решетки Браве. Операции симметрии атомных структур кристаллов

Элементы кристаллохимии и кристаллофизики

Химические связи в кристаллах. Принцип плотнейшей упаковки. Основные типы структур. Тензорное описание физических свойств кристаллов. Примеры физических законов

Колебания кристаллической решетки

Колебания однородной струны. Колебания одномерной цепочки одинаковых атомов. Зоны Бриллюэна. Дисперсионные кривые. Фазовая и групповая скорости и распределение колебаний по частотам для атомной цепочки. Циклические граничные условия Борна Кармана. Колебания одномерной сложной цепочки атомов. Оптические и акустические ветви колебаний и их физическая природа. Взаимодействие электромагнитного излучения с оптическими колебаниями атомов в кристаллах.

Тепловые свойства кристаллов

Классическая теория теплоемкости. Закон Дюлонга-Пти. Теплоемкость твердых тел при низких температурах. Теория теплоемкости Эйнштейна. Квантовый осциллятор. Теория теплоемкости решетки по Дебаю. Температура Дебая. Ангармонизм. Тепловое расширение. Уравнение состояния кристаллической решетки. Понятие о фоно-

нах. Теплопроводность диэлектриков.

Модель свободных электронов

Модель Друде. Основные предположения модели Друде. Электропроводность и закон Ома. Движение электронов в магнитном поле. Эффект Холла, магнитосопротивление. Теплопроводность металлов. Закон Видемана-Франца. Модель Зоммерфельда. Распределение Ферми-Дирака. Энергетические уровни и плотность состояний свободного электронного газа. Поверхность Ферми. Теплоемкость электронного газа. Диэлектрическая реакция электронного газа. Плазмоны.

Магнитные свойства твердых тел

Магнитная восприимчивость. Диамагнетизм атомов и электронов проводимости. Диамагнетизм свободного электронного газа (диамагнетизм Ландау). Эффект де Гааза ван-Алфена. Циклотронный резонанс. Парамагнетизм газов и электронов проводимости в металлах. Закон Кюри. Квантовая теория парамагнетизма. Парамагнетизм электронного газа. Парамагнитный резонанс. Ферромагнетизм. Точка Кюри и обменный интеграл. Ферромагнитные домены и их происхождение. Ширина стенки Блоха и размеры доменов. Антиферромагнетизм. Простейшая модель антиферромагнетика.

Сверхпроводимость

Экспериментальные данные. Критическая температура перехода. Разрушение сверхпроводимости магнитным полем. Эффект Мейснера. Теплоемкость сверхпроводников и ширина энергетической щели. Уравнение Лондонов. Теория сверхпроводимости Бардина-Купера-Шриффера. Основное состояние в теории БКШ. Незатухающие токи. Одночастичное тунелирование. Тунелирование спаренных электронов. Эффект Джозефсона. Высокотемпературная сверхпроводимость.

7.3 Экзаменационные вопросы

1. Структура кристалла, пространственная решетка. Формула Вульфа-Брегга. Индексы Миллера. Закон целых чисел (закон Гаюи). Кристаллографические проекции.
2. Обратная решетка: свойства и физический смысл. Важнейшие теоремы решеточной кристаллографии
3. Понятие о симметрии. Основные положения теории групп. Примеры групп.
4. Точечная симметрия кристаллов. Матричное представление преобразований симметрии. Примеры. Основные теоремы о сочетании операций симметрии.
5. Кристаллографические категории, сингонии и системы координат. Классы сим-

- метрии.
6. Предельные группы симметрии (группы Кюри). Суперпозиция групп симметрии. Принцип Кюри. Примеры.
 7. Формы кристаллов. Физически различные формы кристаллов.
 8. Решетки Браве. Элементы симметрии кристаллических структур. Пространственные группы симметрии.
 9. Атомные и ионные радиусы. Координационное число и многогранник. Число атомов в ячейке. Определение стехиометрической формулы вещества. Поляризация ионов.
 10. Типы связи в структурах. Пределы устойчивости структур. Плотнейшие упаковки частиц в структурах. Построение структур с помощью координационных полиэдров (многогранников).
 11. Основные типы структур. Политипия, изоморфизм, фазовые переходы, полиморфизм. Основной принцип симметрии в кристаллофизике. Указательные поверхности.
 12. Классификация физических величин. Физические тензоры в кристаллах. Общий вид физических законов. Примеры физических законов: закон Ома, пьезоэлектричество, эффект Сасаки, закон Гука, тензор упругих модулей.
 13. Колебания однородной струны. Колебания одномерной цепочки одинаковых атомов.
 14. Дисперсионные кривые. Фазовая и групповая скорости и распределение колебаний по частотам для атомной цепочки. Циклические граничные условия Борна - Кармана.
 15. Колебания одномерной сложной цепочки атомов. Оптические и акустические ветви колебаний и их физическая природа. Взаимодействие электромагнитного излучения с оптическими колебаниями атомов в кристаллах.
 16. Классическая теория теплоемкости. Закон Дюлонга-Пти.
 17. Теория теплоемкости Эйнштейна. Квантовый осциллятор.
 18. Теория теплоемкости решетки по Дебаю. Температура Дебая.
 19. Ангармонизм. Тепловое расширение.
 20. Уравнение состояния кристаллической решетки. Понятие о фононах. Теплопроводность диэлектриков.
 21. Модель Друде. Основные предположения модели Друде. Электропроводность и закон Ома.
 22. Движение электронов в магнитном поле. Эффект Холла, магнитосопротивление.

23. Теплопроводность металлов. Закон Видемана-Франца.
24. Модель Зоммерфельда. Распределение Ферми-Дирака. Энергетические уровни и плотность состояний свободного электронного газа. Поверхность Ферми.
25. Теплоемкость электронного газа. Диэлектрическая реакция электронного газа. Плазмоны.
26. Магнитная восприимчивость. Диамагнетизм атомов и электронов проводимости.
27. Диамагнетизм свободного электронного газа (диамагнетизм Ландау). Эффект де Гааза ван-Алфена. Циклотронный резонанс.
28. Парамагнетизм газов и электронов проводимости в металлах. Закон Кюри.
29. Квантовая теория парамагнетизма. Парамагнетизм электронного газа. Парамагнитный резонанс.
30. Ферромагнетизм. Точка Кюри и обменный интеграл. Ферромагнитные домены и их происхождение. Ширина стенки Блоха и размеры доменов. Антиферромагнетизм. Простейшая модель антиферромагнетика.
31. Экспериментальные данные. Критическая температура перехода. Разрушение сверхпроводимости магнитным полем. Эффект Мейснера. Теплоёмкость сверхпроводников и ширина энергетической щели.
32. Уравнение Лондонов.
33. Теория сверхпроводимости Бардина-Купера-Шриффера. Основное состояние в теории БКШ.
34. Незатухающие токи. Одночастичное тунелирование. Тунелирование спаренных электронов.
35. Эффект Джозефсона. Высокотемпературная сверхпроводимость.

8. Учебно-методическое обеспечение дисциплины

8.1. Рекомендуемая литература

б) базовые учебники

1. Чупрунов Е.В., Хохлов А.Ф., Фадеев М.А. Основы кристаллографии, М.: Физматлит, 2004.
2. Ансельм А.И. Введение в теорию полупроводников. М.: Наука, 1978.
3. Павлов П.В., Хохлов А.Ф. Физика твёрдого тела. М.: Высшая школа. 1999.

а) основная литература:

1. Ашкрофт Н., Мермин Н. Физика твердого тела. - М.: Мир. 1979.
2. Киттель У. Введение в физику твердого тела. М.: Наука. 1978.
3. Уэрт Ч., Томсон Р. Физика твердого тела. М., 1966.
4. Казарян Э., Арутюнян С. Элементы теории физики твердого тела. Ереван 2005 (на армянском языке).

б) дополнительная литература:

1. Займан Дж. Принципы теории твердого тела. М.: Мир. 1974.
2. Голдсмит Г. (ред.) Задачи по физике твердого тела. М.: Наука. 1976.
3. Блейкмор Дж. Физика твердого тела. М.: Мир. 1988.
4. Ландау Л.Д., Лифшиц Е.М. Квантовая механика. Нерелятивистская теория. т.Ш. М., Наука, 1989.

8.2. Средства обеспечения освоения дисциплины

Специализированные компьютерные программы не предусмотрены.

9. Материально-техническое обеспечение дисциплины

Специализированные лаборатории и классы или приборы не требуются.

Программа составлена в соответствии с Государственным образовательным стандартом высшего профессионального образования по направлению подготовки бакалавров «11.03.04 – Электроника и наноэлектроника».