

МОСКОВСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ

им. М. В. ЛОМОНОСОВА

МЕЖДУНАРОДНЫЙ УЧЕБНО-НАУЧНЫЙ ЛАЗЕРНЫЙ ЦЕНТР

На правах рукописи

УДК 534.212+534.232

КОЖУШКО ВИКТОР ВЛАДИМИРОВИЧ

**ЛАЗЕРНАЯ ОПТИКО-АКУСТИЧЕСКАЯ ДИАГНОСТИКА
СЛОИСТЫХ СРЕД**

01.04.06 - акустика

АВТОРЕФЕРАТ

диссертация на соискание ученой степени

кандидата физико-математических наук

Москва 2004

Работа выполнена в Международном учебно-научном лазерном центре Московского государственного университета им. М. В. Ломоносова

Научные руководители: доктор физ.-мат. наук, доцент
Карабутов Александр Алексеевич

доктор физ.-мат. наук, профессор
Митюринч Георгий Семенович

Официальные оппоненты: доктор физ.-мат. наук, профессор
Егерев С. В.

кандидат физ.-мат. наук, доцент
Петровский А. Н.

Ведущая организация: Центр волновых исследований РАН

Защита диссертации состоится "16" сентября 2004 г. в 15 часов на заседании диссертационного совета Д.501.001.67 на физическом факультете Московского государственного университета им. М. В. Ломоносова по адресу: 119992, г. Москва, ГСП, Ленинские горы, МГУ, физический факультет ЦФА

С диссертацией можно ознакомиться в научной библиотеке физического факультета МГУ им. М. В. Ломоносова

Автореферат разослан "2" июля 2004 года

Ученый секретарь
диссертационного совета
кандидат физ.-мат. наук,
доцент

Королев А. Ф.

Актуальность темы диссертации

В современных технологиях все большее практическое применение находят структуры, построенные из материалов, имеющих различные физические свойства, например, графэпоксидные композиты — легкие и прочные конструкционные материалы, представляющие собой пространственную структуру из графитных волокон в отвердевшем полимере. Для безопасного использования композитов в конструкциях необходимы методы неразрушающего контроля их механических свойств, которые должны применяться как на этапе производства, так и в процессе эксплуатации.

Диагностика неоднородностей механических свойств конструкций и материалов в машиностроении эффективно проводится средствами ультразвуковой эхоскопии. Возбуждение и регистрация зондирующих импульсов происходит пьезоэлектрическими преобразователями в результате последовательного переключения режимов работы с использованием прямого и обратного пьезоэффекта. Минимальные размеры обнаруживаемых неоднородностей определяются рабочей полосой частот, которая связана с резонансами преобразователя и, как правило, не превышает 10 МГц. Большой разброс масштабов неоднородностей в композитах, от долей миллиметра до десятка микрометров, и повышенные требования к качеству материал в свою очередь делает необходимым проведение диагностики в более широкой полосе частот (вплоть до 100 МГц). Вследствие этого повышаются требования к уже существующим средствам и стимулируется поиск новых методов неразрушающего контроля пространственно-неоднородных сред. Для решение данных задач представляется перспективным применение широкополосных ультразвуковых импульсов, возбуждаемых в результате оптико-акустического (ОА) эффекта.

Поглощение короткого лазерного импульса приводит к появлению в среде распределенных источников тепла, локальному изменению температуры, которое вызывает термоупругие напряжения. Напряжения снимаются в результате возбуждения импульса давления – ОА сигнала. В общем случае результирующий ОА сигнал определяется параметрами лазерного излучения такими как: длительность импульса и форма временной огибающей интенсивности, – а также оптическими, теплофизическими и механическими свойствами поглощающей и граничащей с ней сред. Регистрация результирующего ОА сигнала проводится пьезоэлектрическими приемниками или оптическими методами. По форме и спектру ОА сигнала можно восстановить оптические, теплофизические и механические свойства сред.

В прикладных задачах неразрушающего контроля механических свойств возбуждаемый ультразвуковой импульс может быть использован для зондирования конструк-

ционных материалов и изделий. Зондирующий ультразвуковой импульс возбуждается непосредственно в исследуемой среде, или акустически связанной с ней, специально подобранной среде — ОА излучателе. Лазерные импульсы длительностью порядка 10 наносекунд могут быть использованы для диагностики неоднородностей механических свойств в полосе частот до 100 МГц. Возможна прямая и косвенная регистрация, в первом случае регистрируется ультразвуковой импульс, прошедший исследуемый объект, во втором случае — рассеянный назад.

Спектр или форма регистрируемых сигналов несут в себе информацию о результате взаимодействия импульса давления с механическими неоднородностями среды. При регистрации ультразвукового импульса, прошедшего исследуемую среду, можно определить спектр пропускания, дисперсию скорости звука, и связанные с ними характеристики, что используется в методе широкополосной ультразвуковой спектроскопии при исследовании поглощающих и неоднородных сред. Амплитуда зондирующего импульса давления пропорциональна плотности мощности лазерного импульса и может варьироваться в широких пределах, что расширяет динамический диапазон измерений. Применение предельно демпфированных пленочных пьезополимерных приемников позволяет регистрировать сигналы с высоким временным разрешением в широкой полосе частот от десятков килогерц до десятков мегагерц, при этом масштабы обнаруживаемых неоднородностей составляют от десятков микрон до миллиметров.

Возбуждение ультразвуковых волн лазерными импульсами происходит в результате преобразование энергии оптического излучения в механические напряжения (через изменение температуры). Естественно, что имеющиеся в среде неоднородности оптических, теплофизических и механических свойств оказывают непосредственное влияние на результирующий ОА сигнал. Таким образом, ОА методы могут быть использованы для диагностики структур и материалов с различными типами неоднородностей.

Одним из актуальных направлений неразрушающего контроля является измерение остаточных напряжений металлов. Такие напряжения возникают после технологических операций: сварки, механического или термического упрочнения. Возникающие в металлах структурные изменения (механических и теплофизических свойств) происходят на глубине в сотни микрон от поверхности и могут быть исследованы также в рамках одномерной модели. Представляется перспективным исследование остаточных напряжений тепловыми волнами. Так как в металлах поглощение излучения оптического диапазона происходит на глубине в десятки нанометров, то в тонком приповерхностном слое локализуются источники тепла. В термоволновом приближении неоднородности теплофизических свойств, вызванные остаточными напряжениями, оказывают непосредственное влияние на процесс диффузии тепла. На сегодняшний день метода-

ми фототепловой радиометрии показана возможность восстановления распределения теплофизических свойств по глубине материалов по амплитудно-фазовым частотным характеристикам, полученным фотоакустическими методами. В фотоакустических методах тепловые волны возбуждаются в результате облучения поверхности исследуемого образца оптическим излучением, гармонически модулированным по интенсивности. Методы ОА диагностики могут быть использованы для дальнейшего развития полученных результатов, так как при импульсном воздействии можно восстановить частотную передаточную функцию среды в значительно более широкой полосе частот.

Последние десять лет интенсивно развивается термоакустическая и ОА томография биологических тканей. Возможность неинвазивной диагностики при высоком контрасте оптического поглощения делают методы ОА томографии перспективными для восстановления пространственных неоднородностей поглощения. Особенно актуальны задачи ОА томографии для применения в области медицинских исследований, связанных с ранней диагностикой раковых заболеваний. Так как возбуждающее излучение взаимодействует с оптическими неоднородностями, наиболее ярко характеризующими изменения в тканях, а информация о результате взаимодействия передается ультразвуковыми волнами, испытывающими незначительные искажения в процессе распространения. Теоретически и экспериментально показано, что в случае одномерной модели временной фронт возбуждаемого ОА сигнала повторяет пространственное распределение тепловых источников в среде. На сегодняшний день решаются задачи двумерной и трехмерной томографии, что требует усовершенствования средств регистрации и развития численных алгоритмов по восстановлению пространственного распределения неоднородностей поглощения.

Поэтому требуется развитие численных методов, позволяющих аппроксимировать результаты измерений расчетами, полученными для модельных сред с известным распределением свойств. Слоистые структуры являются наиболее простой моделью. Пространственные неоднородности свойств таких структур могут быть исследованы в рамках одномерной модели, что существенно упрощает анализ. Решение задачи ОА преобразования удобно проводить методом частотных передаточных функций, позволяющим разделить влияние параметров возбуждающего лазерного импульса и свойств сред на результирующий ОА сигнал.

Целью настоящей работы является теоретическое и экспериментальное исследование возбуждения, распространения и регистрации ультразвуковых волн в одномерных пространственно-неоднородных средах применительно к ОА методам диагностики и неразрушающего контроля.

Цели настоящей работы

1. Решение задачи о термоакустическом возбуждении продольных ультразвуковых волн в одномерной слоистой структуре с определением поля давления акустических волн в отдельных слоях.
2. Диагностика одномерных пространственно-периодических структур методом широкополосной акустической спектроскопии с лазерными термооптическими источниками ультразвука.
3. Решение задачи об интерференции встречных плоских волн в поглощающих средах на примере пластинки и одномерной периодической структуры.
4. Поэтапный расчет частотной передаточной функции оптико-акустического преобразования в одномерной пространственно-неоднородной среде с заданным распределением оптических и теплофизических свойств.
5. Диагностика теплофизических свойств и толщины субмикронной металлической пленки на кварцевой подложке оптико-акустическим методом.

Научная новизна

1. Проведен поэтапный расчет прямой задачи оптоакустики для одномерных неоднородных сред, с заданным распределением оптических, теплофизических и механических свойств, на основе связанных систем уравнений, выражающих условия непрерывности на границах слоев.
2. Решена задача интерференции встречных продольных акустических волн в одномерной слоистой структуре. Показано, что в этом случае возможна диагностика нарушений периодичности структуры невыявляемых при наличии только одной падающей на структуру волны.
3. Измерение толщины субмикронной металлической пленки на прозрачной подложке методом лазерной оптико-акустической спектроскопии, использующим наносекундные возбуждающие лазерные импульсы и пьезоэлектрическую регистрацию.

Практическая ценность

1. Численный расчет частотной передаточной функции ОА преобразования для одномерных слоистых сред в совокупности с широкополосной акустической спек-

троскопией с лазерными источниками ультразвука может быть использован для неразрушающего контроля и визуализации подповерхностной структуры неоднородных материалов, а также биологических тканей.

2. Результаты исследования передаточной функции ОА преобразования в системе подложка – хромовая пленка – жидкость могут быть использованы при разработке методов диагностики и неразрушающего контроля, определения теплофизических параметров тонкопленочных покрытий.

Защищаемые положения

1. Анализ зонной структуры спектров пропускания ультразвука, рассчитанных теоретически и измеренных методом широкополосной акустической спектроскопии с лазерными источниками ультразвука, позволяет осуществлять диагностику нарушений периодичности одномерных слоистых структур.
2. Интерференция встречных продольных акустических волн позволяет различить одномерные поглощающие периодические структуры, спектры пропускания ультразвука которых являются инвариантными относительно пространственного положения источника и приемника.
3. Частотная передаточная функция оптико-акустического преобразования в слоистой среде с оптическими, теплофизическими и механическими неоднородностями находится в результате поэтапного численного решения связанных систем уравнений, выражающих условия непрерывности полей на границах слоев.
4. Возбуждение оптико-акустических сигналов наносекундными лазерными импульсами и анализ спектральной передаточной функции термооптического преобразования в полосе частот 1–100 МГц позволяют измерять толщину субмикронных и микронных металлических пленок на оптически прозрачной подложке.

Личный вклад соискателя

Все результаты представленные в работе получены соискателем лично либо в соавторстве при его непосредственном участии.

Апробация работы и публикации

Результаты диссертационной работы докладывались и обсуждались на международных конференциях "Optics of Crystals" (Мозырь, Беларусь, 2000), "Workshop "Molecular acoustics and Photothermics" (Гливице, Польша, 2000, 2002), Международной конференции "Механика композитных материалов" (Рига, Латвия, 2000), "11-ой Сессия РАО" (Россия, Москва 2001), 16-ом международном симпозиуме по нелинейной акустике (Россия, Москва, 2002), на семинаре кафедры общей физики и волновых процессов МГУ им. М. В. Ломоносова .

Основные результаты работы опубликованы в работах [1–17].

Структура и объем диссертации

Работа состоит из введения, четырех глав, заключения и списка литературы. Объем диссертации 124 страницы, в том числе рисунков 27, 1 таблица. Список литературы включает 132 наименований.

Содержание диссертации

Во введении показана актуальность и перспективность применения ОА и родственных методов для решения задач диагностики и неразрушающего контроля, а также в медицинских приложениях. Сформулированы цели и задачи работы. Кратко изложено содержание диссертации.

В первой главе проводится обзор литературы по диагностике и неразрушающему контролю пространственно-неоднородных сред, в том числе многослойных структур фотоакустическими и оптико-акустическими методами; подчеркиваются преимущества, получаемые при применении ОА методов для диагностики и неразрушающего контроля широкого круга материалов с различными типами неоднородностей; обсуждаются результаты диагностики биологических тканей, полученные с помощью ОА методов.

Во второй главе рассматривается распространение продольных акустических волн в слоистых средах. Теоретически рассчитываются и экспериментально определяются спектры пропускания одномерных периодических структур (ПС). Приводится схема экспериментальной установки, и описывается метод широкополосной ультразвуковой спектроскопии с лазерными источниками ультразвука для диагностики пространственно-неоднородных сред. Сравняются полученные теоретические и экспериментальные результаты.

§2.1. Рассмотрена одномерная модель акустически пространственно-неоднородной среды, представленной в виде многослойной структуры, у которой изменения свойств в пределах слоя незначительны. При нормальном падении плоской ультразвуковой волны в каждом слое существует две распространяющиеся навстречу друг другу продольные акустические волны. На основе условий непрерывности спектральных составляющих колебательной скорости частиц и давления на границах слоев структуры, толщины и свойства которых известны, возможно определение поля акустической волны в каждом ее слое, в том числе и при наличии распределенных источников. Для этого записывается система из $2N+2$ связанных линейных уравнений (N общее число слоев), которую можно представить в виде произведения матрицы свойств и столбца неизвестных амплитуд давления в отдельных слоях. Результат произведения равен столбцу, описывающему распределенные источники. Решения такой системы уравнений выполняется численно, например, методом Гаусса. При этом, ввиду общности подхода, данный метод может быть использован для решения задач связанных с распространением электромагнитных, тепловых и акустических волн в слоистых структурах с произвольным распределением неоднородностей при наличии распределенных источников, что представляется удобным для поэтапного решения прямой оптико-акустической задачи.

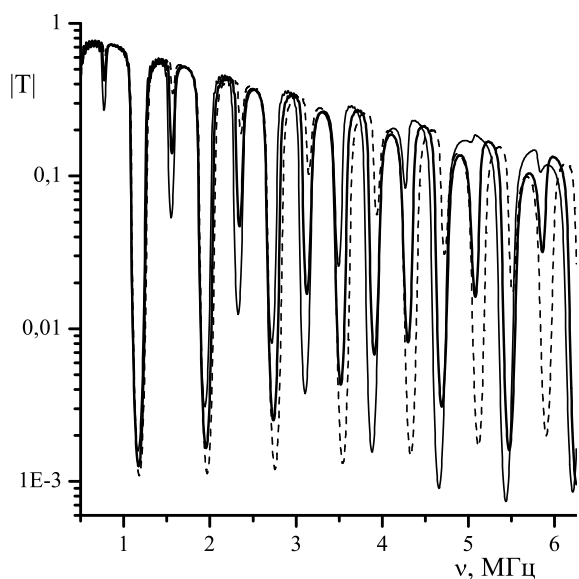


Рис. 1. Спектры пропускания ПС, состоящих из 10 слоев оргстекла и воды с периодом равным 2,6 мм, толщина оргстекла равна 1,57 мм (сплошная), 1,6 мм (жирная), 1,63 мм (прерывистая).

для волн меньшей длины в результате изменения периода структуры. Рассчитаны спектры пропускания ПС, содержащей модельный дефектный слой — удаленный слой орг-

§2.2. С помощью метода, изложенного в §2.1, рассчитаны спектры пропускания ультразвука одномерной ПС, состоящей из чередующихся слоев воды и слоев оргстекла. Для полосы частот 0.5 - 6 МГц проведены расчеты спектров пропускания таких структур с учетом поглощения в оргстекле. Показано, что спектры пропускания структур с фиксированным периодом, но различными соотношениями толщин слоев, образующих период структуры, различны. При этом наибольшие отличия наблюдаются в коротковолновой области, в полосе частот 2 - 6 МГц, где в спектре изменяется положение полос прозрачности и непрозрачности (см. рис. 1).

Это объясняется большим набегом фазы

стекла. Показано, что наличие дефекта в структуре приводит к появлению в спектре в областях непрозрачности локальных максимумов пропускания, положение и амплитуда которых зависит от положения дефектного слоя в структуре. Амплитуды локальных максимумов отличаются в большей мере в области низких частот, что объясняется более низким поглощением. Результаты расчетов могут быть использованы для выявления регулярных и нерегулярных изменений в ПС.

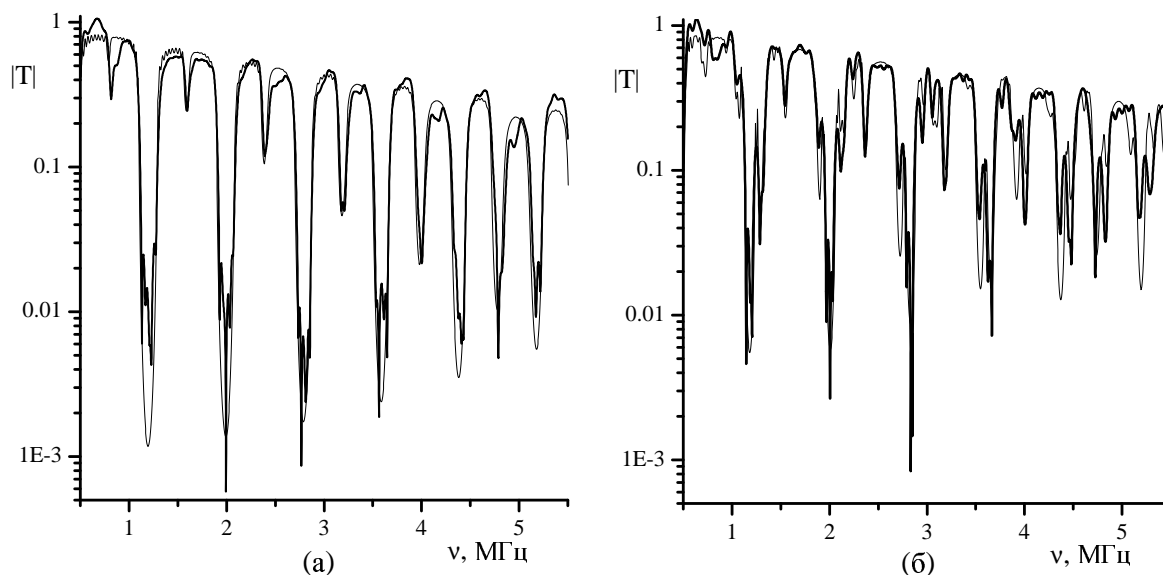


Рис. 2. Экспериментально полученные спектры пропускания акустических волн (жирная линия), (а) — ПС, состоящей из 10 слоев оргстекла и воды, (б) — та же структура с удаленными 5-ым и 8-ым слоями, тонкая линия — рассчитанные спектры таких структур с параметрами слоев оргстекла ($d_1 = 1,62$ мм, $\rho_1 = 1,2$ г/см³, $c_1 = 2,63$ мм/мкс) и воды ($d_2 = 0,98$ мм, $\rho_2 = 1$ г/см³, $c_2 = 1,49$ мм/мкс).

§2.3. Приводится схема и описание экспериментальной установки, использующей метод ультразвуковой широкополосной спектроскопии с лазерными термооптическими источниками. С помощью данного метода измерены спектры пропускания ультразвука одномерных ПС, образованных 10 слоями оргстекла, помещенными в дистиллированную воду. Полученный экспериментально спектр (жирная линия рис. 2 а) был аппроксимирован теоретическим спектром, полученным путем вариаций толщин слоев, образующих период, в пределах точности их изготовления (тонкая линия). Затем в структуре были удалены 5-ый и 8-ой слои оргстекла и тем самым созданы дефекты. Теоретически рассчитанный спектр пропускания такой структуры соответствует экспериментальному в пределах ошибки измерений (рис. 2 б). Хорошее соответствие теоретических и экспериментальных результатов показывает возможность проведения диагностики слоистых сред методами лазерной широкополосной ультразвуковой спектроскопии, при динамическом диапазоне более 40 дБ, который обеспечивается использованной установкой.

Из решения связанной системы уравнений, теоретически рассчитана спектральная чувствительность пьезоэлектрических приемников на основе ПВДФ пленки с учетом тыльной нагрузки и экранирующего слоя. Экспериментально измеренные спектральные чувствительности приемников из ПВДФ пленки хорошо согласуются с результатами расчета.

В главе 3, на примере одиночной пластинки и ПС, рассматривается интерференция встречных продольных акустических волн в поглощающих средах. Для поглощающей пластинки, получены условия появления экстремумов амплитуды прошедшей волны. Показано, что при изменении амплитуды и фазы встречной волны возможна диагностика нарушений периодичностей структуры, не обнаруживаемых при наличии только одной падающей на структуру волны.

§3.1. Рассмотрен случай нормального падения встречных акустических волн на плоскопараллельную поглощающую пластинку. Давление в пластинке представлено как суперпозиция двух волн, распространяющихся в противоположных направлениях с учетом многократных переотражений. Из системы уравнений, выражающей условия непрерывности давления и колебательной скорости частиц на границах пластинки, определяются неизвестные амплитуды волн давления, зависящие от разности фаз и соотношения амплитуд между падающими на пластинку извне волнами. Показано, что наличие встречной волны, падающей на пластинку, позволяет управлять интерференционным потоком в широкой полосе частот. Получены условия для экстремумов пропускания амплитуды проходящей волны при фиксированном общем потоке энергии, подводимом к пластинке.

§3.2. Рассмотрена интерференция встречных продольных волн в одномерной ПС, состоящей из чередующихся слоев оргстекла и воды. Как отмечено в §2.2, удаление слоя оргстекла в такой структуре приводит к значительному изменению спектра пропускания в полосе непрозрачности, а именно: к появлению локального максимума. Теоретически показано, что при однонаправленном распространении спектры пропускания ПС с таким дефектом инвариантны к пространственному положению источника и приемника, в силу теоремы взаимности. Эта неоднозначность спектра пропускания препятствует решению задачи по определению положения дефектного слоя в структуре. Включение встречного источника позволяет различить такие структуры. Так, на рис. 3 показано изменение спектра результирующей волны давления, распространяющейся от ПС, в полосе непрозрачности при различных отношениях амплитуд падающих волн. Таким образом, анализируя зависимости амплитуд локального максимума в области непрозрачности ($3,35 \div 3,55$ МГц) от амплитуды и разности фаз между падающими волнами, можно определить положение дефектного слоя.

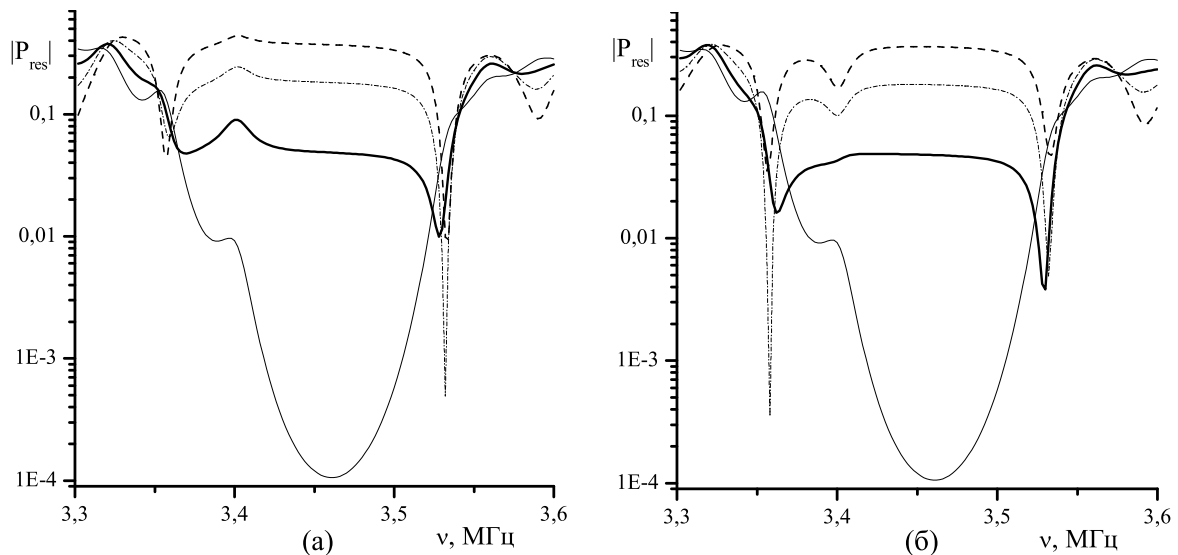


Рис. 3. Спектр амплитуды волны давления, прошедшей ПС (10 слоев оргстекла помещенных в воду), в которой (а) 4-ый и (б) 7-ой слой удалены, при различных отношениях падающих амплитуд давления p_b/p_f : 0 (однонаправленное распространение) — тонкая, 0,24 — жирная, 0,51 — штрих пунктирная, 0,85 — прерывистая линии.

Глава 4. Методом частотных передаточных функций поэтапно решается прямая ОА задача в одномерных, пространственно-неоднородных средах. Рассматриваются случаи теплопроводящих и нетеплопроводящих сред. Показаны возможности применения данного численного метода для решения задач, связанных с реконструкцией и визуализацией пространственного распределения неоднородностей, а также для исследования теплофизических свойств тонкопленочных покрытий.

§4.1. Численно решена прямая задача оптоакустики в одномерных пространственно неоднородных средах. Для этого последовательно решаются связанные системы уравнений, выражающих условия непрерывности полей на границах слоев. В общем случае необходимо решение следующих задач:

1) граничной задачи электродинамики, из решения которой определяется пространственное распределение источников тепла как скорости диссипации энергии электромагнитного излучения;

2) расчет пространственного распределения изменения температуры в многослойной среде, из условий непрерывности температуры и тепловых потоков, а также известного частного решения уравнения теплопроводности для отдельного слоя, при наличии распределенных источников тепла, найденных на первом этапе;

3) из условий непрерывности для скалярного потенциала и колебательной скорости частиц на границах выделенных слоев и частного решения уравнения для скалярного потенциала при найденном на втором этапе температурном поле, определяется ампли-

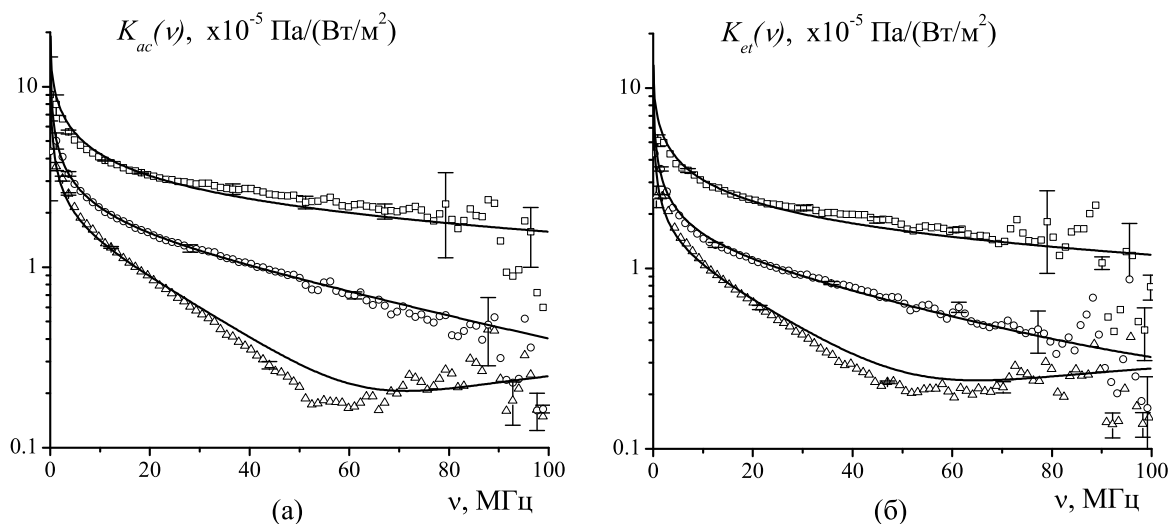


Рис. 4. Передаточные функции ОА преобразования в системе: кварцевая подложка - пленка хрома - ацетон (а)/этанол (б) при различных толщинах пленки. Сплошными линиями изображены результаты теоретического моделирования, аппроксимирующие методом наименьших квадратов по параметру h_{Cr} экспериментальные зависимости. Для ацетона – \square , \circ , \triangle , $h_{Cr} = 0,3$ мкм, $0,68$ мкм и $1,05$ мкм, соответственно, для этанола – \square , \circ , \triangle , $h_{Cr} = 0,3$ мкм, $0,7$ мкм и $1,06$ мкм.

туда волны давления для случаев регистрации ОА сигнала на просвет и на отражение.

В §4.2 рассмотрена прямая ОА задача в оптически пространственно-неоднородных нетеплопроводящих средах. В случае нетеплопроводящих сред, характерном для композитов и биологических тканей, диффузией тепла за время действия лазерного импульса можно пренебречь, поэтому пространственное изменение температуры пропорционально объемной диссипации энергии, определенной на первом этапе. По заданному пространственному распределению коэффициента поглощения рассчитано тепловыделение одномерных структур и частотные передаточные функции ОА преобразования. С помощью обратного преобразования Фурье получены формы ОА сигналов для случаев регистрации на просвет и на отражение. Рассмотрено влияние соотношения акустических импедансов поглощающей и прозрачной сред на форму результирующего сигнала. Результаты численного расчета хорошо согласуются с ранее известными. В частности, форма фронта ОА сигнала повторяет пространственное распределение тепловых источников в исследуемой среде, что подтверждает адекватность методики решения прямых задач оптоакустики.

В §4.3 исследована спектральная передаточная функция ОА возбуждения звука в системе кварцевая подложка – пленка хрома – иммерсионная жидкость в зависимости от толщины пленки и теплофизических свойств жидкости. Была рассмотрена следующая схема взаимодействия: лазерный импульс длительностью $\tau_L = 10^{-8}$ с освещает

хромовую пленку со стороны кварцевого стекла. В результате поглощения оптического излучения источники тепла локализируются в тонком приграничном слое пленки, далее идет процесс диффузии тепла в пленку, подложку и жидкость. Изменение температуры материалов системы приводит к возникновению упругих напряжений, а затем к возбуждению ультразвука. Вкладом подложки можно пренебречь, ввиду наименьшего значения коэффициента объемного расширения. Вклад жидкости в результирующий ОА сигнал определяется изменением в ней температуры, которое, ввиду затухания тепловых волн в процессе диффузии тепла в пленке, существенно зависит от ее толщины. Зависимость глубины диффузии тепла обратно пропорционально квадратному корню частоты. Таким образом, предположено, что частотные передаточные функции систем в наибольшей степени зависят от толщины пленки. Фактически жидкость играет роль прецизионного термометра с высоким (наносекундным) временным разрешением.

Измерены частотные передаточные функции для трех хромовых зеркал различной толщины с двумя жидкостями: спиртом и ацетоном (рис. 4). Измеренные передаточные функции аппроксимировались численно рассчитанными с подгонкой по одному параметру — толщине пленки. В качестве критерия был выбран метод наименьших квадратов. Значения теплофизических и механических характеристик материалов системы брались из таблиц. Полученные для различных иммерсионных жидкостей значения толщин зеркал совпадают в пределах 3%. Теоретически определенные и наблюдаемые в эксперименте локальные минимумы передаточных функций наиболее толстого зеркала проявляется в результате интерференции в пленке тепловых волн, диффундирующих к границе пленка-жидкость и отраженных от нее.

Основные результаты

1. Численно решена задача о распространении плоских ультразвуковых волн в многослойных поглощающих структурах при наличии распределенных источников. Рассчитаны спектры пропускания ультразвука периодических структур, состоящих из чередующихся слоев оргстекла и воды. Измеренные в полосе частот 0,5 – 6 МГц спектры пропускания таких структур (с толщинами слоев оргстекла 1,4 – 1,7 мм и толщинами слоев воды 0,9 – 1,2 мм) соответствуют рассчитанным в пределах ошибки 5% при динамическом диапазоне измерений 40 – 50 дБ. Данные результаты показывают возможность диагностики нарушений периодичности структур по спектрам пропускания ультразвука, рассчитанным теоретически и измеренным методом лазерной широкополосной ультразвуковой спектроскопии.

2. Численно решена задача интерференции встречных продольных акустических волн в одномерной слоистой структуре. На примере периодической структуры, состоящей из чередующихся слоев оргстекла и воды, показано, что интерференция встречных волн позволяет различить одномерные поглощающие структуры, спектры пропускания ультразвука которых являются инвариантными относительно пространственного положения источника и приемника.
3. Рассчитана частотная передаточная функция термооптического возбуждения ультразвука в системе кварцевая подложка — металлическая пленка — иммерсионная жидкость. Теоретически показано, что спектр эффективно возбуждаемых частот в такой системе определяется теплофизическими параметрами пленки и жидкости и зависит от толщины пленки. Верхняя граница частотного диапазона ультразвукового сигнала обратно пропорциональна толщине пленки $f \propto \chi/h^2$, (где χ — температуропроводность пленки, h — ее толщина). Появление локального минимума в частотной передаточной функции объясняется интерференцией тепловых потоков в металлической пленке.
4. Методом лазерной оптико-акустической спектроскопии с использованием наносекундных лазерных импульсов измерены частотные передаточные функции системы кварцевая подложка — хромовая пленка — органическая жидкость (ацетон или этанол) в полосе частот 1 – 60 МГц для пленок трех различных толщин. Значения толщины пленки (0,3 мкм; 0,7 мкм и 1 мкм), полученные в результате аппроксимации измеренной передаточной функции теоретически рассчитанной, для двух использованных жидкостей совпадают в пределах ошибки 3%.

Список публикаций

- [1] Карабутов А. А., Кожушко В. В., Пеливанов И. М., Подымова Н. Б. Исследование оптико-акустическим методом прохождения широкополосных ультразвуковых сигналов через периодические одномерные структуры // Акуст. журн., 2000, Т.46(4), С.510–515.
- [2] Карабутов А. А., Кожушко В. В., Пеливанов И. М., Подымова Н. Б. Неразрушающая диагностика одномерных периодических структур лазерным ультразвуковым методом по спектрам пропускания широкополосных акустических импульсов // Механика композитных материалов, 2001, Т.37(2), С.249–254.

- [3] Карабутов А. А., Кожушко В. В., Пеливанов И. М., Митюрин Г. С. Интерференция встречных продольных акустических волн в изотропной поглощающей пластинке и периодической структуре с дефектами// Акуст. журн., 2001, Т.47(6), С.890–896.
- [4] Жаринов А. Н., Карабутов А. А., Кожушко В. В., Пеливанов И. М., Соломатин В. С., Хохлова Т. Д. Пленочный широкополосный фокусированный гидрофон для оптико-акустической томографии// Акуст. журн., 2003, Т.49(6), С.799–805.
- [5] Карабутов А. А., Кожушко В. В., Пеливанов И. М., Подымова Н. Б. Влияние толщины субмикронной металлической пленки на эффективность термооптической генерации ультразвука в системе подложка-пленка-жидкость// Вестник МУ. Сер. 3. Физика. Астрономия, 2003, Т.44(6), С.53–57.
- [6] Карабутов А. А., Кожушко В. В., Пеливанов И. М., Подымова Н. Б. Неразрушающая диагностика одномерных периодических структур лазерным ультразвуковым методом по спектрам пропускания широкополосных акустических импульсов. *Тезисы конф. "Механика композитных материалов"*, Рига, 2000, С. 98.
- [7] Kozhushko V. V., Mityurich G. S. Photoacoustic transformation in one-dimensional periodic structures. *Proc. Mol. Quant. Acoust.*, 2000, V. 21, P.127–132.
- [8] Kozhushko V. V., Mityurich G. S. The opposite interaction of longitudinal acoustic waves in isotropic dissipative media. *Abstract of International scientific conference of "Optics of Crystals"*, Mozyr, Belarus, 2000, P.39–40.
- [9] Кожушко В. В. Фотоакустическое преобразование в одномерных периодических средах. *Тезисы VIII республиканской конференции студентов и аспирантов по физике*, Гродно, 2000, С. 28.
- [10] Karabutov A. A., Pelivanov I. M., Kozhushko V. V., Mityurich G. S. The opposite interaction of longitudinal acoustic waves in isotropic dissipative media. *Proc. SPIE "Optics of crystals"*, Mozyr, Belarus, 2000, V.4358, P.277–282.
- [11] Kozhushko V. V., Mityurich G. S. Photoacoustic transformation in the one-dimensional periodic structures. *Abstracts of 5th Workshop on Photoacoustics and Photothermics*, Gliwice, Poland, 2000.
- [12] Karabutov A. A., Kozhushko V. V., Mityurich G. S., Pelivanov I. M. The solution of direct optoacoustic problem for one-dimensional thermally non-conductive media. *Abstracts of "Problem of Interaction of Radiation with Matter"*, Gomel, 2001, P.108.

- [13] Карабутов А. А., Кожушко В. В., Пеливанов И. М., Митюрин Г. С. Оптико-акустическое преобразование в одномерных пространственно неоднородных нетеплопроводящих средах// Известия ГГУ, 2001, Т.5(8), С.105–109.
- [14] Kozhushko V. V., Karabutov A. A., Pelivanov I. M., Podymova N. B., Mityurich G. S. Application of modified matrix method to solve the direct optoacoustic problem in one-dimensional spatially inhomogeneous media. Editors Rudenko O. V. and Sapozhnikov O. A. *Abstracts of 16th International Symposium on Nonlinear Acoustics*, Moscow, Russia, 2002, P.201–202.
- [15] Karabutov A. A., Kozhushko V. V., Mityurich G. S., Pelivanov I. M., Podymova N. B. Direct problem of photoacoustic diagnostics in one-dimensional spatially inhomogeneous media. *Proc. Mol. Quant. Acoust.*, Gliwice, Poland, 2002, V.23, P.213–223.
- [16] Karabutov A. A., Kozhushko V. V., Mityurich G. S., Pelivanov I. M., Podymova N. B. Application of modified matrix method to solve the direct optoacoustic problem in one-dimensional spatially inhomogeneous media. Editors Rudenko O. V. and Sapozhnikov O. A. *Nonlinear Acoustics at the Beginning of the 21st Century*, Moscow, Russia, 2002, V.2, P.893–896.
- [17] Makarov V. A., Karabutov A. A., Kozhushko V. V., Pelivanov I. M., Khokhlova T. D., Zharinov A. N. Focused array transducer for 2D tomography. Editor Oraevsky A. A. *Proc. of SPIE - Biomedical Optoacoustic IV*, 2003, V.4960, P.156–167.