

МОСКОВСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ
им. М.В.ЛОМОНОСОВА

ФИЗИЧЕСКИЙ ФАКУЛЬТЕТ

СР 24.05.16.2001-2

На правах рукописи

УДК 534.212+534.232

ПЕЛИВАНОВ ИВАН МИХАЙЛОВИЧ

ЛАЗЕРНАЯ ОПТИКО-АКУСТИЧЕСКАЯ ДИАГНОСТИКА
ГЕТЕРОГЕННЫХ СРЕД

Специальность: 01.04.21 - лазерная физика

Автореферат

диссертации на соискание ученой степени
кандидата физико-математических наук

Москва - 2000

Работа выполнена на кафедре общей физики и волновых процессов физического факультета МГУ им. М.В. Ломоносова.

Научные руководители: доктор физико-математических наук,
профессор В.А. Макаров
кандидат физико-математических наук,
Н.Б. Подымова

Официальные оппоненты: доктор физико-математических наук,
С.В. Егерев
кандидат физико-математических наук,
доцент Г.В. Белокопытов

Ведущая организация: Институт проблем лазерных
и информационных технологий РАН, г. Шатура

Защита состоится "14" декабря 2000 года в "15⁰⁰" часов на заседании диссертационного совета К 053.05.21 в МГУ им. М.В. Ломоносова по адресу: 119899, г. Москва, Воробьевы горы, МГУ, ул. Хохлова, д.1, Корпус Нелынейной Оптики, аудитория им. С.А. Ахманова.

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

Автореферат разослан "3" ноября 2000 года.

Ученый секретарь диссертационного совета

К.053.05.21, кандидат физ.-мат. наук, доцент

М.С. Полякова

B328.256,03

B372,18,03

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность исследования

Исследование физических свойств и внутренней структуры неоднородных конденсированных сред является важным в многочисленных задачах как фундаментального, так и прикладного характера. Среди них можно отметить разработку новых неинвазивных методов диагностики биологических тканей и объектов, неразрушающий контроль конструкционных материалов на различных стадиях изготовления, а также в процессе эксплуатации деталей и изделий.

Для решения таких задач целесообразно использовать оптико-акустический (ОА) эффект - термооптическое возбуждение акустических волн в среде при поглощении в ней модулированного по интенсивности светового (лазерного) излучения. Параметры ОА сигналов определяются как характеристиками поглощенного излучения, так и оптическими, теплофизическими и акустическими свойствами поглощающей среды. Это позволяет проводить измерения указанных свойств исследуемой среды по временному профилю давления ОА сигнала. Подбирая соответствующим образом характеристики лазерного излучения и поглощающей среды, можно получить мощные широкополосные ультразвуковые импульсы, применение которых необходимо в задачах акустической спектроскопии и ультразвукового неразрушающего контроля.

Исследование распространения оптического излучения в светорассеивающих средах и, в частности, распределения поглощающих и рассеивающих неоднородностей, является фундаментальной научной проблемой. В последнее время интерес к этой проблеме в значительной мере связан с развитием лазерной диагностики и терапии биологических сред и тканей. Измерение оптических характеристик таких сред необходимо как для расчета распределения излучения внутри биологической среды так и для определения его оптимальной дозировки, а также для решения прямой задачи оптической томографии.

При поглощении в среде лазерного импульса с длительностью, много меньшей времени пробега акустической волны по области тепловыделения, профиль давления оптико-акустического сигнала повторяет пространственное распределение тепловых источников в среде. В случае однородно поглощающей и рассеивающей среды в приближении плоской световой волны это распределение совпадает с пространственным распределением интенсивности света в среде. Таким образом, применение оптико-акустического эффекта в задачах измерения оптических свойств рассеивающих сред представляется весьма перспективным.

С развитием технологии полупроводниковых приборов, в частности интегральных схем, представляющих собой сложную многослойную структуру с использованием полупроводников разного типа проводимости, возрос интерес к изучению свойств периодических структур (ПС). Интересным эффектом является наличие диапазонов прозрачности и непрозрачности, которые наблюдаются для различных типов излучения в спектре пропускания таких структур. В оптике ПС используются, например, при изготовлении диэлектрических фильтров и зеркал резонаторов, в динамической голографии, зеркалах с обращением волнового фронта, двумерном оптическом воспроизведении или для трехмерной оптической записи информации.

В связи с развитием микроэлектроники в последнее время интенсивно исследуется случай, когда один из слоев ПС заменяется материалом со свойствами, нарушающими периодичность. В этом случае в зоне непрозрачности спектра пропускания электромагнитного излучения появляется узкий локальный максимум. Подобная ситуация имеет место, когда в кристаллическую решетку полупроводника внедряют атом примеси, когда дает разрешенное энергетическое состояние в запрещенной зоне.

Возможность экспериментального исследования на макро уровне при использовании ультразвуковой техники эффектов, аналогичных тем, которые имеют волновую природу и возникают при электромагнитном взаимодействии, объясняет интерес к изучению ПС в акустике. Кроме того, большинство композитных материалов имеют периодическую или слоистую структуру. Поэтому исследование акустических свойств таких структур является важным и актуальным. Использование ОА эффекта для возбуждения мощных широкополосных зондирующих импульсов позволяет проводить спектроскопию указанных сред в широкой полосе частот в реальном масштабе времени.

Применение композитных материалов в авиастроении и машиностроении позволяет уменьшать вес конструкций и существенно повысить их прочность. Значительное распространение получили графито-эпоксидные и стеклопластиковые композиты. Дефекты структуры композита, такие как трещины, воздушные раковины, отслоения волокон от матрицы и т.д., появляющиеся как на стадии изготовления, так и в процессе эксплуатации, существенно ослабляют его прочность. В связи с этим возникла потребность в разработке неразрушающих методов контроля их прочностных характеристик. Большинство композитных материалов подвержены старению, т.е. их

упругие свойства меняются под действием динамических и статических нагрузок. Такие процессы приводят к изменению затухания и скорости распространения ультразвуковых волн в композите. По значениям фазовых скоростей акустических волн можно вычислить упругие модули трансверсально-изотропных и ортотропных композитов. Однако их расчет для композитов с более сложным характером анизотропии внутренней структуры представляет значительные трудности. В этом случае необходим анализ частотных зависимостей коэффициентов пропускания, отражения или затухания ультразвука в композите в широком спектральном диапазоне. Однако применение для этой цели традиционных ультразвуковых методов, использующих пьезопреобразователи для генерации акустических импульсов, затруднено прежде всего из-за низкой эффективности возбуждения широкополосных акустических сигналов. Использование ОА эффекта в оперативных методах неразрушающего контроля и диагностики композитных материалов позволяет устранить данную трудность.

Изображение внутренней структуры гетерогенных сред может быть получено методами оптической томографии, электронной микроскопии и рентгеноструктурного анализа. Хотя эти методы обеспечивают получение детальной картины особенностей структуры, они не дают возможность напрямую связать эти особенности с физическими свойствами объекта и предсказать динамику изменения структуры материала. Например, для пористого кремния - материала, получаемого путем электрохимического травления в растворах кислот и имеющего ряд перспективных применений в оптике и электронике, важнейшими макроскопическими характеристиками являются его теплопроводность, пористость и толщина вытравленного пористого слоя. Степень пористости образца определяется обычно гравиметрическим методом. Для определения пористости существуют также методы газовой и жидкостной порометрии, рентгеноструктурный метод. Однако эти методы обладают либо невысокой точностью, либо имеют разрушающий характер измерений. Пористость материала существенно влияет на его акустические характеристики (скорость и затухание ультразвука). Поэтому для диагностики указанных свойств пористого кремния представляется перспективным применение оптико-акустического эффекта, позволяющего получать короткие и мощные акустические импульсы с известной амплитудой и частотным спектром.

Целью диссертационной работы является: разработка методов лазерной оптико-акустической диагностики оптических, акустических и механических свойств гетерогенных сред.

Задачи исследования:

1. Теоретически и экспериментально исследовать процесс импульсного лазерного возбуждения акустических сигналов в сильнорассеивающих конденсированных средах и разработать метод прямого измерения пространственного распределения интенсивности света в таких средах и их оптических характеристик.
2. Экспериментально исследовать особенности распространения широкополосных акустических импульсов продольных волн в одномерных модельных и реальных периодических структурах.
3. Экспериментально исследовать влияние дефектов в периодической структуре на спектр пропускания ультразвука.
4. Разработать метод неразрушающих измерений пористости и толщины слоя на подложке образцов пористого кремния с использованием лазерных источников широкополосных акустических сигналов.
5. На основе иммерсионной техники с лазерным источником ультразвука исследовать распространение широкополосных акустических импульсов в графито-эпоксидных композитах и разработать метод измерения полного набора их упругих модулей.
6. Разработать метод неразрушающей оптико-акустической дефектоскопии графито-эпоксидных композитов на основе анализа рассеянных назад на неоднородностях структуры широкополосных акустических сигналов.

Научная новизна:

1. Продемонстрирована возможность прямого измерения пространственного распределения интенсивности лазерного излучения в сильно рассеивающих свет конденсированных средах по временному профилю давления оптико-акустического сигнала.
2. Впервые оптико-акустическим методом проведены измерения оптических характеристик сильно рассеивающих сред: коэффициента поглощения и приведенного коэффициента рассеяния света.
3. Методом широкополосной оптико-акустической спектроскопии исследованы особенности зонной структуры спектра пропускания ультразвука одномерными периодическими структурами, состоящими из чередующихся слоев оргстекла и

воды, в частотном диапазоне (0,5÷10) МГц и изучено влияние дефектов структуры на спектр пропускания ультразвука.

4. С использованием лазерных источников широкополосных ультразвуковых импульсов экспериментально исследовано распространение продольных и сдвиговых акустических волн и построены их волновые поверхности в однонаправленных графито-эпоксидных композитах.
5. Предложен и экспериментально реализован оптико-акустический метод дефектоскопии композитных материалов, основанный на регистрации рассеянных назад ультразвуковых сигналов.

Практическая ценность:

1. Разработана оптико-акустическая методика прямого измерения пространственного распределения интенсивности лазерного излучения в сильно рассеивающих свет конденсированных средах и их оптических характеристик, особенно актуальная в задачах диагностики биологических тканей и объектов.
2. Разработана оптико-акустическая методика измерения акустических и механических характеристик одномерных периодических структур, которая может применяться в неразрушающем контроле композитных материалов; а также в задачах моделирования на макроуровне распространения электромагнитного излучения в фотонных кристаллах.
3. Разработан лазерный оптико-акустический метод неразрушающих измерений пористости и толщины слоя на подложке образцов пористого кремния, что является весьма актуальным ввиду его широкого применения в современной оптике и микроэлектронике.
4. Разработанные методы лазерной оптико-акустической диагностики позволяют проводить измерения полного набора упругих модулей однонаправленных графито-эпоксидных композитов и ультразвуковую дефектоскопию таких материалов при одностороннем доступе к объекту контроля. Применение данных методов необходимо при анализе структуры композитных материалов как на стадии изготовления, так и в процессе эксплуатации изделий, в частности, в авиационной промышленности и машиностроении.

Защищаемые положения:

1. Лазерный оптико-акустический метод позволяет проводить прямые измерения пространственного распределения интенсивности света в сильнорассеивающих

- конденсированных средах. Коэффициент экстинкции света определяется по экспоненциальной аппроксимации переднего фронта оптико-акустического сигнала.
2. Оптические характеристики сильнорассеивающих конденсированных сред - коэффициент поглощения и приведенный коэффициент рассеяния света - определяются по временному профилю давления оптико-акустического сигнала при известных теплофизических параметрах среды.
 3. Методика широкополосной оптико-акустической спектроскопии с лазерными источниками ультразвука позволяет проводить измерения пропускания акустических волн одномерными периодическими структурами в полосе частот $0.1 - 100$ МГц в реальном масштабе времени. Дефекты в таких структурах приводят к возникновению одного или нескольких локальных максимумов в запрещенной зоне пропускания ультразвука. Амплитуда и положение локального максимума в зоне непрозрачности зависят от расположения дефектного слоя.
 4. Иммерсионная методика с лазерным источником ультразвука позволяет проводить неразрушающие измерения пористости и толщины слоя образцов пористого кремния на монокристаллической подложке.
 5. Метод широкополосной акустической спектроскопии с лазерными источниками импульсов продольных и сдвиговых ультразвуковых волн позволяет определить полный набор упругих модулей однонаправленных графито-эпоксидных композитов.
 6. Оптико-акустический метод с косвенной регистрацией акустических сигналов позволяет осуществлять ультразвуковую дефектоскопию многонаправленных графито-эпоксидных композитов по рассеянным назад широкополосным акустическим сигналам при одностороннем доступе к объекту контроля.

Апробация работы и публикации:

Результаты диссертационной работы обсуждались и докладывались на Всероссийской конференции "Композиционные, керамические, порошковые материалы и покрытия." (Москва, 1995); Международной конференции "Неразрушающий контроль и диагностика-96." (Москва, 1996); Международной конференции "Механика композитных материалов" (Латвия, Рига, 1998, 2000); Международной конференции "Современные проблемы механики" (Москва, 1999); Всероссийской конференции "Нелинейные задачи в теории гидродинамики упругих сред" (Москва, 1999); Международной конференции "Biomedical optics 2000" (San Jose, USA, 2000); Международной конференции "X Conference on Laser Optics" (С-Петербург, 2000).

Основные результаты диссертации изложены в 11 публикациях, список которых приведен в конце автореферата.

Структура и объем диссертации

Диссертация состоит из введения, четырех глав, заключения и списка литературы. Объем диссертации 171 страница, в том числе 45 рисунков, 4 таблицы. Список литературы включает 123 наименования.

Содержание диссертации.

Во введении сформулированы цели и задачи работы. Кратко изложено содержание диссертации.

Глава I посвящена теоретическому обоснованию возможностей применения оптико-акустического эффекта в задачах неразрушающей диагностики оптических, акустических и механических свойств гетерогенных сред.

В §1.1 рассмотрен метод передаточных функций для решения задачи термооптического возбуждения звука в однородно поглощающих свет средах. Спектр $p(\omega)$ термооптически возбуждаемого звукового сигнала (ОА сигнала) определяется произведением спектра временной огибающей интенсивности поглощенного лазерного излучения и частотной передаточной функции термооптического преобразования $K(\omega)$:

$$p(\omega) = I_0 f(\omega) K(\omega). \quad (1)$$

Функция $K(\omega)$ зависит от коэффициента поглощения света, теплофизических параметров поглощающей среды и является Фурье-образом пространственного распределения источников тепла. В случае короткого лазерного импульса, т.е. когда диапазон $f(\omega)$ значительно шире спектрального диапазона $K(\omega)$, временная зависимость давления переднего фронта акустического сигнала в поглощающей среде $p(\tau = t - z/V_L)$ (V_L - скорость звука в среде) повторяет пространственное распределение в ней источников тепла. Таким образом, применение ОА эффекта возможно не только для возбуждения мощных широкополосных акустических импульсов, но и в качестве метода измерения пространственного распределения интенсивности света и оптических характеристик поглощающих сред во временной форме фронта ОА импульса.

§1.2 посвящен анализу трансформации формы ОА сигнала при распространении в конденсированной среде. Поскольку информация извлекается в первую очередь из

анализа временной формы ОА сигналов, то учет изменения формы импульса является очень важным. Проходя расстояние от излучателя до приемника, широкополосный акустический сигнал искажается, причем низкие частоты больше подвержены дифракции, а высокие - затуханию. Поэтому влияние диссипативных и дифракционных искажений на форму ОА сигнала рассматривается в случае сильно различающихся масштабов их проявления. Обычно в задачах неразрушающей диагностики используются акустические импульсы небольших амплитуд, поэтому влияние нелинейных искажений на форму ОА сигнала не учитывается.

Глава II посвящена измерению пространственного распределения интенсивности света и оптических характеристик сильно рассеивающих свет конденсированных сред импульсным оптико-акустическим методом.

В §2.1 приведен краткий обзор различных методов исследования оптических характеристик рассеивающих конденсированных сред. Большинство методов диагностики оптических свойств рассеивающих сред основано на регистрации рассеянного средой лазерного излучения. Регистрируется либо рассеянное вперед, либо рассеянное назад световое поле. В параграфе обсуждаются достоинства и недостатки оптических методов. В качестве альтернативного метода решения поставленной задачи представляется перспективным применение оптико-акустического эффекта. В ОА методике регистрируется не световой, а акустический сигнал, возбуждаемый в рассеивающей среде, что существенно облегчает процедуру обработки экспериментальных данных и позволяет одновременно измерять пространственное распределение интенсивности света и оптические характеристики среды.

В §2.2 проведен теоретический анализ пространственного распределения интенсивности света в условиях многократного рассеяния (коэффициент поглощения μ_a много меньше коэффициента рассеяния μ_s). Рассматривается одномерный случай, т.е. падение на рассеивающую среду волны с плоским волновым фронтом. В этом приближении и при условии, что время жизни фотона в среде $(\mu_a c)^{-1}$ (c - скорость света в среде) много меньше длительности лазерного импульса τ_L , из уравнения баланса фотонов получено стационарное уравнение диффузии:

$$\left[\frac{d^2}{dz^2} - \mu_{eff}^2 \right] I_{dif}(z) = -\frac{S(z)}{D}, \quad (2)$$

где $I_{dif}(z)$ и $S(z)$ соответственно распределения интенсивности и источников

диффузного поля в среде, μ_{eff} - коэффициент экстинкции света, D - коэффициент диффузии для потока фотонов. Решение этого уравнения

$$I_{diff}(z) = I_0 \frac{3}{2\mu_{eff}\lambda_{tr}} \left\{ \exp(\mu_{eff}\lambda_{tr}) - \exp[-\mu_{eff}\lambda_{tr}(2\Delta + 1)] \right\} \exp(-\mu_{eff}z) \quad (3)$$

(Δ - постоянная, зависящая от показателей преломления прозрачной и рассеивающей сред) описывает распределение интенсивности света на расстояниях от границы, больших $2\div 3$ транспортных длин свободного пробега фотона в среде λ_{tr} . Сравнение результатов диффузионной теории с результатами экспериментов необходимо для определения неизвестных величин μ_a и μ'_s ($\mu'_s = \mu_s(1-g)$, g - средний косинус угла однократного рассеяния).

В §2.3 рассмотрена модель импульсного оптико-акустического эффекта в рассеивающей среде. Анализ термооптического возбуждения звука в рассеивающей среде возможен только при упрощающих предположениях. В рассматриваемом случае среда являлась сильно рассеивающей ($\mu_a \ll \mu_s$), и ее толщина L и характерный радиус лазерного пучка a_0 , используемого для возбуждения звука, были много больше глубины проникновения света в среду $z_L \approx \mu_{eff}^{-1}$. В этом случае можно использовать приближение полубесконечной среды и считать лазерный пучок коллимированным. Если время релаксации теплового поля в области нагрева $t_{th} \approx 1/(\mu_{eff}^2 \chi)$ много больше длительности лазерного импульса τ_L , то диффузией тепла в процессе лазерного нагрева среды можно пренебречь. При поглощении в среде короткого лазерного импульса ($\mu_{eff} V_L \tau_L \ll 1$, V_L - скорость звука в среде) и при указанных выше предположениях передний фронт давления ОА сигнала повторяет пространственное распределение интенсивности света $H(z)$ в среде:

$$p(\tau = t - z/V_L) = \frac{\beta V_L^2}{2c_p} \mu_a E_0 \begin{cases} H(-V_L \tau), & \tau < 0 \\ [(1-N)/(1+N)] H(V_L \tau), & \tau > 0 \end{cases} \quad (4)$$

(β - коэффициент теплового расширения среды, c_p - удельная теплоемкость при постоянном давлении, E_0 - плотность энергии падающего на среду лазерного излучения).

В §2.4 приведены результаты измерения пространственного распределения интенсивности света в сильнорассеивающих средах и оптических характеристик таких

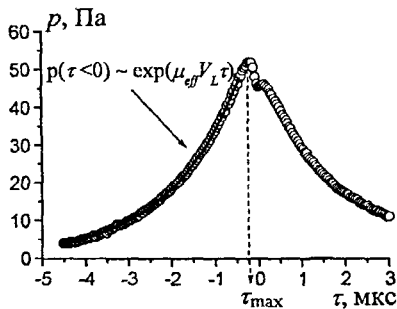


Рис.1. Временной профиль давления ОА сигнала во взвеси частиц TiO_2 , возбуждаемого при свободной границе. Точки - зарегистрированный сигнал, сплошная кривая - экспоненциальная аппроксимация.

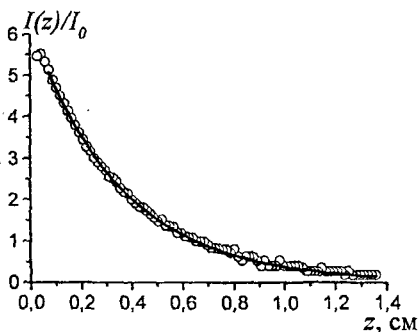


Рис.2. Пространственное распределение интенсивности света в водной суспензии полистироловых сферических частиц. Сплошная кривая - теоретический расчет, $\mu_{eff} = 2.8 \text{ см}^{-1}$, $\lambda_{tr} = 6.13 \cdot 10^{-2} \text{ см}$; точки - передний фронт давления ОА сигнала, нормированного на $(\beta c_0^2 / 2c_p) \mu_a E_0$.

сред. В качестве исследуемых модельных рассеивающих сред были взяты водная суспензия полистироловых сферических частиц (радиус частиц $r_0 = 0.38 \text{ мкм}$, объемная концентрация $n_V = 0.75\%$) и взвесь частиц оксида титана TiO_2 в воде (средний размер частиц $r_0 < 1 \text{ мкм}$, $n_V = 0.2 \div 1.7\%$). По экспоненциальной

аппроксимации переднего фронта ОА сигнала $p(\tau < 0) \sim \exp(\mu_{eff} V_L \tau)$ (рис.1) был определен коэффициент экстинкции света в исследуемых средах μ_{eff} . Относительная ошибка в измерении μ_{eff} определяется шумом квантования сигнала $p(\tau)$ и ошибкой в измерении скорости звука и составляет около 1%. Для суспензии полистироловых сфер результат расчета приведенного коэффициента рассеяния света $\mu'_s = \mu_{eff}^2 / 3\mu_a$ по известному коэффициенту поглощения света в воде $\mu_a = 0.16 \text{ см}^{-1}$ и измеренному значению μ_{eff} совпал в пределах точности измерений 2% с рассчитанным по теории Ми. По известным μ_a и μ'_s было рассчитано

пространственное распределение интенсивности света в суспензии в диффузионном приближении (рис.2). Для взвеси частиц TiO_2 в воде по абсолютной величине давления фронта ОА сигнала и по экспериментально измеренному значению μ_{eff} был вычислен

коэффициент μ'_s , а затем и μ_a . Предлагаемый оптико-акустический метод позволяет определять оптические характеристики рассеивающей среды с относительной точностью $2.5 \pm 3\%$.

Глава III посвящена ОА методикам неразрушающего контроля и диагностики одномерных периодических структур (ПС).

В §3.1 проведен краткий обзор литературы по ультразвуковой диагностике акустических и механических свойств ПС. Наличие у таких структур в спектре пропускания ультразвука диапазонов прозрачности ("pass-bands") и непрозрачности ("stop-bands") открывает возможность их неразрушающей диагностики. Поскольку наличие дефектов в структуре приводит к появлению одного или нескольких локальных максимумов в зоне прозрачности, метод широкополосной ультразвуковой спектроскопии позволит провести дефектоскопию ПС. Применение для этой цели лазерных источников мощных широкополосных ультразвуковых сигналов является весьма перспективным, позволяя проводить измерения в широком диапазоне частот и в реальном масштабе времени.

В §3.2 теоретически проанализировано распространение ультразвуковых волн в ПС с использованием модели встречного интерференционного взаимодействия двух плоских волн в каждом слое ПС. Для расчета коэффициента пропускания ПС использована матричная методика. Данный подход дает возможность не ограничиваться свойствами материалов слоев и их количеством. Это позволяет анализировать пропускание ультразвука произвольными слоистыми структурами.

В §3.3 рассмотрена принципиальная схема иммерсионного метода с лазерным источником ультразвука. Эта схема являлась основной при проведении ОА диагностики различных модельных и реальных периодических структур и композитных материалов.

В §3.4 приведены экспериментальные результаты по ОА диагностике модельных одномерных ПС, состоящих из оргстекла и воды. В полосе частот $(0.5 \div 6)$ МГц исследована зонная структура спектра пропускания ультразвука (рис.3а). Подробно изучена ПС с дефектами, т.е. когда один или несколько слоев оргстекла заменены водой (рис.3б). В этом случае в зоне непрозрачности наблюдались локальные максимумы пропускания ультразвука, а зона прозрачности видоизменялась. Полученные экспериментальные данные хорошо совпали с результатами численного моделирования, выполненными по методике §3.2.

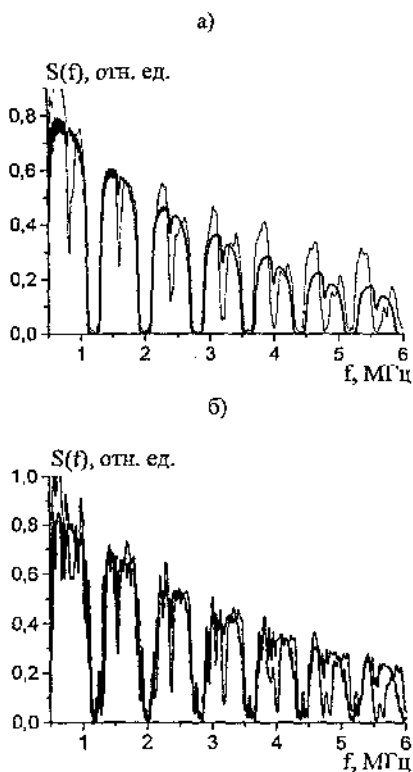


Рис. 3. Спектры пропускания ПС, состоящей из 10 слоев оргстекла и 9 слоев воды. (а) - $d_1 = 1.655$ мм, $V_{L1} = 2.67$ мм/мкс, $d_2 = 0.94$ мм, $V_{L2} = 1.482$ мм/мкс (расчет - жирная линия, эксперимент - тонкая линия); (б) - 5-ый и 8-ой слои оргстекла заменены водой (расчет - жирная линия, эксперимент - тонкая линия).

диагностики композитов приведены в §3.6 и §4.4.

§3.6 и §3.7 посвящены ОА диагностике реальных ПС. В §3.6 на основе ультразвуковых измерений пропускания и рассеяния назад ультразвука проведена диагностика толщины и качества склейки ПС, состоящих из двух пластин алюминия, скрепленных эпоксидной смолой.

В §3.7 рассмотрена оптико-акустическая методика измерения пористости и толщины слоя пористого кремния на монокристаллической подложке. Метод основан на определении фазовой скорости ультразвука в двухфазной среде этанол/кремний.

В §3.5 рассмотрена принципиальная схема оптико-акустического рефлектометра - прибора, специально сконструированного на основе схемы с косвенной регистрацией акустических сигналов для неразрушающего контроля и диагностики периодических структур и композитных материалов при одностороннем доступе к образцу или изделию. Иммерсионная методика, рассмотренная в §3.3, обладает существенными недостатками при исследовании готовых изделий, т.к. требует приготовления образцов в виде плоскопараллельных пластин. Кроме того, иммерсионный метод является непригодным для контроля изделий, к которым имеется только односторонний доступ. Поэтому рефлектометр использовался в дополнение к иммерсионной методике. Полученные с помощью такого прибора результаты неразрушающей ультразвуковой

Этанол использовался в данном случае в качестве иммерсионной среды, он же заполнял свободный объем пор. После проведения измерений этанол быстро испаряется из пористого слоя, не разрушая его первоначальную структуру. Используя теоретическую модель распространения акустических волн в двухфазной среде, найдено выражение, связывающее пористость кремния и фазовую скорость ультразвука в такой среде. Толщина пористого слоя на подложке была рассчитана из анализа результатов ревербераций зондирующего ультразвукового импульса в слоистой среде "этанол - этанол/слой пористого кремния - кремниевая подложка - этанол". Таким образом, данный метод позволяет проводить измерения на образцах с минимальной толщиной пористого слоя $h_{\min} \approx 2$ мкм при пористости образцов 50 ± 70 %.

Глава IV посвящена ОА методу неразрушающего контроля и диагностики композитных материалов.

В §4.1 проведен краткий обзор литературы по ультразвуковым исследованиям упругих свойств композитных материалов, их структуроскопии и дефектоскопии. В подавляющем большинстве работ в качестве зондирующих импульсов используются широкополосные акустические сигналы. Пространственное разрешение таких методов зависит от длительности зондирующих импульсов, а глубина зондирования - от их амплитуды. Применение лазерного возбуждения ультразвука представляется наиболее целесообразным для этой цели, т.к. позволяет получать мощные широкополосные акустические сигналы с хорошо контролируемой амплитудой и частотным спектром.

В §4.2 рассмотрена теоретическая модель распространения плоских акустических волн в однонаправленных (1-D) графито-эпоксидных (г/э) композитах в длинноволновом случае, т.е. когда длина волны ультразвука много больше характерного периода структуры. В таком случае зонная структура спектра пропускания вырождается, и композит может быть описан моделью анизотропного твердого тела. В этом приближении находится связь между фазовыми скоростями акустических волн и упругими модулями материала, описываемая уравнением Кристоффеля:

$$|\Gamma_{ij} - \rho v^2 \delta_{ij}| = 0, \quad (5)$$

где ρ - плотность материала, $\Gamma_{ij} = c_{ijkl} v_j v_k$ - тензор Кристоффеля, c_{ijkl} - матрица жесткости, v_i - направляющие косинусы волнового вектора.

В §4.3 описывается иммерсионная методика с применением лазерного возбуждения широкополосных продольных и сдвиговых акустических импульсов для

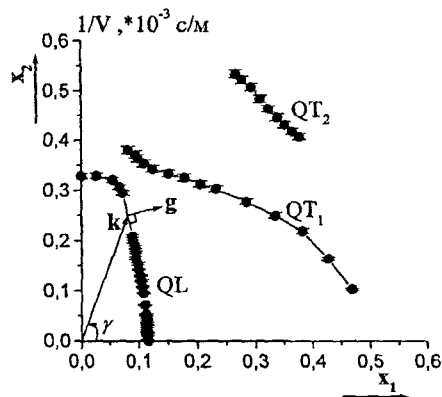


Рис.4. Волновые поверхности в 1-D графито-эпоксидном композите: QL - квазипродольная волна, QT_1 - быстрая квазипоперечная волна, QT_2 - медленная квазипоперечная волна, ось x_1 - коллинеарна направлению укладки волокон.

определения полного набора упругих модулей 1-D г/э композитов. Показано, что дисперсия фазовой скорости продольных и поперечных волн в диапазоне 1-15 МГц отсутствует. Измерена анизотропия фазовых скоростей для всех типов упругих волн и построены их волновые поверхности (рис.4).

На основе полученных экспериментальных данных рассчитан полный набор упругих модулей 1-D г/э композитов. Максимальная ошибка измерений для продольных и сдвиговых модулей составляет 3%, для смешанных - 6%.

§4.4 посвящен методу ОА дефектоскопии многонаправленных г/э композитов с помощью ОА рефлектометра, описанного в §3.5. ОА сигнал, возбуждаемый на лицевой поверхности композита, распространяется вглубь образца, где испытывает рассеяние на его неоднородностях. Рассеянный назад ультразвук регистрируется широкополосным приемником, т.е. измерения проводятся при одностороннем доступе к образцу. Исследовались г/э композиты с различными инородными включениями. Оптико-акустические сигналы, возбуждаемые в исследуемых образцах с использованием рефлектометра и зарегистрированные с помощью цифрового осциллографа, имеют характерный вид, представленный на рис.5. Они состоят из нескольких условных частей. Первый импульс большой амплитуды - зондирующий импульс, возбуждаемый при поглощении лазерного импульса в приповерхностном слое композита толщиной порядка $\mu\text{с}^{-1}$. Малая пространственная протяженность эталонного импульса $\Delta l = 0.5 \pm 0.6 \text{ мм}$ позволяет обнаруживать дефекты в образцах или изделиях из г/э композитов на глубине от 0.5 мм. Таким же (0.5 мм) будет разрешение по глубине, при этом латеральное разрешение определяется радиусом пучка на поверхности образца и

составляет около 3 мм. Импульс, прошедший в образец и отраженный от его тыльной

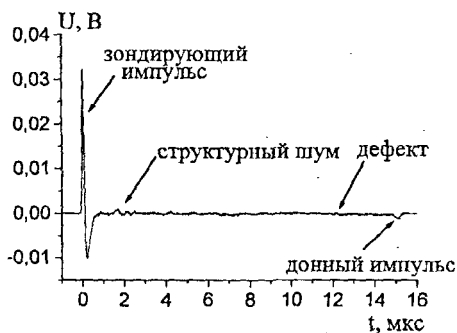


Рис.5. Временной профиль ОА сигнала, полученный с использованием рефлектометра для образца графито-эпоксидного композита, содержащего дефект уплотнения.

структуры композита, регистрируется приемником с временной задержкой, соответствующей пробегу ультразвука до дефекта в прямом и обратном направлениях.

Для выявления характера дефектов структуры композитов и глубины их залегания осуществлялась математическая обработка экспериментальных данных с использованием спектрального и корреляционного анализа. На рис.6 представлена

нормированная на затухание ультразвука в композите автокорреляционная функция (АКФ) сигнала, представленного на рис.5, в пространственном масштабе $z = V_L t / 2$ (временной масштаб тот же, что и на рис.5). По знаку корреляционной функции определялся характер дефекта. Трехполярные "всплески" с положительным центральным пиком будут характеризовать дефекты уплотнения, а с отрицательным пиком - дефекты разрежения плотности типа

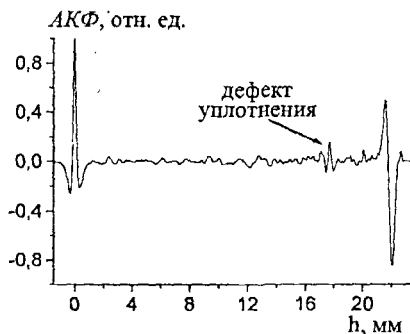


Рис.6. Автокорреляционная функция ОА сигнала для образца графито-эпоксидного композита, содержащего дефект уплотнения.

расслоений или воздушных раковин. На рис.6 отчетливо виден всплеск, соответствующий глубине залегания дефекта уплотнения, отраженный от которого импульс был практически неразличим во временном треке ОА сигнала (см. рис.5).

В заключении сформулированы основные результаты работы.

1. Разработана и экспериментально реализована методика прямого измерения пространственного распределения интенсивности света в сильно рассеивающих свет средах по абсолютной величине давления переднего фронта оптико-акустического сигнала. Временной фронт оптико-акустического сигнала, возбуждаемого в исследуемой среде, в случае короткого лазерного импульса повторяет пространственное распределение тепловых источников, т.е. пространственное распределение интенсивности света.
2. На основе импульсного оптико-акустического эффекта разработана и практически реализована методика прямого одновременного измерения коэффициентов поглощения и приведенного рассеяния сильно света рассеивающих сред. Созданная экспериментальная установка дает возможность измерять коэффициент экстинкции света в диапазоне $(1.5 \div 100) \text{ см}^{-1}$ при коэффициенте поглощения от 0.05 см^{-1} .
3. С использованием источников стандартных оптико-акустических сигналов разработана и практически реализована методика измерения пропускания ультразвука одномерными периодическими структурами. Частотный диапазон исследования определяется только спектром возбуждаемых сигналов и может простираться от 0.1 МГц до 100 МГц.
4. Спектр пропускания ультразвука одномерных периодических структур представляет собой зонную структуру полос прозрачности и непрозрачности. Дефекты структуры приводят к возникновению в запрещенной зоне одного или нескольких локальных максимумов, а зона прозрачности видоизменяется.
5. Разработана и практически реализована методика оптико-акустической диагностики пористого кремния. Данная методика позволяет проводить неразрушающие измерения пористости и толщины пористого слоя на подложке на образцах с толщиной пористого слоя от 2 мкм до 40 мкм при пористости образцов $(50 \div 70)\%$. Относительная ошибка измерения пористости составляет $(3 \div 5)\%$. Абсолютная погрешность измерения толщины пористого слоя составляет 1 мкм.
6. На основе комплекса широкополосной оптико-акустической спектроскопии продольных и сдвиговых волн исследовано распространение широкополосных

продольных и сдвиговых акустических сигналов в однонаправленных графито-эпоксидных композитах. Обнаружено отсутствие частотной дисперсии в длинноволновом случае. Построены волновые поверхности для квазипродольных и квазипоперечных волн в широком диапазоне углов их распространения. Обнаружено, что фазовая скорость продольной акустической волны вдоль волокон может в 3 раза превосходить ее скорость поперек волокон.

7. Разработана и практически реализована методика измерения полного набора упругих модулей однонаправленных графито-эпоксидных композитов по экспериментально измеренным фазовым скоростям упругих волн. Максимальная ошибка измерения для продольных и сдвиговых модулей составляет 3%, для смешанных - 6% при толщине образцов (3+12) мм.
8. Разработана и практически реализована методика неразрушающей структуроскопии и дефектоскопии многонаправленных графито-эпоксидных композитов по рассеянным назад оптико-акустическим сигналам при одностороннем доступе к объекту контроля. Метод позволяет обнаружить дефекты типа несплошностей, расслоений или инородных включений в композитах на глубинах от 0.5 мм до 30 мм.

Основные результаты диссертации изложены в следующих публикациях:

- [1] *Карабутов А.А., Керштейн И.М., Пеливанов И.М., Подымова Н.Б.* Распространение широкополосных акустических сигналов в однонаправленных волокнистых композитах. // Вестник МУ. Серия 3. Физика, Астрономия. 1997. №5. С.47
- [2] *Карабутов А.А., Керштейн И.М., Пеливанов И.М., Подымова Н.Б.* Исследование упругих свойств однонаправленных графито-эпоксидных композитов лазерным ультразвуковым методом. // Механика композитных материалов. 1998. Т.34(6). С.811.
- [3] *Карабутов А.А., Керштейн И.М., Пеливанов И.М., Подымова Н.Б.* Распространение продольных и сдвиговых акустических видеоимпульсов в однонаправленных графито-эпоксидных композитах. // Акуст. Журн. 1999. Т.45(1). С.105.
- [4] *Karabutov A.A., Pelivanov I.M., Podymova N.B., Skipetrov S.E.* Direct measurement of the spatial distribution of light intensity in a scattering medium. // JETP Lett. 1999. Vol.70(3). P.183.
- [5] *Карабутов А.А., Пеливанов И.М., Подымова Н.Б., Скипетров С.Е.* Измерение оптических характеристик рассеивающих сред оптико-акустическим методом. // Квантовая электроника. 1999. Т.29(3). С.215.
- [6] *Карабутов А.А., Керштейн И.М., Пеливанов И.М., Подымова Н.Б.* Измерение полного набора упругих модулей однонаправленных графито-эпоксидных композитов лазерным оптико-акустическим методом. // Тезисы конф. "Современные проблемы механики". 1999. С.228.
- [7] *Карабутов А.А., Керштейн И.М., Пеливанов И.М., Подымова Н.Б.* Диагностика дефектов структуры композитов лазерным оптико-акустическим методом. // Тезисы конф. "Современные проблемы механики". 1999. С.229.

- [8] *Karabutov A.A., Oraevsky A.A., Pelivanov I.M., Podymova N.B., Skipetrov S.E.* Direct measurement of absorbed light spatial distribution in turbid media by time-resolved opto-acoustic method. // *Pros. SPIE*. 2000. Vol.3916. P.112.
- [9] *Карабутов А.А., Кожушко В.В., Пеливанов И.М., Подымова Н.Б.* Исследование оптико-акустическим методом прохождения широкополосных ультразвуковых импульсов через периодические одномерные структуры. // *Акуст. Журн.* 2000. Т.46(4). С.510.
- [10] *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". 2000. С.115.
- [11] *Карабутов А.А., Пеливанов И.М., Подымова Н.Б.* "Неразрушающий контроль дефектов структуры графито-эпоксидных композитов лазерным ультразвуковым методом. // Тезисы конф. "Механика композитных материалов". 2000. С.116.