

O'ZBEKISTON RESPUBLIKASI
OLIY VA O'RTA MAXSUS TA'LIM VAZIRLIGI
SAMARQAND DAVLAT UNIVERSITETI
FIZIKA FAKULTETI

NAZARIY FIZIKA VA KVANT ELEKTRONIKASI KAFEDRASI

Ro'yxatga olindi:
№ _____
“ ___ ” _____ 2019y

“TASDIQLAYMAN”
O'quvishlaribuyichaprorektori:
_____prof.A.S.Soleev
“ ___ ” _____ 2019 y.

LAZERLI AKUSTO-OPTIK SPEKTROSKOPIYA
FANINIDAN
O'QUV – USLUBIY MAJMUUA
(4-kurs talabalari uchun tanlov fan)



Samarqand- 2019

Fanning o'quv-uslubiy majmuasi ishchi o'quv dasturi, o'quv reja va na'munaviy o'quv dasturiga muvofiq ishlab chiqildi.

TUZUVCHI:

Sabirov L.M - SamDU, «Nazariy fizika va kvant elektronikasi» kafedrası professori f.-m.f.d.

TAQRIZCHI:

prof.Eshqobilov N.B. - SamDU, nazariy fizika va kvant elektronikasi kafedrası mudiriprofessori, f.-m.f.d.

Fanning o'quv-uslubiy majmuasi «Nazariy fizika va kvant elektronikasi» kafedrasining 2019 yil “__” avgustdagidagi 1-son yig'ilishida muhokamadan o'tgan va fakultet kengashida muhokama qilish uchun tavsiya etilgan.

Kafedramudiri: _____ prof.Eshqobilov N.B.

Fanning o'quv-uslubiy majmuasi FizikafakultetiIlmiyKengashining2019 yil “__”avgustdagi 1-son majlis bayoni bilan tasdiqlangan.

Fakultetkengashiraisi: _____ **dots. Absanov A.A.**

Kelishildi:

O'quv –uslubiy boshqarmaboshlig'i:

Aliqulov B.S

**ЎЗБЕКИСТОН РЕСПУБЛИКАСИ ОЛИЙ ВА ЎРТА МАХСУС
ТАЪЛИМ ВАЗИРЛИГИ**

**САМАРҚАНД ДАВЛАТ УНИВЕРСИТЕТИ
Физика факультети
Назарий физика ва квант электроникаси кафедраси**

Рўйхатга олинди “ТАСДИҚЛАЙМАН”
№ _____ Ўқув ишлари бўйича проректор
201__ «__» _____ Проф. А.Солиев
“ _____ ” _____ 2019й.

**“ЛАЗЕРЛИ АКУСТО-ОПТИК СПЕКТРОСКОПИЯ”
(4-курслар учун танловфани)**

ИШЧИ ЎҚУВ ДАСТУР

Билим соҳаси	100000 – гуманитар соҳа
Таълим соҳаси	140000 – табиий фанлар
Таълим йўналиши	5140200 – физика

САМАРҚАНД 2019

**Фаннинг ишчи ўқув дастури ўқув, ишчи ўқув режа ва ўқув
дастурига
мувофиқ ишлаб чиқилди.**

Тузувчи:

Семенов Д.И - СамДУ, «Назарий физика ва квант электроникаси»
кафедраси доценти ф-м.ф.д

Исмаилов Ф.Р- СамДУ, «Назарий физика ва квант электроникаси »
кафедраси ассистенти

Такризчи:

Сабилов Л.М.- - СамДУ, «Назарий физика ва квант
электроникаси» кафедраси профессори ф-м.ф.д

Фаннинг ишчи ўқув дастури “Назарий физика ва квант
электроникаси ” кафедрасининг 2019 йил “___” _____даги
“1”-сон йиғилишида муҳокамадан ўтган ва факултет кенгашида
муҳокама қилиш учун тавсия этилган.

Кафедра мудир: _____ **проф.Н.Б. Эшқобилов**

Фаннинг ишчи ўқув дастури “Физика” факултет кенгашида
муҳокама етилган ва фойдаланишга тавсия қилинган (2018 йил
_____аги 1-сонли баённома).

Факултет илмий кенгаши раиси: _____ **доц.А.А.Абсанов**

Келишилди: Ўқув услубий бўлим бошлиғи
_____ **доц. Алиқулов Б.С**

ЛАЗЕРЛИ АКУСТО-ОПТИК СПЕКТРОСКОПИЯ

№	Маърузамавзуси	Умумийсо ат	адабиё тлар
1	Акустические упругие волны	2	1-2
2	Распространение и основные характеристики звуковой волны	2	1-2
3	Специфические особенности ультразвука	2	1-2
4	Дисперсия скорости звука	2	1-3
5	Дисперсия, связанная со свойствами среды	2	1-2
6	Молекулярная акустика	2	5,6
7	Акустическая релаксация	2	1,2
8	Дифракция света на ультразвуке	2	3,4
9	Уравнение распространения света в периодической среде	2	1,5,6
10	Распределение интенсивности дифрагированного излучения по дифракционным порядкам	2	1-3
11	Режим Брега в явлениях дифрагированного света на ультразвуке	2	2,4
12	Физические особенности дифракции Брега	2	3-5
13	Взаимодействие электромагнитного излучения с фонами	2	2-4
14	Гиперзвуковые волны в жидкостях	2	1-3
15	Взаимодействие электромагнитного излучения с адиабатическими флуктуациями давления	2	2,4
16	Рассеяния света на акустических фонах	2	3-5
17	Основные методы лазерной акусто-оптической спектроскопии	2	2-4
18	Изотропное рассеяния света	2	1-3
19	Двойное лучепреломления в акустическом поле	2	2,4
20	Время ориентационной релаксации в эффекта двулучепреломления	2	3-5
21	Эффект Керра, Коттон-Мутона, двулучепреломления в потоке	2	2-4
22	Релаксационные явления в эффекте наведенного двулучепреломления	2	4-5
23	Рассеяния света упругих волны (гиперзвуковых диапазонов)	2	

24	Манделштам-Бриллюэнский спектроскопия	2	
25	Методика измерения скорость гиперзвуковых волн в жидкостях и газах	2	
26	Методика измерения поглощения гиперзвуковых волн в жидкостях и газах	2	
		52	

АМАЛИЙ МАШҒУЛОТ

	Тема работы	Часы
1	Общая характеристика акустической волны	2
2	Звуковые колебания в среде	2
3	Особенности распространения в среде	2
4	Общее понятие дисперсия звука	2
5	Дисперсия релаксационного типа	2
6	Эффект Доплера	2
7	Энергия звукового поля	2
8	Интенсивность звука	2
9	Уровень интенсивности звука	2
10	Понятие акустической релаксации	2
11	Время акустической релаксации	2
12	Дифракция света на ультразвуке	2
13	Дифракции Раман-Ната	2
14	Режим дифракции Раман-Ната	2
15	Решение задачи специфической особенности ультразвука	2
16	Решение задачи интенсивности звукового поля	2
17	Взаимодействие оптического излучения в звуке	2
18	Измерения ультра акусто-оптической дифракции и расчет скорости ультразвука	2
19	Измерения ультра акусто-оптической дифракции и расчет скорости ультразвука	2

20	Изучение зависимости скорости ультразвука от температуры и частоты	2
21	Изучение зависимости коэффициента поглощения ультразвука от частоты	2
22	Изучение зависимости коэффициента поглощения ультразвука от температуры	2
23	Изменения величины поведения двулучепреломления	2
24	Частотные зависимости коэффициента поглощения звука в жидкостях	2
25	Расчет параметров релаксационного процесса по частотного зависимости коэффициента поглощения гиперзвука	2
26	Методика измерения скорость гиперзвуковых волн в жидкостях и газах	2
27	Методика измерения поглощения гиперзвуковых волн в жидкостях и газах	2
		56

МУСТАҚИЛ ИШ МАВЗУЛАРИ

1. Применение Ультразвук
2. Пьезоэлектрический эффект
3. Понятые акустический фононы
4. Фазовая и групповая скорость акустической волны.
5. Влияние состояния среды на скорость распространения звуковых волн.
6. Релаксационная теория распространения звука в жидкостях.
7. Акустооптические исследования газов и паров.
8. Акустооптические исследования жидкостей.
9. Акустооптические исследования твердых тел.
10. Применение акустооптических методов для исследования неравновесных состояний вещества.
11. Рассеяние света как метод исследования фононов.
12. Оптические явления в поле ультразвуковых волн.
13. Двойное лучепреломление света, наведенное полем акустической волны.
14. Акустические исследования фазовых переходов и критических явлений.
15. адиабатических флуктуаций давления.
16. Изучение коэффициента поглощения гиперзвуковых волн в жидкостях по спектрам рассеяния Мандельштама-Бриллюэна
17. Анизотропное рассеяние света в жидкостях.
18. Изотропное рассеяние света в жидкостях.

АДАБИЁТЛАР

Асосий

1. Фабелинский И.Л., Молекулярное рассеяние света, М.:Наука,.1970.
2. Вукс М.Ф., Рассеяния света в газах, жидкостях и растворах, Изд. ЛГУ, 1977.
3. Ультразвук. "Маленькая энциклопедия", М., 1979.
4. Физическая акустика, (под редакцией. У Мэзона), том VI, М.: Мир, 1993.

Қўшимча

1. Волькенштейн М.В., Молекулярная оптика, М., 1951.
2. Ноздрев В.Ф., Молекулярная акустика, Изд. "Высшая школа", М., 1974.
3. Вукс М.Ф., Электрические и оптические свойства молекул и конденсированных сред, Л., 1987.

ЛАЗЕРНАЯ АКУСТО-ОПТИЧЕСКАЯ СПЕКТРОСКОПИЯ

КОНСПЕКТ ЛЕКЦИЙ

СОДЕРЖАНИЕ

- Лекция 1. Акустические упругие волны.
- Лекция 2. Распространение и основные характеристики звуковых волн.
- Лекция 3. Специфические особенности ультразвука.
- Лекция 4. Дисперсия скорости звука.
- Лекция 5. Дисперсия, связанная со свойствами среды.
- Лекция 6. Молекулярная акустика.
- Лекция 7. Акустическая релаксация.
- Лекция 8. Дифракция света на ультразвуке.
- Лекция 9. Распределение интенсивности светового излучения в дифракционных максимумах.
- Лекция 10. Дифракция Рамана-Ната.
- Лекция 11. Дифракция Брега.
- Лекция 12. Гиперзвуковые волны в жидкостях.
- Лекция 13. Взаимодействие электромагнитного излучения с фононами среды.

ЛЕКЦИЯ 1

АКУСТИЧЕСКИЕ УПРУГИЕ ВОЛНЫ

План:

1. Общая характеристика акустической волны;
2. Способы изучения упругих волн;
3. Особенности распространения упругих волн в среде.

Ключевые слова:

Волна, распространение, колебание, скорость, поглощение, суперпозиция, акустика

Основное содержание:

Существование упругих волн вытекает из законов Ньютона. Удар по торцу тонкого длинного стержня сжимает слой, прилегающий к торцу, и сообщает ему скорость. Возникшие силы упругости ускоряют следующий слой и деформируют его. Упругие силы, возникшие при деформации второго слоя, остановят первый слой, а второй слой приобретет скорость. В результате окажется, что первый слой остановился и вернулся в недеформированное состояние, а второй начал двигаться и сжался. Так движение и деформация будут передаваться от слоя к слою, - по стержню побежит упругая волна, которая будет переносить исходное возмущение вдоль по стержню практически без изменения.

Во всех других случаях распространения упругих волн в любых средах - твердых, жидких и газообразных - основные черты картины те же, что мы описали для стержня: частицы среды в волне приобретают скорость, деформируются и в них возникают упругие напряжения, которые и передают волну дальше по телу.

При распространении волны следует различать два совершенно разных явления: движение частиц среды в волне и перемещение самой упругой волны по среде. Первое явление - это движение частиц как материальных точек; второе явление - переход возмущенного состояния среды с одних частиц на другие. Так, величина смещения и скорость частицы в волне зависят от силы звука, например для слышимых звуков - от их громкости. Эти величины в звуковой волне, как правило, очень малы, а после прохождения волны каждая частица практически остается в своем исходном положении. Волна же удаляется по среде от места возникновения; скорость ее велика (сотни и тысячи метров в секунду) и не зависит от силы звука, а только от свойств среды: чем больше упругость среды, тем больше упругие напряжения, возникающие в среде при данной деформации, и тем быстрее передается возмущение от частицы к частице - тем больше скорость звука.

Скорость звука всегда конечна и определяется именно свойствами и плотностью среды. Отсюда следует, что во всех акустических вопросах нужно учитывать как упругость среды, так и ее инерционные свойства; от других же свойств среды ее акустическое поведение не зависит.

Изучать упругие волны можно двумя принципиально разными способами. Можно рассматривать волну как движение материальных точек (частиц среды), упруго взаимодействующих между собой. В этом способе объект изучения - отдельные частицы среды и их движение. К частицам можно применить уравнения механики системы материальных точек, учесть силы взаимодействия между ними, их инерцию и найти таким способом движение каждой частицы. Так удастся рассмотреть, однако, только простейшие виды волн - бегущие одномерные волны. Для волн же любого вида этот способ весьма неудобен. В самом деле, силы упругости, действующие на какую-либо частицу, вызваны деформациями соседних частиц, а эти деформации связаны сдвижением еще более удаленных частиц и т. д.; в итоге, чтобы найти движение одной частицы, требуется выяснить и движение всех остальных частиц среды. Но тогда, оказывается, проще с самого начала отказаться от громоздкого рассмотрения поведения каждой частицы в отдельности и вместо этого изучать волну в целом как самостоятельный объект. В этом и заключается второй способ.

При втором способе изучения содержание акустики как науки можно назвать механикой упругих волн, в противоположность механике частиц среды, с которой имеем дело при первом способе. Выбор в качестве основного объекта изучения не отдельных частиц среды, а всей волны в целом диктуется тем, что для волны удастся найти простые законы поведения: законы распространения, законы отражения и преломления на границах разных сред, законы рассеяния от препятствий, особенности поведения в ограниченных областях среды и т. д.

Схема построения акустики как механики упругих волн имеет, таким образом, следующий вид. Общие законы поведения упругих волн мы получим как следствия ньютоновской механики для частиц среды. Но, получив эти законы, мы в каждой конкретной физической ситуации будем искать поведение волны в целом, уже не интересуясь движением отдельных частиц среды, в которой бежит волна. В тех же случаях, когда это понадобится, можно снова перейти к частицам: изучив волну в целом, легко найти движение каждой частицы.

Хотя звуковая волна - механическое явление, поведение волны - явление совершенно иное, чем движение материальных тел. Действительно, обычные в механике тел понятия координаты, траектории, ускорения, неприменимы к волне или применимы лишь частично, хотя эти понятия остаются полностью в силе для каждой частицы среды, в которой бежит волна. Так, волне, выходящей из некоторого источника звука, нельзя приписать какой-либо траектории, так как она расходится от источника во все стороны.

Любая волна в данной среде движется с неизменной скоростью, поэтому к волне понятие ускорения неприменимо. Требуется более глубокого анализа даже основное в акустике понятие скорости волны: оно оказывается отличным от понятия скорости тела. Но даже в тех случаях, когда поведение волны, казалось

бы, похоже на движение тела по инерции (например, бегущая плоская волна), все же это поведение принципиально отлично от движения тела. Так, если на пути волны есть препятствие, то она разделится на две волны, бегущие в противоположных направлениях: отраженную и прошедшую. При падении синусоидальной волны эти обе волны также будут синусоидальными, а если подобрать препятствие так, чтобы их амплитуды были равны, то они окажутся равными 0.707 от амплитуды падающей волны. Если бы, однако, обе такие волны были посланы вместе в одну сторону, то они образовали бы одну волну с амплитудой $0.707 + 0.707 = 1.414$.

Далее, если в какой-либо среде бегут две волны, то, каждая бежит, «не замечая» другой, как если бы в среде существовала только она одна. Вместе с тем для волны явится препятствием каждая неоднородность среды. Попадая на ограниченное препятствие, волна рассеивается во все стороны; при этом какая-то часть волны возвращается и в то место, откуда вышла исходная волна, - на этом основаны гидролокация и ультразвуковая дефектоскопия (обнаружение при помощи ультразвука дефектов, например трещин, внутри непрозрачных материалов).

Ввиду всех этих и многих других особенностей поведения волн, о волнах, как правило, не говорят «движутся», оставляя этот термин для перемещений тел (в том числе, конечно, и для перемещений частиц среды в волне). О волне говорят, что она «распространяется», понимая под этим термином всю картину изменения возмущенного состояния среды с течением времени.

Для описания распространения упругих волн существует привилегированная «абсолютная» система координат: система, связанная с самой средой в целом. Для электромагнитных волн в вакууме, конечно, никакой привилегированной системы нет. Отметим, наконец, что простые законы распространения упругих волн справедливы только при условии достаточной малости отклонений частиц среды в волне от положения равновесия.

Контрольные вопросы:

1. Основные характеристики упругой волны.
2. Как происходит распространение упругой волны в среде?
3. Перечислить способы изучения упругих волн.
4. Чем определяется скорость распространения упругой волны в среде?
5. Перечислить основные особенности распространения упругих волн в среде.

Вопросы для самостоятельной работы:

1. Зависимость скорости распространения звука от агрегатного состояния среды.
2. Фазовая и групповая скорость акустической волны.
3. Уравнение плоской монохроматической волны и его следствия.

Рекомендуемая литература:

5. *Ультразвук. Маленькая энциклопедия*, М., 1979.
6. *Физическая акустика*, (под редакцией. У Мэсона), том VI, М.: Мир, 1993.
7. Ноздрев В.Ф., *Молекулярная акустика*, Изд. "Высшая школа", М., 1974.
8. Фабелинский И.Л., *Молекулярное рассеяние света*, М.:Наука.,1970.
9. Вукс М.Ф., *Рассеяния света в газах, жидкостях и растворах*, Изд. ЛГУ, 1977.
10. Волькенштейн М.В., *Молекулярная оптика*, М., 1951.

ЛЕКЦИЯ 2

РАСПРОСТРАНЕНИЕ И ОСНОВНЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ЗВУКОВЫХ ВОЛН

План:

1. Звуковые колебания в среде;
2. Скорость распространения звуковых волн в среде;
3. Линейные характеристики звукового поля;
4. Энергетические характеристики звукового поля.

Ключевые слова:

Колебание, звук, скорость звука, звуковое давление, энергия, интенсивность звука, акустическое сопротивление.

Основное содержание:

Звук распространяется в виде переменного возмущения упругой среды, т. е. в виде звуковых волн. Звуковыми колебаниями называют колебательные движения частиц среды под действием этого возмущения. Пространство, в котором происходит распространение этих волн, называют звуковым полем. Если источник возмущения известен, то пространство, в котором могут быть обнаружены звуковые колебания, создаваемые этим источником, называют звуковым полем данного источника звука. Звуковые колебания являются частным случаем механических колебаний.

Звуковые колебания в жидкой и газообразной средах являются продольными колебаниями, т. е. частицы колеблются вдоль линии распространения волн. В твердых средах, кроме продольных колебаний, имеют место и поперечные колебания и волны, т. е. такие, в которых частицы среды колеблются в направлении, перпендикулярном линии распространения волны. Направление распространения звуковых волн называют звуковым лучом, а поверхность, соединяющую все смежные точки поля с одинаковой фазой колебания частиц среды, называют фронтом волны. Фронт волны перпендикулярен звуковому лучу. В общем случае фронт волны имеет сложную форму, но в практических случаях ограничиваются рассмотрением трех видов фронта волны: плоской, сферической и цилиндрической.

Звуковые волны распространяются с определенной скоростью, называемой скоростью звука. В разных средах и телах скорость звука различна. В газообразных средах скорость звука зависит от плотности среды ρ и статического атмосферного давления p_{ac} :

$$c = \sqrt{\gamma \frac{p_{ac}}{\rho}}$$

где γ - коэффициент адиабаты; $\gamma = C_p/C_v$, C_p и C_v - теплоемкость среды при постоянном давлении и при постоянном объеме. Для газов это отношение составляет от 1.668 (для аргона) до 1.28 (для метана). Для воздуха оно равно 1.402 при 15 °С и давлении 101 325 Па. В жидких и твердых материалах скорость звука определяется плотностью материала ρ и модулем упругости E для соответствующего вида деформации ((продольные колебания, крутильные, изгибные и др.):

$$c = \sqrt{\frac{E}{\rho}}$$

Для колебаний с периодом T длина звуковой волны, т. е. расстояние между соседними фронтами волны с одинаковой фазой колебаний, например, между максимумами или минимумами колебания, $\lambda = cT$, а частота колебаний $f = 1/T$. Частоты акустических колебаний в пределах 20-20 000 Гц называют звуковыми, ниже 20 Гц - инфразвуковыми, а выше 20 000 Гц - ультразвуковыми (вводят также понятие гиперзвуковых колебаний со сверхвысокими частотами, точных границ для них нет.). Звуковые частоты делят на низкие, средние и высокие. Примерная граница между низкими и средними частотами составляет 200-500 Гц, между высокими и средними 2000-5000 Гц. Если речь идет только об акустических процессах, то обычно прилагательное «звуковые» опускают.

Линейные характеристики звукового поля

К линейным характеристикам звукового поля в жидкостях и газах относят звуковое давление, смещение частиц среды, скорость колебаний и акустическое сопротивление среды.

Звуковым давлением в газах и жидкостях называют разность между мгновенным значением давления $p_{ам}$ в точке среды при прохождении через нее звуковой волны и статическим давлением в той же точке, т.е. $p = p_{ам} - p_{ac}$. Звуковое давление - величина знакопеременная: в моменты сгущения (уплотнения) частиц среды она положительная, в моменты разрежения (расширения) среды - отрицательная. Эту величину оценивают по амплитуде или по эффективному значению. Для синусоидальных колебаний эффективное значение составляет $1/\sqrt{2} = 0.701$ амплитудного. Звуковое давление представляет собой силу, действующую на единицу поверхности: $p = F/S$. В системе СИ его измеряют в ньютонах на квадратный метр (Н/м²). Эта единица называется Паскалем и обозначается Па. В абсолютной системе CGS единиц звуковое давление измеряют в динах на квадратный сантиметр: 1Па=1Н/м²=10дин/см²=1 кг/(мс²).

Смещением называют отклонение частиц среды от ее статического положения под действием проходящей звуковой волны. Если отклонение происходит по направлению движения волны, то смещению приписывают положительный знак, а при противоположном направлении — отрицательный знак. Смещение измеряют в метрах (в системе СИ) или сантиметрах (в абсолютной системе CQS единиц).

Скоростью колебаний называют скорость движения частиц среды под действием проходящей звуковой волны: $v = du/dt$, где u - смещение частиц среды; t - время. При движении частицы среды в направлении распространения волны скорость колебаний считается положительной, а в обратном направлении - отрицательной. Заметим, что эту скорость нельзя путать со скоростью движения - волны,

которая постоянна для данной среды и условий распространения волн. Скорость колебаний измеряют в метрах в секунду (м/с) или в сантиметрах в секунду (см/с).

Удельным акустическим сопротивлением называют отношение звукового давления p к скорости колебаний v : $\delta = p/v$. Это справедливо для линейных условий, в частности когда звуковое давление значительно меньше статического. Удельное акустическое сопротивление определяется свойствами среды или материала и условиями распространения волн. В общем случае удельное акустическое сопротивление - комплексная величина: $\delta_a = \omega_a + iq_a$, где ω_a и q_a - активная и реактивная составляющие удельного акустического сопротивления (прилагательное «удельное» часто для краткости опускают.) Размерность удельного акустического сопротивления в системе СИ - Па·с/м, а в абсолютной системе CGS - дин·с/см³.

Энергетические характеристики звукового поля

К энергетическим характеристикам звукового поля относятся интенсивность звука и плотность энергии.

Интенсивностью звука или силой звука называют количество энергии, проходящее в секунду через единицу площади, перпендикулярной к направлению распространения волны. Обозначают ее Y . Единицей интенсивности звука является ватт на квадратный метр (Вт/м²) в системе СИ.

Плотностью энергии ε называют количество звуковой энергии, находящейся в единице объема. Единицей плотности является джоуль на кубический метр в системе СИ и эрг на кубический сантиметр в абсолютной системе CGS единиц: 1 Дж/м³ = 10 эрг/см³. Плотность энергии ε связана с интенсивностью звука Y и звуковым давлением p соотношением:

$$\varepsilon = \frac{Y}{c} = \frac{p^2}{c^2 \rho}$$

Наиболее простыми для анализа являются плоские звуковые волны. Фронт плоской волны - плоскость, звуковые лучи идут параллельно друг другу. Энергия в плоской волне не расходится в стороны, интенсивность звука практически не зависит от расстояния, прошедшего волной, если пренебречь потерями на вязкость среды, молекулярное рассеяние, турбулентное затухание и дифракцию волн. Амплитуды звукового давления и скорости колебаний в этом случае также не зависят от расстояния, прошедшего волной.

Волновое уравнение для плоской волны

$$\frac{\partial^2 p}{\partial t^2} = c^2 \frac{\partial^2 p}{\partial x^2}, \quad c^2 = \gamma \frac{P_{ac}}{\rho}$$

где t - время; x - координата.

Общее решение волнового уравнения для плоской волны

$$p = \varphi_1(t - x/c) + \varphi_2(t + x/c)$$

где c - скорость звука (скорость движения волны); первый член - волна, движущаяся (бегущая) в положительном направлении; второй член - волна, движущаяся (бегущая) в отрицательном направлении.

Типовое частное решение волнового уравнения для волны, распространяющейся в положительном направлении:

$$p = p_m \exp[i\omega(t - x/c)] = p_m \exp[i(\omega t - kx)]$$

где p_m - амплитуда звукового давления; ω - угловая частота колебаний; $\omega = 2\pi f$, f - частота колебаний; $k = \omega/c$ - волновое число.

Контрольные вопросы:

1. Основные параметры и характеристики, описывающие звуковые колебания в среде.
2. Чем определяется скорость распространения звуковых волн в средах.
3. Перечислить и объяснить линейные характеристики звукового поля.
4. Перечислить и объяснить энергетические характеристики звукового поля.

Вопросы для самостоятельной работы:

1. Влияние состояния среды на скорость распространения звуковых волн.
2. Зависимость распространения звуковых волн от свойств среды и от характеристик звукового поля.

Рекомендуемая литература:

1. *Ультразвук. Маленькая энциклопедия*, М., 1979.
2. *Физическая акустика*, (под редакцией. У Мэсона), том VI, М.: Мир, 1993.

3. Ноздрев В.Ф., *Молекулярная акустика*, Изд. "Высшая школа", М., 1974.
4. Фабелинский И.Л., *Молекулярное рассеяние света*, М.:Наука, 1970.
5. Вукс М.Ф., *Рассеяния света в газах, жидкостях и растворах*, Изд. ЛГУ, 1977.

ЛЕКЦИЯ 3

СПЕЦИФИЧЕСКИЕ ОСОБЕННОСТИ УЛЬТРАЗВУКА

План:

1. Общая характеристика ультразвуковых колебаний;
2. Основные законы распространения ультразвуковых волн в среде;
3. Особенности распространения ультразвуковых волн в среде.

Ключевые слова:

Ультразвук, частота колебаний, отражение звука, рассеяние звука, дифракция звука.

Основное содержание:

Ультразвуком называют упругие колебания и волны, частота которых превышает 15-20 кГц. Нижняя граница области ультразвуковых частот, отделяющая ее от области слышимого звука, определяется субъективными свойствами человеческого слуха и является условной, так как верхняя граница слухового восприятия у каждого человека своя. Верхняя граница обусловлена физической природой упругих волн, которые могут распространяться лишь в материальной среде, т.е. при условии, что длина волны значительно больше длины свободного пробега молекул в газе или межатомных расстояний в жидкостях и твердых телах. В газах при нормальном давлении верхняя граница частот ультразвука составляет $\approx 10^9$ Гц, в жидкостях и твердых телах граничная частота достигает 10^{12} - 10^{13} Гц. В зависимости от длины волны и частоты ультразвук обладает различными специфическими особенностями излучения, приема, распространения и применения, поэтому область ультразвуковых частот подразделяют на три области:

- низкие ультразвуковые частоты ($1,5 \cdot 10^4 - 10^5$ Гц);
- средние ($10^5 - 10^7$ Гц);
- высокие ($10^7 - 10^9$ Гц).

Упругие волны с частотами $10^9 - 10^{13}$ Гц принято называть гиперзвуком.

Ультразвуковые волны по своей природе не отличаются от упругих волн слышимого диапазона. В газах и жидкостях распространяются только *продольные* волны, а в твердых телах – *продольные и сдвиговые*.

Распространение ультразвука подчиняется основным законам, общим для акустических волн любого диапазона частот. К основным законам распространения относятся *законы отражения звука и преломления звука на границах различных сред, дифракции звука и рассеяния звука* при наличии препятствий и неоднородностей в среде и неровностей на границах, *законы волноводного распространения* в ограниченных участках среды. Существенную роль при этом играет соотношение между длиной волны звука λ и геометрическим размером D – размером источника звука или препятствия на пути волны, размером неоднородностей среды. При $D \gg \lambda$ распространение звука вблизи препятствий происходит в основном по законам геометрической акустики (можно пользоваться законами отражения и преломления). Степень отклонения от геометрической картины распространения и необходимость учета дифракционных явлений определяются параметром $P = \frac{\sqrt{\lambda r}}{D}$, где r – расстояние от точки наблюдения до объекта, вызывающего дифракцию.

Скорость распространения ультразвуковых волн в неограниченной среде определяется характеристиками упругости и плотностью среды. В ограниченных средах на скорость распространения волн влияет наличие и характер границ, что приводит к частотной зависимости скорости (дисперсия скорости звука). Уменьшение амплитуды и интенсивности ультразвуковой волны по мере ее распространения в заданном направлении, то есть затухание звука, вызывается, как и для волн любой частоты, расхождением фронта волны с удалением от источника, рассеянием и поглощением звука. На всех частотах как слышимого, так и неслышимых диапазонов имеет место так называемое «классическое» поглощение, вызванное сдвиговой вязкостью (внутренним трением) среды. Кроме того, существует дополнительное (релаксационное) поглощение, часто существенно превосходящее «классическое» поглощение.

При значительной интенсивности звуковых волн появляются нелинейные эффекты:

1. нарушается принцип суперпозиции и возникает взаимодействие волн, приводящее к появлению тонов;
2. изменяется форма волны, ее спектр обогащается высшими гармониками и соответственно растет поглощение;
3. при достижении некоторого порогового значения интенсивности УЗ в жидкости возникает кавитация.

Хотя физическая природа ультразвука и определяющие его распространение основные законы те же, что и для звуковых волн любого диапазона частот, он обладает рядом специфических особенностей. Эти особенности обусловлены относительно высокими частотами ультразвука.

Малость длины волны определяет *лучевой характер* распространения ультразвуковых волн. Вблизи излучателя волны распространяются в виде пучков, поперечный размер которых сохраняется близким к размеру излучателя. Попадая на крупные препятствия такой пучок испытывает отражение и преломление. При попадании луча на малые препятствия возникает рассеянная волна, что позволяет обнаруживать в среде малые неоднородности (порядка десятых и сотых долей мм.). Отражение и рассеяние ультразвука на неоднородностях среды позволяют формировать в оптически непрозрачных средах *звуковые изображения* предметов, используя звуковые фокусирующие системы, подобно тому, как это делается с помощью световых лучей.

Фокусировка ультразвука позволяет не только получать звуковые изображения (системы звуковидения и акустической голографии), но и *концентрировать* звуковую энергию. С помощью ультразвуковых фокусирующих систем можно формировать заданные *характеристики направленности* излучателей и управлять ими.

Периодическое изменение показателя преломления световых волн, связанное с изменением плотности в ультразвуковой, вызывает *дифракцию света на ультразвуке*, наблюдаемую на частотах мегагерцевого и гигагерцевого диапазона. Ультразвуковую волну при этом можно рассматривать как дифракционную решетку.

Важнейшим нелинейным эффектом в ультразвуковом поле является *кавитация* – возникновение в жидкости массы пульсирующих пузырьков, заполненных паром, газом или их смесью. Сложное движение пузырьков, их схлопывание, слияние друг с другом и т.д. порождают в жидкости импульсы сжатия (микроударные волны) и микропотоки, вызывают локальное нагревание среды, ионизацию. Эти эффекты оказывают влияние на вещество: происходит разрушение находящихся в жидкости твердых тел (*кавитационная эрозия*), возникает перемешивание жидкости, инициируются или ускоряются различные физические и химические процессы. Изменяя условия протекания кавитации, можно усиливать или ослаблять различные кавитационные эффекты, например с ростом частоты ультразвука увеличивается роль микропотоков и уменьшается кавитационная эрозия, с увеличением давления в жидкости возрастает роль микроударных воздействий. Увеличение частоты приводит к повышению порогового значения интенсивности, соответствующей началу кавитации, которое зависит от рода жидкости, ее газосодержания, температуры и т.д.. Кавитация – сложный комплекс явлений. Ультразвуковые волны, распространяющиеся в жидкости, образуют чередующиеся области высоких и низких давлений, создающих зоны высоких сжатий и зоны разрежений. В разреженной зоне гидростатическое давление понижается до такой степени, что силы, действующие на молекулы жидкости, становятся больше сил межмолекулярного сцепления. В результате резкого изменения гидростатического равновесия жидкость «разрывается», образуя многочисленные мельчайшие пузырьки газов и паров. В следующий момент, когда в жидкости наступает период высокого давления, образовавшиеся ранее пузырьки схлопываются. Процесс схлопывания пузырьков сопровождается образованием ударных волн с очень большим местным мгновенным давлением, достигающим нескольких сотен атмосфер.

Контрольные вопросы:

1. Сформулировать общие характеристики ультразвуковых колебаний.
2. Перечислить и объяснить основные законы распространения ультразвуковых волн в среде.
3. Сформулировать специфические особенности распространения ультразвуковых волн в среде.

Вопросы для самостоятельной работы:

1. Применение ультразвука в научных исследованиях.
2. Применение ультразвука в медицине и технике.

Рекомендуемая литература:

1. *Ультразвук. Маленькая энциклопедия*, М., 1979.

2. *Физическая акустика*, (под редакцией. У Мэзона), том VI, М.: Мир, 1993.
3. Ноздрев В.Ф., *Молекулярная акустика*, Изд. "Высшая школа", М., 1974.
4. Фабелинский И.Л., *Молекулярное рассеяние света*, М.:Наука.,1970.
5. Вукс М.Ф., *Рассеяния света в газах, жидкостях и растворах*, Изд. ЛГУ, 1977.

ЛЕКЦИЯ 4

ДИСПЕРСИЯ СКОРОСТИ ЗВУКА

План:

1. Общее понятие дисперсии скорости звука;
2. Дисперсия релаксационного типа;
3. «Геометрическая» дисперсия скорости звука.

Ключевые слова:

Частота звуковой волны, зависимость скорости от частоты, дисперсия, релаксация.

Основное содержание:

Дисперсией скорости звука называют зависимость фазовой скорости монохроматических звуковых волн от частоты. Дисперсия является причиной изменения формы звуковой волны (звукового импульса) при распространении его в среде. Различают дисперсию скорости, обусловленную физическими свойствами среды, и дисперсию, обусловленную наличием границ тела, в котором звуковая волна распространяется, и от свойств тела не зависящую.

Дисперсия скорости звука 1-го типа – релаксационная дисперсия

Дисперсия скорости звука первого типа может вызываться различными причинами. Наиболее важны случаи дисперсии, связанной с релаксационными процессами, происходящими в среде при прохождении звуковой волны. Механизм возникновения релаксационной дисперсии можно выяснить на примере многоатомного газа.

При распространении звука в газе молекулы газа совершают поступательное движение. Если газ одноатомный, то никаких других движений, кроме поступательных, атомы газа совершать не могут. Если же газ многоатомный, то при столкновениях молекул между собой могут возникать вращательные движения молекул, а также колебательные движения атомов, составляющих молекулу. При этом часть энергии звуковой волны тратится на возбуждение этих колебательных и вращательных движений. Переход энергии от звуковой волны (т. е. от поступательного движения) к внутренним степеням свободы (т. е. к колебательным и вращательным движениям) происходит не мгновенно, а за некоторое время, которое называется временем релаксации τ . Это время определяется числом соударений, которое должно произойти между молекулами для перераспределения энергии между всеми степенями свободы. Если период звуковой волны мал по сравнению с τ (высокие частоты), то за период волны внутренние степени свободы не успеют возбудиться и перераспределение энергии не успеет произойти. В этом случае газ будет вести себя так, как будто никаких внутренних степеней свободы вовсе нет. Если же период звуковой волны много больше, чем τ (низкие частоты), то за период волны энергия поступательного движения успеет перераспределиться на внутренние степени свободы. При этом энергия поступательного движения будет меньше, чем в случае, когда внутренних степеней свободы не было бы.

Поскольку упругость газа определяется энергией, приходящейся на поступательные движения молекул, то, следовательно, упругость газа, а значит и скорость звука, также будет меньше, чем в случае высоких частот. Иными словами, в некоторой области частот, близких к частоте релаксации, равной $\omega_p = 1/\tau$, скорость звука увеличивается с ростом частоты, т. е. имеет место так называемая положительная дисперсия.

Если c_0 - скорость звука при малых частотах ($\omega\tau \ll 1$), а c_∞ - при очень больших частотах ($\omega\tau \gg 1$), то скорость звука для произвольной частоты описывается формулой

$$c^2 = c_0^2 + (c_\infty^2 - c_0^2) \frac{\omega^2 \tau^2}{1 + \omega^2 \tau^2}.$$

Вследствие необратимости процессов перераспределения энергии в той области частот, где имеет место дисперсия, наблюдается повышенное поглощение звука.

Релаксационная дисперсия скорости звука может быть не только в газах, но и в жидкостях, где она

связана с различными межмолекулярными процессами, в растворах электролитов, в смесях, в которых под действием звука возможны химические реакции между компонентами, в эмульсиях, а также в некоторых твёрдых телах.

Величина дисперсии может быть весьма различной в разных веществах. Так, например, в углекислом газе величина дисперсии порядка 4%, в бензоле ~ 10%, в морской воде меньше чем 0,01%, а в сильно вязких жидкостях и в высокополимерных соединениях скорость звука может измениться на 50%. Однако в большинстве веществ дисперсия скорости звука весьма малая величина и измерения её довольно сложны.

Частотный диапазон, в котором имеет место дисперсия также различен для разных веществ. Так, в углекислом газе при нормальном давлении и температуре 18 °С частота релаксации равна 28 кГц, в морской воде 120 кГц. В таких соединениях, как четырёххлористый углерод, бензол, хлороформ и др., область релаксации попадает в область частот порядка 10^9 - 10^{10} Гц, где обычные ультразвуковые методы измерений не применимы и дисперсию можно измерить, только используя оптические методы.

К дисперсии 1-го же типа, но не носящей релаксационного характера, приводят теплопроводность и вязкость среды. Эти виды дисперсии обусловлены обменом энергией между областями сжатия и разрежения в звуковой волне и особенно существенны для микронеоднородных сред. Дисперсия скорости звука может проявляться также в среде с вкрапленными неоднородностями (резонаторами), например в воде, содержащей пузырьки газа. В этом случае при частоте звука, близкой к резонансной частоте пузырьков, часть энергии звуковой волны идёт на возбуждение колебаний пузырьков, что приводит к дисперсии и к возрастанию поглощения звука.

Дисперсия скорости звука 2-го типа – «геометрическая» дисперсия

Вторым типом дисперсии скорости звука является «геометрическая» дисперсия, обусловленная наличием границ тела или среды распространения. Она появляется при распространении волн в стержнях, пластинах, в любых [волноводах акустических](#). Дисперсия скорости наблюдается для изгибных волн в тонких пластинах и стержнях (толщина пластины или стержня должна быть много меньше, чем длина волны). При изгибании тонкого стержня упругость на изгиб тем больше, чем меньше изгибаемый участок. При распространении изгибной волны длина изгибаемого участка определяется длиной волны. Поэтому с уменьшением длины волны (с повышением частоты) увеличивается упругость, а следовательно, и скорость распространения волны. Фазовая скорость такой волны пропорциональна корню квадратному из частоты, т. е. имеет место положительная дисперсия.

При распространении звука в волноводах звуковое поле можно представить как суперпозицию нормальных волн, фазовые скорости которых для прямоугольного волновода с жёсткими стенками имеют вид

$$c^{(n)} = \frac{1}{\sqrt{1 - \left(\frac{nc\pi}{ad}\right)^2}},$$

где n - номер нормальной волны ($n = 1, 2, 3, \dots$), c - скорость звука в свободном пространстве, d - ширина волновода. Фазовая скорость [нормальной волны](#) всегда больше скорости звука в свободной среде и уменьшается с ростом частоты («отрицательная» дисперсия).

Дисперсия скорости звука обоих типов приводит к расплыванию формы импульса при его распространении. Это особенно важно для [гидроакустики](#), [атмосферной акустики](#) и [геоакустики](#), где имеют дело с распространением звука на большие расстояния.

Контрольные вопросы:

1. Что такое дисперсия скорости звука?
2. Какие виды дисперсии скорости звука бывают?
3. Чем обусловлена дисперсия скорости звука?
4. Связь дисперсии с релаксационными процессами в среде.
5. Связь дисперсии с геометрическими характеристиками среды.

Вопросы для самостоятельной работы:

1. Релаксационная теория распространения звука в жидкостях.
2. Частотная зависимость скорости и коэффициента поглощения звуковых волн в жидкостях.

Рекомендуемая литература:

1. *Ультразвук. Маленькая энциклопедия*, М., 1979.
2. *Физическая акустика*, (под редакцией. У Мэзона), том VI, М.: Мир, 1993.
3. Ноздрев В.Ф., *Молекулярная акустика*, Изд. "Высшая школа", М., 1974.
4. Фабелинский И.Л., *Молекулярное рассеяние света*, М.:Наука, 1970.
5. Вукс М.Ф., *Рассеяния света в газах, жидкостях и растворах*, Изд. ЛГУ, 1977.

ЛЕКЦИЯ 5

ДИСПЕРСИЯ, СВЯЗАННАЯ СО СВОЙСТВАМИ СРЕДЫ

План:

1. Пространственная дисперсия скорости звука;
2. Резонансная дисперсия скорости звука;
3. Дисперсия, связанная с флуктуациями термодинамических величин.

Ключевые слова:

Дисперсия, неоднородность среды, длина волны, резонанс, осциллятор, флуктуация.

Основное содержание:

Кроме релаксационной дисперсии скорости звука в микронеоднородных средах существует также пространственная дисперсия, которая обусловлена зависимостью c от l/λ , как и дисперсия нормальных волн, с поглощением не связана. Пространственная дисперсия наблюдается также в кристаллах на гиперзвуковых частотах, когда пространственная периодичность кристаллической решётки приводит к пространственной дисперсии упругих свойств кристаллов и обуславливает его акустическую активность - способность поворачивать плоскость поляризации волны. При более низких частотах этот эффект становится пренебрежимо мал.

Резонансная релаксация, наблюдаемая в области частот, близких к собств. частоте ω_0 имеющихся в среде резонаторов той или иной природы, приводит к зависимости c от ω в виде

$$c = c_0 \left[1 - A \frac{\left(1 - \frac{\omega^2}{\omega_0^2}\right) \frac{\omega^2}{\omega_0^2}}{\left(1 - \frac{\omega^2}{\omega_0^2}\right)^2 + d^2 \frac{\omega^2}{\omega_0^4}} \right] \quad (1)$$

где ω_0 - резонансная частота, c_0 - скорость звука при $\omega/\omega_0 \rightarrow 0$, d - удвоенный коэффициент затухания колебаний резонатора. При квантовом подходе обычно считают, что резонансная релаксация имеет место в средах, включающих двухуровневые подсистемы любой природы, на частотах, близких к резонансу. Резонансная релаксация наблюдается как в однородных, так и в микронеоднородных средах. Она определяет дисперсию, например, в стёклах при низких температурах, в системе обладающих спином связанных частиц, помещённых в магнитное поле, и в других однородных средах. В микронеоднородных средах резонансная дисперсия наблюдается при включениях в виде резонаторов. Вода, содержащая пузырьки газа,- важный для гидроакустики пример такой среды. Скорость звука в жидкости с газовыми пузырьками определяется выражением (1), и зависит от радиуса пузырька, плотности жидкости, сжимаемости жидкости и газа, а также от относительного объёма, занятого пузырьками, который считается достаточно малым. Другим примером микронеоднородной среды с включениями в виде резонаторов является кристалл, содержащий петли дислокаций, когда последние можно описать моделью струны, закреплённой на концах (т. н. источники Франка - Рида).

Релаксация, связанная с флуктуациями различных термодинамических величин, приводит к дисперсии, особенно существенной вблизи критических точек и [фазовых переходов](#) 2-го рода, где велики флуктуации параметра порядка, соответствующего данному фазовому переходу. Амплитуда этих флуктуации, время их рассасывания и радиус корреляции меняются под влиянием изменения давления и температуры в звуковой волне, причём новое распределение флуктуации запаздывает по отношению к изменению давления, что и приводит к дисперсии и избыточному поглощению.

Выражения для дисперсии зависят от того, каким уравнением описывается процесс рассасывания флуктуации. Дисперсия в этом случае сильно зависит от близости к температуре перехода.

Характерный для микронеоднородных сред релаксационный процесс, состоящий в выравнивании значений некоторой дополнительной термодинамической переменной (принимаяющей различные значения в

среде и включениях при изменении давлений в звуковой волне) путём диффузии (теплопроводности) через границы включений, приводит к след. зависимости с:

$$c = c_{\infty} / \operatorname{Re} \left\{ \left[1 + i \frac{c_{\infty}^2 - c_0^2}{c_0^2} F(\omega, \tau) \right]^{1/2} \right\}, \quad (2)$$

где

$$F(\omega, \tau) = \frac{3}{2} \frac{1}{\omega \tau} \frac{[1 + (1-i) \nu \overline{\omega \tau}] \{ (1-i) \nu \overline{\omega \tau} - \operatorname{th} [(1-i) \nu \overline{\omega \tau}] \}}{(1-i) \nu \overline{\omega \tau} \{ 1 + \operatorname{th} [(1-i) \nu \overline{\omega \tau}] \}}$$

Выражение (2) определяет: дисперсию в эмульсиях, обусловленную выравниванием разности температур между их компонентами; аналогичную дисперсию в поликристаллах; дисперсию в сильновязких жидкостях. Последнюю можно представить как двухфазную среду, состоящую из неупорядоченной жидкости и помещённых в неё упорядоченных областей, степень порядка в которых характеризуется величиной, имеющей смысл концентрации дырок Френкеля (аналог вакансий в кристаллах). При изменении давления меняется равновесное значение этой величины в упорядоченных областях, что и приводит к диффузии дырок через их границы. Запаздывание этого процесса относительно изменения фазы звуковой волны и приводит к дисперсии. Подобным выражением описывается дисперсия во взвесьях, связанная с отставанием тяжёлых частиц от жидкости при движении последней в звуковой волне; возбуждаемые при этом частицами вязкие волны постепенно передают им импульс от жидкости; запаздывание этого процесса обмена импульсом и приводит к указанной дисперсии.

Контрольные вопросы:

1. Что такое пространственная дисперсия скорости звука?
2. Условия проявления пространственной дисперсии.
3. Что такое резонансная дисперсия скорости звука?
4. Условия проявления резонансной дисперсии.
5. Связь дисперсии с флуктуациями термодинамических величин.

Вопросы для самостоятельной работы:

1. Распространение звука в окрестности критических точек жидкостей.
2. Распространение звука в окрестности фазовых переходов второго рода.

Рекомендуемая литература:

1. *Ультразвук. Маленькая энциклопедия*, М., 1979.
2. *Физическая акустика*, (под редакцией У Мэзона), том VI, М.: Мир, 1993.
3. Ноздрев В.Ф., *Молекулярная акустика*, Изд. "Высшая школа", М., 1974.
4. Фабелинский И.Л., *Молекулярное рассеяние света*, М.:Наука, 1970.
5. Вукс М.Ф., *Рассеяния света в газах, жидкостях и растворах*, Изд. ЛГУ, 1977.
6. Волькенштейн М.В., *Молекулярная оптика*, М., 1951.

ЛЕКЦИЯ 6

МОЛЕКУЛЯРНАЯ АКУСТИКА

План:

1. Предмет молекулярной акустики;
2. Задачи молекулярной акустики;
3. Акустические исследования сред в различных агрегатных состояниях.

Ключевые слова:

Акустика, скорость звука, поглощение звука, акустические параметры, ультразвук, гиперзвук.

Основное содержание:

Молекулярной акустикой называется раздел физической акустики, в котором свойства вещества и кинетика молекулярных процессов исследуются акустическими методами. Основными методами молекулярной акустики являются измерение скорости звука и поглощения звука, а также зависимостей этих величин от разных физических параметров: частоты звуковой волны, температуры, давления и др. Методами молекулярной акустики можно исследовать газы, жидкости, полимеры, твёрдые тела, плазму.

Развитие молекулярной акустики как самостоятельного раздела началось в 30-е годы 20 в., когда было установлено, что во многих веществах при распространении в них звуковых волн имеет место дисперсия скорости звука, а поглощение звука не описывается классическим законом, по которому коэффициент поглощения пропорционален квадрату частоты. Эти аномалии были объяснены на основании изучения релаксационных процессов, что позволило связать некоторые свойства вещества на молекулярном уровне, а также ряд кинетических характеристик молекулярных процессов с такими макроскопическими величинами, как скорость и поглощение звука.

По скорости звука можно определить такие характеристики вещества, как сжимаемость, отношение теплоёмкостей, упругие свойства твёрдого тела и др., а по поглощению звука - значения сдвиговой и объёмной вязкости, время релаксации и др. В газах, измеряя скорость звука и её зависимость от температуры, определяют параметры, характеризующие взаимодействие молекул газа при столкновениях. В жидкости, вычисляя скорость звука на основании той или иной модели жидкости и сравнивая результаты расчёта с опытными данными, в ряде случаев можно оценить правдоподобность используемой модели и определить энергию взаимодействия молекул. На скорость звука влияют особенности молекулярной структуры, силы межмолекулярного взаимодействия и плотность упаковки молекул. Так, например, увеличение плотности упаковки молекул, появление водородных связей, полимеризация приводят к увеличению скорости звука, а введение в молекулу тяжёлых атомов - к её уменьшению.

При наличии релаксационных процессов энергия поступательного движения молекул, которую они получают в звуковой волне, перераспределяется на внутренние степени свободы. При этом появляется дисперсия скорости звука, а зависимость произведения коэффициента поглощения на длину волны от частоты имеет максимум на некоторой частоте, называется частотой релаксации. Величина дисперсии скорости звука и величина коэффициента поглощения зависят от того, какие именно степени свободы возбуждаются под действием звуковой волны, а частота релаксации, равная обратному значению времени релаксации, связана со скоростью обмена энергией между различными степенями свободы. Таким образом, измеряя скорость звука и поглощение в зависимости от частоты и определяя время релаксации, можно судить о характере молекулярных процессов и о том, какой из этих процессов вносит основной вклад в релаксацию. Этими методами можно исследовать возбуждение колебательных и вращательных степеней свободы молекул в газах и жидкостях, процессы столкновения молекул в смесях различных газов, установление равновесия при химических реакциях, перестройку молекулярной структуры в жидкостях, процессы сдвиговой релаксации в очень вязких жидкостях и полимерах, различные процессы взаимодействия звука с элементарными возбуждениями в твёрдых телах и др.

Анализ акустических данных для жидкостей обычно проводить труднее, чем для газов, поскольку область релаксации здесь, как правило, лежит в диапазоне более высоких частот, требующем более сложных измерений. В очень вязких жидкостях, полимерах и некоторых других веществах в поглощение и дисперсию может давать вклад целый набор релаксационных процессов с широким спектром времён релаксации. Поскольку время релаксации зависит от температуры и давления, меняя эти параметры, можно сдвигать по частоте область релаксации. Так, например, в газе повышение давления газа эквивалентно уменьшению частоты. Это бывает удобно использовать при измерении скорости и поглощения звука, если частота релаксации при нормальных условиях оказывается в том диапазоне частот, который с трудом поддаётся экспериментальному исследованию. Изучение температурных зависимостей скорости и поглощения звука позволяет разделить вклад различных релаксационных процессов.

В молекулярной акустике для исследований обычно применяется ультразвук; в газах - в диапазоне частот 10^4 - 10^5 Гц, а в жидкостях и твёрдых телах - в диапазоне 10^5 - 10^8 Гц. Это связано как с высоким развитием техники излучения и приёма ультразвука и с большой точностью измерений в этом диапазоне частот, так и с тем, что работа на более низких частотах потребовала бы очень больших объёмов исследуемого вещества, а на более высоких частотах поглощение звука становится столь большим, что многие акустические методы оказываются неприменимыми.

Контрольные вопросы:

1. В чем заключается предмет молекулярной акустики?
2. Какие основные задачи решаются в молекулярной акустике?
3. Методы акустических исследований сред в различных агрегатных состояниях.

Вопросы для самостоятельной работы:

1. Акустические исследования жидкостей на ультразвуковых частотах.
2. Акустические исследования жидкостей на гиперзвуковых частотах.

Рекомендуемая литература:

1. *Ультразвук. Маленькая энциклопедия*, М., 1979.
2. *Физическая акустика*, (под редакцией. У Мэзона), том VI, М.: Мир, 1993.
3. Ноздрев В.Ф., *Молекулярная акустика*, Изд. "Высшая школа", М., 1974.
4. Фабелинский И.Л., *Молекулярное рассеяние света*, М.:Наука.,1970.
5. Вукс М.Ф., *Рассеяния света в газах, жидкостях и растворах*, Изд. ЛГУ, 1977.
6. Волькенштейн М.В., *Молекулярная оптика*, М., 1951.

ЛЕКЦИЯ 7

АКУСТИЧЕСКАЯ РЕЛАКСАЦИЯ

План:

1. Понятие акустической релаксации;
2. Виды акустической релаксации;
3. Время акустической релаксации.

Ключевые слова:

Релаксация, равновесие, время релаксации, степень свободы, колебательная релаксация, структурная релаксация, химическая релаксация.

Основное содержание:

Акустическая релаксация - процесс восстановления термодинамического равновесия среды, которое было нарушено из-за изменения давления и температуры при прохождении звуковой волны. Акустическая релаксация.- необратимый процесс, при котором энергия поступательного движения молекул или ионов в звуковой волне переходит на внутренние степени свободы, возбуждая их, в результате чего энергия звуковой волны уменьшается, т. е. происходит поглощение звука. Релаксация также всегда сопровождается дисперсией звука.

Простейший вид акустической релаксации - релаксация внутримолекулярного возбуждения, или кнезеровская релаксация. Такая релаксация происходит, например, в двухатомных и многоатомных газах, где энергия поступательного движения молекул в звуковой волне переходит в энергию, связанную с колебательными и вращательными степенями свободы молекул, т. е. изменяется заселённость вращательных и колебательных уровней. Др. виды акустической релаксации: структурная релаксация в жидкостях, при которой акустическая волна инициирует изменение ближнего порядка в расположении молекул жидкости; химическая релаксация, при которой под действием звука сдвигается равновесие в химической реакции. В твёрдом теле звуковая волна нарушает равновесное распределение фононов, что приводит к релаксационным процессам, определяющим решёточное поглощение звука. Один из видов акустической релаксации в твёрдом теле - релаксация различных дефектов кристаллической решётки - как точечных, так и линейных (дислокаций), связанная с движением дефектов под действием механических напряжений в упругой волне. При распространении звука в полупроводниках и металлах нарушается равновесное распределение электронов проводимости, что также приводит к релаксации, а следовательно, к дополнительному поглощению звука.

Для описания отклонения системы от равновесия вводят дополнительный параметр ξ , который в зависимости от вида релаксационного процесса может иметь различный физический смысл (например, величина ξ может описывать отклонение концентрации возбуждённых молекул от равновесной, изменение заселённостей уровней для двухуровневой системы, концентрацию одного из компонентов химической реакции при химической релаксации и т. п.). Для описания распространения звука в среде с релаксацией рассматриваются как "внешние" параметры, такие, как давление, плотность и температура, так и "внутренне" параметр ξ , изменение которого со временем описывается уравнением

$$\frac{d\xi}{dt} = -\frac{1}{\tau}(\xi - \xi_0), \quad (1)$$

где τ - время релаксации, ξ_0 - равновесное значение параметра ξ .

Время релаксации зависит от микроскопических свойств вещества, таких, например, как число соударений молекул газа в единицу времени и эффективности передачи энергии при этих соударениях. В газе при заданной температуре время релаксации прямо пропорционально числу соударений, необходимых для возбуждения соответствующих степеней свободы. Наличие примесей других газов влияет на время релаксации. Например, в воздухе основной вклад в поглощение звука даёт колебательная релаксация молекул O_2 и N_2 , причём частота релаксации для O_2 выше, чем для N_2 . Примеси паров воды и изменение температуры воздуха существенно влияют на положение релаксационного максимума. В двухатомных газах значения времени релаксации обычно очень велики, и область релаксации лежит в звуковом диапазоне частот. В жидкостях времена релаксации значительно меньше, чем в газах, так как все процессы перестройки жидкостей совершаются быстрее. Поэтому в большинстве жидкостей частота акустической релаксации лежит в области гиперзвука.

Контрольные вопросы:

1. Что такое акустическая релаксация?
2. Причины появления акустической релаксации.
3. Какие виды акустической релаксации бывают?
4. Что такое время акустической релаксации и чем оно определяется?

Рекомендуемая литература:

1. *Ультразвук. Маленькая энциклопедия*, М., 1979.
2. *Физическая акустика*, (под редакцией. У Мэзона), том VI, М.: Мир, 1993.
3. Ноздрев В.Ф., *Молекулярная акустика*, Изд. "Высшая школа", М., 1974.
4. Фабелинский И.Л., *Молекулярное рассеяние света*, М.:Наука, 1970.
5. Вукс М.Ф., *Рассеяния света в газах, жидкостях и растворах*, Изд. ЛГУ, 1977.
6. Волькенштейн М.В., *Молекулярная оптика*, М., 1951.

ЛЕКЦИЯ 8

ДИФРАКЦИЯ СВЕТА НА УЛЬТРАЗВУКЕ

План:

1. Общее понятие о дифракции света на ультразвуке;
2. Дифракция света на ультразвуке в жидкостях.

Ключевые слова:

Дифракция, акусто-оптическое взаимодействие, стоячая волна, бегущая волна, спектр.

Основное содержание:

Как известно, в пластинке кварца или турмалина можно возбудить механические колебания очень большой частоты (до 10^8 Гц). Такая колеблющаяся пластинка излучает упругие (ультраакустические) волны, которые со скоростью звука распространяются в окружающей среде. Поместив колеблющийся кварц в какую-нибудь жидкость, например ксилол, мы получим ультраакустические волны в этой жидкости. Упругая волна в жидкости есть волна сжатия и разрежения, которая распространяется с определенной скоростью. Таким образом, жидкость, в которой распространяется ультраакустическая волна, представляет собой периодическую последовательность областей сжатия и разрежения, т.е. областей, характеризующихся также и различием в показателе преломления света. Поэтому для света жидкость, в которой распространяется ультраакустическая волна, представляет собой фазовую решетку, ибо при прохождении света через столб такой жидкости происходит изменение не амплитуды, а фазы световой волны.

Если заставить ультраакустическую волну отражаться от дна сосуда, то наложение проходящей и отраженной волн поведет к образованию стоячей ультраакустической волны, которая также представляет собой периодическую структуру переменной плотности и, следовательно, переменного показателя преломления света. Как в случае проходящей, так и стоячей ультраакустической волны получающаяся фазовая решетка будет иметь период, равный длине ультраакустической волны, что легко видеть из рис.1.

В ксилоле скорость распространения ультразвуковых волн равна примерно 1000 м/с, так что при частоте 10^8 Гц длина ультразвуковой волны $\lambda = 10^{-3}$ см = 10 мкм. Мы получаем, следовательно, фазовую решетку с периодом 10 мкм, вполне удобную для наблюдения дифракции световых волн¹.

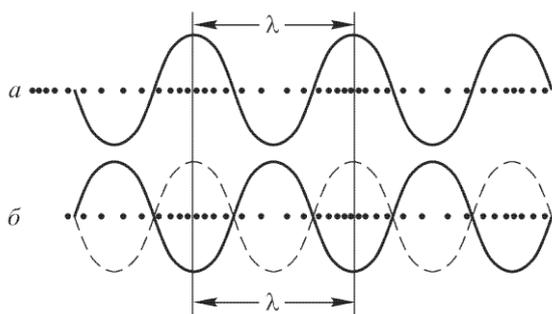


Рис. 1.

Распределение плотности в бегущей (а) и стоячей (б) ультразвуковых волнах. Как в бегущей, так и в стоячей волне длины периодически повторяющихся областей сжатия и разрежения равны длине ультразвуковой волны в среде.

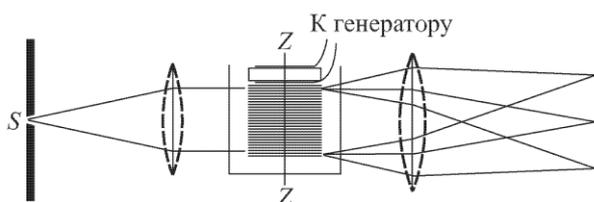


Рис. 2

Схема наблюдения дифракции на ультразвуковых волнах.

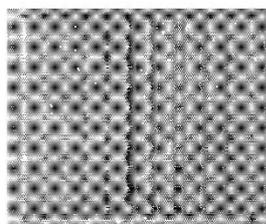


Рис. 3

Спектры, полученные при дифракции на ультразвуковой волне.

Пропуская пучок белого света через сосуд с жидкостью, в которой возбуждена ультразвуковая волна (рис.2), мы получим на экране спектр с дисперсией, соответствующей периоду дифракционной решетки, вычисленному по частоте колебаний кварца и скорости ультразвуковой волны в жидкости (рис.3).

Если пустить ультразвуковые волны по трем направлениям, то мы получим пространственную решетку для световых лучей. Явление пространственной дифракции (дискретные максимумы для определенных длин волн) выступает здесь не так отчетливо, как, например, в случае рентгеновских лучей, ибо размеры всего столба, на котором происходит дифракция, в данном случае не особенно велики по сравнению с периодом решетки, так что мы, по сути дела, имеем случай перехода от плоской решетки к объемной.

Интересно отметить, что фазовая решетка, осуществляемая с помощью ультразвуковых волн, отличается еще одной особенностью. Показатель преломления не только имеет пространственную периодичность, но и меняется периодически во времени с периодом ультразвуковой волны, т.е. примерно 10^7 - 10^8 раз в секунду. Это приводит к тому, что интенсивность дифрагировавшего света испытывает периодическое изменение с той же частотой, т.е. модуляцию. Эффект модуляции приводит к тому, что если на ультразвуковую волну падает монохроматический свет частоты $\nu \approx 5 \times 10^{14}$ Гц, то дифрагировавший свет имеет измененную частоту, равную $\nu \pm N$, где N - частота примененной ультразвуковой волны. Если $N \sim 10^8$ Гц, то это изменение частоты незначительно и составляет несколько десятимиллионных от первоначальной. Такое изменение наблюдалось на опыте. Этот эффект имеет чрезвычайно большое научное и практическое значение.

Изложенное рассмотрение применимо к стоячей ультразвуковой волне, где показатель

¹Для большинства жидкостей скорость ультразвуковых волн, не отличающаяся от скорости обычных звуковых волн, составляет около 1000-1500 м/с. Для прозрачных твердых тел (стекло, кварц) скорости составляют 5000—6000 м/с. Поэтому во всех этих веществах можно удобно осуществлять опыты по дифракции на ультразвуковых волнах с частотами колебаний до 10^7 Гц и выше. При работе со стоячими волнами важно, чтобы интенсивность отраженной волны была близка к интенсивности проходящей. Поэтому лучше работать с веществами, где ультразвуковые волны слабо поглощаются. Из жидкостей такими слабопоглощающими являются ксилол и вода. Следует иметь в виду, что поглощение возрастает пропорционально квадрату частоты ультразвуковой волны.

преломления в каждой точке меняется со временем. Для бегущей ультразвуковой волны изменение частоты легче всего представить как результат отражения света от движущихся поверхностей, которыми являются поверхности фронта бегущей волны, т.е. как результат явления Доплера. В волне, бегущей в одну сторону, изменение частоты дифрагировавшего света будет соответствовать увеличению частоты ($\nu + N$), а в волне, бегущей навстречу, - уменьшению ($\nu - N$). Стоячая волна, как совокупность двух бегущих навстречу, обуславливает изменение частоты, выражаемое формулой $\nu \pm N$. Несложный расчет показывает, что как по методу стоячих волн (модуляция), так и по методу бегущих волн (явление Доплера) мы получаем, конечно, одно и то же значение (N) изменения частоты падающего света.

Изучение дифракции света на ультразвуковых волнах стало важным методом исследования законов распространения этих волн в веществе и служит для исследования вопросов молекулярной физики; для некоторых технических применений используется ультразвуковая дефектоскопия.

Контрольные вопросы:

1. Причина явления дифракции света на ультразвуке.
2. Что из себя представляет и как возникает дифракционный спектр?
3. Применение явления дифракции света на ультразвуке.

Вопросы для самостоятельной работы:

1. Измерение скорости распространения звука в жидкостях по углу дифракции в явлении дифракции света на ультразвуке.
2. Измерение коэффициента поглощения звука в жидкостях по энергетическим характеристикам излучения в явлении дифракции света на ультразвуке.

Рекомендуемая литература:

1. *Ультразвук. Маленькая энциклопедия*, М., 1979.
2. *Физическая акустика*, (под редакцией. У Мэсона), том VI, М.: Мир, 1993.
3. Ноздрев В.Ф., *Молекулярная акустика*, Изд. "Высшая школа", М., 1974.
4. Фабелинский И.Л., *Молекулярное рассеяние света*, М.:Наука, 1970.
5. Вукс М.Ф., *Рассеяния света в газах, жидкостях и растворах*, Изд. ЛГУ, 1977.
6. Волькенштейн М.В., *Молекулярная оптика*, М., 1951.

ЛЕКЦИЯ 9

РАСПРЕДЕЛЕНИЕ ИНТЕНСИВНОСТИ СВЕТОВОГО ИЗЛУЧЕНИЯ В ДИФРАКЦИОННЫХ МАКСИМУМАХ

План:

1. Уравнение распространения света в периодичной среде.
2. Распределение интенсивности дифрагированного излучения по дифракционным порядкам.

Ключевые слова:

Дифракция, волна, акустическое поле, ряд Фурье, дифракция Фраунгофера, граничные условия.

Основное содержание:

Уравнение, описывающее распространение световой волны, может быть записано в виде:

$$\nabla^2 E = \frac{\mu^2(x, t)}{c^2} \frac{\partial^2 E}{\partial t^2} \quad (1)$$

Здесь E – напряженность электрического поля световой волны, c – скорость света в вакууме, μ - показатель преломления среды, который в области акустического поля ($0 < z < L$, L – оптическая длина пути) записывается следующим образом:

$$\mu(x, t) = \mu_0 + \sum_{j=1}^{\infty} \mu_j \sin[j(\omega^* t - k^* x) + \delta_j] \quad (2)$$

В этом выражении ω^* и k^* - круговая частота и волновое число ультразвука, μ_j – амплитуда j -й фурье-

компоненты разложения показателя преломления, и δ_j - ее относительная фаза.

Так как величина E в звуковом поле подвергается периодическому изменению во времени и пространстве, она может быть разложена в ряд Фурье:

$$E = \exp(i\omega t) \sum_{n=-\infty}^{\infty} \varphi_n(z) \exp[i(n\omega^* t - k_n r)] \quad (3)$$

где

$$k_n r = \mu_0 k(z \cos \theta + x \sin \theta) + nk^* x \quad (4)$$

ω и k - круговая частота и волновое число световой волны. Уравнения (3) и (4) представляют собой разложение падающей световой волны на сумму плоских волн, где индекс n обозначает n -й порядок дифракции Фраунгофера. Уравнение (3) показывает, что для бегущей волны круговая частота n -го порядка будет равна $\omega + n\omega^*$.

Подставляя (2)-(4) в (1) и пренебрегая членами второго порядка получаем систему разностно-дифференциальных уравнений, которые связывают амплитуды в разложении на плоские волны:

$$\frac{d\varphi_n}{dt} + \frac{1}{2L} \sum_{j=1}^{\infty} \nu_j [\varphi_{n-j} \exp(i\delta_j) - \varphi_{n+j} \exp(-i\delta_j)] = i \frac{nQ}{2L} (n - 2\alpha) \varphi_n \quad (5)$$

где

$$\nu_j = k\mu_j L \quad (6)$$

$$Q = \frac{k^* L}{\mu_0 k} \quad (7)$$

$$\alpha = -\left(\frac{\mu_0 k}{k^*}\right) \sin \theta \quad (8)$$

Решение уравнения (5) нужно искать при $z=0$ и следующих граничных условиях:

$$\begin{aligned} \varphi_0 &= 1 \\ \varphi_n &= 0 \quad (n \neq 0) \end{aligned} \quad (9)$$

Для синусоидальной звуковой волны (5) превращается в:

$$\frac{d\varphi_n}{dz} + \frac{\nu}{2L} [\varphi_{n-1} - \varphi_{n+1}] = i \frac{nQ}{2L} (n - 2\alpha) \varphi_n \quad (10)$$

где опущен нижний индекс у ν .

Уравнение (10) впервые было получено Раманом и Натом в 1936 г.

Контрольные вопросы:

1. Исходное уравнение распространения света в пространственно-периодической среде.
2. Изменение показателя преломления среды в поле акустической волны.
3. Система уравнений Рамана-Ната.

Вопросы для самостоятельной работы:

1. Рассмотреть явление дифракции света на ультразвуке с точки зрения интегральных уравнений.
2. Численное решение системы уравнений Рамана-Ната.

Рекомендуемая литература:

1. *Ультразвук. Маленькая энциклопедия*, М., 1979.
2. *Физическая акустика*, (под редакцией. У Мэзона), том VI, М.: Мир, 1993.
3. Ноздрев В.Ф., *Молекулярная акустика*, Изд. "Высшая школа", М., 1974.
4. Фабелинский И.Л., *Молекулярное рассеяние света*, М.:Наука, 1970.
5. Вукс М.Ф., *Рассеяния света в газах, жидкостях и растворах*, Изд. ЛГУ, 1977.
6. Волькенштейн М.В., *Молекулярная оптика*, М., 1951.

ЛЕКЦИЯ 10

ДИФРАКЦИЯ РАМАНА-НАТА

План:

1. Режим Рамана-Ната в явлении дифракции света на ультразвуке;
2. Специфические особенности дифракции Рамана-Ната;
3. Распределение интенсивности по дифракционным порядкам в режиме Рамана-Ната.

Ключевые слова:

Дифракционная решетка, интенсивность света, дифракционный порядок, функция Бесселя, эффективность дифракции.

Основное содержание:

Для случая $Q \ll 1$ Раман и Нат получили следующее распределение интенсивности падающего излучения по дифракционным порядкам:

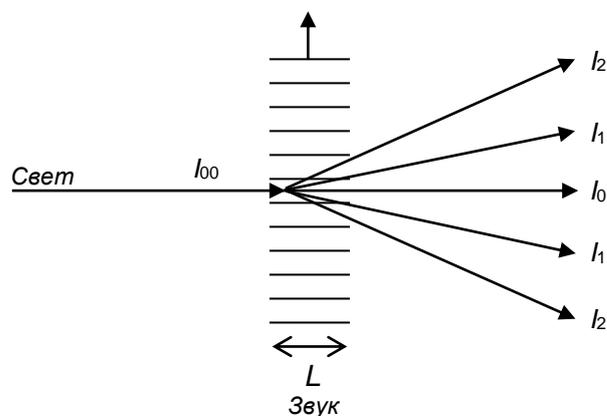
$$\frac{I_n}{I_{00}} = J_n^2 \left[\nu \frac{\sin(Q\alpha/2)}{(Q\alpha/2)} \right] \quad (1)$$

Здесь I_n – интенсивность света в n -ом дифракционном порядке, I_{00} – интенсивность света, падающего на звуковой пучок, J_n – функция Бесселя первого рода n -го порядка. При нормальном падении $\alpha=0$, и (1) сводится к

$$\frac{I_n}{I_{00}} = J_n^2(\nu) \quad (2)$$

В литературе иногда встречается утверждение, что режим Рамана-Ната обуславливает дифракционную картину, возникающую только лишь при нормальном падении света на звуковой пучок. В историческом контексте будет более корректным обозначить термином «дифракция Раман-Ната» всю картину дифракционных явлений, возникающих при взаимодействии света с ультразвуковыми волнами при условии $Q \ll 1$.

Ультразвуковое поле, параметры которого удовлетворяют условию $Q \ll 1$, эквивалентно оптической решетке, которая вызывает фазовую (но не амплитудную) модуляцию света, проходящего через нее. Параметр ν , известный как параметр Рамана-Ната, полностью описывает картину дифракции в этом предельном случае. Он является мерой степени фазовой модуляции света, вызванной звуковым полем.



Схематическое представление дифракции Рамана-Ната

Исследуя распределение интенсивности по дифракционным порядкам в виде (1) можно заметить следующее:

1. Наблюдается много дифракционных порядков;
2. Дифракционная картина симметрична при любом угле падения света, т.к. $I_n=I_{-n}$;

3. Угловая зависимость аргумента функции Бесселя такова, что наиболее ярко картина дифракции проявляется при нормальном падении света на звуковой пучок. При $Q\alpha=2m\pi$ (m – ненулевое целое число) все дифракционные эффекты исчезают;
4. Интенсивности света в положительных и отрицательных n -х дифракционных порядках обращаются в нуль, когда аргумент (14) равен любому корню функции Бесселя n -го порядка. Это можно наблюдать изменяя Q или α ;
5. Так как $\left[\frac{\sin(Q\alpha/2)}{(Q\alpha/2)} \right]$ является симметричной по α функцией, распределение интенсивности в каком-либо дифракционном порядке, как функция от угла падения, будет также симметричным по отношению к нормальному падению ($\alpha=0$).

Контрольные вопросы:

1. Условие режим Рамана-Ната в явлении дифракции света на ультразвуке.
2. Перечислить и объяснить специфические особенности дифракции Рамана-Ната.
3. Чем определяется распределение интенсивности по дифракционным порядкам в режиме Рамана-Ната.

Вопросы для самостоятельной работы:

1. Эффективность дифракции Рамана-Ната в зависимости от интенсивности звука.
2. Эффективность дифракции Рамана-Ната в зависимости от угла падения света на звуковой пучок.

Рекомендуемая литература:

1. *Ультразвук. Маленькая энциклопедия*, М., 1979.
2. *Физическая акустика*, (под редакцией У Мэсона), том VI, М.: Мир, 1993.
3. Ноздрев В.Ф., *Молекулярная акустика*, Изд. "Высшая школа", М., 1974.
4. Фабелинский И.Л., *Молекулярное рассеяние света*, М.:Наука.,1970.
5. Вукс М.Ф., *Рассеяния света в газах, жидкостях и растворах*, Изд. ЛГУ, 1977.
6. Волькенштейн М.В., *Молекулярная оптика*, М., 1951.

ЛЕКЦИЯ 11

ДИФРАКЦИЯ БРЭГГА

План:

1. Режим Брэгга в явлении дифракции света на ультразвуке;
2. Специфические особенности дифракции Брэгга;
3. Распределение интенсивности по дифракционным порядкам в режиме Брэгга.

Ключевые слова:

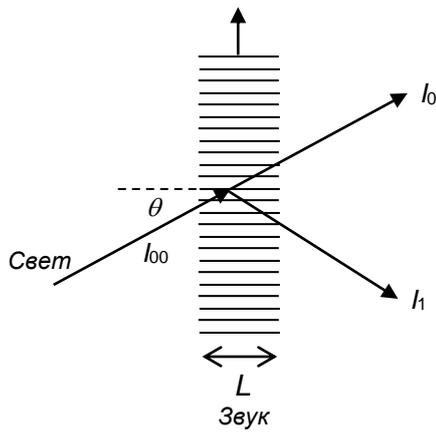
Дифракционная решетка, интенсивность света, дифракционный порядок, функция Бесселя, эффективность дифракции.

Основное содержание:

В случае $Q \gg 1$ дифракция возникает при падении свет на звуковой пучок под определенным углом θ , т.н. углом Брэгга:

$$\theta_B = \arcsin\left(\frac{1}{2} \frac{\lambda}{\Lambda}\right)$$

В этом случае отклонение происходит только в первый порядок дифракции. В зависимости от того, какой угол – тупой или острый образует волновой вектор света с направлением распространения звуковой волны, частота дифрагированного света равна $\omega + \Omega$ (+1-й порядок дифракции) либо $\omega - \Omega$ (-1-й порядок)



Схематичное представление дифракции Брэгга

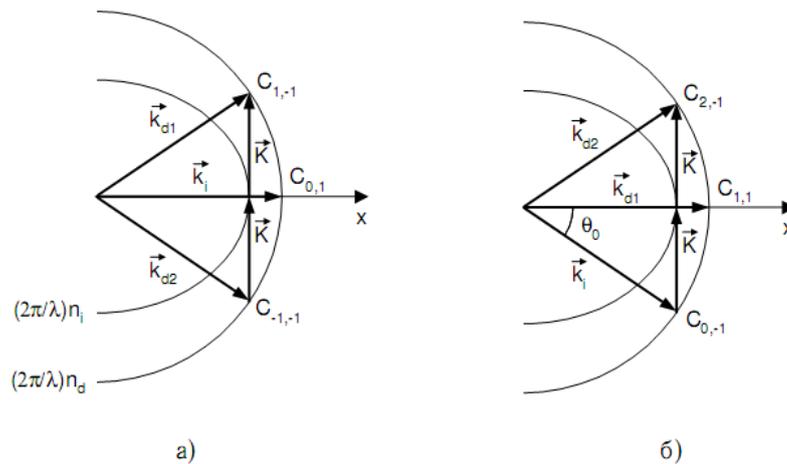
Для точного выполнения условия Брэгга $\alpha = \pm 1/2$, распределение дифрагированного излучения по интенсивности имеет вид:

$$I_0 = \cos^2(\nu/2)$$

$$I_1 = \sin^2(\nu/2)$$

Эти выражения дают возможность легко определить величину ν в случае брэгговского режима.

Анизотропные среды характеризуются двуполосной поверхностью показателей преломления. Это обстоятельство приводит к тому, что при определенных условиях (заданных частотах и углах падения света на ультразвуковую волну) может наблюдаться многократное брэгговское рассеяние света. Главная особенность рассматриваемого явления заключается в том, что законы сохранения энергии и импульса выполняются для двух или даже трех дифракционных максимумов одновременно. Это означает, что при дифракции света возникают два или даже три дифракционных максимума, помимо нулевого, каждый из которых является брэгговским. Многие особенности анизотропного брэгговского рассеяния света с несколькими максимумами могут быть качественно определены из векторных диаграмм. На рисунке представлены векторные диаграммы анизотропного рассеяния света в два дифракционных максимума для случая, когда акустическая волна распространяется перпендикулярно оптической оси одноосного отрицательного кристалла, а плоскость рассеяния составляет угол α с оптической осью. Особенностью рассеяния, показанного на векторной диаграмме, является одновременное осуществление стоксового и антистоксового процессов, что сопровождается отклонением света в два дифракционных максимума, расположенных симметрично относительно нулевого.



Векторные диаграммы двукратного брэгговского рассеяния: а - рассеяние в +1 и -1 максимумы; б - рассеяние в 1 и 2 максимумы

Контрольные вопросы:

1. Условие режим Брэгга в явлении дифракции света на ультразвуке.
2. Перечислить и объяснить специфические особенности дифракции Брэгга.

3. Чем определяется распределение интенсивности по дифракционным порядкам в режиме Брэгга.

Вопросы для самостоятельной работы:

1. Эффективность дифракции Брэгга в зависимости от интенсивности звука.
2. Эффективность дифракции Брэгга в зависимости от угла падения света на звуковой пучок.

Рекомендуемая литература:

1. *Ультразвук. Маленькая энциклопедия*, М., 1979.
2. *Физическая акустика*, (под редакцией У Мэсона), том VI, М.: Мир, 1993.
3. Ноздрев В.Ф., *Молекулярная акустика*, Изд. "Высшая школа", М., 1974.
4. Фабелинский И.Л., *Молекулярное рассеяние света*, М.:Наука, 1970.
5. Вукс М.Ф., *Рассеяния света в газах, жидкостях и растворах*, Изд. ЛГУ, 1977.
6. Волькенштейн М.В., *Молекулярная оптика*, М., 1951.

ЛЕКЦИЯ 12

ГИПЕРЗВУКОВЫЕ ВОЛНЫ В ЖИДКОСТЯХ

План:

1. Гиперзвуковые акустические волны в жидкостях;
2. Модуляция рассеянного света тепловыми волнами;
3. Рассеяние Мандельштама-Бриллюэна.

Ключевые слова:

Гиперзвук, акустическая волна, модуляция, рассеяние света, рассеяние Мандельштама-Бриллюэна.

Основное содержание:

Представим себе, что световая волна с длиной волны λ падает на образец сплошной материальной среды [среда, в которой длина свободного пробега атома или молекулы \bar{l} много меньше длины волны света ($\bar{l} \ll \lambda$)].

Если в такой среде возникла стоячая акустическая волна, а при огромном количестве дебаевских волн это всегда возможно, то параллельный пучок света, падающий на такую решетку, будет дифрагировать как на дифракционной решетке, а дифрагированный луч света пойдет в направлении, заданном условием Брэгга, а именно

$$2n\Lambda \sin \frac{\theta}{2} = \lambda \quad (1)$$

n - показатель преломления.

Таким образом, при наблюдении дифрагированного (рассеянного) света под углом θ «выделяется» акустическая (дебаевская) волна с длиной волны Λ и частотой $f = V/\Lambda$ (V - скорость звука).

Из выражения (1) и определения частоты следует, что изменение частоты вследствие модуляции света стоячей волной:

$$\pm \Delta\omega = \pm\Omega = 2\pi f = \pm 2n \frac{V}{c} \omega \sin \frac{\theta}{2} \quad (2)$$

$$V = \frac{\lambda f}{2n \sin \theta / 2} \quad (3)$$

Ω , ω , c - циклическая частота звука, света и скорость света соответственно.

Из формулы (2) следует, что частота тепловой упругой волны может меняться от нуля при $\theta=0^\circ$ до

$$f = \frac{n}{\pi} \cdot \frac{V}{c} \omega \quad \text{при } \theta=180^\circ. \text{ Самая большая скорость } V \text{ у алмаза и } f=6 \times 10^{10} \text{ Гц для } \lambda = 5144 \text{ \AA}$$

Таким образом описанный здесь метод акустических исследований позволяет изучать особенности распространения звука, частота которого не выше $\sim 10^{10} - 10^{11}$ Гц, что на три - четыре порядка ниже границы спектра упругих колебаний в твердом теле, но достаточно велика, чтобы обнаружить, например, дисперсию

скорости звука. Изучение низкочастотного звука (при $\theta \neq 0$) возможно, но представляет собой трудную экспериментальную работу. Наиболее комфортабельна работа этим способом при углах рассеяния в области $\theta = 90^\circ$.

Эффект модуляции рассеянного света тепловыми волнами предсказали независимо друг от друга Мандельштам и Бриллюэн, экспериментально наблюдал Гросс.

Полная теория явления дает количественное выражение для распределения интенсивности по частотам в компоненте Мандельштама-Бриллюэна.

Из этого выражения следует, что полная ширина $\delta\omega$ компоненты (ширина на половине максимальной интенсивности компоненты) определяется выражением:

$$\delta\omega = 2\alpha V \quad (4)$$

Здесь α - амплитудный коэффициент поглощения звуковой волны, V - скорость гиперзвука, определенная по смещению $\Delta\omega$.

Таким образом, изучение спектра света молекулярного рассеяния позволит найти все основные характеристики упругой волны.

При наблюдении рассеянного света под углом $\theta = 90^\circ$, например, в жидком бензоле могут быть получены акустические характеристики волны частоты $\omega \sim 10^{10}$ Гц.

Контрольные вопросы:

1. Причины появления гиперзвуковых акустических волн в жидкостях.
2. Следствие модуляции рассеянного света тепловыми волнами в жидкостях.
3. Качественное описание рассеяния Мандельштама-Бриллюэна.

Вопросы для самостоятельной работы:

1. Применение рассеяния Мандельштама-Бриллюэна для изучения скорости распространения гиперзвука в жидкостях.
2. Изучение коэффициента поглощения гиперзвуковых волн в жидкостях по спектрам рассеяния Мандельштама-Бриллюэна.

Рекомендуемая литература:

1. *Ультразвук. Маленькая энциклопедия*, М., 1979.
2. *Физическая акустика*, (под редакцией У Мэсона), том VI, М.: Мир, 1993.
3. Ноздрев В.Ф., *Молекулярная акустика*, Изд. "Высшая школа", М., 1974.
4. Фабелинский И.Л., *Молекулярное рассеяние света*, М.:Наука, 1970.
5. Вукс М.Ф., *Рассеяния света в газах, жидкостях и растворах*, Изд. ЛГУ, 1977.
6. Волькенштейн М.В., *Молекулярная оптика*, М., 1951.

ЛЕКЦИЯ 13

ВЗАИМОДЕЙСТВИЕ ЭЛЕКТРОМАГНИТНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ С ФОНОНАМИ СРЕДЫ

План:

1. Флуктуации термодинамических величин в веществе;
2. Связь флуктуаций с рассеянием света;
3. Взаимодействие электромагнитного излучения с адиабатическими флуктуациями давления;
4. Рассеяние света на акустических фонах.

Ключевые слова:

Флуктуация, плотность, рассеяние, термодинамическая величина, фонов, электромагнитная волна, давление.

Основное содержание:

При попадании световой волны от внешнего источника на вещество происходит взаимодействие с такими упругими волнами. Каждая из этих волн создает периодическую решетку, на которой происходит дифракция света, это явление аналогично дифракции света на ультразвуке.

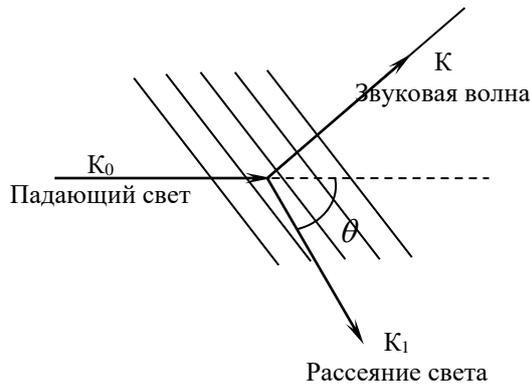


Схема рассеяния световой волны с волновым вектором K_0 на звуковой волне с волновым вектором K . тонкими параллельными линиями показано волновые фронты звуковой волны, K – волновой вектор рассеянной световой волны

Вследствие флуктуации плотность вещества в каждой точке определяется формулой

$$\rho = \rho_0 + \Delta\rho$$

где ρ_0 – невозмущенное значение плотности, а $\Delta\rho$ – ее изменение; в выражение для $\Delta\rho$ можно выделить две, волны распространяющиеся в противоположных направлениях:

$$\Delta\rho = Ae^{i(\Omega t - Kx)} + Ae^{-i(\Omega t - Kx)}$$

Ω – круговая частота, K – волновой вектор упругой волны связаны между собой соотношением: $\Omega = Kc_{зв}$, а $c_{зв}$ – скорость звука. Поскольку диэлектрическая проницаемость вещества является функцией плотности и температуры, то из-за флуктуации плотности её изменение при постоянной температуре равно:

$$\Delta\varepsilon = \left(\frac{\partial\varepsilon}{\partial\rho} \right)_T \Delta\rho$$

вследствие этого возникает периодического изменение показателя преломления $n = \sqrt{\varepsilon}$ с пространственным периодом $2\pi / K$ по оси x . Если падающая на элемент объема среды под произвольным углом к оси x световая волна имеет вид:

$$E_{II} = E_0 e^{i(w_0 t - k_0 x)} + E_0^* e^{-i(w_0 t - k_0 x)}$$

(где w_0 – ее частота, а k_0 – волновой вектор), то в результате ее взаимодействия с периодической решеткой, обусловленной изменением показателя преломления n , возникает рассеянная волна

$$E_p = E_1 e^{i(w_1 t - k_1 x)} + E_1^* e^{-i(w_1 t - k_1 x)}$$

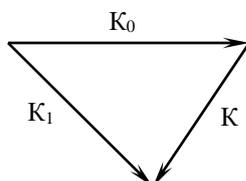
с частотой w_1 и волновым вектором k_1 . Для световых волн в веществе справедливы соотношения:

$$w_0 = \frac{k_0 c_0}{n}, \quad w_1 = \frac{k_1 c_0}{n}, \quad k_0 = n \frac{2\pi}{\lambda_0}.$$

где λ_0 – длина волны падающего света в вакууме, а c_0 – скорость света в вакууме. При рассеянии должно выполняться условие:

$$K_1 - K_0 - K = 0$$

соответствующее закону сохранения импульса при взаимодействии волн



Векторная диаграмма, иллюстрирующая закон сохранения импульса при рассеяние света на звуке.

Контрольные вопросы:

1. Причины возникновения флуктуаций термодинамических параметров в жидкостях.
2. Причина адиабатических флуктуаций давления.
3. Рассеяние электромагнитного излучения на акустических фонах.

Вопросы для самостоятельной работы:

1. Изотропное рассеяние света в жидкостях.
2. Анизотропноерассеяние света в жидкостях.

Рекомендуемая литература:

1. *Ультразвук. Маленькая энциклопедия*, М., 1979.
2. *Физическая акустика*, (под редакцией. У Мэзона), том VI, М.: Мир, 1993.
3. Ноздрев В.Ф., *Молекулярная акустика*, Изд. "Высшая школа", М., 1974.
4. Фабелинский И.Л., *Молекулярное рассеяние света*, М.:Наука, 1970.
5. Вукс М.Ф., *Рассеяния света в газах, жидкостях и растворах*, Изд. ЛГУ, 1977.
6. Волькенштейн М.В., *Молекулярная оптика*, М., 1951.

Предмет: Лазерная акусто-оптическая спектроскопия
(танловфан, 4 курс бакалавриата)

Задания для семинарских (практических) занятий

Раздел 1. Распространение линейных акустических волн в идеальной среде

1.1. Исходя из уравнений гидродинамики, вывести уравнение для звуковых волн малой амплитуды в идеальной среде.

1.2. Найти решение волнового уравнения для бегущей плоской волны. Показать, что звуковая волна является продольной, и установить связь между возмущениями давления, плотности и колебательной скоростью в такой волне.

1.3. Найти условие, при котором распространение звуковой волны можно рассматривать как адиабатический процесс.

1.4. Выразить адиабатический модуль объемной упругости k_a , связывающий приращения давления и плотности

$$p^* = k_a \rho^* / \rho^0 = \beta_a^{-1} \rho^* / \rho^0$$

(где β_a - адиабатический коэффициент сжатия) через скорость звука c .

1.5. Вывести формулу для скорости звука в идеальном газе.

1.6. Записать решение волнового уравнения для плоской монохроматической волны. Найти соотношение между амплитудами давления и смещения, колебательной скорости и ускорения частиц.

1.7. Смещение частиц в плоской бегущей в воздухе звуковой волне имеет вид:

$$\xi = 5 \times 10^{-8} \sin(1980t - 6x) \text{ [м]}.$$

Найти: частоту колебаний; скорость распространения волны; длину волны; амплитуду скорости колебания каждой частицы; ускорение; амплитуду звукового давления, если распространение звука происходит адиабатически ($\rho_0 c = 420 \text{ кг/(м}^2\text{с)}$).

1.8. Плоская волна с амплитудой акустического давления 0.0002 дин/см^2 при 1000 Гц (порог слышимости) распространяется в воздухе. Найти значения амплитуды скорости и смещения частиц.

1.9. Амплитуда колебательной скорости в плоской гармонической звуковой волне в воде равна $u_0 = 5 \times 10^{-5} \text{ см/с}$. Вычислить амплитуду смещения и звукового давления на частоте 100 Гц . Как изменятся эти величины, если такую же колебательную скорость имеет волна в воздухе?

1.10. Исходя из линеаризованных уравнений гидродинамики идеальной среды, вывести формулы для

объемной плотности энергии и вектора плотности потока энергии звуковой волны.

1.11. Получить выражения для объемной плотности энергии и интенсивности плоской бегущей волны.

1.12. В воздухе при температуре $27\text{ }^{\circ}\text{C}$ и нормальном атмосферном давлении распространяется звуковая волна, уровень интенсивности которой равен $B = 150$ дБ. Определить температуру в месте максимального давления и амплитуду ее колебаний. Как изменится эта величина, если мощность волны уменьшается в 10 раз?

Раздел 2. Затухание звука в жидкостях и газах, релаксационное поглощение

2.1. Записать волновое уравнение для акустической волны в вязкой теплопроводящей среде.

2.2. Вывести формулу для коэффициента затухания звука, обусловленного вязкостью и теплопроводностью среды.

2.3. Цилиндрическая волна распространяется в воздухе. Вычислить коэффициент поглощения звука по давлению, если на дистанции от 1 км до 1.5 км от источника звука интенсивность звука уменьшается на 5 дБ.

2.4. Вывести формулу для коэффициента поглощения, связанного с наличием в среде релаксационного процесса.

2.5. Используя формулу для дисперсии скорости звука, обусловленной релаксационным процессом, найти область наиболее быстрого изменения скорости в зависимости от частоты.

2.6. Найти максимальное значение коэффициента релаксационного поглощения, происходящего на длине волны.

2.7. Скорость звука в уксусной кислоте на частоте 250 кГц при температуре $20\text{ }^{\circ}\text{C}$ и атмосферном давлении равна 1194 м/с. При увеличении частоты до 3000 кГц относительная дисперсия скорости звука составляет около 1%. Найти максимальный безразмерный коэффициент релаксационного поглощения, отнесенный к длине волны.

Раздел 3. Акустооптические явления в жидкостях

3.1. По экспериментальным данным о величине акустического двулучепреломления определить значения времен релаксации и построить график зависимости времени релаксации от температуры.

$T, \text{ }^{\circ}\text{C}$	$\frac{\Delta n}{\sqrt{Y}} \sqrt{\rho v^3}$
102,0	0,0193
101,0	0,0203

100,0	0,0214
98,9	0,0227
98,0	0,0241
97,2	0,0258
96,0	0,0278
95,0	0,0300
93,9	0,0325
92,9	0,0358
92,0	0,0390
91,1	0,0428
90,1	0,0455
89,0	0,0486
87,9	0,0513
87,1	0,0537
86,0	0,0553
85,0	0,0575
84,0	0,0581

3.2. Используя результаты измерений угла акусто-оптической дифракции, приведенные в Таблице 1(а), рассчитать значения скорости ультразвука для различных частот ультразвука. Заполнить Таблицу 1(б) и построить график зависимость скорости ультразвука V от частоты f .

Таблица 1(а). Результаты измерений угла акусто-оптической дифракции при различных частотах ультразвука

$t, ^\circ\text{C}$	$f, \text{МГц}$	$n=1$		$n=2$		$n=3$	
		ϕ_{+1}	ϕ_{-1}	ϕ_{+2}	ϕ_{-2}	ϕ_{+3}	ϕ_{-3}
10	4	20° 26' 21"	20° 14' 19"	20° 32' 22"	20° 08' 18"	20° 38' 20"	20° 02' 20"
	9.8	20° 35' 04"	20° 05' 36"	20° 49' 50"	19° 50' 50"	21° 04' 26"	19° 36' 14"
	12	20° 38' 23"	20° 02' 17"	20° 56' 27"	19° 44' 13"	21° 14' 20"	19° 26' 20"
	25	20° 57' 57"	19° 42' 43"	20° 35' 35"	19° 05' 05"	21° 12' 51"	18° 27' 49"

Таблица 1(б). (заполнить таблицу)

$t, ^\circ\text{C}$	$f, \text{МГц}$	$n=1$	$n=2$	$n=3$	$V_{\text{ср}}, \text{м/с}$
		$V, \text{м/с}$	$V, \text{м/с}$	$V, \text{м/с}$	
10	4				
	9.8				
	12				
	25				

3.3. Используя результаты измерений угла акусто-оптической дифракции, приведенные в Таблице 2(а), рассчитать значения скорости ультразвука для различных температур исследуемой жидкости. Заполнить Таблицу 2(б) и построить график зависимость скорости ультразвука V от температуры t .

Таблица 2(а). Результаты измерений угла акусто-оптической дифракции при различных температурах среды

$f, \text{МГц}$	$t, ^\circ\text{C}$	$n=1$		$n=2$		$n=3$	
		ϕ_{+1}	ϕ_{-1}	ϕ_{+2}	ϕ_{-2}	ϕ_{+3}	ϕ_{-3}
4	30	20° 26' 06"	20° 14' 34"	20° 31' 54"	20° 08' 46"	20° 37' 36"	20° 03' 04"
	50	20° 25' 59"	20° 14' 41"	20° 31' 37"	20° 09' 03"	20° 37' 16"	20° 03' 24"

70	20° 25' 55"	20° 14' 45"	20° 31' 30"	20° 09' 10"	20° 37' 11"	20° 03' 29"
90	20° 25' 57"	20° 14' 43"	20° 31' 34"	20° 09' 06"	20° 37' 14"	20° 03' 26"

Таблица 2(б). (заполнить таблицу)

f , МГц	t , °C	$n=1$	$N=2$	$n=3$	V_{cp} , м/с
		V , м/с	V , м/с	V , м/с	
4	30				
	50				
	70				
	90				

3.4. Используя результаты измерений интенсивности дифрагированного излучения, приведенные в Таблице 3(а), рассчитать значения коэффициента поглощения ультразвука для различных частот ультразвука. Заполнить Таблицу 3(б) и построить график зависимость коэффициента поглощения ультразвука α от частоты f .

Таблица 3(а). Результаты измерений амплитуды сигнала акусто-оптической дифракции в зависимости от изменения расстояния до источника ультразвука при различных частотах ультразвука

t , °C	f , МГц	$x=1\text{мм}$		$x=2\text{мм}$		$x=3\text{мм}$	
		U_1	U_2	U_1	U_2	U_1	U_2
100	2	4.80 В	4.54 В	4.80 В	4.29 В	4.80 В	4.06 В
	3	4.60 В	4.21 В	4.60 В	3.86 В	4.60 В	3.53 В
	5	4.60 В	3.54 В	4.60 В	2.72 В	4.60 В	2.10 В
	9	4.40 В	3.33 В	4.40 В	2.51 В	4.40 В	1.90 В
	16	4.20 В	1.46 В	4.20 В	0.50 В	4.20 В	0.18 В
	22	4.00 В	0.95 В	4.00 В	0.23 В	4.00 В	0.05 В

Таблица 3(б). (заполнить таблицу)

t , °C	f , МГц	$x=1\text{мм}$	$x=2\text{мм}$	$x=3\text{мм}$	α_{cp} , см ⁻¹
		α , см ⁻¹	α , см ⁻¹	α , см ⁻¹	
100	2				
	3				
	5				
	9				
	16				
	22				

3.5. Используя результаты измерений интенсивности дифрагированного излучения, приведенные в Таблице 4(а), рассчитать значения коэффициента поглощения ультразвука для различных температур исследуемой жидкости. Заполнить Таблицу 4(б) и построить график зависимость коэффициента поглощения ультразвука α от температуры t .

Таблица 4(а). Результаты измерений амплитуды сигнала акусто-оптической дифракции в зависимости от изменения расстояния до источника ультразвука при различных температурах среды

f , МГц	t , °C	$x=1\text{мм}$		$x=2\text{мм}$		$x=3\text{мм}$	
		U_1	U_2	U_1	U_1	U_2	U_1
2	100	4.80 В	4.54 В	4.80 В	4.29 В	4.80 В	4.06

	95	4.80 В	4.39 В	4.80 В	4.01 В	4.80 В	3.66
	90	4.80 В	4.34 В	4.80 В	3.93 В	4.80 В	3.56
	85	4.80 В	3.89 В	4.80 В	3.15 В	4.80 В	2.56
	84	4.80 В	3.63 В	4.80 В	2.74 В	4.80 В	2.07

Таблица 4(б). (заполнить таблицу)

f , МГц	t , °С	$\Delta x=1\text{мм}$	$\Delta x=2\text{мм}$	$\Delta x=3\text{мм}$	$\alpha_{\text{ср}}$, см ⁻¹
		α , см ⁻¹	α , см ⁻¹	α , см ⁻¹	
2	100				
	95				
	90				
	85				
	84				

САМАРКАНДСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ
ФИЗИЧЕСКИЙ ФАКУЛЬТЕТ

КАФЕДРА «КВАНТОВАЯ ЭЛЕКТРОНИКА И ТЕОРЕТИЧЕСКАЯ ФИЗИКА»

Предмет: Лазерная акусто-оптическая спектроскопия

(танловфан, 4 курс бакалавриата)

ТЕСТОВЫЕ ВОПРОСЫ

- Что изучает акустооптика?
 - Явления взаимодействия лазерного излучения с веществом
 - Явления взаимодействия электромагнитных волн со звуковыми волнами в твердых и жидких телах
 - Нелинейно-оптические явления в твердых и жидких телах
 - Процессы взаимодействия оптических волн с внутренними параметрами твердых и жидких тел
- Какими параметрами световых пучков позволяют управлять акустооптические устройства?
 - Только поляризацией
 - Только частотой
 - Только спектральным составом
 - Частотой, поляризацией, спектральным составом
- На каком явлении основана работа большинства акустооптических устройств?
 - Эффект Доплера для звуковых волн
 - Дисперсия скорости звука в веществе
 - Дифракция света на ультразвуке
 - Частотная зависимость коэффициента поглощения звука
- Какой принцип лежит в основе работы акустооптических дефлекторов и сканеров?
 - Зависимость угла отклонения дифрагированного света от длины волны звука
 - Зависимость скорости распространения звуковых волн в веществе от частоты звука
 - Зависимость коэффициента поглощения звуковых волн в веществе от частоты звука
 - Зависимость интенсивности дифрагированного излучения от частоты звука

5. Чем регулируется распределение энергии между основным лучом и дифрагированным?
- Изменением интенсивности звука
 - Изменением частоты звука
 - Изменением скорости звука
 - Изменением коэффициента поглощения звука
6. На каком явлении основана работа быстродействующих акустооптических устройств, осуществляющих управляемую фильтрацию светового сигнала?
- С изменением частоты звука меняется в широких пределах интенсивность дифрагированного света
 - С изменением частоты звука меняется в широких пределах скорость распространения звука в среде
 - С изменением частоты звука меняется в широких пределах длина волны дифрагированного света
 - С изменением частоты звука меняется в широких пределах коэффициент поглощения звука в среде
7. Что такое акустооптическая рефракция?
- Изменение хода световых лучей в неоднородно деформированной среде
 - Изменение хода световых лучей в среде, обладающих постоянной периодической структурой
 - Изменение хода световых лучей в среде, обусловленной присутствием в среде случайным образом изменяющегося акустического поля
 - Изменение хода световых лучей под действием звука определенной частоты, обуславливающей нелинейно-оптическое взаимодействие звука со средой
8. Упругооптическая постоянная вещества иначе называется:
- Постоянной Поккельса
 - Постоянной Фарадея
 - Постоянной Планка
 - Постоянной Ридберга
9. Эффективность дифракции света на ультразвуке определяется:
- Геометрией акустооптического взаимодействия
 - Интенсивностью ультразвука в точке взаимодействия со световой волной
 - Частотой ультразвука
 - Коэффициентом поглощения ультразвука в среде
10. Дифракция Брэгга возникает при:
- Определенном угле падения света на звуковой пучок
 - Нормальном падении света на звуковой пучок
 - Любом угле падения света на звуковой пучок
 - Падении света на звуковой пучок под углом, не превышающем 45°
11. Сколько дифрагированных лучей возникает в результате дифракции Брэгга?
- 1
 - 2
 - 3
 - 4
12. Дифракция Рамана-Ната возникает при:
- Нормальном падении света на звуковой пучок
 - Определенном угле падения света на звуковой пучок
 - Любом угле падения света на звуковой пучок
 - Падении света на звуковой пучок под углом, не превышающем 45°
13. Количество дифрагированных лучей, возникающих в результате дифракции Рамана-Ната:
- Зависит от интенсивности падающего света
 - Всегда нечетное количество
 - Всегда кратно 3
 - Может принимать любое целое значение
14. Какие режимы дифракции используются в современных акустооптических устройствах?
- Рамана-Ната и Брэгга
 - Рамана-Ната
 - Брэгга

- d) Среди приведенных ответов нет правильного
15. Какие физические характеристики позволяют изучать акустооптические методы?
- Характеристики звукового поля и свойства материалов, в которых имеет место взаимодействие света со звуком
 - Только характеристики звукового поля
 - Только свойства материалов, в которых имеет место взаимодействие света со звуком
 - Среди приведенных ответов нет правильного
16. Анализ какого параметра позволяет восстановить картину пространственного распределения интенсивности звука в образце?
- Эффективности дифракции света на ультразвуке
 - Частоты звукового поля
 - Коэффициента поглощения ультразвука
 - Дисперсии скорости ультразвука
17. Какие параметры материала позволяет изучить акустооптическая дифракция?
- Скорость и поглощение ультразвука
 - Плотность и показатель преломления материала
 - Нелинейно-оптические характеристики материала
 - Среди приведенных ответов нет правильного
18. Какой элемент лежит в основе акустооптических устройств?
- Акустооптическая ячейка
 - Нелинейно-оптический преобразователь
 - Параметрический акустооптический преобразователь
 - Механико-оптический модулятор
19. Что такое акустооптический дефлектор?
- Устройство для управления направлением светового луча в пространстве на основе явлений акустооптической дифракции и рефракции
 - Устройство для управления частотными характеристиками звукового поля на основе явлений акустооптической дифракции и рефракции
 - Устройство для управления энергетическими характеристиками дифрагированного излучения на основе явлений акустооптической дифракции и рефракции
 - Устройство для управления поляризационными характеристиками дифрагированного излучения на основе явлений акустооптической дифракции и рефракции
20. Что такое акустооптический сканер?
- Устройство для управления направлением светового луча в пространстве на основе явлений акустооптической дифракции и рефракции
 - Устройство для управления частотными характеристиками звукового поля на основе явлений акустооптической дифракции и рефракции
 - Устройство для управления энергетическими характеристиками дифрагированного излучения на основе явлений акустооптической дифракции и рефракции
 - Устройство для управления поляризационными характеристиками дифрагированного излучения на основе явлений акустооптической дифракции и рефракции
21. Что такое акустооптический модулятор?
- Устройство для управления интенсивностью светового луча.
 - Устройство для управления частотными характеристиками звукового поля
 - Устройство для управления пространственными характеристиками дифрагированного излучения
 - Устройство для управления поляризационными характеристиками дифрагированного излучения
22. Что такое акустооптический фильтр?
- Устройство, позволяющее выделить из широкого спектра оптического излучения достаточно узкий интервал длин световых волн.
 - Устройство, позволяющее эффективно управлять частотой светового потока
 - Устройство для управления пространственными характеристиками дифрагированного излучения
 - Устройство для управления поляризационными характеристиками дифрагированного излучения
23. В каком режиме дифракции работает акустооптический фильтр

- a) Брэгга
 - b) Рамана-Ната
 - c) Промежуточный между режимом Брэгга и Рамана-Ната
 - d) Среди приведенных ответов нет правильного
24. На каком принципе основана работа акустооптического фильтра?
- a) С монохроматическим звуком эффективно взаимодействуют лишь те световые волны, длины которых удовлетворяют условию Брэгга
 - b) С монохроматическим звуком эффективно реагируют лишь те световые волны, которые распространяются перпендикулярно направлению звукового пучка
 - c) С монохроматическим звуком эффективно взаимодействуют лишь те световые волны, волновой фронт которых является плоским
 - d) Среди приведенных ответов нет правильного
25. На каком явлении основан принцип работы акустооптического фильтра?
- a) Анизотропная дифракция в двулучепреломляющих кристаллах
 - b) Анизотропная дифракция в изотропных жидкостях
 - c) Анизотропная дифракция в изотропных кристаллах
 - d) Среди приведенных ответов нет правильного
26. Что такое акустооптический процессор?
- a) Акустооптическое устройство для обработки информации
 - b) Акустооптическое устройство для записи информации
 - c) Акустооптическое устройство для хранения информации
 - d) Среди приведенных ответов нет правильного
27. Что необходимо для обработки информации акустооптическим процессором?
- a) Преобразование радиосигнала в звуковой
 - b) Преобразование звукового сигнала в оптический
 - c) Преобразование частоты радиосигнала
 - d) Преобразование амплитуды акустооптического сигнала
28. В каком режиме акустооптической дифракции работает низкочастотный акустооптический процессор?
- a) Рамана-Ната
 - b) Брэгга
 - c) Промежуточный режим
 - d) Среди приведенных ответов нет правильного
29. В каком режиме акустооптической дифракции работает высокочастотный акустооптический процессор?
- a) Брэгга
 - b) Рамана-Ната
 - c) Промежуточный режим
 - d) Среди приведенных ответов нет правильного
30. В каких средах проявляется акустооптический эффект
- a) Во всех
 - b) Только в жидкостях
 - c) Только в твердых телах
 - d) Только в жидких кристаллах
31. Чем ограничивается применение акустооптических эффектов в жидкостях?
- a) Сильное поглощение высокочастотного звука
 - b) Низкое акустооптическое качество жидкостей
 - c) Высокая текучесть жидкостей
 - d) Низкий показатель преломления по сравнению с кристаллами
32. Что такое акустоэлектрический эффект?
- a) Возникновение постоянного тока в проводящей среде под действием бегущей ультразвуковой волны
 - b) Изменение диэлектрической проницаемости вещества под действием ультразвуковых волн
 - c) Возникновение переменного электромагнитного поля в среде под действием ультразвуковых волн
 - d) Среди приведенных ответов нет правильного

33. Ультразвуком называется звук с частотой:
- 10^3 - 10^9 Гц
 - 10^6 - 10^9 Гц
 - 10^3 - 10^6 Гц
 - 10^1 - 10^3 Гц
34. Чем обусловлен акустоэлектрический эффект?
- Взаимодействие ультразвука с электронами проводимости
 - Взаимодействие ультразвука с примесями в проводнике
 - Взаимодействие ультразвука с экситонами
 - Среди приведенных ответов нет правильного
35. Нелинейное поглощение звука определяется таким параметром звуковой волны, как:
- Амплитуда
 - Частота
 - Длина волны
 - Скорость распространения в среде
36. Акустоэлектрический эффект является проявлением:
- Нелинейных взаимодействий
 - Линейных взаимодействий
 - Как линейных, так и нелинейных взаимодействий
 - Среди приведенных ответов нет правильного
37. Преимущества поверхностных акустических волн (ПАВ) при применении в акустоэлектронных устройствах?
- Малые потери на преобразовании при их возбуждении и приеме
 - Несингулярность волнового фронта ПАВ
 - Линейность зависимости частоты от скорости распространения ПАВ
 - Среди приведенных ответов нет правильного
38. Основным элементов акустоэлектронных устройств является:
- Электроакустический преобразователь
 - Электроакустический фильтр
 - Электроакустический затвор
 - Электроакустический детектор
39. К какому акустическому элементу относится концентратор?
- Звукопровод
 - Звуковой фильтр
 - Звуковой модулятор
 - Звуковой детектор
40. Увеличение плотности энергии ультразвуковых волн осуществляется при помощи:
- Концентратора
 - Звукового фильтра
 - Звукового модулятора
 - Звукового трансформера
41. Ввод энергии в акустические волноводы осуществляется при помощи:
- Концентратора
 - Звукового фильтра
 - Звукового модулятора
 - Звукового трансформера
42. Гиперзвуком называется звук с частотой:
- 10^9 - 10^{12} Гц
 - 10^6 - 10^9 Гц
 - 10^3 - 10^6 Гц
 - 10^1 - 10^3 Гц
43. Какие устройства акустоэлектроники относятся к линейным?

- a) Все перечисленные устройства
 - b) Акустические фильтры
 - c) Акустические линии задержки
 - d) Кодированные и декодирующие устройства
44. Какие из перечисленных акустоэлектронных устройств не являются линейными?
- a) Конволютор
 - b) Акустический фильтр
 - c) Акустическая линия задержки
 - d) Дисперсионная линия задержки
45. Что понимается под акустоэлектронным взаимодействием?
- a) Взаимодействие ультразвука с электронами
 - b) Взаимодействие ультразвука с любыми заряженными частицами
 - c) Взаимодействие ультразвука с высокочастотными фонами
 - d) Среди приведенных ответов нет правильного
46. К каким явлениям приводит взаимодействие акустических и световых волн в среде, состоящей из анизотропных молекул?
- a) Акустическое двулучепреломление
 - b) Дисперсия скорости звука
 - c) Интерференция звуковых и световых волн
 - d) Параметрическое усиление звуковых волн
47. Вклад в коэффициент поглощения звука в среде со стороны объемной вязкости обусловлен:
- a) Релаксационными процессами
 - b) Теплопроводностью
 - c) Дисперсией скорости звука
 - d) Частотной зависимостью коэффициента поглощения
48. Причина явления дифракции света на ультразвуке
- a) Периодическое изменение показателя преломления в поле звуковой волны
 - b) Периодическое изменение скорости звука в среде
 - c) Периодическое изменение интенсивности звуковой волны
 - d) Периодическое изменение частоты возбуждающего излучения
49. К каким явлениям приводит взаимодействие акустических и световых волн в среде?
- a) Дифракция света на звуковых волнах
 - b) Дисперсия скорости звука
 - c) Интерференция звуковых и световых волн
 - d) Параметрическое усиление звуковых волн
50. Дисперсией скорости звука называется:
- a) Зависимость фазовой скорости звуковых волн от частоты
 - b) Зависимость фазовой скорости звуковых волн от их амплитуды
 - c) Зависимость фазовой скорости звуковых волн от их энергии
 - d) Зависимость фазовой скорости звуковых волн от профиля их волнового фронта
51. Стоксово (классическое) поглощение звука в среде – это поглощение, обусловленное:
- a) Сдвиговой вязкостью и теплопроводностью
 - b) Сдвиговой и объемной вязкостью
 - c) Объемной вязкостью и теплопроводностью
 - d) Только сдвиговой вязкостью
52. Причина явления акустического двулучепреломления
- a) Периодическое изменение ориентации молекул в среде
 - b) Периодическое изменение показателя преломления в поле звуковой волны
 - c) Периодическое изменение интенсивности звуковой волны
 - d) Периодическое изменение частоты возбуждающего излучения
53. Процесс необратимого перехода энергии звуковой волны в другие виды энергии называется:
- a) Поглощением звука

- b) Дисперсией скорости звука
 - c) Акустической рефракцией
 - d) Среди приведенных ответов нет правильного
54. Величина, называемая объемной вязкостью:
- a) Характеризует процесс диссипации энергии при объемных деформациях среды
 - b) Характеризует отклик среды на прохождение звуковой волны
 - c) Характеризует процесс диссипации энергии при сдвиговых деформациях среды
 - d) Характеризует величину дисперсии скорости звука в среде
55. Практическое применение явления акустического двулучепреломления
- a) Измерение времени ориентационной релаксации
 - b) Измерение скорости звука
 - c) Измерение показателя преломления среды
 - d) Измерение частоты звука
56. Вынужденное рассеяние Мандельштама-Бриллюэна наблюдается:
- a) При достаточно больших мощностях возбуждающего излучения
 - b) В определенном образом подобранной рассеивающей среде
 - c) При высоких температурах рассеивающей среды
 - d) При высоком показателе преломления рассеивающей среды
57. Практическое применение явления дифракции света на ультразвуке
- a) Измерение скорости звука
 - b) Измерение показателя преломления среды
 - c) Измерение дисперсии скорости света
 - d) Измерение частоты звука
58. На акустических волнах какого диапазона частот происходит рассеяние Мандельштама-Бриллюэна?
- a) Гиперзвукового
 - b) Ультразвукового
 - c) Инфразвукового
 - d) Среди приведенных ответов нет правильного
59. Какой тип дифракции света на ультразвуке является резонансным?
- a) Дифракция Брэгга
 - b) Дифракция Рамана-Ната
 - c) Промежуточный режим дифракции
 - d) Среди приведенных ответов нет правильного
60. Акустический импеданс – это:
- a) Комплексное сопротивление, которое вводится при рассмотрении колебаний акустической системы
 - b) Действительное сопротивление, которое вводится при рассмотрении колебаний акустической системы
 - c) Величина, характеризующая отклик среды на прохождение через нее акустических волн
 - d) Величина, характеризующая скорость изменения колебаний частиц среды в поле звуковой волны
61. Под каким углом происходит рассеяние света при вынужденном рассеянии Мандельштама-Бриллюэна?
- a) 180°
 - b) 90°
 - c) 45°
 - d) порядка $1-2^\circ$
62. При рассеянии Мандельштама-Бриллюэна имеет место:
- a) Сдвиг частоты рассеянного света относительно частоты падающего
 - b) Совпадение частоты рассеянного света с частотой падающего
 - c) Случайный характер изменения частоты рассеянного света
 - d) Среди приведенных ответов нет правильного
63. Кавитация – это:
- a) Образование в жидкости пульсирующих пузырьков, заполненных паром, газом или их смесью
 - b) Образование в жидкости областей с переменным показателем преломления, обусловленным прохождением звуковой волны

- c) Образование в жидкости локальных областей повышения температуры за счет перекачки в жидкость энергии акустической волны
- d) Среди приведенных ответов нет правильного
64. Рассеяние света на флуктуациях плотности в жидкостях и газах или на колебаниях кристаллической решетки в твердом теле называется рассеянием:
- a) Мандельштама-Бриллюэна
- b) Рэлея
- c) Рамана-Ната
- d) Комбинационное
65. Дисперсии скорости звука в жидкостях заметно проявляется на частотах:
- a) Гиперзвукового диапазона
- b) Ультразвукового диапазона
- c) Инфразвукового диапазона
- d) Среди приведенных ответов нет правильного
66. Акустоэлектронное устройство, служащее для получения функций свертки двух акустических сигналов, называется:
- a) Конволютор
- b) Дефлектор
- c) Концентратор
- d) Модулятор
67. Дисперсия скорости звука в газах обусловлена процессами:
- a) Всеми перечисленными процессами
- b) Химической релаксации
- c) Колебательной релаксации
- d) Вращательной релаксации
68. Дисперсия скорости звука в жидкостях может быть обусловлена процессами:
- a) Всеми перечисленными процессами
- b) Химической релаксации
- c) Колебательной релаксации
- d) Поворотной-изомерной релаксации
69. Прибор для определения давления звукового излучения:
- a) Радиометр
- b) Вискозиметр
- c) Манометр
- d) Барометр
70. Рассеяние света Мандельштама-Бриллюэна на практике применяется для:
- a) Измерение скорости гиперзвука
- b) Измерение коэффициента поглощения ультразвука
- c) Измерение времени релаксации анизотропии
- d) Измерение времени релаксации ориентации молекул
71. Квант энергии звуковой волны:
- a) Фонон
- b) Фотон
- c) Магنون
- d) Экситон
72. Коэффициент поглощения высокочастотного звука определяется по таким спектральным характеристикам, как:
- a) Ширина компонент изотропного рассеяния света
- b) Смещение компонент изотропного рассеяния света
- c) Ширина линии анизотропного рассеяния света
- d) Смещение линии анизотропного рассеяния света
73. В каких единицах измеряется коэффициент поглощения звука?

- a) 1/см
- b) дБ
- c) 1/сек
- d) м/сек

74. Скорость распространения высокочастотного звука определяется по таким спектральным характеристикам, как:

- a) Смещение компонент изотропного рассеяния света
- b) Ширина компонент изотропного рассеяния света
- c) Ширина линии анизотропного рассеяния света
- d) Смещение линии анизотропного рассеяния света

75. Время ориентационной релаксации молекул в конденсированных средах может быть измерено при помощи:

- a) Двухлучепреломление, наведенное акустическим полем
- b) Манделштам-бриллюэновская спектроскопия
- c) Дифракция света на ультразвуке
- d) Вынужденное рассеяние Манделштама-Бриллюэна

Предмет: Лазерная акусто-оптическая спектроскопия

(танловфан, 4 курс бакалавриата)

Вопросы итогового контроля

- 6. Основные характеристики упругой волны.
- 7. Как происходит распространение упругой волны в среде?
- 8. Перечислить способы изучения упругих волн.
- 9. Чем определяется скорость распространения упругой волны в среде?
- 10. Перечислить основные особенности распространения упругих волн в среде.
- 11. Основные параметры и характеристики, описывающие звуковые колебания в среде.
- 12. Чем определяется скорость распространения звуковых волн в средах.
- 13. Перечислить и объяснить линейные характеристики звукового поля.
- 14. Перечислить и объяснить энергетические характеристики звукового поля.
- 15. Сформулировать общие характеристики ультразвуковых колебаний.
- 16. Перечислить и объяснить основные законы распространения ультразвуковых волн в среде.
- 17. Сформулировать специфические особенности распространения ультразвуковых волн в среде.
- 18. Что такое дисперсия скорости звука?
- 19. Какие виды дисперсии скорости звука бывают?
- 20. Чем обусловлена дисперсия скорости звука?
- 21. Связь дисперсии с релаксационными процессами в среде.
- 22. Связь дисперсии с геометрическими характеристиками среды.
- 23. Что такое пространственная дисперсия скорости звука?
- 24. Условия проявления пространственной дисперсии.
- 25. Что такое резонансная дисперсия скорости звука?
- 26. Условия проявления резонансной дисперсии.
- 27. Связь дисперсии с флуктуациями термодинамических величин.
- 28. В чем заключается предмет молекулярной акустики?

29. Какие основные задачи решаются в молекулярной акустике?
30. Методы акустических исследований сред в различных агрегатных состояниях.
31. Что такое акустическая релаксация?
32. Причины появления акустической релаксации.
33. Какие виды акустической релаксации бывают?
34. Что такое время акустической релаксации и чем оно определяется?
35. Причина явления дифракции света на ультразвуке.
36. Что из себя представляет и как возникает дифракционный спектр?
37. Применение явления дифракции света на ультразвуке.
38. Исходное уравнение распространения света в пространственно-периодической среде.
39. Изменение показателя преломления среды в поле акустической волны.
40. Система уравнений Рамана-Ната.
41. Условие режим Рамана-Ната в явлении дифракции света на ультразвуке.
42. Перечислить и объяснить специфические особенности дифракции Рамана-Ната.
43. Чем определяется распределение интенсивности по дифракционным порядкам в режиме Рамана-Ната.
44. Условие режим Брэгга в явлении дифракции света на ультразвуке.
45. Перечислить и объяснить специфические особенности дифракции Брэгга.
46. Чем определяется распределение интенсивности по дифракционным порядкам в режиме Брэгга.
47. Причины появления гиперзвуковых акустических волн в жидкостях.
48. Следствие модуляции рассеянного света тепловыми волнами в жидкостях.
49. Качественное описание рассеяния Мандельштама-Бриллюэна.
50. Причины возникновения флуктуаций термодинамических параметров в жидкостях.
51. Причина адиабатических флуктуаций давления.
52. Рассеяние электромагнитного излучения на акустических фононах.

Темы для самостоятельной работы

19. Применение Ультразвук
20. Пьезоэлектрический эффект
21. Понятие акустический фононы
22. Фазовая и групповая скорость акустической волны.
23. Влияние состояния среды на скорость распространения звуковых волн.
24. Релаксационная теория распространения звука в жидкостях.
25. Акустооптические исследования газов и паров.
26. Акустооптические исследования жидкостей.
27. Акустооптические исследования твердых тел.
28. Применение акустооптических методов для исследования неравновесных состояний вещества.
29. Рассеяние света как метод исследования фононов.
30. Оптические явления в поле ультразвуковых волн.
31. Двойное лучепреломление света, наведенное полем акустической волны.
32. Акустические исследования фазовых переходов и критических явлений.
33. адиабатических флуктуаций давления.
34. Изучение коэффициента поглощения гиперзвуковых волн в жидкостях по спектрам рассеяния Мандельштама-Бриллюэна
35. Анизотропное рассеяние света в жидкостях.
36. Изотропное рассеяние света в жидкостях.

МИНИСТЕРСТВО ВЫСШЕГО И СРЕДНЕГО СПЕЦИАЛЬНОГО ОБРАЗОВАНИЯ РЕСПУБЛИКИ
УЗБЕКИСТАН

САМАРКАНДСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ

ФИЗИЧЕСКИЙ ФАКУЛЬТЕТ

КАФЕДРА «КВАНТОВАЯ ЭЛЕКТРОНИКА И ТЕОРЕТИЧЕСКАЯ ФИЗИКА»

Предмет: *ЛАЗЕРНАЯ АКУСТО-ОПТИЧЕСКАЯ СПЕКТРОСКОПИЯ*
(спец. курс, бакалавриат, 4 курс)

Лабораторная работа

**ДИФРАКЦИИ ЛАЗЕРНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ НА УЛЬТРАЗВУКЕ В
ЖИДКОСТЯХ: КАЧЕСТВЕННОЕ И КОЛИЧЕСТВЕННОЕ ОПИСАНИЕ
ЯВЛЕНИЯ, МЕТОДИКА НАБЛЮДЕНИЯ И РАСЧЕТА АКУСТИЧЕСКИХ
ПАРАМЕТРОВ**

ТЕОРЕТИЧЕСКАЯ ЧАСТЬ

Качественное описание явления дифракции света на ультразвуковых волнах

Как известно, в пластинке кварца или турмалина можно возбудить механические колебания очень большой частоты (до 10^8 Гц). Такая колеблющаяся пластинка излучает упругие (ультраакустические) волны, которые со скоростью звука распространяются в окружающей среде. Поместив колеблющийся кварц в какую-нибудь жидкость, например в воду, мы получим ультраакустические волны в этой жидкости. Упругая волна в жидкости есть волна сжатия и разрежения, которая распространяется с определенной скоростью. Таким образом, жидкость, в которой распространяется ультраакустическая волна, представляет собой периодическую последовательность областей сжатия и разрежения, т.е. областей, характеризующихся также и различием в показателе преломления света. Поэтому для света жидкость, в которой распространяется ультраакустическая волна, представляет собой фазовую решетку, ибо при прохождении света через столб такой жидкости происходит изменение не амплитуды, а фазы световой волны.

Если заставить ультраакустическую волну отражаться от стенки сосуда, то наложение проходящей и отраженной волн поведет к образованию стоячей ультраакустической волны, которая также представляет собой периодическую структуру переменной плотности и, следовательно, переменного показателя преломления света. Как в случае проходящей, так и стоячей ультраакустической волны получающаяся фазовая решетка будет иметь период, равный длине ультраакустической волны, что легко видеть из рис. 1.

В воде скорость распространения ультраакустических волн равна примерно 1500 м/с, так что при частоте 10^8 Гц длина ультраакустической волны $\lambda = 15 \times 10^{-6}$ м = 15 мкм. Мы получаем, следовательно, фазовую решетку с периодом 15 мкм, вполне удобную для наблюдения дифракции световых волн².

Пропуская пучок белого света через сосуд с жидкостью, в которой возбуждена ультраакустическая волна (рис. 2), мы получим на экране спектр с дисперсией, соответствующей периоду дифракционной решетки, вычисленному по частоте колебаний кварца и скорости ультраакустической волны в жидкости (рис. 3).

Интересно отметить, что фазовая решетка, осуществляемая с помощью ультраакустических волн, отличается еще одной особенностью. Показатель преломления не только имеет пространственную периодичность, но и меняется периодически во времени с периодом ультраакустической волны, т.е. примерно 10^7 - 10^8 раз в секунду. Это приводит к тому, что интенсивность дифрагировавшего света испытывает периодическое изменение с той же частотой, т.е. модуляцию. Эффект модуляции приводит к тому, что если на ультраакустическую волну падает монохроматический свет частоты $\nu \approx 5 \times 10^{14}$ Гц, то дифрагировавший свет имеет измененную частоту, равную $\nu \pm N$, где N - частота примененной ультраакустической волны. Если $N \sim 10^8$ Гц, то это изменение частоты незначительно и составляет несколько десятимиллионных от первоначальной. Такое изменение наблюдалось на опыте. Этот эффект имеет чрезвычайно большое научное и практическое значение.

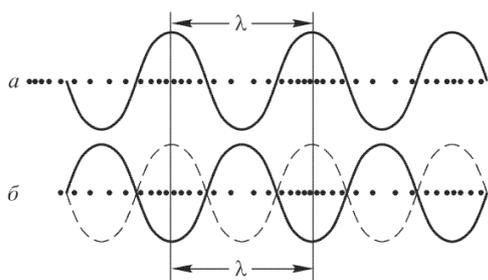


Рис. 1.

Распределение плотности в бегущей (а) и стоячей (б) ультраакустических волнах. Как в бегущей, так и в стоячей волне длины периодически повторяющихся областей сжатия и разрежения равны длине ультраакустической волны в среде.

² Для большинства жидкостей скорость ультраакустических волн, не отличающаяся от скорости обычных звуковых волн, составляет около 1000-1500 м/с. Для прозрачных твердых тел (стекло, кварц) скорости составляют 5000—6000 м/с. Поэтому во всех этих веществах можно удобно осуществлять опыты по дифракции на ультраакустических волнах с частотами колебаний до 10^7 Гц и выше. При работе со стоячими волнами важно, чтобы интенсивность отраженной волны была близка к интенсивности проходящей. Поэтому лучше работать с веществами, где ультраакустические волны слабо поглощаются. Из жидкостей такими слабопоглощающими являются ксилол и вода. Следует иметь в виду, что поглощение возрастает пропорционально квадрату частоты ультраакустической волны.

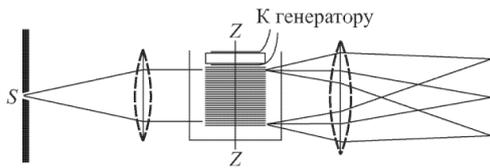


Рис. 2

Схема наблюдения дифракции на ультразвуковых волнах.

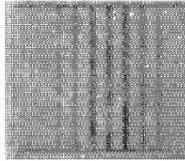


Рис. 3

Спектры, полученные при дифракции на ультразвуковой волне.

Изложенное рассмотрение применимо к стоячей ультразвуковой волне, где показатель преломления в каждой точке меняется со временем. Для бегущей ультразвуковой волны изменение частоты легче всего представить как результат отражения света от движущихся поверхностей, которыми являются поверхности фронта бегущей волны, т.е. как результат явления Доплера. В волне, бегущей в одну сторону, изменение частоты дифрагировавшего света будет соответствовать увеличению частоты ($\nu + N$), а в волне, бегущей навстречу, - уменьшению ($\nu - N$). Стоячая волна, как совокупность двух бегущих навстречу, обуславливает изменение частоты, выражаемое формулой $\nu \pm N$. Несложный расчет показывает, что как по методу стоячих волн (модуляция), так и по методу бегущих волн (явление Доплера) мы получаем, конечно, одно и то же значение (N) изменения частоты падающего света.

Изучение дифракции света на ультразвуковых волнах стало важным методом исследования законов распространения этих волн в веществе и служит для исследования вопросов молекулярной физики; для некоторых технических применений используется ультразвуковая дефектоскопия.

Количественное описание явления дифракции света на ультразвуковых волнах

Дифракция света на ультразвуке (акустооптическая дифракция) – это совокупность явлений, связанных с отклонением от законов прямолинейного распространения света в среде в присутствии звуковой волны. В результате периодического изменения показателя преломления света n под действием звуковой волны в среде возникает структура, аналогичная дифракционной решётке, которая обладает периодичностью звуковой волны и движется вместе с ней со скоростью звука. Если в такой структуре распространяется пучок монохроматического света, то в среде, помимо основного, возникают пучки отклонённого (дифрагированного) света, характеристики которых - направление в пространстве, поляризация и интенсивность - зависят от параметров звукового поля (частоты и интенсивности ультразвука, толщины звукового пучка D), а также от угла θ , под которым падает свет на звуковой пучок (рис.4).

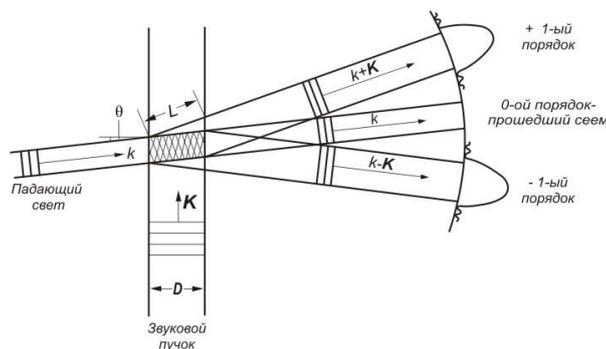


Рис. 4

Схема дифракции монохроматического излучения на ультразвуке.

В результате эффекта Доплера при рассеянии на движущейся решётке возникает сдвиг частоты дифрагированного света: для m -го порядка дифракции частота света

$$\omega_m = \omega_0 \pm m\Omega(1)$$

где ω_0 - частота падающего света, Ω - частота звука, ω_m - частота дифрагированного света. Частота света, отклонённого в сторону распространения звуковой волны, увеличивается [знак + в формуле (1)], а отклонённого в противоположную сторону [знак -], уменьшается. Непосредственное взаимодействие падающего света со звуком обуславливает только первый порядок дифракции, а высшие порядки

появляются лишь в результате последующей дифракции на звуке света, уже отклонённого в первый, во второй и т. д. порядки.

Интенсивность света в дифракционном максимуме определяется фазовыми сдвигами между волнами, приходящими в точку наблюдения из всех точек объёма взаимодействия (рис. 4).

В общем случае разность фаз

$$\Delta\varphi \sim \frac{D}{\lambda} \gg 1$$

где λ - длина волны света, поэтому электромагнитные волны, испускаемые различными частями области взаимодействия, интерферируя, взаимно гасят друг друга. При произвольном угле падения света θ эффективность η_m дифракция света на ультразвуке мала (здесь $\eta_m = I_m/I_{00}$, I_m - интенсивность света в m -м порядке дифракции, I_{00} - интенсивность падающего света). Однако при определённой геометрии взаимодействия, когда излучение, идущее из различных точек области взаимодействия в направлении на m -й дифракционный максимум, оказывается синфазным, значение η_m возрастает на много порядков - возникает явление т. н. резонансной дифракции. Это явление имеет место в первом дифракционном порядке, если выполняется условие:

$$|\Delta\varphi| = \left| k \pm K - \frac{\omega \pm \Omega}{c/n} \right| L \ll 1 \quad (2)$$

где k и K - волновой вектор света и звука соответственно, c - скорость света в вакууме, n - показатель преломления для световой волны, L - длина взаимодействия в направлении на 1-й дифракционный максимум (рис. 4).

Условие возникновения и характер резонансной дифракция света на ультразвуке зависят от соотношения между длинами волн света λ и звука L . Для низкочастотного звука, длина волны которого удовлетворяет условию $\lambda L / L^2 \ll 1$, резонансная дифракция имеет место при нормальном падении света на звуковой пучок. Это так называемая дифракция Рамана-Ната.

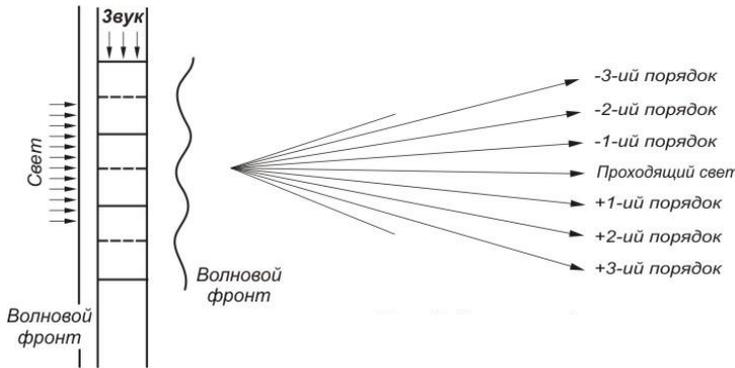


Рис. 5(а)

Схема дифракции Рамана - Ната.

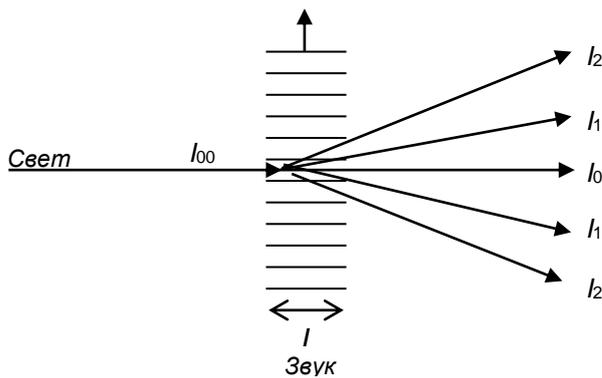


Рис. 5(б)

Упрощенная схема дифракции Рамана-Ната

В этом случае световая волна проходит сквозь звуковой пучок не отражаясь, а периодическое изменение n под действием ультразвука приводит к периодическому изменению фазы прошедшей световой волны. На выходе плоская волна оказывается фазомодулированной: её волновой фронт становится «гофрированным» (рис. 5). Такая волна эквивалентна значительному числу плоских волн, распространяющихся под малыми углами к проходящему световому пучку. Действительно, условие резонансной дифракции выполняется одновременно для большого числа порядков дифракции, и при достаточной длине взаимодействия L возникает многократное рассеяние фотона на фонах. Соответственно при выходе из области акустооптического взаимодействия световой луч разбивается на серию лучей с частотами $\omega_m = \omega_0 + m\Omega$, $m =$

$0, \pm 1, \dots$, идущих по различным направлениям, определяемым соотношением:

$$\sin \theta'_m = \frac{m\lambda}{\Lambda} \quad (3)$$

Резонансная дифракция света на высокочастотном звуке, длина волны которого удовлетворяет условию $\lambda L / \Lambda^2 > 1$, называется брэгговской дифракцией. Она возникает, если свет падает на звуковой пучок под определённым углом θ (рис. 6, а), т.н. углом Брэгга:

$$\theta_B = \arcsin\left(\frac{1}{2} \cdot \frac{\lambda}{\Lambda}\right) \quad (4)$$

В этом случае отклонение света происходит только в 1-й порядок дифракции. Объяснить дифракцию Брэгга можно тем, что падающая под углом к звуковой решётке световая волна частично отражается от неё (рис. 6, б) и интерференция отражённых лучей определяет интенсивность дифрагированного света: она максимальна, если разность оптического хода Δ световых волн, отражённых от соседних максимумов деформации среды, удовлетворяет условию: $\Delta = 2\Lambda \sin \theta = \lambda$ т. е. условию Брэгга.

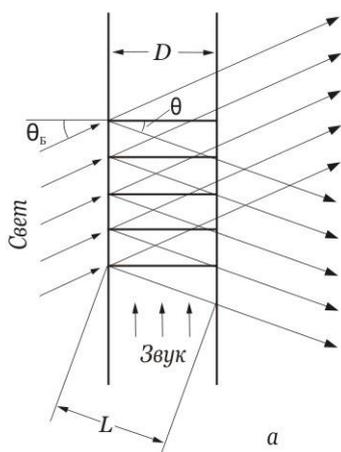


Рис.6.

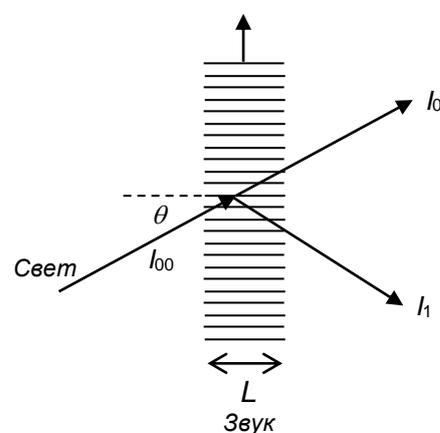
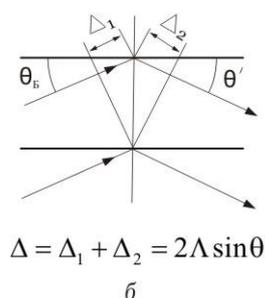


Рис.7.

а – схема дифракции Брэгга: 1 – проходящий свет, 2 – дифрагированный свет; б – схема отражения световых лучей от максимумов деформации в звуковой волне; D – разность фаз отраженных лучей.

Упрощенная схема дифракции Брэгга

Интерференционная картина, однако, возникает лишь в том случае, если пучки, отражённые от соседних максимумов звуковой волны, пересекаются, т. е. выполняется условие:

$$\Lambda / L \sin \theta_B = 2\Lambda^2 / L\lambda < 1.$$

В зависимости от того, какой угол тупой или острый образует волновой вектор света с направлением распространения звуковой волны, частота дифрагированного света равна $\omega + \Omega$ (+1-й порядок дифракции) либо $\omega - \Omega$ (-1-й порядок). Дифрагированный луч выходит из звукового пучка под углом рассеяния θ' ; в изотропной среде $\theta' = \theta_B$. Для данной длины световой волны λ существует предельная звуковая частота $\Omega_{i\theta} = 4\pi c_{\text{ср}} / \lambda$ выше которой брэгговская дифракция невозможна. Эта частота отвечает случаю рассеяния света точно в обратном направлении.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ЧАСТЬ

Наблюдение дифракции лазерного излучения на ультразвуке в жидкостях

Экспериментальная установка для наблюдения акусто-оптической дифракции

Для изучения явления дифракции света на ультразвуковых волнах в лаборатории кафедры «Квантовая электроника и теоретическая физика» физического факультета СамГУ была собрана стендовая акусто-

оптическая установка, блок-схема которой приведена на рис. 8.

Оптическая часть установки:

1. Источник монохроматического излучения (He-Ne лазер ЛГ-38) – длина волны излучения 632.8 нм, мощность 10 мВт.
2. Фокусирующая система, представляющая собой комбинацию короткофокусной и длиннофокусной линз, между которыми расположена диафрагма 0.1 мм (pin-hole система). Назначение фокусирующей системы – уменьшение диаметра светового пучка до 1.5 мм.

Регистрирующая часть установки:

1. Фотоэлектронный умножитель ФЭУ-79, который преобразует поступающие световые импульсы в электрические.
2. Блок питания ФЭУ с рабочим напряжением 1200 В.
3. Осциллограф С1-65, который предназначен для измерения амплитуды электрических импульсов, подающихся с ФЭУ.

Электрическая часть установки:

1. Задающий генератор Г5-15, который формирует электрические импульсы длительностью 2 мкс, частотой следования 400 Гц и амплитудой 100 В.
2. Усилитель, предназначенный для усиления импульсов с задающего генератора до 600 В.
3. Генератор звуковой частоты Г3-41, модифицированный для работы как в непрерывном режиме генерации, так и в импульсном режиме. В импульсном режиме работы генератор Г3-41 включается только на время действия импульса с задающего генератора Г5-15. Частота генератора Г3-41 плавно регулируется в диапазоне 0.15-30 МГц. Амплитуда электрических импульсов генератора Г3-41 плавно регулируется в диапазоне 0-50 В.
4. Осциллограф С1-74, предназначенный для измерения амплитуды электрического сигнала с генератора Г3-41 в импульсном режиме работы.
5. Частотомер ЧЗ-34А предназначен для точного измерения частоты электрических импульсов, поступающих с генератора Г3-41.

Принцип работы акусто-оптической установки заключается в следующем. Прямоугольные импульсы с задающего генератора Г5-15 длительностью 2 мкс и амплитудой 100 В усиливаются до напряжения 600 В и подаются на анод генераторной лампы генератора Г3-41 (частота следования импульсов 400 Гц), который работает в режиме генерации только во время действия задающего импульса. Генератор Г3-41 модифицирован таким образом, что может работать и в непрерывном режиме, который используется в процессе настройки и юстировки экспериментальной установки. Электрические сигналы с генератора Г3-41 поступают на пьезопластинку, которая преобразует электрические сигналы в упругие волны, направляющиеся в исследуемый образец. Частота генерации контролируется частотомером ЧЗ-34А.

Кювета с исследуемым образцом и наклеенным на нее пьезоизлучателем установлена на специальном столике гониометра Г-5. На подвижном плече гониометра установлен фотоэлектронный умножитель (ФЭУ-79), который служит приемником выходящего из кюветы излучения. Световые импульсы выходящего из кюветы излучения преобразуются в ФЭУ в электрические и поступают на вход осциллографа С1-65, развертка которого синхронизируется импульсами задающего генератора Г5-15.

При прохождении лазерного излучения через образец, в котором распространяется ультразвуковая волна, на выходе из кюветы помимо основного возникают пучки отклоненного (дифрагированного) света, обусловленные эффектом дифракции света на ультразвуке. Характеристики дифрагированного излучения – направление в пространстве, поляризация и интенсивность – зависят от параметров звукового поля (частоты и интенсивности ультразвука, толщины звукового пучка), а также от угла, под которым свет падает на звуковой пучок. При нормальном (перпендикулярном) падении света на звуковой пучок (режим Рамана-Ната) при выходе из области акустооптического взаимодействия световой луч разбивается на серию лучей, идущих по различным направлениям, определяемым соотношением:

$$\sin \theta_m = \frac{m\lambda f}{\nu},$$

где θ_m - угол дифракции (в m -ом дифракционном порядке), λ - длина волны падающего излучения, f - частота звука, ν - скорость распространения звука.

Измеряя при помощи гониометра угол дифракции θ_m , а при помощи частотомера – частоту ультразвука, можно рассчитать скорость ультразвука по приведенной выше формуле.

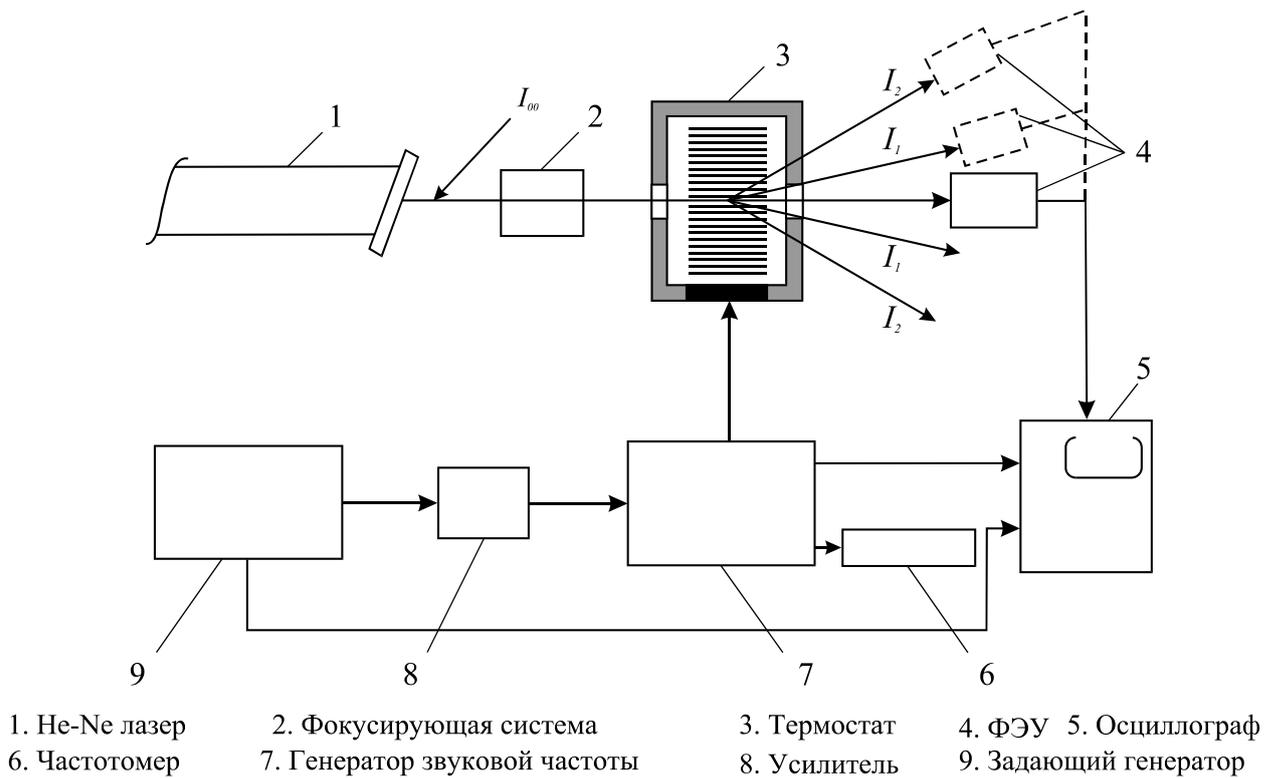


Рис.8. Блок-схема установки для изучения акусто-оптической дифракции лазерного излучения на ультразвуке в жидкостях.

Измерение угла акусто-оптической дифракции и расчет скорости ультразвука

Углом акусто-оптической дифракции θ называется угол, между проходящим и дифрагированным лучами. Рассмотрим в качестве примера дифракцию, возникающую при малой частоте ультразвука и при нормальном (перпендикулярном) падении светового луча на звуковой пучок (дифракция Рамана-Ната). На рис.9 показано пространственное распределение дифрагированного излучения в этом случае.

Как видно из рисунка, при дифракции Рамана-Ната помимо проходящего пучка света (I_0) на выходе из области взаимодействия света со звуком появляются пучки дифрагированного света ($I_{\pm 1}, I_{\pm 2}, \dots$), симметрично расположенных относительно I_0 . Ввиду симметрии картины угол θ между I_0 и I_{+1} в точности равен углу между I_0 и I_{-1} . Этот угол и называется углом акусто-оптической дифракции. Соответственно угол между I_0 и I_{+2} в точности равен углу между I_0 и I_{-2} и равен 2θ . Таким образом, угол дифракции θ можно измерить, используя любой дифракционный порядок по формуле:

$$\theta = \frac{\varphi}{n}$$

где n – порядок дифракции ($n = 1, 2, 3, \dots$), а φ - угол между проходящим пучком света I_0 и пучком света, дифрагировавшим в n -й порядок (I_{+n} или I_{-n}).

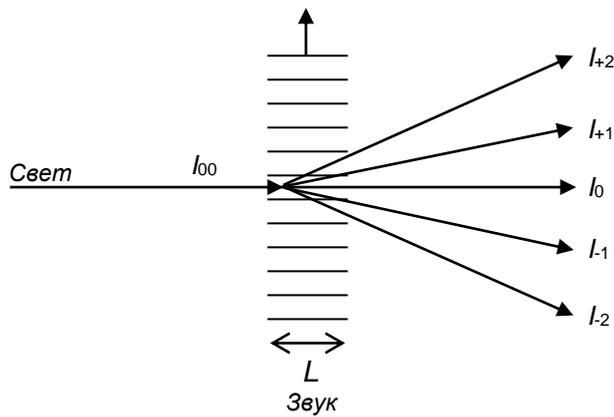


Рис. 9

Дифракции Рамана-Ната. Пространственное распределение дифрагированного излучения

На практике, обычно, применяют более удобную схему измерения угла дифракции. Сначала подвижное плечо гониометра с укрепленным на нем фотоэлектронным умножителем (ФЭУ) поворачивают так, чтобы пучок дифрагированного в +1-й порядок света (пучок I_{+1} на рис.9) попадал точно в щель ФЭУ. Точное положение ФЭУ устанавливают (при помощи микрометрического винта, поворачивающего подвижное плечо гониометра) таким образом, чтобы на экране осциллографа амплитуда сигнала была максимальной. Такое положение ФЭУ соответствует некоторому значению угла φ_1 по шкале гониометра. После этого плечо гониометра поворачивают таким образом, чтобы в щель ФЭУ попадал пучок свет, дифрагированного в -1-й порядок (пучок I_{-1} на рис.9). Такое положение ФЭУ соответствует некоторому значению угла φ_2 по шкале гониометра.

Как видно из рис.9, $|\varphi_1 - \varphi_2| = 2\theta$.

Таким образом, если $\varphi_n^{(+)}$ – угол, отсчитываемый по шкале гониометра и соответствующий пучку света в +n-м порядке (I_{+n} на рис.9), а $\varphi_n^{(-)}$ – угол, отсчитываемый по шкале гониометра и соответствующий пучку в -n-м порядке света (I_{-n} на рис.9), тогда угол дифракции θ может быть рассчитан по формуле:

$$\theta = \frac{|\varphi_n^{(+)} - \varphi_n^{(-)}|}{2n} \quad (5)$$

После того, как по формуле (5) был рассчитан угол дифракции, скорость ультразвука может быть рассчитана по формуле:

$$v = \frac{\lambda f}{\sin \theta} \quad (6)$$

где λ – длина волны света (в вакууме), f – частота ультразвука.

Пример расчета скорости ультразвука

Предположим, что по методу, описанному выше, для некоторой жидкости при изучении акусто-оптической дифракции были получены значения углов по шкале гониометра:

$$\varphi^{(+)} = 20^{\circ} 49' 50'' \text{ и } \varphi^{(-)} = 19^{\circ} 50' 50''.$$

При этом измерялись углы для пучков света, соответствующих второму порядку дифракции, т.е. $n=2$. Измерения проводились с использованием оптического излучения He-Не лазера ($\lambda = 6328 \text{ \AA} = 6328 \times 10^{-10} \text{ м}$), для частоты ультразвука 9.8 МГц ($9.8 \times 10^6 \text{ Гц}$).

Рассчитаем угол дифракции. Для определения разности углов $\varphi^{(+)} - \varphi^{(-)}$ удобно превратить имеющиеся значения углов в угловые секунды. Тогда:

$$\varphi^{(+)} = 20^{\circ} 49' 50'' = 20 \times 3600'' + 49 \times 60'' + 50'' = 72000'' + 2940'' + 50'' = 74990''$$

$$\varphi^{(-)} = 19^{\circ} 50' 50'' = 19 \times 3600'' + 50 \times 60'' + 50'' = 68400'' + 3000'' + 50'' = 71450''$$

$$\varphi^{(+)} - \varphi^{(-)} = 74990'' - 71450'' = 3540''$$

По формуле (5) угол дифракции θ будет равен:

$$\theta = \frac{3540''}{2 \times 2} = 885'' \text{ (т.е. } 0^{\circ} 14' 45'')$$

Полученный угол дифракции необходимо перевести из градусов в радианы по формуле:

$$\theta^{(\text{рад})} = \frac{\theta^{(\text{град})} \times \pi}{180} = \frac{\theta^{(\text{град})} \times 3.14}{180 \times 3600''} = \frac{\theta'' \times 3.14}{648000''}$$

Для измеренного выше угла дифракции перевод в радианы дает:

$$\theta = \frac{885 \cdot 3.14}{648000} \approx 0.00429$$

Так как угол дифракции очень мал (меньше 1°), можно использовать известное утверждение, что для малых углов $\sin \theta \approx \theta$ (где θ – радианная мера угла). Тогда для нашего угла дифракции $\sin \theta = \sin(0.00429) \approx 0.00429$.

Подставляя в формулу (6) значения длины волны лазерного излучения, частоты ультразвука и $\sin \theta$, определим скорость ультразвука:

$$v = \frac{6328 \times 10^{-10} \times 9.8 \times 10^6}{0.00429} \approx 1446 \text{ (м/с)}$$

Таким образом, в исследованной жидкости скорость ультразвука на частоте 9.8 МГц составляет 1446 м/с.

Измерение интенсивности дифрагированного излучения и расчет коэффициента поглощения ультразвука

Измерение коэффициента поглощения ультразвука при помощи явления дифракции света на ультразвуке основывается на том факте, что интенсивность света в дифрагированном пучке определяется интенсивностью звуковой волны в точке акусто-оптического взаимодействия. Интенсивность звуковой волны убывает по мере удаления от источника ультразвука за счет поглощения звуковой волны в среде. Поэтому, измерения интенсивности света в дифрагированном пучке в зависимости от расстояния от области акусто-оптического взаимодействия до источника ультразвука позволяют рассчитать коэффициент поглощения звуковой волны.

Таким образом, величину амплитудного коэффициента поглощения звука α можно определить, перемещая кювету с образцом в направлении, перпендикулярном направлению лазерного луча, и измеряя изменение интенсивности дифрагированного света. Методика измерения коэффициента поглощения ультразвука заключается в следующем.

1. Подвижное плечо гониометра с укрепленным на нем фотоэлектронным умножителем поворачивают так, чтобы пучок дифрагированного в +1-й порядок света (пучок I_{+1} на рис.9) попадал точно в щель ФЭУ. Точное положение ФЭУ устанавливают (при помощи микрометрического винта, поворачивающего подвижное плечо гониометра) таким образом, чтобы на экране осциллографа амплитуда электрического сигнала была максимальной.
2. Измеряют амплитуду электрического сигнала U_1 по шкале осциллографа.
3. При помощи микрометрического винта перемещают столик гониометра с закрепленной на нем кюветой на некоторое расстояние x (отсчитываемому по шкале микрометрического винта) в направлении, перпендикулярном падающему на кювету лазерному лучу. Таким образом изменяется расстояние от источника ультразвука до области акусто-оптического взаимодействия.
4. Измеряют амплитуду электрического сигнала U_2 по шкале осциллографа. Ввиду того, что при перемещении кюветы относительно лазерного луча увеличивается расстояние от области акусто-оптического взаимодействия до источника ультразвука, амплитуда электрического сигнала на экране осциллографа U_2 становится меньше, чем U_1 .
5. Рассчитывают коэффициент поглощения ультразвука по формуле:

$$\alpha = \frac{\ln U_1 / U_2}{2x}$$

Для измерения коэффициента поглощения ультразвука может быть использован любой дифрагированный пучок света.

Пример расчета коэффициента поглощения ультразвука

Предположим, что по методу, описанному выше, для некоторой жидкости были проведены измерения интенсивностей дифрагированного излучения для частоты ультразвука 2 МГц и получены следующие значения амплитуд электрических сигналов на осциллографе.

$U_1 = 4.80 \text{ В}$, $x = 1 \text{ мм}$, $U_2 = 4.54 \text{ В}$
 $x = 2 \text{ мм}$, $U_2 = 4.29 \text{ В}$

$x=3\text{мм}, U_2=4.06\text{ В}$

Рассчитаем значения коэффициента поглощения ультразвука для этих значений. При расчете величину x будем выражать в сантиметрах, т.к. традиционная единица измерения коэффициента поглощения звука - $[\text{см}^{-1}]$.

$$\alpha_1 = \frac{\ln 4.80 / 4.54}{2 \times 0.1} \approx \frac{\ln 1.0573}{0.2} \approx 0.28 \text{ (см}^{-1}\text{)}$$

$$\alpha_2 = \frac{\ln 4.80 / 4.29}{2 \times 0.2} \approx \frac{\ln 1.1189}{0.4} \approx 0.28 \text{ (см}^{-1}\text{)}$$

$$\alpha_3 = \frac{\ln 4.80 / 4.06}{2 \times 0.3} \approx \frac{\ln 1.1823}{0.6} \approx 0.28 \text{ (см}^{-1}\text{)}$$

Среднее значение коэффициента поглощения ультразвука $\alpha_{\text{ср}} = (\alpha_1 + \alpha_2 + \alpha_3) / 3 = 0.28 \text{ (см}^{-1}\text{)}$

Таким образом, в исследованной жидкости коэффициент поглощения ультразвука на частоте 2 МГц составляет 0.28 см^{-1} .

При анализе распространения звука в жидкостях обычно используют не саму величину коэффициента поглощения ультразвука, а величину α/f^2 (т.е. коэффициент поглощения, отнесенный к квадрату частоты). Нетрудно показать, что в нашем случае:

$$\frac{\alpha}{f^2} = \frac{0.28}{(2 \times 10^6)^2} = 7 \times 10^{-14} \text{ (см}^{-1} \times \text{с}^2\text{)}$$

ЗАДАНИЯ ПО ВЫПОЛНЕНИЮ ЛАБОРАТОРНОЙ РАБОТЫ

1. Изучение зависимости скорости ультразвука от частоты

Задание: Используя результаты измерений угла акусто-оптической дифракции, приведенные в Таблице 1(а), рассчитать значения скорости ультразвука для различных частот ультразвука. Заполнить Таблицу 1(б) и построить график зависимость скорости ультразвука $V_{\text{от}}$ частоты f .

Таблица 1(а). Результаты измерений угла акусто-оптической дифракции при различных частотах ультразвука

$t, \text{ }^\circ\text{C}$	$f, \text{ МГц}$	$n=1$		$n=2$		$n=3$	
		ϕ_{+1}	ϕ_{-1}	ϕ_{+2}	ϕ_{-2}	ϕ_{+3}	ϕ_{-3}
10	4	$20^\circ 26' 21''$	$20^\circ 14' 19''$	$20^\circ 32' 22''$	$20^\circ 08' 18''$	$20^\circ 38' 20''$	$20^\circ 02' 20''$
	9.8	$20^\circ 35' 04''$	$20^\circ 05' 36''$	$20^\circ 49' 50''$	$19^\circ 50' 50''$	$21^\circ 04' 26''$	$19^\circ 36' 14''$
	12	$20^\circ 38' 23''$	$20^\circ 02' 17''$	$20^\circ 56' 27''$	$19^\circ 44' 13''$	$21^\circ 14' 20''$	$19^\circ 26' 20''$
	25	$20^\circ 57' 57''$	$19^\circ 42' 43''$	$20^\circ 35' 35''$	$19^\circ 05' 05''$	$21^\circ 12' 51''$	$18^\circ 27' 49''$

Таблица 1(б). (заполнить таблицу)

$t, \text{ }^\circ\text{C}$	$f, \text{ МГц}$	$n=1$	$n=2$	$n=3$	$V_{\text{ср}}, \text{ м/с}$
		$V, \text{ м/с}$	$V, \text{ м/с}$	$V, \text{ м/с}$	
10	4				
	9.8				

	12				
	25				

2. Изучение зависимости скорости ультразвука от температуры

Задание: Используя результаты измерений угла акусто-оптической дифракции, приведенные в Таблице 2(а), рассчитать значения скорости ультразвука для различных температур исследуемой жидкости. Заполнить Таблицу 2(б) и построить график зависимость скорости ультразвука $V_{от}$ температуры t .

Таблица 2(а). Результаты измерений угла акусто-оптической дифракции при различных температурах среды

f , МГц	t , °C	$n=1$		$n=2$		$n=3$	
		ϕ_{+1}	ϕ_{-1}	ϕ_{+2}	ϕ_{-2}	ϕ_{+3}	ϕ_{-3}
4	30	20° 26' 06"	20° 14' 34"	20° 31' 54"	20° 08' 46"	20° 37' 36"	20° 03' 04"
	50	20° 25' 59"	20° 14' 41"	20° 31' 37"	20° 09' 03"	20° 37' 16"	20° 03' 24"
	70	20° 25' 55"	20° 14' 45"	20° 31' 30"	20° 09' 10"	20° 37' 11"	20° 03' 29"
	90	20° 25' 57"	20° 14' 43"	20° 31' 34"	20° 09' 06"	20° 37' 14"	20° 03' 26"

Таблица 2(б). (заполнить таблицу)

f , МГц	t , °C	$n=1$	$N=2$	$n=3$	$V_{ср}$, м/с
		V , м/с	V , м/с	V , м/с	
4	30				
	50				
	70				
	90				

3. Изучение зависимости коэффициента поглощения ультразвука от частоты

Задание: Используя результаты измерений интенсивности дифрагированного излучения, приведенные в Таблице 3(а), рассчитать значения коэффициента поглощения ультразвука для различных частот ультразвука. Заполнить Таблицу 3(б) и построить график зависимость коэффициента поглощения ультразвука $\alpha_{от}$ частоты f .

Таблица 3(а). Результаты измерений амплитуды сигнала акусто-оптической дифракции в зависимости от изменения расстояния до источника ультразвука при различных частотах ультразвука

t , °C	f , МГц	$x=1\text{мм}$		$x=2\text{мм}$		$x=3\text{мм}$	
		U_1	U_2	U_1	U_2	U_1	U_2
100	2	4.80 В	4.54 В	4.80 В	4.29 В	4.80 В	4.06 В
	3	4.60 В	4.21 В	4.60 В	3.86 В	4.60 В	3.53 В
	5	4.60 В	3.54 В	4.60 В	2.72 В	4.60 В	2.10 В
	9	4.40 В	3.33 В	4.40 В	2.51 В	4.40 В	1.90 В
	16	4.20 В	1.46 В	4.20 В	0.50 В	4.20 В	0.18 В
	22	4.00 В	0.95 В	4.00 В	0.23 В	4.00 В	0.05 В

Таблица 3(б). (заполнить таблицу)

t , °C	f , МГц	$x=1\text{мм}$	$x=2\text{мм}$	$x=3\text{мм}$	$\alpha_{ср}$, см ⁻¹
		α , см ⁻¹	α , см ⁻¹	α , см ⁻¹	
100	2				
	3				
	5				
	9				
	16				
	22				

4. Изучение зависимости коэффициента поглощения ультразвука от температуры

Задание: Используя результаты измерений интенсивности дифрагированного излучения, приведенные в Таблице 4(а), рассчитать значения коэффициента поглощения ультразвука для различных температур исследуемой жидкости. Заполнить Таблицу 4(б) и построить график зависимость коэффициента поглощения ультразвука $\alpha_{от}$ температуры t .

Таблица 4(а). Результаты измерений амплитуды сигнала акусто-оптической дифракции в зависимости от изменения расстояния до источника ультразвука при различных температурах среды

f , МГц	t , °C	$x=1\text{мм}$		$x=2\text{мм}$		$x=3\text{мм}$	
		U_1	U_2	U_1	U_1	U_2	U_1
2	100	4.80 В	4.54 В	4.80 В	4.29 В	4.80 В	4.06
	95	4.80 В	4.39 В	4.80 В	4.01 В	4.80 В	3.66
	90	4.80 В	4.34 В	4.80 В	3.93 В	4.80 В	3.56
	85	4.80 В	3.89 В	4.80 В	3.15 В	4.80 В	2.56
	84	4.80 В	3.63 В	4.80 В	2.74 В	4.80 В	2.07

Таблица 4(б). (заполнить таблицу)

f , МГц	t , °C	$\Delta x=1\text{мм}$	$\Delta x=2\text{мм}$	$\Delta x=3\text{мм}$	$\alpha_{\text{ср}}$, см^{-1}
		α , см^{-1}	α , см^{-1}	α , см^{-1}	
2	100				
	95				
	90				
	85				
	84				

Контрольные вопросы

1. Причины возникновения акусто-оптической дифракции в изотропных средах.
2. Резонансная дифракция на низких частотах ультразвука (режим Рамана-Ната).
3. Резонансная дифракция на высоких частотах ультразвука (режим Брэгга).
4. Какими параметрами световых пучков позволяют управлять акустооптические устройства?
5. Какими параметрами среды и акустического поля регулируется распределение энергии между основным лучом и дифрагированным?
6. Какими параметрами определяется эффективность дифракции света на ультразвуке?
7. Чем ограничивается применение акустооптических эффектов в жидкостях?

Рекомендуемая литература

11. Ультразвук. "Маленькая энциклопедия", М., 1979.
12. Физическая акустика, (под редакцией. У Мэзона), том VI, М.: Мир, 1993.
13. Волькенштейн М.В., Молекулярная оптика, М., 1951.
14. Ноздрев В.Ф., Молекулярная акустика, Изд. "Высшая школа", М., 1974.

МИНИСТЕРСТВО ВЫСШЕГО И СРЕДНЕГО СПЕЦИАЛЬНОГО ОБРАЗОВАНИЯ РЕСПУБЛИКИ
УЗБЕКИСТАН

САМАРКАНДСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ

ФИЗИЧЕСКИЙ ФАКУЛЬТЕТ

КАФЕДРА «КВАНТОВАЯ ЭЛЕКТРОНИКА И ТЕОРЕТИЧЕСКАЯ ФИЗИКА»

Предмет: *ЛАЗЕРНАЯ АКУСТО-ОПТИЧЕСКАЯ СПЕКТРОСКОПИЯ*
(спец. курс, бакалавриат, 4 курс)

Лабораторная работа

**ЧАСТОТНАЯ ЗАВИСИМОСТЬ КОЭФФИЦИЕНТА ПОГЛОЩЕНИЯ
ЗВУКОВЫХ ВОЛН В ЖИДКОСТЯХ И ЕЕ АНАЛИЗ В РАМКАХ
РЕЛАКСАЦИОННОЙ ТЕОРИИ РАСПРОСТРАНЕНИЯ ЗВУКА**

ТЕОРЕТИЧЕСКАЯ ЧАСТЬ

Гидродинамическая теория распространения звука в жидкостях

Остановимся сначала на определении скорости звука в газах. Формула для адиабатической скорости звука (лапласова скорость)

$$V = \sqrt{\gamma \frac{P}{\rho}}$$

($\gamma = C_p/C_v$ – отношение теплоемкостей при постоянном давлении и объеме, P и ρ – равновесные значения давления и плотности) хорошо оправдывающаяся на опыте, получена в предположении адиабатичности процесса распространения. При этом считается, что между участками сжатия и разрежения в волне температура не успевает выравняться. В первом приближении значение V не зависит ни от частоты звука, ни от его амплитуды, хотя при определенных условиях такие зависимости имеются.

Теоретическое нахождение V даже для одноатомного газа представляет собой сложную задачу, которая решается лишь приближенно. При нахождении V для двухатомного газа на основе газокинетического рассмотрения следует пользоваться модельным представлением. При решении задач по теоретическому вычислению V нужно, кроме учета теплового движения, сделать определенные предположения о характере столкновений молекул, учесть распределение скоростей в тепловом движении, нецентральный удары, вращение молекул при соударениях и т. д. Такого рода задачи относятся к молекулярной и статистической физике; по этим вопросам имеется обширная литература.

Жидкости занимают промежуточное положение между твердыми телами и газами, обладая, в отличие от твердых тел, лишь ближним порядком. Теория жидкого состояния не разработана в такой степени, как для газов и твердых тел (кристаллов). По этой причине теоретические расчеты скорости звука в жидкостях, основанные на молекулярных представлениях, оказываются в еще меньшей степени обоснованными, чем для реальных газов. Имеются только эмпирические и полуэмпирические выражения для V в жидкостях, дающие связь между V и такими макроскопическими параметрами, как плотность ρ и температура T .

Поскольку скорость звука V определяется структурой среды и взаимодействием между молекулами, измерение V дает существенные сведения о равновесной структуре газов или жидкостей. Измерения V представляют собой важный метод определения термодинамических величин – адиабатической $\beta_S = 1/\rho V^2$ и изотермической $\beta_T = \gamma \beta_S$ сжимаемостей (в последнем случае при дополнительном измерении теплоемкости при постоянном объеме C_v).

По мере распространения звуковой волны амплитуда ее уменьшается. Это связано с рядом причин: с убылью плотности энергии волны вследствие увеличения поверхности, занимаемой фронтом волны (сферические, цилиндрические и вообще расходящиеся волны), поглощением энергии волны вследствие диссипативных процессов, вызываемых вязкостью и теплопроводностью среды, рассеянием на неоднородностях. Для плоской бегущей волны убыль ее амплитуды из-за процессов диссипации характеризуется коэффициентом поглощения α , который показывает, на каком расстоянии амплитуда волны (например, звуковое давление p') убывает в e раз, т. е.

$$p' = p'_0 \cdot e^{-\alpha x}$$

Относительная убыль амплитуды на единицу расстояния будет

$$\alpha = p'^{-1} \cdot \frac{dp'}{dx}$$

(амплитудный пространственный коэффициент поглощения).

С учетом вязкости и теплопроводности среды, в которой распространяется звуковая волна, гидродинамическая теория дает следующее выражение для коэффициента поглощения звука:

$$\alpha = \frac{\omega^2}{2V_0^3 \rho} \left[\frac{4}{3} \eta + \eta' + \chi \left(\frac{1}{C_V} - \frac{1}{C_P} \right) \right] \quad (1)$$

где η и η' – коэффициенты сдвиговой и объемной вязкости, χ – коэффициент теплопроводности, ω – циклическая частота звука, V_0 – скорость звука для бесконечно малой частоты ($\omega \rightarrow 0$).

Подчеркнем, что коэффициент поглощения пропорционален квадрату частоты звука и диссипативным коэффициентам η , η' и χ . Впервые эта формула была получена Стоксом без учета теплопроводности χ , влияние которой затем учел Кирхгоф. Хотя Стокс и понимал роль и значение объемной вязкости η' , тем не менее включение ее в (1) впервые было сделано, по-видимому, только Рэлеем. Поэтому обычно формулой Стокса-Кирхгофа называют формулу для α (т.н. классическое или Стоксово поглощение) без учета η' :

$$\alpha_{\text{ст}} = \frac{\omega^2}{2V_0^3 \rho} \left[\frac{4}{3} \eta + \chi \left(\frac{1}{C_V} - \frac{1}{C_P} \right) \right]$$

света и релаксационная теория распространения звука

Звук с частотой $\sim 10^9$ Гц и выше относится к гиперзвуковому диапазону частот. Возбуждение гиперзвука в среде сопряжено с трудностями экспериментального характера, связанными с тем, что звук такой высокой частоты сильно поглощается средой. В то же время метод молекулярного рассеяния света позволяет изучать скорость распространения и амплитудный коэффициент поглощения гиперзвука по спектрам тонкой структуры рэлеевского рассеяния света.

Существование тонкой структуры линии Рэля обусловлено наличием в жидкости адиабатических флуктуаций давления, распространяющихся в среде в виде тепловых упругих (дебаевских) волн. Эффект модуляции рассеянного света этими волнами (предсказанный, независимо друг от друга, Мандельштамом и Бриллюэном) приводит к изменению частоты рассеянного света $\Delta\nu$, которое может быть записано в виде:

$$\Delta\nu = 2n\nu_0 \frac{V}{c} \sin \frac{\theta}{2}$$

где ν_0 – частота возбуждающего света, n – показатель преломления, V – скорость звука, c – скорость света в вакууме, θ – угол рассеяния.

Из этой формулы видно, что, изменяя угол рассеяния θ , можно исследовать характеристики распространения звука на частотах, которые еще недавно были недоступны ультразвуковому методу. Для жидкостей частота звука, модулирующая рассеянный свет, довольно велика, и при $\theta=90^\circ$ составляет порядка $5 \cdot 10^9$ Гц. Изменение угла рассеяния света от 0° до 180° позволяет изучать частоты гиперзвука от 1 ГГц до 7-8 ГГц.

Спектральная ширина компонент Мандельштама-Бриллюэна связана с амплитудным коэффициентом поглощения гиперзвука α следующим соотношением:

$$\delta\nu = \frac{\alpha V}{\pi c}$$

Таким образом, исследуя спектры тонкой структуры линии Рэля для различных углов рассеяния света, можно по измеренным значениям смещения Δ и ширины δ компонент Мандельштама-Бриллюэна определить значения скорости распространения и коэффициента поглощения звука в интервале частот от 1 ГГц до 7-8 ГГц.

Из предсказаний изложенной выше гидродинамической теории распространения упругих волн следует, что звук с частотой порядка 10^9 Гц должен сильно затухать в жидкости, и по этой причине тонкая структура линии Рэля в жидкостях не должна наблюдаться.

Факт существования тонкой структуры линии Рэля в жидкостях объясняет релаксационная теория Мандельштама-Леонтовича, которая позволила снять ряд трудностей, стоявшей перед классической теорией, а также предсказала явление зависимости скорости высокочастотного звука от частоты – дисперсию скорости звука.

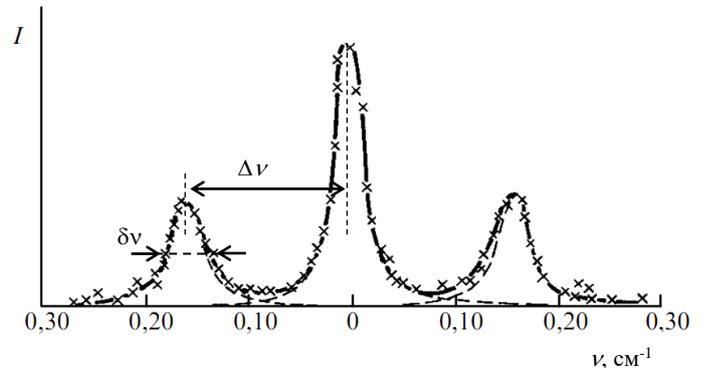
Обнаружить заметную дисперсию скорости звука в маловязких жидкостях на основании сопоставления измерений скорости гиперзвука по положению компонент Мандельштама-Бриллюэна и скорости ультразвука впервые удалось Фабелинскому и его сотрудникам. Обнаруженная ими дисперсия обусловлена релаксацией объемной вязкости.

Исследования Фабелинского и Песина в жидкостях с большой сдвиговой вязкостью привели к обнаружению тонкой структуры линии Рэля в весьма вязких средах и стеклах. В этих случаях была обнаружена дисперсия скорости звука $\sim 70\%$, обусловленная релаксацией сдвиговой вязкости.

Применение в качестве источника возбуждающего света газовых лазеров позволило повысить точность измерений скорости гиперзвука на порядок величины, приблизив их к точности измерений скорости ультразвука. Такое повышение точности измерений позволило расширить круг объектов, в которых обнаруживается дисперсия скорости звука, и уточнить ряд прежних определений дисперсии.

Релаксационная теория распространения звука Мандельштама и Леонтовича представляет собой общую феноменологическую теорию, не использующую какой-либо молекулярной модели релаксации объемной вязкости.

В теории предполагается, что состояние жидкости описывается не только плотностью ρ и температурой T , но и некоторым параметром ξ , характеризующим состояние жидкости. Величина ξ есть функция плотности и температуры и в состоянии равновесия $\xi = \xi_0$.



Спектр света, рассеянного в жидком бензоле

Разлагая скорость изменения ξ во времени в ряд по разности $\xi - \xi_0$, получаем

$$\dot{\xi} = \frac{1}{\tau} (\xi - \xi_0)$$

Величина имеет размерность времени и называется временем релаксации данного процесса. С увеличением τ замедляется процесс восстановления равновесия в системе.

Пусть жидкость подвергается периодическому адиабатическому сжатию и разряжению, причем все величины, характеризующие состояние жидкости, будут зависеть от времени пропорционально $e^{-i\omega t}$ (ω – циклическая частота звука). В этом случае $\xi_0 = \xi_{00} + \xi$, где ξ_{00} – постоянная составляющая ξ_0 , а ξ – переменная часть, пропорциональная $e^{-i\omega t}$. Аналогичным образом можно записать и ξ в виде $\xi = \xi_{00} + \xi$.

В результате вычислений получается, что наличие медленных процессов установления равновесия макроскопически эквивалентно наличию второй (объемной) вязкости η' :

$$\eta' = \frac{\tau \rho}{1 + i\omega\tau} (V_\infty^2 - V_0^2) \quad (2)$$

здесь V_∞ и V_0 – скорости звука для частот $\omega \rightarrow \infty$ и $\omega \rightarrow 0$, соответственно.

При медленных процессах, когда справедливо неравенство $\omega\tau \ll 1$,

$$\eta'_0 = \tau \rho (V_\infty^2 - V_0^2) \quad (3)$$

Подставив (3) в (2), получим выражение для частотной зависимости коэффициента объемной вязкости

$$\eta' = \frac{\eta'_0}{1 + i\omega\tau} \quad (4)$$

Как следует из гидродинамической теории, амплитудный коэффициент поглощения звука выражается формулой (с учетом того, что вклад в поглощение со стороны теплопроводности для обычных жидкостей пренебрежимо мал)

$$\alpha = \alpha_\eta + \alpha_{\eta'} = \frac{\omega^2}{2V_0^3 \rho} \left(\frac{4}{3} \eta + \eta' \right) \quad (5)$$

где η и η' – коэффициенты сдвиговой и объемной вязкости.

Используя выражения (3)-(5), получаем, взяв действительные части:

$$\alpha_{\eta'} = \frac{\omega^2 \tau (V_\infty^2 - V_0^2)}{2V_0^3 (1 + \omega^2 \tau^2)} \quad (6)$$

Как видно из (6), часть поглощения, обусловленная объемной вязкостью, релаксируя, стремится к определенному, постоянному значению. Таким образом, противоречие между выводами гидродинамической теории и экспериментальными результатами по тонкой структуре рэлеевской линии устраняется.

Кроме выражения (6) для поглощения звука Мандельштам и Леонтович получили также выражение для скорости распространения звука:

$$V^2 = V_0^2 + (V_\infty^2 - V_0^2) \frac{\omega^2 \tau^2}{1 + \omega^2 \tau^2} \quad (7)$$

Выражение (7) показывает, что с увеличением частоты звука его скорость должна расти и стремиться к V_∞ . Время релаксации объемной вязкости является одним произвольным параметром релаксационной теории. Определение его представляется очень существенным и может быть сделано двумя независимыми путями, поскольку входит в выражение для скорости звука (7) и в выражение для коэффициента поглощения звука (6).

В реальных жидкостях распространение звука может описываться целым набором времен релаксаций. Тогда значение τ , определенное по формулам (6) или (7), конечно, должно рассматриваться как среднее эффективное значение.

Мандельштам и Леонтович указали также путь для решения более общей задачи, когда состояние жидкости описывается не одним, а несколькими параметрами ξ . Однако, в настоящее время в большинстве случаев не удается разделить релаксационные процессы в жидкостях, приводящие к дисперсии скорости звука, и, следовательно, применить указанные путь решения более общей задачи.

Релаксационная теория распространения звука, развитая Мандельштамом и Леонтовичем, имеет большое значение благодаря тому, что она носит феноменологический характер, хотя и не дает конкретного представления о характере релаксационного процесса. Теория позволила правильно поставить эксперименты как в ультразвуковой, так и в гиперзвуковой области. Основываясь на выводах теории, была обнаружена дисперсия скорости звука в ряде жидкостей.

ПРАКТИЧЕСКАЯ ЧАСТЬ

Анализ частотной зависимости коэффициента поглощения звука

Пусть для некоторой жидкости мы имеем следующие результаты измерений коэффициента поглощения звука на разных частотах:

	$f, \text{Гц}$	$\alpha, \text{см}^{-1}$
	1.05×10^9	2380
Гиперзвук	4.56×10^9	22100
	6.60×10^9	29200

Проведем предварительный анализ представленных в таблице результатов. Как видно из таблицы, коэффициент поглощения гиперзвука заметно возрастает при увеличении его частоты. Подобная частотная зависимость коэффициента поглощения может быть объяснена (в рамках релаксационной теории) процессом релаксации объемной вязкости. Подставляя выражение (6) в (1) и пренебрегая вкладом со стороны теплопроводности, получим выражение для коэффициента поглощения звука в виде:

$$\frac{\alpha}{f^2} = \frac{8\pi^2}{3} \cdot \frac{\eta}{V_0^3 \rho} + \frac{2\pi^2 \tau}{V_0^3} \cdot \frac{V_\infty^2 - V_0^2}{1 + \omega^2 \tau^2} \quad (8)$$

Вводя обозначения

$$\frac{8\pi^2}{3} \cdot \frac{\eta}{V_0^3 \rho} = A \quad \text{и} \quad \frac{2\pi^2 \tau}{V_0^3} \cdot (V_\infty^2 - V_0^2) = B,$$

можно представить (8) в более удобном для анализа виде:

$$\frac{\alpha}{f^2} = A + \frac{B}{1 + \omega^2 \tau^2} \quad (9)$$

где A и B являются параметрами, независимыми от частоты звука.

Выражение для коэффициента поглощения звука, отнесенного к квадрату частоты, содержит в себе три неизвестных величины – A , B и τ . Однако, если провести измерения скорости для трех частот звука, можно составить систему, состоящую из трех уравнений типа (9) с тремя неизвестными:

$$\begin{cases} \frac{\alpha_1}{f_1^2} = A + \frac{B}{1 + (2\pi f_1 \tau)^2} \\ \frac{\alpha_2}{f_2^2} = A + \frac{B}{1 + (2\pi f_2 \tau)^2} \\ \frac{\alpha_3}{f_3^2} = A + \frac{B}{1 + (2\pi f_3 \tau)^2} \end{cases} \quad (10)$$

где α_1 , α_2 и α_3 – коэффициенты поглощения звука для частот f_1 , f_2 и f_3 , соответственно. Решая эту систему уравнений можно найти значения A , B и τ .

Стандартный метод решения систем уравнений позволяет определить неизвестные параметры в следующем виде:

$$\tau = \frac{1}{2\pi f_2} \cdot \sqrt{\frac{\left(\frac{f_2}{f_1}\right)^2 - 1}{\left(\frac{f_3}{f_1}\right)^2 - 1} \cdot \frac{\alpha_1 - \alpha_3 \cdot \left(\frac{f_1}{f_3}\right)^2}{\alpha_1 - \alpha_2 \cdot \left(\frac{f_1}{f_2}\right)^2} - 1} \quad (11)$$

$$B = \frac{1}{4\pi^2} \cdot \frac{\frac{\alpha_1}{f_1^2} - \frac{\alpha_2}{f_2^2}}{\tau^2} \cdot \frac{(1 + [2\pi f_2 \tau]^2)(1 + [2\pi f_1 \tau]^2)}{f_2^2 - f_1^2} \quad (12)$$

$$A = \frac{\alpha_1}{f_1^2} - \frac{B}{1 + (2\pi f_1 \tau)^2} \quad (13)$$

Воспользуемся результатами измерений коэффициента поглощения гиперзвука, представленными в таблице.

$$\begin{aligned} \alpha_1 &= 2380 \text{ см}^{-1}, \quad \alpha_1/f_1^2 = 2.15 \times 10^{-15} \text{ см}^{-1} \text{ с}^2, & 2\pi f_1 &= 6.6 \times 10^9 \text{ рад/с.} \\ \alpha_2 &= 22100 \text{ см}^{-1}, \quad \alpha_2/f_2^2 = 1.06 \times 10^{-15} \text{ см}^{-1} \text{ с}^2, & 2\pi f_2 &= 28.6 \times 10^9 \text{ рад/с.} \\ \alpha_3 &= 29200 \text{ см}^{-1}, \quad \alpha_3/f_3^2 = 0.67 \times 10^{-15} \text{ см}^{-1} \text{ с}^2, & 2\pi f_3 &= 41.5 \times 10^9 \text{ рад/с.} \end{aligned}$$

Подставив эти значения в формулу (11) получим: $\tau = 3.8 \times 10^{-11}$ с.

Далее, по формулам (12) и (13), следует: $B = 2.4 \times 10^{-18} \text{ см}^{-1} \text{ с}^2$ и $A = 2.3 \times 10^{-15} \text{ см}^{-1} \text{ с}^2$.

Таким образом, анализ экспериментальных результатов, приведенных в таблице, с точки зрения релаксационной теории распространения звука позволяет сделать следующие выводы:

1. В исследуемой жидкости в интервале звуковых частот от ~ 1 ГГц до ~ 7 ГГц имеет место заметная частотная зависимость коэффициента поглощения гиперзвука.
2. Наблюдаемая зависимость коэффициента поглощения от частоты гиперзвука обусловлена процессом релаксации объемной вязкости, характерное время которого 3.8×10^{-11} с.
3. Рассчитанные по формулам релаксационной теории значения скоростей A и B равны, соответственно, $2.3 \times 10^{-15} \text{ см}^{-1} \text{ с}^2$ и $2.4 \times 10^{-18} \text{ см}^{-1} \text{ с}^2$.

ЗАДАНИЯ ПО ВЫПОЛНЕНИЮ ЛАБОРАТОРНОЙ РАБОТЫ

Расчет и параметров релаксационного процесса по частотной зависимости коэффициента поглощения гиперзвука

Задание: Пользуясь экспериментальными данными по значениям коэффициента поглощения гиперзвука, приведенным в Таблице 1(а):

- 1) Рассчитать значения A , B и τ .
- 2) Заполнить Таблицу 1(б).
- 3) Построить графики зависимости A , B и τ от температуры.
- 4) Используя выражение (9) и рассчитанные значения A , B и τ , построить кривые зависимости α/f^2 от $\lg(f)$ для исследованных температур жидкости (из Таблицы 1(а)).

Таблица 1(а).

Результаты измерений коэффициента поглощения гиперзвука для различных частот и температур жидкости.

f , ГГц	$t=20$ °С	$t=40$ °С	$t=60$ °С	$t=80$ °С
	α , см ⁻¹			
6.2	28800	28300	30100	29200
4.8	20200	20150	20800	22100
1.1	3110	3580	2700	2380

Таблица 1(б).
(заполнить таблицу)

t , °С	A , см ⁻¹ с ⁻²	B , см ⁻¹ с ⁻²	τ , с
20			
40			
60			
80			

Контрольные вопросы

1. Частотный интервал, относящийся к ультра- и гиперзвуковым частотам.
2. Тонкая структура линии рэлеевского рассеяния света и причины ее возникновения.
3. Классическое поглощение звука.
4. Основные положения и выводы релаксационной теории Мандельштама-Леонтовича.
5. Методы измерения коэффициента поглощения звука в диапазоне ультра- и гиперзвуковых частот.

Рекомендуемая литература

15. Фабелинский И.Л., Молекулярное рассеяние света, М.:Наука.,1970.
16. Вукс М.Ф., Рассеяния света в газах, жидкостях и растворах, Изд. ЛГУ, 1977.
17. Ультразвук. "Маленькая энциклопедия", М., 1979.
18. Физическая акустика, (под редакцией. У Мэзона), том VI, М.: Мир, 1993.
19. Ноздрев В.Ф., Молекулярная акустика, Изд. "Высшая школа", М., 1974.

МИНИСТЕРСТВО ВЫСШЕГО И СРЕДНЕГО СПЕЦИАЛЬНОГО ОБРАЗОВАНИЯ РЕСПУБЛИКИ
УЗБЕКИСТАН

САМАРКАНДСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ

ФИЗИЧЕСКИЙ ФАКУЛЬТЕТ

КАФЕДРА «КВАНТОВАЯ ЭЛЕКТРОНИКА И ТЕОРЕТИЧЕСКАЯ ФИЗИКА»

Предмет: *ЛАЗЕРНАЯ АКУСТО-ОПТИЧЕСКАЯ СПЕКТРОСКОПИЯ*

(спец. курс, бакалавриат, 4 курс)

Лабораторная работа

**ДИСПЕРСИЯ СКОРОСТИ ВЫСОКОЧАСТОТНЫХ ЗВУКОВЫХ ВОЛН В
ЖИДКОСТЯХ И ЕЕ АНАЛИЗ В РАМКАХ РЕЛАКСАЦИОННОЙ ТЕОРИИ
РАСПРОСТРАНЕНИЯ ЗВУКА**

ТЕОРЕТИЧЕСКАЯ ЧАСТЬ

Тонкая структура рэлеевского рассеяния света и релаксационная теория распространения звука в жидкостях

Звук с частотой $\sim 10^9$ Гц и выше относится к гиперзвуковому диапазону частот. Возбуждение гиперзвука в среде сопряжено с трудностями экспериментального характера, связанными с тем, что звук такой высокой частоты сильно поглощается средой. В то же время метод молекулярного рассеяния света позволяет изучать скорость распространения гиперзвука по спектрам тонкой структуры рэлеевского рассеяния света (см. рисунок).

Существование тонкой структуры линии Рэля обусловлено наличием в жидкости адиабатических флуктуаций давления, распространяющихся в среде в виде тепловых упругих (дебаевских) волн. Эффект модуляции рассеянного света этими волнами (предсказанный, независимо друг от друга, Мандельштамом и Бриллюэном) приводит к изменению частоты рассеянного света $\Delta\nu$, которое может быть записано в виде:

$$\Delta\nu = 2n\nu_0 \frac{V}{c} \sin \frac{\theta}{2}$$

где ν_0 – частота возбуждающего света, n – показатель преломления, V – скорость звука, c – скорость света в вакууме, θ – угол рассеяния.

Из этой формулы видно, что, изменяя угол рассеяния θ , можно исследовать характеристики распространения звука на частотах, которые еще недавно были недоступны ультразвуковому методу. Для жидкостей частота звука, модулирующая рассеянный свет, довольно велика, и при $\theta=90^\circ$ составляет порядка $5 \cdot 10^9$ Гц. Изменение угла рассеяния света от 0° до 180° позволяет изучать частоты гиперзвука от 1 ГГц до 7-8 ГГц.

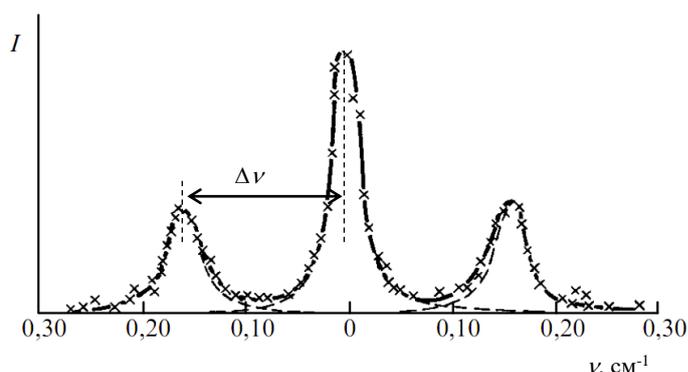
Из предсказаний гидродинамической теории распространения упругих волн следует, что звук с частотой порядка 10^9 Гц должен сильно затухать в жидкости, и по этой причине тонкая структура линии Рэля в жидкостях не должна наблюдаться.

Факт существования тонкой структуры линии Рэля в жидкостях объясняет релаксационная теория Мандельштама-Леонтовича, которая позволила снять ряд трудностей, стоявшей перед классической теорией, а также предсказала явление зависимости скорости высокочастотного звука от частоты – дисперсию скорости звука.

Обнаружить заметную дисперсию скорости звука в маловязких жидкостях на основании сопоставления измерений скорости гиперзвука по положению компонент Мандельштама-Бриллюэна и скорости ультразвука впервые удалось Фабелинскому и его сотрудникам. Обнаруженная ими дисперсия обусловлена релаксацией объемной вязкости.

Исследования Фабелинского и Песина в жидкостях с большой сдвиговой вязкостью привели к обнаружению тонкой структуры линии Рэля в весьма вязких средах и стеклах. В этих случаях была обнаружена дисперсия скорости звука $\sim 70\%$, обусловленная релаксацией сдвиговой вязкости.

Применение в качестве источника возбуждающего света газовых лазеров позволило повысить точность измерений скорости гиперзвука на порядок величины, приблизив их к точности измерений скорости ультразвука. Такое повышение точности измерений позволило расширить круг объектов, в которых обнаруживается дисперсия скорости звука, и уточнить ряд прежних определений дисперсии.



Спектр света, рассеянного в жидком бензоле

Релаксационная теория распространения звука Мандельштама и Леонтовича представляет собой общую феноменологическую теорию, не использующую какой-либо молекулярной модели релаксации объемной вязкости.

В теории предполагается, что состояние жидкости описывается не только плотностью ρ и температурой T , но и некоторым параметром ξ , характеризующим состояние жидкости. Величина ξ есть функция плотности и температуры и в состоянии равновесия $\xi = \xi_0$.

Разлагая скорость изменения ξ во времени в ряд по разности $\xi - \xi_0$, получаем

$$\dot{\xi} = \frac{1}{\tau} (\xi - \xi_0) \quad (1)$$

Величина имеет размерность времени и называется временем релаксации данного процесса. С увеличением τ замедляется процесс восстановления равновесия в системе.

Пусть жидкость подвергается периодическому адиабатическому сжатию и разряжению, причем все величины, характеризующие состояние жидкости, будут зависеть от времени пропорционально $e^{-i\omega t}$ (ω – циклическая частота звука). В этом случае $\xi_0 = \xi_{00} + \xi'$, где ξ_{00} – постоянная составляющая ξ_0 , а ξ' – переменная часть, пропорциональная $e^{-i\omega t}$. Аналогичным образом можно записать и ξ в виде $\xi = \xi_{00} + \xi'$.

В результате вычислений получается, что наличие медленных процессов установления равновесия макроскопически эквивалентно наличию второй (объемной) вязкости η' :

$$\eta' = \frac{\tau \rho}{1 + i\omega \tau} (V_\infty^2 - V_0^2) \quad (2)$$

здесь V_∞ и V_0 – скорости звука для частот $\omega \rightarrow \infty$ и $\omega \rightarrow 0$, соответственно.

При медленных процессах, когда справедливо неравенство $\omega \tau \ll 1$,

$$\eta'_0 = \tau \rho (V_\infty^2 - V_0^2) \quad (3)$$

Подставив (3) в (2), получим выражение для частотной зависимости коэффициента объемной вязкости

$$\eta' = \frac{\eta'_0}{1 + i\omega \tau} \quad (4)$$

Как следует из гидродинамической теории, амплитудный коэффициент поглощения звука выражается формулой

$$\alpha = \alpha_\eta + \alpha_{\eta'} = \frac{\omega^2}{2V_0^3 \rho} \left(\frac{4}{3} \eta + \eta' \right) \quad (5)$$

где η и η' – коэффициенты сдвиговой и объемной вязкости.

Используя выражения (3)-(5), получаем, взяв действительные части:

$$\alpha_{\eta'} = \frac{\omega^2 \tau (V_\infty^2 - V_0^2)}{2V_0^3 (1 + \omega^2 \tau^2)} \quad (6)$$

Как видно из (6), часть поглощения, обусловленная объемной вязкостью, релаксируя, стремится к определенному, постоянному значению. Таким образом, противоречие между выводами гидродинамической теории и экспериментальными результатами по тонкой структуре рэлеевской линии устраняется.

Кроме выражения (6) для поглощения звука Мандельштам и Леонтович получили также выражение для скорости распространения звука:

$$V^2 = V_0^2 + (V_\infty^2 - V_0^2) \frac{\omega^2 \tau^2}{1 + \omega^2 \tau^2} \quad (7)$$

Выражение (7) показывает, что с увеличением частоты звука его скорость должна расти и стремиться к V_∞ . Время релаксации объемной вязкости является одним произвольным параметром релаксационной теории. Определение его представляется очень существенным и может быть сделано двумя независимыми путями, поскольку входит в выражение для скорости звука (7) и в выражение для коэффициента поглощения звука (6).

В реальных жидкостях распространение звука может описываться целым набором времен релаксаций. Тогда значение τ , определенное по формулам (6) или (7), конечно, должно рассматриваться как среднее эффективное значение.

Мандельштам и Леонтович указали также путь для решения более общей задачи, когда состояние жидкости описывается не одним, а несколькими параметрами ξ . Однако, в настоящее время в большинстве случаев не удается разделить релаксационные процессы в жидкостях, приводящие к дисперсии скорости звука, и, следовательно, применить указанные путь решения более общей задачи.

Релаксационная теория распространения звука, развитая Мандельштамом и Леонтовичем, имеет большое значение благодаря тому, что она носит феноменологический характер, хотя и не дает конкретного представления о характере релаксационного процесса. Теория позволила правильно поставить

эксперименты как в ультразвуковой, так и в гиперзвуковой области. Основываясь на выводах теории, была обнаружена дисперсия скорости звука в ряде жидкостей.

ПРАКТИЧЕСКАЯ ЧАСТЬ

Расчет и анализ дисперсии скорости звука

Пусть для некоторой жидкости мы имеем следующие результаты измерений скорости звука на разных частотах:

	f , Гц	V , м/с
Гиперзвук	1.05×10^9	1320
	4.56×10^9	1383
	6.60×10^9	1426

Проведем предварительный анализ представленных в таблице результатов. Как видно из таблицы, скорость звука для самой низкой частоты равна 1320 м/с, а скорость звука для самой высокой из исследованных частот равна 1426 м/с. Другими словами, скорость звука заметно возрастает при увеличении его частоты, т.е. имеет место значительная дисперсия скорости звука. Для расчета величины дисперсии скорости звука используется следующее выражение:

$$\Delta V = \frac{V_2 - V_1}{\frac{V_2 + V_1}{2}} \times 100\% = 2 \times \frac{V_2 - V_1}{V_2 + V_1} \times 100\% \quad (8)$$

В формуле (8) V_2 – скорость звука на частоте f_2 , V_1 – скорость звука на частоте f_1 ($f_2 > f_1$). Подставляя в (8) результаты из таблицы, получим:

$$\Delta V = 2 \times \frac{V_2 - V_1}{V_2 + V_1} \times 100\% = 2 \times \frac{1426 - 1320}{1426 + 1320} \times 100\% = 2 \times \frac{106}{2746} \times 100\% \approx 7.7\%$$

Таким образом, в интервале частот от 1.05 ГГц до 6.6 ГГц дисперсия скорости звука в исследованной жидкости составляет 7.7%.

Полную дисперсию скорости звука можно рассчитать по формуле, аналогичной формуле (8) в виде:

$$\Delta V = 2 \times \frac{V_\infty - V_0}{V_\infty + V_0} \times 100\% \quad (9)$$

здесь V_∞ и V_0 – скорости звука для частот $\omega \rightarrow \infty$ и $\omega \rightarrow 0$, соответственно.

Определение значений V_∞ и V_0 для данной жидкости является, вообще говоря, не простой задачей, которая может быть решена следующим образом.

Как уже упоминалось выше, в рамках релаксационной теории Мандельштама-Леонтовича, зависимость скорости V звука от его частоты ω может быть записана в виде (см. формулу (7)):

$$V^2 = V_0^2 + (V_\infty^2 - V_0^2) \frac{\omega^2 \tau^2}{1 + \omega^2 \tau^2} \quad (10)$$

Это выражение содержит три неизвестные величины: V_∞ (скорость звука для $\omega \rightarrow \infty$), V_0 (скорость звука для $\omega \rightarrow 0$) и τ (время релаксации объемной вязкости). Однако, если провести измерения скорости для трех частот звука, можно составить систему, состоящую из трех уравнений типа (10) с тремя неизвестными:

$$\begin{cases} V_1^2 = V_0^2 + (V_\infty^2 - V_0^2) \frac{\omega_1^2 \tau^2}{1 + \omega_1^2 \tau^2} \\ V_2^2 = V_0^2 + (V_\infty^2 - V_0^2) \frac{\omega_2^2 \tau^2}{1 + \omega_2^2 \tau^2} \\ V_3^2 = V_0^2 + (V_\infty^2 - V_0^2) \frac{\omega_3^2 \tau^2}{1 + \omega_3^2 \tau^2} \end{cases} \quad (11)$$

где V_1 , V_2 и V_3 – скорости звука для частот ω_1 , ω_2 и ω_3 , соответственно. Решая эту систему уравнений можно найти значения V_∞ , V_0 и τ .

Для аналитического решения этой системы уравнений удобно ввести следующие обозначения:

$$V_0^2 = A$$

$$V_\infty^2 - V_0^2 = B$$

$$\frac{1}{\tau^2} = C$$

Тогда система уравнений (11) примет вид:

$$\begin{cases} V_1^2 = A + B \frac{\omega_1^2}{C + \omega_1^2} \\ V_2^2 = A + B \frac{\omega_2^2}{C + \omega_2^2} \\ V_3^2 = A + B \frac{\omega_3^2}{C + \omega_3^2} \end{cases}$$

Решая стандартным образом полученную систему, можно найти:

$$C = \frac{\omega_2^2 - \omega_3^2 \cdot \frac{V_3^2 - V_1^2}{V_2^2 - V_1^2} \cdot \frac{\omega_2^2 - \omega_1^2}{\omega_3^2 - \omega_1^2}}{\frac{V_3^2 - V_1^2}{V_2^2 - V_1^2} \cdot \frac{\omega_2^2 - \omega_1^2}{\omega_3^2 - \omega_1^2} - 1} \quad (12)$$

$$B = \frac{V_2^2 - V_1^2}{\omega_2^2 - \omega_1^2} \cdot \frac{(C + \omega_1^2) \cdot (C + \omega_2^2)}{C} \quad (13)$$

$$A = V_1^2 - B \cdot \frac{\omega_1^2}{C + \omega_1^2} \quad (14)$$

Воспользуемся результатами измерений скорости гиперзвука, представленными в таблице:

$$V_1 = 1320 \text{ м/с}, \omega_1 = 2\pi f_1 = 6.6 \times 10^9 \text{ рад/с.}$$

$$V_2 = 1383 \text{ м/с}, \omega_2 = 2\pi f_2 = 28.6 \times 10^9 \text{ рад/с.}$$

$$V_3 = 1426 \text{ м/с}, \omega_3 = 2\pi f_3 = 41.5 \times 10^9 \text{ рад/с.}$$

Подставив эти значения в формулу (12) получим: $C = 25.4 \times 10^{20}$

Далее, по формулам (13) и (14), следует: $B = 751078$ и $A = 1742273$

Согласно обозначениям, которые мы сделали выше:

$$C = \frac{1}{\tau^2} \rightarrow \tau = \frac{1}{\sqrt{C}} \approx 2 \times 10^{-11} \text{ (с)}$$

$$A = V_0^2 \rightarrow V_0 = \sqrt{A} \approx 1319 \text{ (м/с)}$$

$$B = V_\infty^2 - V_0^2 \rightarrow V_\infty = \sqrt{B + V_0^2} = \sqrt{B + A} \approx 1579 \text{ (м/с)}$$

Расчет полной дисперсии по формуле (9) дает:

$$\Delta V = 2 \times \frac{V_\infty - V_0}{V_\infty + V_0} \times 100\% = 2 \times \frac{1579 - 1319}{1579 + 1319} \times 100\% \approx 18\%$$

Таким образом, анализ экспериментальных результатов, приведенных в таблице, с точки зрения релаксационной теории распространения звука позволяет сделать следующие выводы:

4. В исследуемой жидкости в интервале звуковых частот от ~ 1 ГГц до ~ 7 ГГц имеет место дисперсия скорости распространения гиперзвука порядка 8%.
5. Наблюдаемая дисперсия скорости гиперзвука обусловлена процессом релаксации объемной вязкости, характерное время которого 2×10^{-11} с.
6. Рассчитанные по формулам релаксационной теории значения скоростей V_∞ и V_0 показывают, что полная дисперсия скорости звука в исследуемой жидкости составляет 18%.

ЗАДАНИЯ ПО ВЫПОЛНЕНИЮ ЛАБОРАТОРНОЙ РАБОТЫ

1. Расчет и анализ дисперсии скорости гиперзвука

Задание: Пользуясь экспериментальными данными по значениям скорости гиперзвука, приведенным в Таблице 1(а):

- 1) Рассчитать величину дисперсии скорости ΔV для различных температур жидкости.
- 2) Заполнить Таблицу 1(б).
- 3) Построить график зависимости V от температуры среды для приведенных частот гиперзвука.
- 4) Построить график зависимости V от $\lg(f)$ (логарифм по основанию 10 от частоты) для приведенных температур среды.
- 5) Построить график зависимости дисперсии скорости гиперзвука ΔV от температуры.

Таблица 1(а).

Результаты измерений скорости гиперзвука для различных частот и температур жидкости.

f , ГГц	$t=20$ °С	$t=40$ °С	$t=60$ °С	$t=80$ °С
	V , м/с	V , м/с	V , м/с	V , м/с
6.2	1613	1586	1563	1535
4.8	1575	1555	1536	1515
1.1	1537	1519	1505	1486

Таблица 1(б).

(заполнить таблицу)

t , °С	20	40	60	80
ΔV , %				

2. Расчет и анализ параметров релаксационного процесса

Задание: Пользуясь экспериментальными данными по значениям скорости гиперзвука, приведенным в Таблице 1(а):

- 5) Рассчитать значения V_∞ , V_0 и τ .
- 6) Рассчитать величину полной дисперсии скорости ΔV^* для различных температур.
- 7) Заполнить Таблицу 2(а).
- 8) Построить график зависимости τ от температуры.
- 9) Построить график зависимости скорости гиперзвука V от температуры, на котором привести экспериментальные значения скорости (из Таблицы 1(а)) и рассчитанные значения V_∞ и V_0 .

Таблица 2(а).

(заполнить таблицу)

t , °С	V_∞ , м/с	V_0 , м/с	τ , с	ΔV^* , %
20				
40				
60				
80				

Контрольные вопросы

6. Частотный интервал, относящийся к ультра- и гиперзвуковым частотам.
7. Тонкая структура линии рэлеевского рассеяния света и причины ее возникновения.
8. Дисперсия скорости звука.
9. Основные положения и выводы релаксационной теории Мандельштама-Леонтовича.
10. Методы измерения скорости звука в диапазоне ультра- и гиперзвуковых частот.

Рекомендуемая литература

20. Фабелинский И.Л., Молекулярное рассеяние света, М.:Наука, 1970.
21. Вукс М.Ф., Рассеяния света в газах, жидкостях и растворах, Изд. ЛГУ, 1977.
22. Ультразвук. "Маленькая энциклопедия", М., 1979.
23. Физическая акустика, (под редакцией. У Мэзона), том VI, М.: Мир, 1993.
24. Ноздрев В.Ф., Молекулярная акустика, Изд. "Высшая школа", М., 1974.

Предмет: Лазерная акусто-оптическая спектроскопия

(танловфан, 4 курс бакалавриата)

Вопросы рубежного контроля

53. Что из себя представляет и как возникает дифракционный спектр?
54. Применение явления дифракции света на ультразвуке.
55. Исходное уравнение распространения света в пространственно-периодической среде.
56. Изменение показателя преломления среды в поле акустической волны.
57. Система уравнений Рамана-Ната.
58. Условие режим Рамана-Ната в явлении дифракции света на ультразвуке.
59. Перечислить и объяснить специфические особенности дифракции Рамана-Ната.
60. Чем определяется распределение интенсивности по дифракционным порядкам в режиме Рамана-Ната.
61. Условие режим Брэгга в явлении дифракции света на ультразвуке.
62. Перечислить и объяснить специфические особенности дифракции Брэгга.
63. Чем определяется распределение интенсивности по дифракционным порядкам в режиме Брэгга.
64. Причины появления гиперзвуковых акустических волн в жидкостях.
65. Следствие модуляции рассеянного света тепловыми волнами в жидкостях.
66. Качественное описание рассеяния Мандельштама-Бриллюэна.
67. Причины возникновения флуктуаций термодинамических параметров в жидкостях.

68. Причина адиабатических флуктуаций давления.
69. Рассеяние электромагнитного излучения на акустических фонах.
70. Основные характеристики упругой волны.
71. Как происходит распространение упругой волны в среде?
72. Перечислить способы изучения упругих волн.
73. Чем определяется скорость распространения упругой волны в среде?
74. Перечислить основные особенности распространения упругих волн в среде.
75. Основные параметры и характеристики, описывающие звуковые колебания в среде.
76. Чем определяется скорость распространения звуковых волн в средах.
77. Перечислить и объяснить линейные характеристики звукового поля.
78. Перечислить и объяснить энергетические характеристики звукового поля.
79. Сформулировать общие характеристики ультразвуковых колебаний.
80. Перечислить и объяснить основные законы распространения ультразвуковых волн в среде.
81. Сформулировать специфические особенности распространения ультразвуковых волн в среде.
82. Что такое дисперсия скорости звука?
83. Какие виды дисперсии скорости звука бывают?
84. Чем обусловлена дисперсия скорости звука?
85. Связь дисперсии с релаксационными процессами в среде.
86. Связь дисперсии с геометрическими характеристиками среды.
87. Что такое пространственная дисперсия скорости звука?
88. Условия проявления пространственной дисперсии.
89. Что такое резонансная дисперсия скорости звука?
90. Условия проявления резонансной дисперсии.
91. Связь дисперсии с флуктуациями термодинамических величин.
92. В чем заключается предмет молекулярной акустики?
93. Какие основные задачи решаются в молекулярной акустике?
94. Методы акустических исследований сред в различных агрегатных состояниях.
95. Что такое акустическая релаксация?
96. Причины появления акустической релаксации.
97. Какие виды акустической релаксации бывают?
98. Что такое время акустической релаксации и чем оно определяется?
99. Причина явления дифракции света на ультразвуке.

ГЛОССАРИЙ

Фонон

Квазичастица, представляющая собой квант энергии акустической волны или акустического поля

Лазер

Оптический квантовый генератор монохроматического, направленного и когерентного электромагнитного излучения оптического диапазона частот

Акустооптика

Раздел физики, изучающий взаимодействие акустических и оптических волн в среде

Акустооптическое взаимодействие

Взаимодействие лазерного излучения с акустическими фононами в среде

Активная среда лазера

Активная среда лазера – это вещество, в котором можно реализовать такие условия, когда при прохождении излучения через такую среду оно усиливается, а не ослабляется (поглощается). Такие условия создаются при инверсии заселенностей энергетических уровней. Другими словами в активной среде лазера можно создать условия, когда в состоянии с высокой энергией находится больше частиц, чем в состоянии с низкой энергией.

Накачка активной среды

Накачка – это процесс вложения энергии в активную среду, чтобы в ней реализовалась инверсия заселенностей энергетических уровней.

Основные элементы лазера

Любой лазер состоит из трех основных элементов.

1) Активная среда,

- 2) Система накачки активной среды,
- 3) Резонатор.

Спонтанное излучение

Спонтанное излучение носит случайный (самопроизвольный) характер. Родившийся в результате спонтанного излучения фотон может иметь любое направление движения, поляризацию и фазу. Другими словами – спонтанное излучение не когерентно.

Вынужденное излучение

Вынужденное излучение – когерентно. Рождающийся в результате вынужденного излучения фотон является точной копией того фотона, который заставил атом излучать. Другими словами в вынужденном излучении все фотоны имеют одинаковую фазу, поляризацию, направление движения.

Поглощение света в среде: причины и условия.

Поглощение света в среде будет тогда, когда количество поглощенных атомами фотонов будет больше, чем количество фотонов, излученных в результате вынужденного и спонтанного излучения. Такая ситуация будет всегда, если количество атомов в основном состоянии больше, чем в возбужденном.

Усиление света в среде: причины и условия

Усиление света в среде будет тогда, когда количество поглощенных атомами фотонов будет меньше, чем излученных в результате вынужденного и спонтанного излучения. Такая ситуация будет всегда, если количество атомов в основном состоянии больше, чем в возбужденном.

Основные характеристики лазерного излучения

Монохроматичность, когерентность и направленность.

Монохроматичность лазерного излучения: определение и причина

Монохроматичность излучения означает, что все фотоны имеют одинаковую длину волны. Излучение в активной среде лазера происходит при переходах атома только лишь между двумя энергетическими уровнями. В результате таких переходов могут родиться фотоны только лишь с одной и той же энергией и, соответственно, с одной и той же длиной волны.

Когерентность лазерного излучения: определение и причина

Когерентность излучения означает, что все фотоны абсолютно одинаковы – у всех одна и та же длина волны, фаза, поляризация, направление движения. Когерентность излучения лазера обусловлена тем, что это излучение вынужденное, а в результате вынужденного излучения появляются абсолютно одинаковые фотоны.

Направленность лазерного излучения: определение и причина

Направленность излучения означает, что все фотоны имеют одинаковое направление движения. Направленность излучения лазера обусловлена это излучение вынужденное, а в результате вынужденного излучения все фотоны имеют одинаковое направление.

Типы лазеров по принципу активной среды

По типу активной среды лазеры можно разделить на газовые (гелий-неоновый, аргоновый), твердотельные (стекло с неодимом, рубиновый) и жидкостные (лазеры на красителях).

Типы лазеров по принципу режима работы

По режиму работы лазеры можно разделить на непрерывные (к ним относятся газовые лазеры) и импульсные (все твердотельные). Рубиновый лазер может работать как в импульсном, так и в непрерывном режиме.

Методы накачки активной среды лазера

Для твердотельных лазеров применяется оптическая накачка, т.е. освещение активной среды мощной лампой. Для газовых лазеров применяется электрическая накачка, т.е. пропускание через газ электрического разряда.

Оптический резонатор лазера

Оптический резонатор – это устройство, состоящее из двух зеркал, расположенных на одной оптической оси и параллельных друг другу.

Назначение оптического резонатора

1. Накопление энергии
2. Создание обратной связи – т.е. часть усиленного в активной среде излучения возвращается после отражения от зеркала обратно в активную среду для дальнейшего усиления.
3. Селекция фотонов по направлению – т.е. после отражения от зеркала в активную среду возвращаются только те фотоны, направление которых совпадает с оптической осью (эти фотоны падают перпендикулярно). Фотоны, падающие под углом к зеркалу, после отражения покидают резонатор.

Плоский резонатор

Плоский резонатор – два плоских зеркала, расположенных на некотором расстоянии и параллельные друг другу.

Конфокальный резонатор

Конфокальный резонатор – два сферических зеркала, расположенные на таком расстоянии друг от друга, чтобы совпадало положение их фокусов. Другими словами, для конфокального резонатора всегда должно выполняться условие $l = F_1 + F_2$, где l – расстояние между зеркалами, F_1 и F_2 – фокусные расстояния первого и второго зеркала.

Полуконфокальный резонатор

Полуконфокальный резонатор – одно зеркало сферическое, а другое плоское. Причем плоское зеркало расположено в фокусе сферического. Другими словами, для полуконфокального резонатора всегда должно выполняться условие $l = F$, где l – расстояние между зеркалами, F – фокусное расстояние сферического зеркала.

Фотон

Фотон – квант электромагнитного излучения.

Физические характеристики фотона

Основные характеристики фотона – энергия (E), длина волны (λ), скорость (c), частота (ν).

Связь между основными характеристиками фотона

Связь между ними может быть представлена формулой Планка: $E = h \times \nu = h \times c / \lambda$. Здесь $h \approx 7 \times 10^{-34}$ – постоянная Планка.

МОДЕЛИ ПЕДАГОГИЧЕСКОЙ ТЕХНОЛОГИИ ОБУЧЕНИЯ

СОДЕРЖАНИЕ

- I. ВВЕДЕНИЕ
- II. КОНЦЕПТУАЛЬНЫЕ ПОДХОДЫ К ПРОЕКТИРОВАНИЮ ТЕХНОЛОГИЙ ОБУЧЕНИЯ ПО ПРЕДМЕТУ «ОСНОВЫ ЛАЗЕРНОЙ ФИЗИКИ»
- III. МОДЕЛИ ТЕХНОЛОГИИ ОБУЧЕНИЯ
 - Лекция 1:* Акустические упругие волны
 - Лекция 2:* Распространение и основные характеристики звуковых волн
 - Лекция 3:* Специфические особенности ультразвука
 - Лекция 4:* Дисперсия скорости звука
 - Лекция 5:* Дисперсия, связанная со свойствами среды
 - Лекция 6:* Молекулярная акустика
 - Лекция 7:* Акустическая релаксация
 - Лекция 8:* Дифракция света на ультразвуке
 - Лекция 9:* Распределение интенсивности светового излучения в дифракционных максимумах

Лекция 10: Дифракция Рамана-Ната

Лекция 11: Дифракция Брега

Лекция 12: Гиперзвуковые волны в жидкостях

Лекция 13: Взаимодействие электромагнитного излучения с фононами среды

IV. ТЕХНОЛОГИЧЕСКАЯ КАРТА ЛЕКЦИОННОГО ЗАНЯТИЯ

V. МОДЕЛЬ ТЕХНОЛОГИИ ОБУЧЕНИЯ: ПРАКТИЧЕСКОЕ (СЕМИНАРСКОЕ) ЗАНЯТИЕ

VI. ТЕХНОЛОГИЧЕСКАЯ КАРТА ПРАКТИЧЕСКОГО (СЕМИНАРСКОГО) ЗАНЯТИЯ

VII. ПРИЛОЖЕНИЕ

1. Таблица оценки работы групп
2. Инсерт таблица и работа с ней
3. Критерии оценки результатов индивидуальной работы
4. Ролевая инструментовка семинара-дискуссии
5. Порядок и регламент проведения дискуссии
6. Критерии оценки групповой работы
7. Критерии оценки участников дискуссии
8. Правила работы с применением техники «Инсерт»

I. ВВЕДЕНИЕ

Образовательная технология по учебному предмету «Лазерная акусто-оптическая спектроскопия» разработана на основе правил технологизации лекционных, семинарских и практических занятий.

Актуальность учебного предмета «Лазерная акусто-оптическая спектроскопия» определяется тем, что акусто-оптическое взаимодействие широко используется в современной технологии для управления когерентным световым излучением. Работа большинства акусто-оптических устройств основана на явлении дифракции лазерного излучения на ультразвуке. Угловые, поляризационные и энергетические характеристики дифрагированного излучения, содержат обширную, а порой и уникальную информацию о параметрах звукового пучка и об акустических свойствах среды, в которой распространяется звук. Все это находит широкое применение не только при решении проблем управления параметрами лазерного излучения, но и при решении задач ряда фундаментальных физических исследований в области критического состояния вещества, физики жидкого состояния и т.п. Уникальные свойства лазерного излучения расширяют области применения акусто-оптических методов на производстве и в практике научных лабораторий, что делает актуальной подготовку специалистов в области лазерной физики, обладающих теоретическими знаниями и практическими навыками работы с акусто-оптическими эффектами, устройствами и методами

Целью данного учебного курса является формирования у студентов комплекса знаний и умений в основных направлениях, связанных с особенностями акусто-оптического взаимодействия лазерного излучения в среде и тесно связанными с этим вопросами: специфические характеристики лазерного излучения, акусто-оптическое управление параметрами лазерного излучения, применением акусто-оптических лазерных технологий в науке, технике и на производстве.

Задачами данного учебного курса осветить ряд вопросов, способствующих формированию понимания таких основных моментов лазерной акусто-оптики, как генерация лазерного излучения, виды и типы лазеров, основные отличительные характеристики лазерного излучения, применение монохроматичности, когерентности и направленности в акусто-оптике лазерного излучения для решения ряда проблем в области науки, технологии, метрологии, современной промышленности и ряда других.

Изучение курса «Лазерная акусто-оптическая спектроскопия» тесно взаимосвязано с такими дисциплинами как «Квантовая электроника», «Лазерная измерительная техника», «Основы лазерной физики», «Лазерная спектроскопия высокого разрешения» и другие.

II. КОНЦЕПТУАЛЬНЫЕ ПОДХОДЫ К ПРОЕКТИРОВАНИЮ ТЕХНОЛОГИЙ ОБУЧЕНИЯ ПО ПРЕДМЕТУ «ОСНОВЫ ЛАЗЕРНОЙ ФИЗИКИ»

Личностно ориентированное обучение. Предусматривает полноценное развитие всех участников образовательного процесса и направлен не на определенную обучающуюся личность, а, прежде всего, на учет целей обучения, связанного с будущей профессиональной деятельностью.

Системный подход. Технология обучения должна обладать всеми признаками системы: логикой процесса, взаимосвязью всех его частей, целостностью.

Деятельностный подход. Обуславливает ориентацию обучения на формирование процессуальных качеств личности, активизацию и интенсификацию деятельности обучающегося, развертывание в учебном процессе всех его способностей и возможностей, пытливости и инициативы.

Диалогический подход. Определяет необходимость создания психологического единства и взаимодействия субъектов-участников образовательного процесса, благодаря которому усиливается творческий процесс самоактуализации и самопрезентации личности.

Организация обучения в сотрудничестве. Предполагает необходимость делать акцент на реализацию демократизма, равенства, партнерства в субъектных отношениях обучающего и обучающегося, совместную выработку цели, содержания деятельности и оценку достигнутых результатов.

Проблемное обучение. Это один из способов активного взаимодействия с обучающимися на основе проблемного представления содержания обучения, в ходе которого обеспечивается самостоятельная творческо-познавательная деятельность по выявлению объективных противоречий научного знания и способов их разрешения, формирование и развитие диалектического мышления, творческое применение их в практической деятельности.

Применение новейших средств и способов предоставления информации. Внедрение в процесс обучения новых компьютерных и информационных технологий.

Методы и техника обучения. Дискуссия, кейс-стади, проблемный метод, обучающая игра, «Мозговой штурм», Инсерт, «Учимся вместе», Пинборд, лекция (с приглашением эксперта, конференция, вводная, тематическая, визуализация, с разбором конкретной ситуации, заключительная).

Формы организации обучения. Фронтальная, коллективная и групповая, основанные на диалоге и полилоге, общении, сотрудничестве и взаимном обучении.

Средства обучения. Наряду с традиционными средствами обучения (учебник, текст лекций, опорный конспект, кодоскоп, графические органайзеры) – компьютерные и информационные технологии.

Способы коммуникации. Непосредственное взаимодействие со студентами на основе оперативной обратной связи.

Способы и средства (информации) обратной связи. Наблюдение, блиц-опрос, диагностика обучения на основе анализа результатов текущего, промежуточного и заключительного контроля.

Способы и средства управления. Планирование учебных занятий в виде технологических карт, определяющих этапы учебного занятия, совместные действия обучающего и обучающихся по достижению поставленной цели, контроль (текущий, промежуточный и итоговый) не только аудиторной работы, но и самостоятельной, внеаудиторной работы.

Мониторинг и оценка. Планомерное отслеживание результатов обучения как в процессе учебного занятия (оценка выполнения учебных заданий и тестов, рейтинговая оценка учебной деятельности обучающегося на каждом учебном занятии), так и на протяжении всего курса (оценка текущих, промежуточных и заключительных результатов на основе рейтинговой оценки каждого обучающегося).

III. МОДЕЛИ ТЕХНОЛОГИИ ОБУЧЕНИЯ

ЛЕКЦИЯ 1

Акустические упругие волны

Модель технологии обучения

<i>Время занятия</i> 2 часа	Количество студентов: от 10 до 30
<i>Форма занятия</i>	Лекция
<i>План лекции</i>	4. Общая характеристика акустической волны; 5. Способы изучения упругих волн; 6. Особенности распространения упругих волн в среде.
<i>Цели учебного занятия:</i> предоставление общего понятия об учебном курсе. Ознакомление с понятием акустической волны и особенностям ее распространения в среде.	
<i>Педагогические задачи:</i> <ul style="list-style-type: none"> • ознакомить с назначением и задачами предмета изучения; • дать обзор структуры рассматриваемого материала и рекомендуемой учебно-методической литературы; • осветить поставленные в лекционном материале вопросы; • раскрыть методические и организационные особенности работы в рамках предмета изучения, сроки и формы оценки; • охарактеризовать сущность и значение изучаемого вопроса; • сформулировать теоретические основы рассматриваемых вопросов; • закрепить теоретические основы численными оценками. 	<i>Результаты учебной деятельности:</i> <ul style="list-style-type: none"> • формулируют назначение и задачи предмета изучения; • ориентируются в структуре рассматриваемого материала и формах оценки по учебной деятельности; • освещают поставленные в лекционном материале вопросы; • раскрывают методические и организационные особенности работы в рамках предмета изучения, сроки и формы оценки; • дают развернутую характеристику сущности предмета изучения и значения изучаемого вопроса; • формулируют теоретические основы рассматриваемых вопросов; • закрепляют теоретические основы численными оценками.
<i>Методы преподавания</i>	Лекция, беседа, мозговой штурм, техника «Пинборд»
<i>Формы преподавания</i>	Массовая, коллективная
<i>Средства преподавания</i>	Учебное пособие, текст лекций, проектор
<i>Условия преподавания</i>	Аудитория, приспособленная к применению ТСО
<i>Мониторинг и оценка</i>	Устный контроль: вопросы и ответы

ЛЕКЦИЯ 2

Распространение и основные характеристики звуковых волн

Модель технологии обучения

<i>Время занятия</i> 2 часа	Количество студентов: от 10 до 30
<i>Форма занятия</i>	Лекция
<i>План лекции</i>	5. Звуковые колебания в среде; 6. Скорость распространения звуковых волн в среде; 7. Линейные характеристики звукового поля; 8. Энергетические характеристики звукового поля.
<i>Цели учебного занятия:</i> предоставление понятия о распространении звуковых волн в среде и основных характеристиках звукового поля.	
<i>Педагогические задачи:</i>	<i>Результаты учебной деятельности:</i>
<ul style="list-style-type: none"> • ознакомить с назначением и задачами предмета изучения; • дать обзор структуры рассматриваемого материала и рекомендуемой учебно-методической литературы; • осветить поставленные в лекционном материале вопросы; • раскрыть методические и организационные особенности работы в рамках предмета изучения, сроки и формы оценки; • охарактеризовать сущность и значение изучаемого вопроса; • сформулировать теоретические основы рассматриваемых вопросов; • закрепить теоретические основы численными оценками. 	<ul style="list-style-type: none"> • формулируют назначение и задачи предмета изучения; • ориентируются в структуре рассматриваемого материала и формах оценки по учебной деятельности; • освещают поставленные в лекционном материале вопросы; • раскрывают методические и организационные особенности работы в рамках предмета изучения, сроки и формы оценки; • дают развернутую характеристику сущности предмета изучения и значения изучаемого вопроса; • формулируют теоретические основы рассматриваемых вопросов; • закрепляют теоретические основы численными оценками.
<i>Методы преподавания</i>	Лекция, беседа, мозговой штурм, техника «Пинборд»
<i>Формы преподавания</i>	Массовая, коллективная
<i>Средства преподавания</i>	Учебное пособие, текст лекций, проектор
<i>Условия преподавания</i>	Аудитория, приспособленная к применению ТСО
<i>Мониторинг и оценка</i>	Устный контроль: вопросы и ответы

ЛЕКЦИЯ 3

Специфические особенности ультразвука

Модель технологии обучения

<i>Время занятия</i> 2 часа	Количество студентов: от 10 до 30
<i>Форма занятия</i>	Лекция
<i>План лекции</i>	4. Общая характеристика ультразвуковых колебаний; 5. Основные законы распространения ультразвуковых волн в среде; 6. Особенности распространения ультразвуковых волн в среде.
Цели учебного занятия: предоставление понятия о специфических особенностях акустических волн ультразвукового диапазона частот.	
<p>Педагогические задачи:</p> <ul style="list-style-type: none"> • ознакомить с назначением и задачами предмета изучения; • дать обзор структуры рассматриваемого материала и рекомендуемой учебно-методической литературы; • осветить поставленные в лекционном материале вопросы; • раскрыть методические и организационные особенности работы в рамках предмета изучения, сроки и формы оценки; • охарактеризовать сущность и значение изучаемого вопроса; • сформулировать теоретические основы рассматриваемых вопросов; • закрепить теоретические основы численными оценками. 	<p>Результаты учебной деятельности:</p> <ul style="list-style-type: none"> • формулируют назначение и задачи предмета изучения; • ориентируются в структуре рассматриваемого материала и формах оценки по учебной деятельности; • освещают поставленные в лекционном материале вопросы; • раскрывают методические и организационные особенности работы в рамках предмета изучения, сроки и формы оценки; • дают развернутую характеристику сущности предмета изучения и значения изучаемого вопроса; • формулируют теоретические основы рассматриваемых вопросов; • закрепляют теоретические основы численными оценками.
<i>Методы преподавания</i>	Лекция, беседа, мозговой штурм, техника «Пинборд»
<i>Формы преподавания</i>	Массовая, коллективная
<i>Средства преподавания</i>	Учебное пособие, текст лекций, проектор
<i>Условия преподавания</i>	Аудитория, приспособленная к применению ТСО

ЛЕКЦИЯ 4

Дисперсия скорости звука

Модель технологии обучения

Время занятия 2 часа	Количество студентов: от 10 до 30
Форма занятия	Лекция
План лекции	4. Общее понятие дисперсии скорости звука; 5. Дисперсия релаксационного типа; 6. «Геометрическая» дисперсия скорости звука.
Цели учебного занятия: предоставление понятия о частотной зависимости скорости распространения звука в среде, дисперсии и основных видах дисперсии скорости.	
<p>Педагогические задачи:</p> <ul style="list-style-type: none"> • ознакомить с назначением и задачами предмета изучения; • дать обзор структуры рассматриваемого материала и рекомендуемой учебно-методической литературы; • осветить поставленные в лекционном материале вопросы; • раскрыть методические и организационные особенности работы в рамках предмета изучения, сроки и формы оценки; • охарактеризовать сущность и значение изучаемого вопроса; • сформулировать теоретические основы рассматриваемых вопросов; • закрепить теоретические основы численными оценками. 	<p>Результаты учебной деятельности:</p> <ul style="list-style-type: none"> • формулируют назначение и задачи предмета изучения; • ориентируются в структуре рассматриваемого материала и формах оценки по учебной деятельности; • освещают поставленные в лекционном материале вопросы; • раскрывают методические и организационные особенности работы в рамках предмета изучения, сроки и формы оценки; • дают развернутую характеристику сущности предмета изучения и значения изучаемого вопроса; • формулируют теоретические основы рассматриваемых вопросов; • закрепляют теоретические основы численными оценками.
Методы преподавания	Лекция, беседа, мозговой штурм, техника «Пинборд»
Формы преподавания	Массовая, коллективная
Средства преподавания	Учебное пособие, текст лекций, проектор
Условия преподавания	Аудитория, приспособленная к применению ТСО

ЛЕКЦИЯ 5

Дисперсия, связанная со свойствами среды

Модель технологии обучения

Время занятия 2 часа	Количество студентов: от 10 до 30
Форма занятия	Лекция
План лекции	4. Пространственная дисперсия скорости звука; 5. Резонансная дисперсия скорости звука; 6. Дисперсия, связанная с флуктуациями термодинамических величин.
Цели учебного занятия: предоставление понятия о различных механизмах, приводящих к дисперсии скорости распространения звуковых волн в среде.	
Педагогические задачи: <ul style="list-style-type: none"> • ознакомить с назначением и задачами предмета изучения; • дать обзор структуры рассматриваемого материала и рекомендуемой учебно-методической литературы; • осветить поставленные в лекционном материале вопросы; • раскрыть методические и организационные особенности работы в рамках предмета изучения, сроки и формы оценки; • охарактеризовать сущность и значение изучаемого вопроса; • сформулировать теоретические основы рассматриваемых вопросов; • закрепить теоретические основы численными оценками. 	Результаты учебной деятельности: <ul style="list-style-type: none"> • формулируют назначение и задачи предмета изучения; • ориентируются в структуре рассматриваемого материала и формах оценки по учебной деятельности; • освещают поставленные в лекционном материале вопросы; • раскрывают методические и организационные особенности работы в рамках предмета изучения, сроки и формы оценки; • дают развернутую характеристику сущности предмета изучения и значения изучаемого вопроса; • формулируют теоретические основы рассматриваемых вопросов; • закрепляют теоретические основы численными оценками.
Методы преподавания	Лекция, беседа, мозговой штурм, техника «Пинборд»
Формы преподавания	Массовая, коллективная
Средства преподавания	Учебное пособие, текст лекций, проектор

<i>Условия преподавания</i>	Аудитория, приспособленная к применению ТСО
<i>Мониторинг и оценка</i>	Устный контроль: вопросы и ответы

ЛЕКЦИЯ 6

Молекулярная акустика

Модель технологии обучения

<i>Время занятия</i> 2 часа	Количество студентов: от 10 до 30
<i>Форма занятия</i>	Лекция
<i>План лекции</i>	4. Предмет молекулярной акустики; 5. Задачи молекулярной акустики; 6. Акустические исследования сред в различных агрегатных состояниях.
Цели учебного занятия: предоставление понятия о предмете и задачах молекулярной акустики, акустических исследований сред в различных агрегатных состояниях.	
<p>Педагогические задачи:</p> <ul style="list-style-type: none"> • ознакомить с назначением и задачами предмета изучения; • дать обзор структуры рассматриваемого материала и рекомендуемой учебно-методической литературы; • осветить поставленные в лекционном материале вопросы; • раскрыть методические и организационные особенности работы в рамках предмета изучения, сроки и формы оценки; • охарактеризовать сущность и значение изучаемого вопроса; • сформулировать теоретические основы рассматриваемых вопросов; • закрепить теоретические основы численными оценками. 	<p>Результаты учебной деятельности:</p> <ul style="list-style-type: none"> • формулируют назначение и задачи предмета изучения; • ориентируются в структуре рассматриваемого материала и формах оценки по учебной деятельности; • освещают поставленные в лекционном материале вопросы; • раскрывают методические и организационные особенности работы в рамках предмета изучения, сроки и формы оценки; • дают развернутую характеристику сущности предмета изучения и значения изучаемого вопроса; • формулируют теоретические основы рассматриваемых вопросов; • закрепляют теоретические основы численными оценками.
<i>Методы преподавания</i>	Лекция, беседа, мозговой штурм, техника «Пинборд»
<i>Формы преподавания</i>	Массовая, коллективная

<i>Средства преподавания</i>	Учебное пособие, текст лекций, проектор
<i>Условия преподавания</i>	Аудитория, приспособленная к применению ТСО
<i>Мониторинг и оценка</i>	Устный контроль: вопросы и ответы

ЛЕКЦИЯ 7

Акустическая релаксация

Модель технологии обучения

Время занятия 2 часа	Количество студентов: от 10 до 30
Форма занятия	Лекция
План лекции	4. Понятие акустической релаксации; 5. Виды акустической релаксации; 6. Время акустической релаксации.
Цели учебного занятия: предоставление понятия об акустической релаксации, ее видах и времени восстановления равновесия в системе.	
<p>Педагогические задачи:</p> <ul style="list-style-type: none"> • ознакомить с назначением и задачами предмета изучения; • дать обзор структуры рассматриваемого материала и рекомендуемой учебно-методической литературы; • осветить поставленные в лекционном материале вопросы; • раскрыть методические и организационные особенности работы в рамках предмета изучения, сроки и формы оценки; • охарактеризовать сущность и значение изучаемого вопроса; • сформулировать теоретические основы рассматриваемых вопросов; • закрепить теоретические основы численными оценками. 	<p>Результаты учебной деятельности:</p> <ul style="list-style-type: none"> • формулируют назначение и задачи предмета изучения; • ориентируются в структуре рассматриваемого материала и формах оценки по учебной деятельности; • освещают поставленные в лекционном материале вопросы; • раскрывают методические и организационные особенности работы в рамках предмета изучения, сроки и формы оценки; • дают развернутую характеристику сущности предмета изучения и значения изучаемого вопроса; • формулируют теоретические основы рассматриваемых вопросов; • закрепляют теоретические основы численными оценками.
Методы преподавания	Лекция, беседа, мозговой штурм, техника «Пинборд»
Формы преподавания	Массовая, коллективная

<i>Средства преподавания</i>	Учебное пособие, текст лекций, проектор
<i>Условия преподавания</i>	Аудитория, приспособленная к применению ТСО
<i>Мониторинг и оценка</i>	Устный контроль: вопросы и ответы

ЛЕКЦИЯ 8

Дифракция света на ультразвуке

Модель технологии обучения

Время занятия 2 часа	Количество студентов: от 10 до 30
Форма занятия	Лекция
План лекции	3. Общее понятие о дифракции света на ультразвуке; 4. Дифракция света на ультразвуке в жидкостях.
Цели учебного занятия: предоставление понятия о явлении дифракции лазерного излучения на ультразвуке, и применении этого явления в науке и технологии.	
Педагогические задачи: <ul style="list-style-type: none"> • ознакомить с назначением и задачами предмета изучения; • дать обзор структуры рассматриваемого материала и рекомендуемой учебно-методической литературы; • осветить поставленные в лекционном материале вопросы; • раскрыть методические и организационные особенности работы в рамках предмета изучения, сроки и формы оценки; • охарактеризовать сущность и значение изучаемого вопроса; • сформулировать теоретические основы рассматриваемых вопросов; • закрепить теоретические основы численными оценками. 	Результаты учебной деятельности: <ul style="list-style-type: none"> • формулируют назначение и задачи предмета изучения; • ориентируются в структуре рассматриваемого материала и формах оценки по учебной деятельности; • освещают поставленные в лекционном материале вопросы; • раскрывают методические и организационные особенности работы в рамках предмета изучения, сроки и формы оценки; • дают развернутую характеристику сущности предмета изучения и значения изучаемого вопроса; • формулируют теоретические основы рассматриваемых вопросов; • закрепляют теоретические основы численными оценками.
Методы преподавания	Лекция, беседа, мозговой штурм, техника «Пинборд»

<i>Формы преподавания</i>	Массовая, коллективная
<i>Средства преподавания</i>	Учебное пособие, текст лекций, проектор
<i>Условия преподавания</i>	Аудитория, приспособленная к применению ТСО
<i>Мониторинг и оценка</i>	Устный контроль: вопросы и ответы

ЛЕКЦИЯ 9

Распределение интенсивности светового излучения в дифракционных максимумах

Модель технологии обучения

<i>Время занятия</i> 2 часа	Количество студентов: от 10 до 30
<i>Форма занятия</i>	Лекция
<i>План лекции</i>	3. Уравнение распространения света в периодической среде. 4. Распределение интенсивности дифрагированного излучения по дифракционным порядкам.
Цели учебного занятия: предоставление понятия об основных закономерностях распределения интенсивности по дифракционным порядкам в явлении дифракции лазерного излучения на ультразвуке.	
<i>Педагогические задачи:</i>	<i>Результаты учебной деятельности:</i>
<ul style="list-style-type: none"> • ознакомить с назначением и задачами предмета изучения; • дать обзор структуры рассматриваемого материала и рекомендуемой учебно-методической литературы; • осветить поставленные в лекционном материале вопросы; • раскрыть методические и организационные особенности работы в рамках предмета изучения, сроки и формы оценки; • охарактеризовать сущность и значение изучаемого вопроса; • сформулировать теоретические основы рассматриваемых вопросов; • закрепить теоретические основы 	<ul style="list-style-type: none"> • формулируют назначение и задачи предмета изучения; • ориентируются в структуре рассматриваемого материала и формах оценки по учебной деятельности; • освещают поставленные в лекционном материале вопросы; • раскрывают методические и организационные особенности работы в рамках предмета изучения, сроки и формы оценки; • дают развернутую характеристику сущности предмета изучения и значения изучаемого вопроса; • формулируют теоретические основы рассматриваемых вопросов; • закрепляют теоретические основы

численными оценками.	численными оценками.
<i>Методы преподавания</i>	Лекция, беседа, мозговой штурм, техника «Пинборд»
<i>Формы преподавания</i>	Массовая, коллективная
<i>Средства преподавания</i>	Учебное пособие, текст лекций, проектор
<i>Условия преподавания</i>	Аудитория, приспособленная к применению ТСО
<i>Мониторинг и оценка</i>	Устный контроль: вопросы и ответы

ЛЕКЦИЯ 10

Дифракция Рамана-Ната

Модель технологии обучения

Время занятия 4 часа	Количество студентов: от 10 до 30
Форма занятия	Лекция
План лекции	4. Режим Рамана-Ната в явлении дифракции света на ультразвуке; 5. Специфические особенности дифракции Рамана-Ната; 6. Распределение интенсивности по дифракционным порядкам в режиме Рамана-Ната.
Цели учебного занятия: предоставление понятия о режиме Рамана-Ната в явлении дифракции лазерного излучения на ультразвуке и его специфических особенностях.	
Педагогические задачи: <ul style="list-style-type: none"> • ознакомить с назначением и задачами предмета изучения; • дать обзор структуры рассматриваемого материала и рекомендуемой учебно-методической литературы; • осветить поставленные в лекционном материале вопросы; • раскрыть методические и организационные особенности работы в рамках предмета изучения, сроки и формы оценки; • охарактеризовать сущность и значение 	Результаты учебной деятельности: <ul style="list-style-type: none"> • формулируют назначение и задачи предмета изучения; • ориентируются в структуре рассматриваемого материала и формах оценки по учебной деятельности; • освещают поставленные в лекционном материале вопросы; • раскрывают методические и организационные особенности работы в рамках предмета изучения, сроки и формы оценки; • дают развернутую характеристику сущности предмета изучения и значения

изучаемого вопроса; • сформулировать теоретические основы рассматриваемых вопросов; • закрепить теоретические основы численными оценками.	изучаемого вопроса; • формулируют теоретические основы рассматриваемых вопросов; • закрепляют теоретические основы численными оценками.
<i>Методы преподавания</i>	Лекция, беседа, мозговой штурм, техника «Пинборд»
<i>Формы преподавания</i>	Массовая, коллективная
<i>Средства преподавания</i>	Учебное пособие, текст лекций, проектор
<i>Условия преподавания</i>	Аудитория, приспособленная к применению ТСО
<i>Мониторинг и оценка</i>	Устный контроль: вопросы и ответы

ЛЕКЦИЯ 11

Дифракция Брэгга

Модель технологии обучения

Время занятия 4 часа	Количество студентов: от 10 до 30
Форма занятия	Лекция
План лекции	4. Режим Брэгга в явлении дифракции света на ультразвуке; 5. Специфические особенности дифракции Брэгга; 6. Распределение интенсивности по дифракционным порядкам в режиме Брэгга.
Цели учебного занятия: предоставление понятия о режиме Брэгга в явлении дифракции лазерного излучения на ультразвуке и его специфических особенностях.	
Педагогические задачи: • ознакомить с назначением и задачами предмета изучения; • дать обзор структуры рассматриваемого материала и рекомендуемой учебно-методической литературы; • осветить поставленные в лекционном материале вопросы; • раскрыть методические и организационные особенности работы в рамках предмета изучения, сроки и формы оценки;	Результаты учебной деятельности: • формулируют назначение и задачи предмета изучения; • ориентируются в структуре рассматриваемого материала и формах оценки по учебной деятельности; • освещают поставленные в лекционном материале вопросы; • раскрывают методические и организационные особенности работы в рамках предмета изучения, сроки и формы оценки; • дают развернутую характеристику

<ul style="list-style-type: none"> охарактеризовать сущность и значение изучаемого вопроса; сформулировать теоретические основы рассматриваемых вопросов; закрепить теоретические основы численными оценками. 	<p>сущности предмета изучения и значения изучаемого вопроса;</p> <ul style="list-style-type: none"> формулируют теоретические основы рассматриваемых вопросов; закрепляют теоретические основы численными оценками.
<i>Методы преподавания</i>	Лекция, беседа, мозговой штурм, техника «Пинборд»
<i>Формы преподавания</i>	Массовая, коллективная
<i>Средства преподавания</i>	Учебное пособие, текст лекций, проектор
<i>Условия преподавания</i>	Аудитория, приспособленная к применению ТСО
<i>Мониторинг и оценка</i>	Устный контроль: вопросы и ответы

ЛЕКЦИЯ 12

Гиперзвуковые волны в жидкостях

Модель технологии обучения

Время занятия 2 часа	Количество студентов: от 10 до 30
Форма занятия	Лекция
План лекции	<p>4. Гиперзвуковые акустические волны в жидкостях;</p> <p>5. Модуляция рассеянного света тепловыми волнами;</p> <p>6. Рассеяние Мандельштама-Бриллюэна.</p>
Цели учебного занятия: предоставление понятия о характерных особенностях волн гиперзвукового диапазона частот и их проявлении в спектре молекулярного рассеяния света.	
<p>Педагогические задачи:</p> <ul style="list-style-type: none"> ознакомить с назначением и задачами предмета изучения; дать обзор структуры рассматриваемого материала и рекомендуемой учебно-методической литературы; осветить поставленные в лекционном материале вопросы; раскрыть методические и организационные особенности работы в рамках предмета изучения, сроки и 	<p>Результаты учебной деятельности:</p> <ul style="list-style-type: none"> формулируют назначение и задачи предмета изучения; ориентируются в структуре рассматриваемого материала и формах оценки по учебной деятельности; освещают поставленные в лекционном материале вопросы; раскрывают методические и организационные особенности работы в рамках предмета изучения, сроки и формы оценки;

формы оценки; <ul style="list-style-type: none"> охарактеризовать сущность и значение изучаемого вопроса; сформулировать теоретические основы рассматриваемых вопросов; закрепить теоретические основы численными оценками. 	<ul style="list-style-type: none"> дают развернутую характеристику сущности предмета изучения и значения изучаемого вопроса; формулируют теоретические основы рассматриваемых вопросов; закрепляют теоретические основы численными оценками.
<i>Методы преподавания</i>	Лекция, беседа, мозговой штурм, техника «Пинборд»
<i>Формы преподавания</i>	Массовая, коллективная
<i>Средства преподавания</i>	Учебное пособие, текст лекций, проектор
<i>Условия преподавания</i>	Аудитория, приспособленная к применению ТСО
<i>Мониторинг и оценка</i>	Устный контроль: вопросы и ответы

ЛЕКЦИЯ 13

Взаимодействие электромагнитного излучения с фонами среды

Модель технологии обучения

Время занятия 4 часа	Количество студентов: от 10 до 30
Форма занятия	Лекция
План лекции	5. Флуктуации термодинамических величин в веществе; 6. Связь флуктуаций с рассеянием света; 7. Взаимодействие электромагнитного излучения с адиабатическими флуктуациями давления; 8. Рассеяние света на акустических фонах.
Цели учебного занятия: предоставление понятия о особенностях взаимодействия электромагнитного излучения с фонами среды, и применении явления рассеяния света для изучения гипер акустических параметров жидкостей.	
Педагогические задачи: <ul style="list-style-type: none"> ознакомить с назначением и задачами предмета изучения; дать обзор структуры рассматриваемого материала и рекомендуемой учебно-методической литературы; осветить поставленные в лекционном 	Результаты учебной деятельности: <ul style="list-style-type: none"> формулируют назначение и задачи предмета изучения; ориентируются в структуре рассматриваемого материала и формах оценки по учебной деятельности; освещают поставленные в лекционном материале вопросы;

<p>материале вопросы;</p> <ul style="list-style-type: none"> • раскрыть методические и организационные особенности работы в рамках предмета изучения, сроки и формы оценки; • охарактеризовать сущность и значение изучаемого вопроса; • сформулировать теоретические основы рассматриваемых вопросов; • закрепить теоретические основы численными оценками. 	<ul style="list-style-type: none"> • раскрывают методические и организационные особенности работы в рамках предмета изучения, сроки и формы оценки; • дают развернутую характеристику сущности предмета изучения и значения изучаемого вопроса; • формулируют теоретические основы рассматриваемых вопросов; • закрепляют теоретические основы численными оценками.
<i>Методы преподавания</i>	Лекция, беседа, мозговой штурм, техника «Пинборд»
<i>Формы преподавания</i>	Массовая, коллективная
<i>Средства преподавания</i>	Учебное пособие, текст лекций, проектор
<i>Условия преподавания</i>	Аудитория, приспособленная к применению ТСО
<i>Мониторинг и оценка</i>	Устный контроль: вопросы и ответы

IV. ТЕХНОЛОГИЧЕСКАЯ КАРТА ЛЕКЦИОННОГО ЗАНЯТИЯ

<i>Этапы и время работы</i>	<i>Содержание деятельности</i>	
	<i>Преподаватель</i>	<i>Студенты</i>
Подготовительный этап	<p>1. Подготовка содержания занятия по теме лекции.</p> <p>2. Подготовка необходимых слайдов презентации по материалу лекции.</p> <p>3. Подготовка материалов для контроля усвоения знаний и заданий для самостоятельной работы.</p>	
1. Введение в тему лекции (10 минут)	<p>1.1. Сообщает тему лекции. Даёт о ней первое целостное представление, раскрывает методические и организационные особенности работы в рамках темы.</p> <p>1.2. Выводит на экран структурную логическую схему лекции, дает список вопросов для рассмотрения и их краткую характеристику. Представляет список рекомендуемой литературы и комментирует его.</p> <p>1.4. Предлагает методом мозгового штурма назвать понятия, уже известные по данной теме.</p> <p>1.5. Записывает все поступающие предложения на доске.</p>	<p>Слушают</p> <p>Слушают</p> <p>Называют понятия</p>
2. Основной этап (60 минут)	<p>2.1. С помощью программы PowerPoint демонстрируется и комментируется слайды и тем самым раскрываются основные теоретические аспекты.</p> <p>2.2. В виде схем разъясняет структура излагаемого материала. Формулирует понятие и сущность темы.</p> <p>2.2. Объясняет с помощью слайдов концепцию теории темы изучения.</p> <p>2.3. Делая выводы по каждому пункту темы, акцентирует внимание на особенно важных моментах.</p> <p>2.4. Предлагает вернуться к перечню ключевых понятий темы, представленных на доске. Совместно со студентами уточняет их перечень, повторяющуюся информацию здесь же исключают (техника «Пинборд»), исключают не имеющие отношение к предмету, добавляет необходимые ключевые понятия и термины.</p>	<p>Слушают, записывают</p> <p>Задают вопросы</p> <p>Обсуждают ключевые понятия. Всю информацию структурируют и переносят в конспекты</p>
3. Заключительный этап	<p>3.1. Делает заключительный вывод по рассмотренным вопросам темы, последовательно комментируя результаты работы.</p> <p>3.2. Анализирует и оценивает деятельность</p>	<p>Слушают и задают</p>

(10 минут)	<p>студентов и степень достижения поставленной цели.</p> <p>3.3. Сообщает, что рассмотрение оставшихся вопросов темы будет продолжено на следующем лекционном занятии.</p> <p>3.4. Дает задание для самостоятельной работы:</p> <p>(1) ответить на контрольные вопросы.</p> <p>(2) выполнить задания для самостоятельной работы.</p>	<p>вопросы</p> <p>Записывают задания</p>
------------	--	--

**V. МОДЕЛЬ ТЕХНОЛОГИИ ОБУЧЕНИЯ:
ПРАКТИЧЕСКОЕ (СЕМИНАРСКОЕ) ЗАНЯТИЕ**

<i>Время занятия</i> 2 часа	Количество студентов: от 10 до 30
<i>Форма занятия</i>	Практическое (семинарское) занятие по расширению и углублению знаний
<i>План практического (семинарского) занятия</i>	<ol style="list-style-type: none"> 1. Введение в содержание темы занятия; 2. Формулирование познавательных заданий 3. Решение учебных заданий в группах 4. Презентация результатов, обсуждение итогов и оценка.
<i>Цель учебного занятия:</i> Сформировать навыки применения полученных знаний по теме в процессе решения учебных заданий.	
<p><i>Педагогические задачи:</i></p> <ul style="list-style-type: none"> • охарактеризовать понятие и сущность темы занятия, ее основные этапы развития; • объяснить концепцию теории предмета изучения, раскрыть место предмета в современной науке технике; • раскрыть содержание учебных заданий и последовательность процесса анализа и решения их; • стимулировать самостоятельное решение вопросов задания с формулированием общего результата групповой работы. 	<p><i>Результаты учебной деятельности:</i></p> <ul style="list-style-type: none"> • формулируют понятия и сущности темы занятия, ее основные этапы развития; • характеризуют концепцию теории предмета изучения, раскрывают место предмета в современной науке технике; • характеризуют суть учебных заданий и ход их решения; • самостоятельно решают вопросы учебного задания и формулируют общий результат работы.
<i>Методы обучения</i>	Блиц-опрос, техника графических органайзеров, метод учебных заданий

Формы обучения	Фронтальная работа, работа в группах.
Средства обучения	Текст лекций, учебный материал, листы бумаги А4, маркеры, скотч, УМК студента
Условия обучения	Аудитория с техническим оснащением, приспособленная для организации групповой работы
Мониторинг и оценка	Наблюдение, устный контроль: вопросно-ответная форма, письменный контроль: решение учебных заданий

VI. ТЕХНОЛОГИЧЕСКАЯ КАРТА ПРАКТИЧЕСКОГО (СЕМИНАРСКОГО) ЗАНЯТИЯ

<i>Этапы и время работы</i>	<i>Содержание деятельности</i>	
	<i>преподаватель</i>	<i>обучающиеся</i>
Подготовительный этап	<p>Определяет тему, ставит образовательные цели и планирует учебные результаты.</p> <p>Разрабатывает познавательные учебные задания (дифференцированные), которые соответствуют поставленной образовательной цели.</p> <p>Подготавливает для групп – письменные инструкции, обеспечивающие эффективную внутригрупповую работу.</p>	
1 этап Введение в учебное занятие (15 минут)	<p>1.1.Сообщает тему занятия, его цели и планируемые результаты, обосновывает их значимость и актуальность. Объявляет, что обучение будет проводиться с применением технологии совместной работы в группах.</p> <p>1.2.Актуализирует знания студентов в форме беседы по вопросам, предполагающим содержательные ответы. В процессе актуализации знаний выявляет достаточность усвоенных студентами знаний, необходимых для активного участия в поисковой деятельности по решению учебного задания.</p> <p>1.3. Задает вопросы. Выслушивает 1-2 ответа и объявляет, что дальнейшее обсуждение темы будет проводиться после выполнения задания в группах, в процессе презентации результатов групповой работы.</p>	<p>Слушают</p> <p>Отвечают на вопросы</p>
2 этап Основной (55 минут)	<p>2.1. Разбивает студентов на три группы. Раздает учебные задания, объясняет, какие результаты ожидаются по завершению работы.</p> <p>2.2. Сообщает о формах представления результатов совместной деятельности в группах. Вывешивает инструкцию по</p>	<p>Делятся на группы.</p> <p>Знакомятся с учебным материалом, инструкцией.</p>

	<p>выполнению группового задания на доске. Комментирует критерии оценки результатов каждого и групп в целом. Разъясняет, какими дополнительными материалами можно пользоваться при выполнении заданий</p> <p>2.3. Организует работу в группах. Выступает в качестве наблюдателя. Но при этом: контролирует работающие группы, но не руководит ими; обращает внимание на индивидуальную работу, формирование умений, необходимых для выполнения конкретного задания. Задаёт вопросы с целью узнать, насколько проделана работа по решению заданий; комментируют ход работы студентов, даёт им конкретную информацию, касающуюся оценки их достижений. Делает конкретные замечания.</p> <p>2.6. Объявляет о начале презентации. Назначает представителей групп для сообщения о результатах работы совместного обсуждения и оценки.</p> <p>2.7. Организует взаимопроверку результатов работы групп для определения усвоения в ходе выполнения заданий материала.</p>	<p>Планируют работу в группе. Распределяют вопросы задания внутри группы. Индивидуально выполняют их. Обсуждают индивидуальные результаты. Формируют общий результат групповой работы по учебному заданию и готовят его к презентации. Представители групп сообщают о результатах работы. Каждая группа готовит и задаёт вопросы другой группе для взаимопроверки</p>
<p>3 этап Заключительный (10 минут)</p>	<p>3.1. Анализирует результаты работы групп и подводит итоги выполнения заданий.</p> <p>3.2. Делает вывод о достижении поставленной цели.</p> <p>3.3. Дает задание для самостоятельной работы: (1) отработать учебный материал по теме с помощью техники «Инсерт».</p>	<p>Слушают</p> <p>Записывают задание</p>

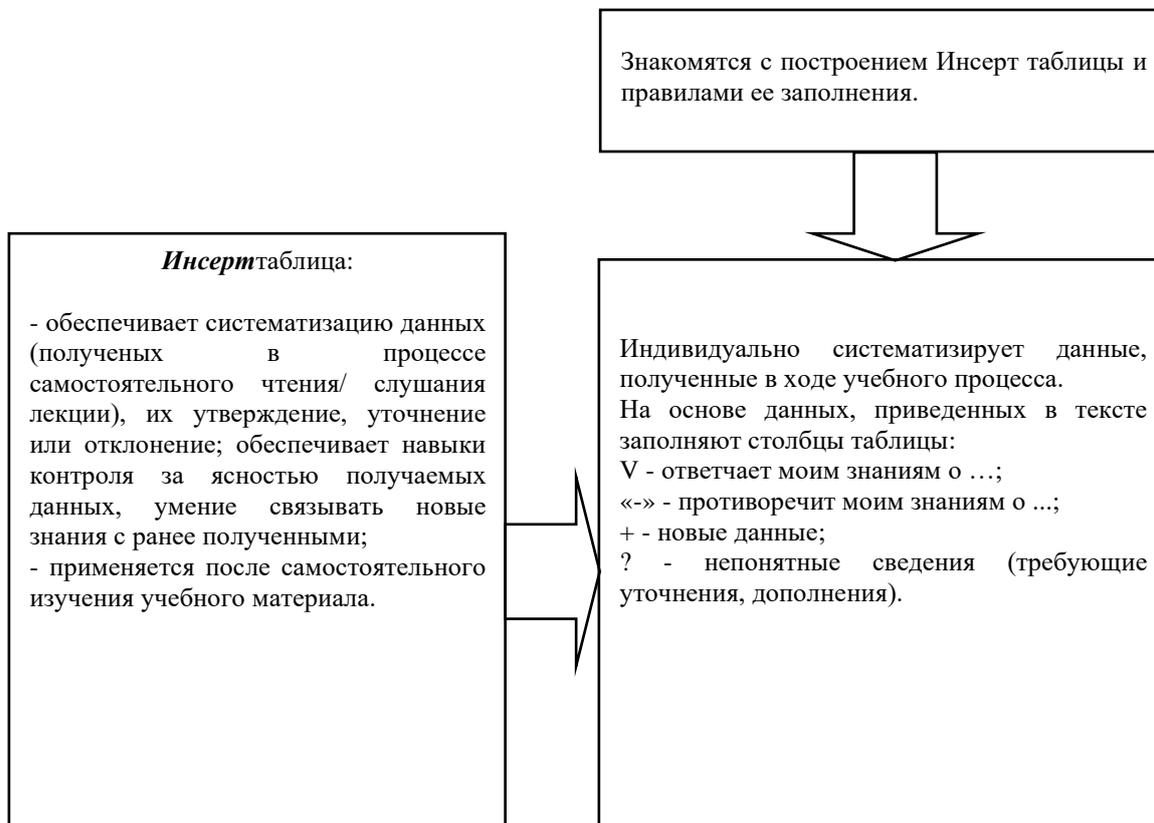
VII. ПРИЛОЖЕНИЕ

1. Таблица оценки работы групп

Группа	Полнота и четкость ответа (0,5)	Наглядность представленной информации (0,3)	Активность каждого члена группы (0,2)	Общая сумма баллов	Оценка
1					
2					
3					

Каждая группа оценивает выступление других групп, суммируя баллы по критериям. Оценка, полученная группой, определяет оценку каждого члена группы: 0,8 – 1 балл - «отлично»; 0,5 – 0,7 – «хорошо»; 0,4 – 0,2 – «удовлетворительно»; менее 0,2 баллов – «плохо».

2. Инсерт таблица и работа с ней



3. Критерии оценки результатов индивидуальной работы

Ф.И.О.	Содержательность, конкретность ответа (0,3)	Вопросы другим (0,1)	Дополнения (0,1)	Общая сумма баллов	Оценка
1					
2					
3					
...					
n					

4. Ролевая инструментовка семинара-дискуссии

Ведущий получает все полномочия обучающего – руководит ходом обсуждения, следит за аргументированностью доказательств или опровержений, точностью использования понятий и терминов, корректностью общения и пр. Строго следит за регламентом выступлений.

Рецензент в целом характеризует выступление и отмечает положительные стороны доклада по критериям: актуальность, последовательность, логика и ясность изложения, четкая формулировка выводов.

5. Порядок и регламент проведения дискуссии

1. **Ведущий** объявляет тему доклада и предоставляет слово докладчику.
 2. **Доклад** продолжается до 8 мин.
 3. **Рецензент** выступает до 5 мин.
- Коллективное обсуждение до 10 мин

6. Критерии оценки групповой работы

Группа	Критерии оценки	
	Выступление (аргументированность вывода)	Решение проблемного задания (правильность, последовательность)
	Отлично – 0.4 балла	Отлично – 0.6 балла
	Хорошо – 0,2 балла	Хорошо – 0,5 балла
	Удовлетворительно – 0.3 балла	Удовлетворительно – 0.4 балла
	Плохо – 0,2 балла	Плохо – 0,3 балла
1		
2		
3		

7. Критерии оценки участников дискуссии

Критерии оценки (в баллах)	Докладчики			
	1	2	3	4
1.Содержание доклада (0,5): -актуальность; -последовательность, логика и ясность изложения; -четкая формулировка выводов; 2.Новизна используемой информации (0,2); 3.Использованные средства представления информации (0,2); 4.Соблюдение регламента (0,1).				
Итого:				
	Рецензенты			
	1	2	3	4
1.Дополнения к докладу (0,3); 2. Выявление сильных и слабых мест доклада (0,7).				
Итого:				
	Участники дискуссии			
1.Вопросы: количество (0,2 за каждый) 2.Дополнения (0,3)				
Итого:				

8. Правила работы с применением техники «Инсерт»

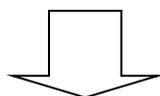
1. Прочитайте текст лекции с применением следующей системы отметок на полях текста:

V - соответствует имеющимся знаниям (информации) о...

- (минус)- противоречит имеющимся знаниям о...

+ (плюс)- является новой информацией

? - непонятная/требующая уточнения/дополнения информация



2. Систематизируйте полученную информацию в виде таблицы:

Вопрос темы	V	-	+	?
1.				
2.				
3.				
4.				

АДАБИЁТЛАР

Асосий

1. Фабелинский И.Л., Молекулярное рассеяние света, М.:Наука,.1970.
2. Вукс М.Ф., Рассеяния света в газах, жидкостях и растворах, Изд. ЛГУ, 1977.
3. Ультразвук. "Маленькая энциклопедия", М., 1979.
4. Физическая акустика, (под редакцией. У Мэзона), том VI, М.: Мир, 1993.
5. Волькенштейн М.В., Молекулярная оптика, М., 1951.
6. Ноздрев В.Ф., Молекулярная акустика, Изд. "Высшая школа", М., 1974.
7. Вукс М.Ф., Электрические и оптические свойства молекул и конденсированных сред, Л., 1987.

