

Рабочая программа дисциплины

1. Название дисциплины: Акустическая нелинейность твердых тел

2. Лекторы.

2.1. Лектор: д.ф.-м.н., профессор Коробов Александр Иванович
кафедра акустики физического факультета МГУ имени М.В. Ломоносова

Тел. +7(495) 939-1821. E-mail: aikor42@mail.ru

3. Аннотация дисциплины.

Курс состоит в систематическом изложении базовых знаний об особенностях распространения и взаимодействия нелинейных акустических волн в твердых телах. Рассматриваются основные механизмы акустической нелинейности в твердых телах, особенности поведения линейных и нелинейных акустических свойств твердых тел в области фазовых переходов. Анализируются влияния дефектов и нарушения сплошности твердых тел на их акустические свойства. Обсуждается структурная нелинейность и физические механизмы, приводящие к появлению структурной (неклассической) нелинейности. Рассматриваются современные экспериментальные методы диагностики твердых тел методами нелинейной акустики. Знание курса нужно как для последующего изучения студентами других курсов на кафедре акустики («Ультразвуковые методы в физике твердого тела», «Кристаллоакустика и акустоэлектроника», так и для самостоятельной научно-исследовательской и практической работы.

4. Цели освоения дисциплины.

В результате освоения дисциплины обучающийся приобретёт знания по акустической нелинейности твердых тел, экспериментальные навыки, актуальные для проведения исследования свойств твердых тел методами нелинейной акустики, использовать полученные знания в своей научно-исследовательской деятельности.

5. Задачи дисциплины.

Задачами курса являются: (1) систематическое изложение акустической нелинейности твердых тел; (2) ознакомление с современными экспериментальными методами исследования нелинейных акустических свойств твердых тел; (3) знакомство с конкретными прикладными задачами диагностики твердых тел методами нелинейной акустики.

6. Компетенции.

6.1. Компетенции, необходимые для освоения дисциплины.

М-ОНК-2; М-ИК-2.

6.2. Компетенции, формируемые в результате освоения дисциплины.

М-ОНК-2; М-ИК-2; М-ИК-3; М-ПК-1; М-ПК-2; М-ПК-3; М-ПК-5; М-ПК-6; М-СПК-13.

7. Требования к результатам освоения содержания дисциплины

В результате освоения дисциплины студент должен знать основы физики нелинейных акустических волн в твердых телах, особенно в приложении к задачам диагностики и неразрушающего контроля твердых тел; уметь применять полученные знания к решению задач нелинейной акустики твердых тел; владеть современными методами решения основных задач диагностики твердых тел методами нелинейной акустики.

8. Содержание и структура дисциплины.

Вид работы	Семестр				Всего
	1	2	3	4	
Общая трудоёмкость, академических часов			72		72
Аудиторная работа:					
Лекции, академических часов			36		36
Семинары, академических часов					
Лабораторные работы, академических часов					
Самостоятельная работа, академических часов			36		36
Вид промежуточной аттестации (зачёт, зачёт с оценкой, экзамен)			зачет		

N раздела, название раздела	N темы	Название темы	Структура и содержание дисциплины				Форма текущего контроля успеваемости
			Содержание темы	Аудиторная нагрузка, отводимая на лекционный материал темы, ак.ч.	Названия семинаров по теме. Аудиторная нагрузка, отводимая на каждый семинар темы, ак.ч.	Самостоятельная работа: название темы самостоятельной работы; трудоёмкость темы, ак.ч.	
1. Феноменологическое описание упругих свойств твердых тел	1	Термодинамическое описание упругих свойств твердых тел	Термодинамические параметры и термодинамические потенциалы. Механическое и термодинамическое напряжения. Уравнения состояния твердых тел. Материальные коэффициенты второго и третьего порядков.	2 ак.ч.	1. Материальное и пространственное описание. Координаты Эйлера и Лагранжа. 2 ак.ч	Материальные коэффициенты второго и третьего порядков. Их размерность и порядок величины. 8 ак.ч	Об ДЗ, КР
	2	Плоские упругие волны малой амплитуды в однородно деформированных средах	Основы нелинейной теории упругости. Система уравнений для описания упругих волн малой амплитуды в твердых телах. Закон сохранения массы (Уравнение непрерывности). Тензор Пиолы-Киргоффа в однородно деформированной среде	2 ак.ч.	2. Статические акустические эффекты в твердых телах. Упруго- и электроакустические эффекты в твердых телах. 2 ак.ч	Тензор Грина-Кристоффеля в однородно деформированной среде. 4 ак.ч	
2. Динамические эффекты в твердых телах	1.	Акустические волны конечной амплитуды в анизотропных твердых телах.	Взаимодействие плоских акустических волн конечной амплитуды в анизотропных твердых телах. Анизотропия акустического нелинейного акустического параметра. Геометрическая и физическая нелинейности.	2 ак.ч.	Неколлинейное взаимодействие акустических волн. Трехволновые взаимодействия. Законы сохранения энергии и импульса. 2 ак.ч	Анизотропия нелинейного акустического параметра. Геометрическая и физическая нелинейности. 12 ак.ч	Об, ДЗ, К

	2.	Элементы динамики кристаллической решетки	Упругие волны в одномерной цепочке атомов. Дисперсия, фазовая и групповая скорости упругих волн. Зона Бриллюэна. Ангармонические эффекты. Межатомные и внутримолекулярные силы.	2 ак. ч.	Колебательные моды одномерной одно- и двухатомной решетки. Граничные условия Борна Кармана. Тепловые фононы. 2 ак. ч.	Потенциал взаимодействия. Закон Гука и коэффициенты упругости. Температура Дебая. Теплоемкость твердых тел. Тепловое расширение. Параметр Грюнайзена. 8 ак.ч.	КР, ДЗ
	3	Взаимодействие акустических волн с электронной подсистемой	Элементы зонной теории твердых тел. Диэлектрики, полупроводники, металлы. Электроны в металлах и полупроводниках. Импульс и энергия Ферми. Принцип Паули. Энергетический спектра электронов и его влияние на физические свойства металлов и полупроводников..	2 ак. ч	Теория Бардина-Купера-Шиффера. Сверхпроводимость. Системы с тяжелыми фермионами. 2 ак.ч	Электропроводность металлов. Механизмы взаимодействия акустических волн с носителями зарядов: деформационный потенциал и пьезоэлектрический эффект. Линейные и нелинейные свойства металлов в области электронно-топологического перехода. 8 ак.ч	Об, ДЗ
	1	Дефекты в кристаллах.	Линейные и точечные дефекты в кристаллах. Образование и типы точечных дефектов. Общие свойства и типы дислокаций. Пластические деформации. (2 часа)	2 ак. ч	Влияние дефектов на упругие свойства кристаллов. Дефект модуля. Юнга. Пики Бордони.(2 часа). 2 ак.ч	Механизмы дислокационного поглощения упругих волн в твердых телах с дефектами. Резонансное поглощение. Амплитудно-зависимое поглощение. Дислокационная релаксация. Барьер Пайерлса. 12 ак.ч	Об, ДЗ
2. Диагностика твердых тел методами нелинейной акустики							

3. Технические методы и средства исследования океана	2.	Нелинейные акустические свойства твердых тел с дефектами и нарушением сплошности	Структурная нелинейность. Физические механизмы, приводящие к появлению структурной (неклассической) нелинейности. Феноменологическое описание неклассической нелинейности: “хлопающая” и гистерезисная нелинейности. Бимодульные среды. (4 часа).	2 ак. ч	Акустические волны конечной амплитуды в твердых телах с дефектами. 2 ак.ч	Особенности упругих свойств микро- и наноструктурированных материалов. Связь упругих нелинейных свойств и прочностных характеристик твердых тел. 4 ак.ч	Об, ДЗ
	3.	Упругие волны неконсолидированных гранулированных сред.	Упругие свойства неконсолидированных гранулированных сред. Механизмы упругой нелинейности неконсолидированных гранулированных сред. Влияние внешних воздействий на линейные и нелинейные упругие свойства гранулированных сред.	2 ак. ч	Флюидонасыщенные гранулированные среды 2 ак.ч.	Теория контактного взаимодействия Герца. Теория флюидонасыщенных сред Гассмана. Теория Био.4 ак.ч	Об, ДЗ
	1.	Экспериментальные методы диагностики твердых тел методами нелинейной акустики.	Статические методы. Квазистатические методы. Динамические спектральные методы. Нелинейная резонансная акустическая спектроскопия твердых тел.	2 ак. ч.	1. Метод Терстона-Браггера. Генерация второй и третьей гармоник в твердых телах с дефектами. 2 ак. ч.	Эффекты быстрой и медленной динамики в твердых телах с остаточными напряжениями. Абсолютные методы измерения в акустике твердого тела. 12 ак.ч	Об, К

Предусмотрены следующие формы текущего контроля успеваемости.

1. Домашнее задание (ДЗ);
2. Контрольная работа (КР);
3. Коллоквиум (К);
4. Обсуждение (Об).

9. Место дисциплины в структуре ООП ВПО

1. Дисциплина по выбору.
2. Вариативная часть, блок профессиональной подготовки, дисциплина магистерской программы
3. Курс связан с рядом дисциплин, преподаваемых на физическом факультете. К началу изучения курса студент должен владеть знаниями общей физики, механики сплошных сред, теоретической механики, теоретических основ акустики, с которыми он методически связан.
 - 3.1. Дисциплины, которые должны быть освоены для начала освоения данной дисциплины: общая физика, основы геофизики, механика сплошных сред, теоретическая механика, введение в акустику, теоретические основы акустики, кристаллоакустика и акустоэлектроника.

3.2. Дисциплины, для которых освоение данной дисциплины (модуля) необходимо как предшествующее: Выполнение магистерской диссертации.

10. Образовательные технологии

Изложение в основном ведётся традиционным способом (с использованием фломастеров, мела и доски). Отдельные семинары сопровождаются презентациями с помощью компьютера и проектора. Во время проведения коллоквиума проводится общая дискуссия по темам соответствующих разделов курса.

11. Оценочные средства для текущего контроля успеваемости и промежуточной аттестации

Примерный список вопросов для проведения текущей и промежуточной аттестации:

1. Феноменологическое описание упругих свойств твердых тел.
2. Термодинамические потенциалы.
3. Механическое и термодинамическое напряжения.
4. Уравнения состояния твердых тел.
5. Коэффициенты упругости высших порядков.
6. Основы нелинейной теории упругости. Тензор Пиолы-Киргоффа.
7. Акустические волны в однородно деформированных кристаллах.
8. Упруго-акустический эффект в твердых телах.
9. Электро акустический эффект в твердых телах, обладающих пьезоэффектом.
10. Элементы динамики кристаллической решетки.
11. Колебательный спектр одномерной решетки. Зона Бриллюэна. Дисперсия, фазовая скорость. Фононы. Частота (температура) Дебая.
12. Ангармонические эффекты. Межатомные и внутримолекулярные силы.
13. Потенциал межатомного взаимодействия.
14. Закон Гука и коэффициенты упругости.
15. Тепловое расширение. Параметр Грюнайзена.
16. Акустические свойства кристаллов в области фазовых переходов (теория Ландау).
17. Электроны в в твердых телах. Металлы. Полупроводники. Изоляторы.
18. Поверхность Ферми.
19. Электронно-топологический переход (ЭТП).
20. Влияние ЭТП на упругие свойства металлов.
21. Гранулированные неконсолидированные среды.
22. Бимодульные среды.
23. Структурная нелинейность. Физические механизмы, приводящие к появлению структурной (неклассической) нелинейности.
24. Феноменологическое описание неклассической нелинейности: “хлопающая” и гистерезисная нелинейности.
25. Связь упругих нелинейных свойств и прочностных характеристик твердых тел.
26. Общая характеристика дефектов и структурных неоднородностей в твердых телах и механизмов связанной с ними акустической нелинейности.
27. Экспериментальные методы исследования упругой нелинейности в твердых телах.

Примерный список заданий для проведения текущей и промежуточной аттестации:

Написать уравнение состояния для диэлектрического кристалла в квадратичном приближении.

Оценить изменения скоростей продольной и сдвиговой упругих волн, распространяющихся вдоль акустической оси в кристалле ниобата лития при приложении электрического поля вдоль оси U
Формулы скоростей продольных и сдвиговых волн в изотропном твердом теле, в котором известны его плотность и коэффициенты упругости.

Написать закон Холла-Петча для поликристаллических металлов.

Оценить вклад в нелинейный акустический параметр геометрической и физической нелинейностей для продольной волны, распространяющейся вдоль ребра куба в кубическом кристалле.
Найти дисперсионное уравнение для одномерной двухатомной цепочки.
Оценить частоту отсечки для продольных волн распространяющейся в одномерной цепочке с периодом 5 ангстрем и скоростью 5000 м/с
Нелинейный закон Гука в изотропных твердых телах. Коэффициенты упругости третьего и второго порядков.
Используя потенциал межатомного взаимодействия в ионном кристалле поваренной соли в форме Mi :
а) Оценить по порядку величины коэффициент теплового расширения в твердом теле.
б) Оценить отношение коэффициентов упругости третьего и второго порядков.

12. Учебно-методическое обеспечение дисциплины

12.1. При изучении курса основное внимание следует уделять физическим механизмам изучаемых явлений, их связи с другими акустическими явлениями и эффектами в бездефектных и средах с дефектами, типичным значениям основных величин, характеризующих процесс или явление, вопросам практического значения изучаемых нелинейных акустических явлений для неразрушающей диагностики твердых тел.

12.2. Литература

Основная литература:

1. Зарембо Л.К., Красильников В.А. Введение в нелинейную акустику. М.: Наука, 1966.
2. Красильников В.А., Крылов В.В. Введение в физическую акустику. М.: Наука, 1984.
3. Гурбатов С.Н., Руденко О.В., Саичев А.И. Волны и структуры в нелинейных средах без дисперсии. М.: Физматлит., 2008.

Дополнительная литература:

1. Лямов В.Е. Поляризационные эффекты и анизотропия взаимодействия акустических волн в кристаллах. М.: Изд.-во МГУ, 1983.
2. Труэлл Р., Эльбаум Ч., Чик Б. Ультразвуковые методы в физике твердого тела. М.: Мир, 1972.
3. Гурбатов С.Н., Руденко О.В., Саичев А.И. Волны и структуры в нелинейных средах без дисперсии. - М.: ФИЗМАТЛИТ, 2008.
4. Киттель Ч. Введение в физику твердого тела М.: Наука, 1978.
5. Физическая акустика (под ред. У.Мэзона.), том 1. М.: Мир, 1972.
6. Акустика в задачах (под редакцией С.Н. Гурбатова и О.В. Руденко). – М.: Наука, 1996.

Периодическая литература:

1. О.В. Руденко. Гигантские нелинейности структурно-неоднородных сред и основы методов нелинейной акустической диагностики // УФН, 2006 Т.176 с.77.
2. Коробов А.И., Изосимова М.Ю. Нелинейные волны Лэмба в металлической пластинке с дефектами // Акуст. Журн., 2006. № 5. с.683-692
3. М.Ю. Изосимова, А.И. Коробов, О.В. Руденко. Пространственное распределение нелинейного акустического параметра в тонкой поликристаллической пластине из сплава с дефектами // Акуст. журнал. 2009. Т.55. № 2. С.153-159.
4. О.В. Руденко, А.И. Коробов, М.Ю. Изосимова. Нелинейность твердых тел с микро- и наномасштабными дефектами и особенности ее макроскопических проявлений // Акуст. журнал. 2010. Т.56. № 2. С.187-193.

5. А.И. Коробов, Прохоров В.М., Д.М. Мехедов. Упругие постоянные второго и третьего порядков алюминиевого сплава В95 и композита В95/наноалмаз // Физика твердого тела, 2013, том 55, № 1, с. 10-13.
6. Н.В. Ширгина, А.И. Коробов, А.И. Кокшайский. Влияние статических и динамических внешних воздействий на упругие нелинейные свойства модели гранулированной неконсолидированной среды // Акустический журнал, 2013, том 59, № 5, с. 552-560
7. А.И. Коробов, Н.И. Одина, Д.М. Мехедов. Влияние медленной динамики на упругие свойства материалов с остаточными и сдвиговыми деформациями // Акустический журнал, 2013, том 59, № 4, с. 438-444
8. Красильников В.А. «Нелинейная акустика конденсированных сред: история и развитие» // Акуст. Журн. 1999. Т.45, №3. с. 423-430 (1999))

Интернет-ресурсы:

www.akzh.ru, www.akin.ru, <http://journals.ioffe.ru/jtf/>

Методические указания к лабораторным занятиям:

... Научно-исследовательская практика, задачи спецпрактикума кафедры акустики: «Искажение формы и поглощение мощных ультразвуковых волн в жидкости», «Численное моделирование нелинейных и дифракционных эффектов в звуковых пучках», «Нелинейные волны в средах с дисперсией».

Методические указания к практическим занятиям. Описание и практическое руководство к экспериментальным установкам: «Сканирующий лазерный виброметр PSV-300 фирмы Polytec» (Германия), «Система для исследования акустических свойств материалов RITEC SNAP» (США), «Автоматизированная экспериментальная установка для фотоакустических исследований».

Программное обеспечение современных информационных компьютерных технологий.

13. Материально-техническое обеспечение

13.1. Помещения - учебная аудитория. Лекционные и семинарские занятия по дисциплине проводятся в соответствии с требованиями к материально-техническим условиям реализации ООП (п.5.3. образовательного стандарта МГУ по направлению подготовки «Физика»). Аудиторный фонд для проведения учебных занятий включает достаточное количество аудиторий для проведения лекций и семинарских занятий с количеством посадочных мест не менее 12 в каждой аудитории.

13.2. Оборудование – доска, фломастеры или мел.

Специализированные компетенции профильной направленности обучения (специализированные компетенции магистерской программы)	
М-СПК-13	Свободно владеть профессиональными знаниями о закономерностях распространения нелинейных акустических волн в бездефектных твердых телах и твердотельных материалах с различными типами дефектов, необходимыми для решения научно-исследовательских и научно-инновационных задач диагностики и неразрушающего контроля новых материалов, инженерных конструкций, визуализации и локализации остаточных напряжений и дефектов в микро- и нанокристаллических материалах методами нелинейной акустики; организовывать и планировать акустические исследования, ставить конкретные задачи в области нелинейной акустики, решать их с помощью современных методов нелинейной акустики, научной аппаратуры, оборудования, математических методов и информационных технологий и оформлять их результаты в виде научных статей, докладов, отчетов.