

МОСКОВСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ
имени М.В. ЛОМОНОСОВА

На правах рукописи

Зарубин Василий Павлович

**УЛЬТРАЗВУКОВАЯ ТЕРМОМЕТРИЯ И ТОМОГРАФИЯ
ТВЕРДЫХ ТЕЛ СЛОЖНОЙ ФОРМЫ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ
ЛАЗЕРНЫХ ИСТОЧНИКОВ УЛЬТРАЗУКА**

01.04.06 – Акустика

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
кандидата физико-математических наук

Москва – 2019

Работа выполнена в лаборатории лазерной оптоакустики на кафедре общей физики и волновых процессов физического факультета Московского государственного университета имени М.В. Ломоносова.

Научный руководитель:

Карабутов Александр Алексеевич
доктор физико-математических наук, доцент

Официальные оппоненты:

Гончуков Сергей Александрович
доктор физико-математических наук, профессор,
профессор кафедры лазерной физики Института
лазерных и плазменных технологий Национального
исследовательского ядерного университета
«МИФИ»

Есипов Игорь Борисович
доктор физико-математических наук, профессор,
профессор кафедры физики факультета разработки
нефтяных и газовых месторождений Российского
государственного университета нефти и газа имени
И. М. Губкина

Поляр Витольд Эдуардович
доктор физико-математических наук, заведующий
отделом акустооптических информационных систем
Научно-технологического центра уникального
приборостроения РАН

Защита состоится «___» _____ 2019 года в ___ часов ___ минут на заседании Диссертационного совета МГУ.01.08 Московского государственного университета имени М.В. Ломоносова по адресу: 119991, ГСП-1, Ленинские горы, д. 1, стр. 2, физическая аудитория им. Р.В. Хохлова.

С диссертацией можно ознакомиться в отделе диссертаций Научной библиотеки МГУ имени М.В. Ломоносова (адрес: 119192, г. Москва, Ломоносовский пр-т, д. 27) и в сети Интернет: <https://istina.msu.ru/dissertations/188295554/>.

Автореферат разослан «___» _____ 2019 г.

Учёный секретарь
диссертационного совета МГУ.01.08
доктор физико-математических наук, доцент
E-mail: kosareva@physics.msu.ru

О. Г. Косарева

ВВЕДЕНИЕ

В 1880 году Александр Бэлл обнаружил, что при облучении твердого тела в замкнутой оболочке периодически прерывающимся светом возникает звук, который может быть услышан при помощи слуховой трубки. Данный эффект, позже названный оптико-акустическим (или фото-акустическим), вызвал определенный интерес, однако, из-за отсутствия возможностей практического применения был забыт более чем на полвека. С изобретением контролируемых мощных импульсных источников света, лазеров, данный эффект стал применим для проведения спектроскопии и других приложений.

Последующее комплексное изучение, разработка полной теории оптико-акустического эффекта, различных способов возбуждения ультразвука при помощи лазера, методов широкополосного детектирования ультразвука создали базис для возникновения технологий, востребованных в медицине и промышленности. Развитие доступных компьютерных технологий, микроэлектроники, систем сбора и обработки данных, совершенствование способов изготовления акустических компонентов позволили получить в 1990-х годах первые изображения объектов при помощи систем для оптико-акустической томографии биологических тканей, использующих одноэлементные (R. Kruger, P. Liu в 1995 г.) и многоэлементные схемы регистрации ультразвука (А. Ораевский, А. Карабутов в 1999 г.). Кроме того, появилась разновидность оптико-акустической томографии – ультразвуковая томография с использованием лазерных источников ультразвука, являющаяся близкой альтернативой традиционной ультразвуковой томографии.

Актуальность.

Ультразвуковая томография с использованием импульсных лазерных источников ультразвука основана на оптико-акустическом эффекте. При поглощении лазерных импульсов в веществе происходит его локальный нагрев, приводящий к нестационарному расширению вещества и возбуждению ультразвуковых волн. Возбужденный ультразвук может быть использован для зондирования твердых тел способом, схожим с применяемым в стандартных ультразвуковых методах. При этом регистрация рассеянных и отраженных волн осуществляется либо одним пьезоэлектрическим элементом, либо антенной из таких элементов. В первом случае один лазерный импульс позволяет получить так называемый А-скан, содержащий информацию о рассеянии зондирующей волны неоднородностями объекта, расположенными вдоль оси ультразвукового пучка. А-сканы используются для построения более информативных двумерных ультразвуковых изображений, называемых В- и С-сканами,

посредством растрового сканирования всей поверхности объекта. При регистрации ультразвука антенной пьезоэлементов для реконструкции изображений объекта могут быть использованы алгоритмы томографии, позволяющие восстанавливать изображение (обычно аналог В-скана) некоторого участка образца за один лазерный импульс. Применение томографического подхода приводит к существенному росту производительности, позволяет строить изображения объектов более сложных форм, расширяет возможности для применения усовершенствованных алгоритмов обработки этих изображений для максимальной автоматизации ультразвукового контроля и извлечения наиболее значимой информации.

Использование лазерных источников для возбуждения ультразвука имеет ряд преимуществ перед традиционными методами. К ним можно отнести гладкую и короткую биполярную форму зондирующих импульсов, имеющих широкий частотный спектр. Кроме того, диаграмма направленности лазерно-индуцированных источников ультразвука соответствует гладкому профилю оптического пучка, что приводит к практическому отсутствию боковых лепестков зондирующих импульсов. К недостаткам подхода относятся дороговизна лазерного оборудования, используемого для возбуждения акустического излучения, и относительно узкий динамический диапазон возбуждаемого ультразвука за счет ограничения амплитуды импульсов интенсивностью лазерного излучения, при котором происходит деградация материала поглощающей пластинки.

Таким образом, лазерные источники имеют как преимущества, так и недостатки перед другими способами возбуждения ультразвука. Поэтому их применение обоснованно в тех задачах, которые наиболее полно раскрывают эти преимущества. Они включают, в первую очередь, приложения, в которых требуется особенно точное определение свойств объектов на основе измерений скорости ультразвука и его затухания в широкой полосе частот. К ним относятся в том числе и рассматриваемые в данной работе ультразвуковая томография твердых тел, имеющих сложный макрорельеф поверхности, и ультразвуковая термометрия твердых тел.

Задача построения изображений внутренней структуры и определения размеров объектов, соответствующих действительным, при помощи ультразвука является широко распространенной в промышленности, поскольку ее решение важно для повышения надежности и информативности контроля, дефектоскопии и структуроскопии твердых тел. Для того, чтобы построить такие изображения, сначала требуется восстановить профиль объекта с хорошей точностью. Однако, томографические ультразвуковые изображения, полученные с использованием пьезоэлектрического способа возбуждения звука, отображают границы объектов при помощи характерной «гребенки», образующейся за счет множественных осцилляций зондирующего импульса. Это приводит к существенному

понижению качества и разрешения изображений и делает затруднительным точное определение профиля твердых тел, необходимое для построения изображений, соответствующих реальным объектам. В противоположность этому, отсутствие осцилляций зондирующих импульсов, возбужденных при помощи импульсного лазерного излучения, позволяет получить изображения высокого качества, удобные для последующей обработки и выделения профиля. Такие изображения могут быть использованы для проведения двумерной и трехмерной профилометрии внутренней и внешней поверхностей объектов, дефектоскопии, контроля размеров и геометрии объектов, и других приложений.

Ультразвуковая термометрия твердых тел может быть осуществлена на основе явления изменения скорости звука при изменении температуры твердого тела. Несмотря на достаточно долгую историю развития, из-за множества возникающих сложностей этот способ измерения температуры в настоящее время разрабатывается только в лабораторных условиях и фактически не применялся на практике. Интерес к ее разработке обусловлен тем, что существует принципиальная возможность использования алгоритмов томографии для пересчета скоростей звука, измеренных в разных направлениях его распространения внутри образца, в распределения температуры по его объему. Одной из основных проблем является малое изменение скорости звука с ростом температуры, и для обеспечения точности измерений, превосходящей 1 – 2 К, необходима точность измерения скорости звука, превосходящая $\sim 1 - 2$ м/с. Принципиально необходимая точность измерений скорости звука может быть обеспечена фазовыми методами.

В целом, применимость ультразвуковой термометрии твердых тел ограничена достаточно тонкими образцами, содержащими малое число акустических неоднородностей, влияние которых на изменение скорости звука будет меньше, чем влияние изменения температуры. В этом случае применение фазовых методов является затруднительным за счет множественных отражений и наличия «мертвой зоны» у пьезопреобразователей. Другим возможным подходом к измерению скоростей в тонких объектах с точностью, достигающей нескольких метров за секунду, является использование лазерных источников ультразвука. Такой подход хорошо зарекомендовал себя на практике и, в отличие от фазовых методов, не имеет проблем, обусловленных множественными осцилляциями импульсов. В этой связи лазерные источники ультразвука приобретают определенное преимущество при проведении термометрии. Одним из приложений, в которых важно знать структуру тепловых полей внутри твердого тела, является разработка акусто-оптических устройств, неоднородность температуры внутри которых приводит к существенным искажениям функции пропускания.

В связи с изложенным выше, цели и задачи диссертационной работы могут быть сформулированы следующим образом.

Основной целью диссертационной работы является разработка способов ультразвуковой термометрии и томографии твердых тел, имеющих сложную форму поверхности, с использованием лазерных источников ультразвука.

В соответствии с заявленной целью были поставлены и решены следующие практически значимые **задачи**:

1. Разработка принципа и алгоритмов построения ультразвуковых изображений профиля твердых тел, имеющих сложную форму поверхности, с использованием импульсных лазерных источников для возбуждения зондирующего ультразвука и регистрацией рассеянных волн многоэлементной широкополосной приемной антенной.
2. Разработка принципа и алгоритмов ультразвуковой томографии твердого тела с использованием импульсных лазерных источников для возбуждения зондирующего ультразвука и регистрацией рассеянных волн многоэлементной приемной антенной в эхо-режиме. При этом необходим учет преломления зондирующих ультразвуковых волн на поверхности тела на прямом и обратном направлениях распространения, а также разработка алгоритмов для сегментации и измерения геометрии внутренней поверхности объекта. Осуществление численного моделирования процессов распространения волн.
3. Разработка автоматизированной экспериментальной системы для ультразвуковой профилометрии и томографии твердых тел с использованием лазерных источников ультразвука в режиме реального времени. Постановка экспериментов по визуализации и измерению объектов, изготовленных из различных материалов, на ее основе. Определение разрешения разработанной системы и анализ определяющих его факторов.
4. Разработка принципа и экспериментальная реализация способа измерения распределения температуры внутри неоднородно нагретого анизотропного акусто-оптического кристалла на основе томографии скорости звука с импульсным лазерным источником ультразвука и широкополосным приемным элементом.

Научная новизна работы.

1. Разработан и экспериментально реализован новый способ иммерсионной ультразвуковой профилометрии твердых тел с использованием импульсного лазерного источника ультразвука и приемной многоэлементной цилиндрически фокусированной антенны, обеспечивающий высокую точность измерений в режиме реального времени: 20 мкм в направлении распространения зондирующего пучка и 0.3 мм – в поперечном направлении. Предложены и реализованы новые алгоритмы, позволяющие строить двумерные и трехмерные ультразвуковые изображения профиля твердого тела.

2. Разработан и экспериментально реализован новый способ иммерсионной ультразвуковой томографии твердых тел со сложной формой поверхности, использующий лазерный источник ультразвука, приемную многоэлементную цилиндрически фокусированную антенну для работы в эхо-режиме. Предложены и реализованы новые алгоритмы ультразвуковой томографии, учитывающие преломление ультразвука на границе твердого тела на прямом и обратном путях распространения. Разработанный способ томографии обеспечивает высокую точность измерений: 0.1 мм в направлении распространения зондирующего пучка и 0.3 мм – в поперечном.
3. Впервые экспериментально реализована ультразвуковая термометрия акусто-оптического устройства на базе кристалла парателлуриата, основанная на томографии скорости звука, с использованием импульсного лазерного источника ультразвука. Термометрия позволила определить двумерные распределения средней температуры вдоль толщины неоднородно нагретого кристалла с точностью 2 К и пространственным разрешением 0.5 мм в направлении, перпендикулярном распространению зондирующего пучка.

Достоверность представленных результатов подтверждается проверочными физическими экспериментами, соответствием экспериментальных результатов априорной информации, результатам численного моделирования, а также проведенным независимыми методами измерениями. Результаты работы опубликованы в международных журналах, индексируемых в базах Web of Science и Scopus, а также в журналах из списка ВАК. Результаты работы были доложены и обсуждены на семинарах и на международных конференциях.

Практическая значимость работы.

1. Разработанный способ иммерсионной профилометрии позволяет визуализировать и измерять геометрические характеристики макрорельефа объектов, находящихся в жидкостях и имеющих поверхностные загрязнения. Ультразвуковая профилометрия является первым шагом для проведения ультразвуковой томографии твердых тел. Прикладные применения способа включают заводской контроль изделий, находящихся в охлаждающих, смазочных и других жидкостях; контроль резервуаров, трубопроводов, подводный контроль корпусов.
2. Осуществленный в диссертации способ высокоскоростной иммерсионной ультразвуковой томографии позволяет получать изображения профиля и внутренней структуры твердого тела со сложной формой поверхности, воспроизводящие с высокой точностью (0.02-0.1 мм) положения внешних и внутренних поверхностей твердого

тела. Полученные результаты являются основой для разработки экспериментальных методов двумерной и трехмерной ультразвуковой томографии, позволяющей с высокой точностью визуализировать распределения рассеивателей в акустически сильно неоднородных средах. Прикладные применения способа включают подводную и иммерсионную дефектоскопию, контроль износа деталей, точности изготовления деталей, контроль композитных изделий с различными формами поверхности.

3. Разработанные алгоритмы построения и обработки ультразвуковых изображений профиля и внутренней структуры твердых тел имеют общий характер и могут быть применены при использовании различных источников ультразвука, не только лазерных.
4. Осуществлен способ ультразвуковой термометрии с использованием лазерного источника ультразвука для определения температурных распределений внутри твердого тела с высокой точностью. Способ может быть использован для термометрии акусто-оптических устройств в целях их оптимизации. Описанный в диссертации способ термометрии является основой для разработки трехмерной томографии температуры твердых тел с однородной структурой.

Основные положения, выносимые на защиту.

1. Ультразвуковая томография в эхо-режиме с использованием импульсного лазерного источника ультразвука и широкополосной приемной антенны с 16 цилиндрически сфокусированными приемными элементами, имеющими ширину 1 мм и расположенными на расстоянии 1 мм, позволяет визуализировать внешнюю поверхность твердого тела вращения, погруженного в воду и имеющего кусочно-линейную образующую. Точность измерения профиля поверхности составляет 20 мкм в направлении распространения ультразвукового зондирующего пучка и 0.3 мм в перпендикулярном направлении.
2. Импульсный лазерный источник ультразвука и широкополосная приемная антенна с 16 цилиндрически сфокусированными приемными элементами, имеющими ширину 1 мм и расположенными на расстоянии 1 мм, могут быть использованы для проведения иммерсионной ультразвуковой томографии внутренней поверхности твердого и полого тела вращения, имеющего кусочно-линейную образующую и изготовленного из плексигласа или дюралюминия. Используемые при этом алгоритмы должны учитывать преломление волн на поверхности тела, а точность измерений составляет 0.1 мм в направлении распространения ультразвукового зондирующего пучка и 0.3 мм – в перпендикулярном направлении.

3. Измерение скорости звука при помощи импульсного лазерного источника ультразвука и широкополосного приемного элемента позволяет определить среднюю температуру вдоль пути зондирующего пучка неоднородно нагретого и акустически анизотропного кристалла парателлуриата толщиной ~ 10 мм с точностью 2 К и поперечным пространственным разрешением 0.5 мм.

Апробация результатов работы

Вошедшие в диссертацию материалы докладывались на всероссийских и международных конференциях: международной конференции студентов, аспирантов и молодых ученых «Ломоносов-2016» (11-15 апреля 2016 г., Москва), V международном симпозиуме по лазерному ультразвуку «Laser Ultrasonics 2016» (4-8 июля 2016 г., Линц, Австрия), конференции «NDT Days 2017» (12-16 июня 2017, Созополь, Болгария), 13 школы по акусто-оптике и приложениям “13th School on Acousto-Optics and Applications” (19-23 июня 2017, Москва), VI международном конгрессе по ультразвуку «6th International Congress on Ultrasonics» (18-20 декабря 2017 г., Гонолулу, Гавайи, США), VI международном симпозиуме по лазерному ультразвуку «Laser Ultrasonics 2018» (9-13 июля 2018 г., Ноттингем, Великобритания). Разработка нового способа профилометрии была представлена на Международной выставке изобретений SIF 2017 в Сеуле (Южная Корея) и отмечена наградами: серебряной медалью выставки SIF 2017, специальным призом от университета технологий г. Лодзь и дипломом Федеральной Службы по Интеллектуальной Собственности (Роспатент). По результатам разработки способа профилометрии, изложенным в Главе 1, оформлен патент.

Личный вклад автора

Изложенные в диссертационной работе результаты разработки способов профилометрии, томографии и термометрии с использованием лазерных источников ультразвука, экспериментальные установки для осуществления данных способов, разработанные и реализованные алгоритмы, поставленные физические эксперименты выполнены автором лично, либо при его непосредственном участии. Программно-аппаратный комплекс, находящийся в основе автоматизированной установки для лазерной ультразвуковой профилометрии и томографии, разработан и реализован А. С. Бычковым. Комбинированный оптико-акустический и лазерно-ультразвуковой модуль разработан В. А. Симоновой. Акустооптическая ячейка с системой управления, использованная в качестве объекта исследования для лазерной ультразвуковой термометрии, разработана Акусто-Оптическим центром НИТУ «МИСиС».

Публикации

Основные результаты диссертации изложены в 15 научных публикациях (из них 9 статей в рецензируемых научных журналах, удовлетворяющих Положению о присуждении ученых степеней в МГУ им. М. В. Ломоносова, 1 патент на изобретение, 5 тезисов докладов), список которых приведен в конце автореферата.

Структура и объем диссертации

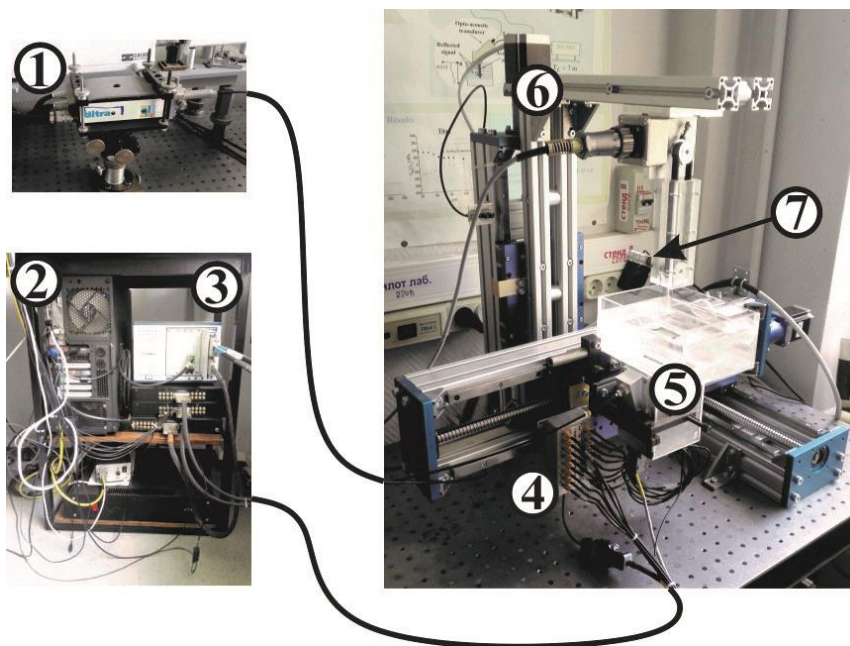
Текст диссертации состоит из введения, трех глав, каждая из которых посвящена решению отдельной задачи, и заключения. При этом все три главы являются оригинальными, и каждая из них состоит из введения, основной части и выводов. Материал работы изложен на 116 страницах, включающих 46 иллюстраций. Список цитируемой литературы содержит 120 наименований. В диссертации принята двухзначная нумерация формул и рисунков. Обращение к формулам осуществляется в виде (1.5), что означает нахождение данной формулы в 1-й главе под номером 5. Аналогично производится нумерация рисунков. Нумерация таблиц едина для всего текста.

Содержание диссертационной работы

Во введении сформулированы актуальность, научная новизна, цели и задачи проведенной работы, основные положения, выносимые на защиту, кратко описано содержание каждой главы диссертации.

Первая глава посвящена разработке способа ультразвуковой профилометрии твердых тел с использованием лазерных источников ультразвука и многоэлементной приемной антенны пьезоэлектрических приемников. Принцип профилометрии, на основании которого действует автоматизированная экспериментальная установка, работающая в режиме реального времени (Рис. 1), состоит в следующем: возбуждаемый при поглощении

Рисунок 1. Экспериментальная установка для иммерсионной лазерной ультразвуковой профилометрии и томографии. 1 – Nd:YAG лазер; 2 – персональный компьютер; 3 – высокоскоростная система приема и обработки информации; 4 – многоканальный предусилитель; 5 – широкополосный лазерный ультразвуковой модуль (оптико-акустический генератор и многоэлементная акустическая антенна); 6 – четырехкоординатная система позиционирования; 7 – образец.



импульсного излучения ультразвуковой пучок фокусируется акустической линзой и распространяется через иммерсионную жидкость к объекту. Из-за большой разницы акустических импедансов жидкости и образца происходит отражение от его поверхности. Отраженные волны преобразуются в электрические сигналы при регистрации широкополосной многоэлементной антенной пьезоэлектрических детекторов. После этого происходит усиление, оцифровка и последующая компьютерная обработка сигналов для построения изображений образца и его профиля. Обработка сигналов на ПК включает в себя предварительную Фурье-фильтрацию принятых данных, построение двумерных ультразвуковых изображений образца, сегментацию профиля на этих изображениях и построение трехмерных изображений поверхности. Для обеспечения режима реального времени вычисления осуществлялись с использованием технологии параллельного программирования на графических процессорах NVIDIA CUDA на базе видеокарты GeForce GTX 770 и с использованием открытой библиотеки компьютерного зрения OpenCV. Это позволило получать детальные ультразвуковые изображения с высоким числом пикселей (размером 1000×1000 пикселей) в режиме реального времени (до 10 Гц).

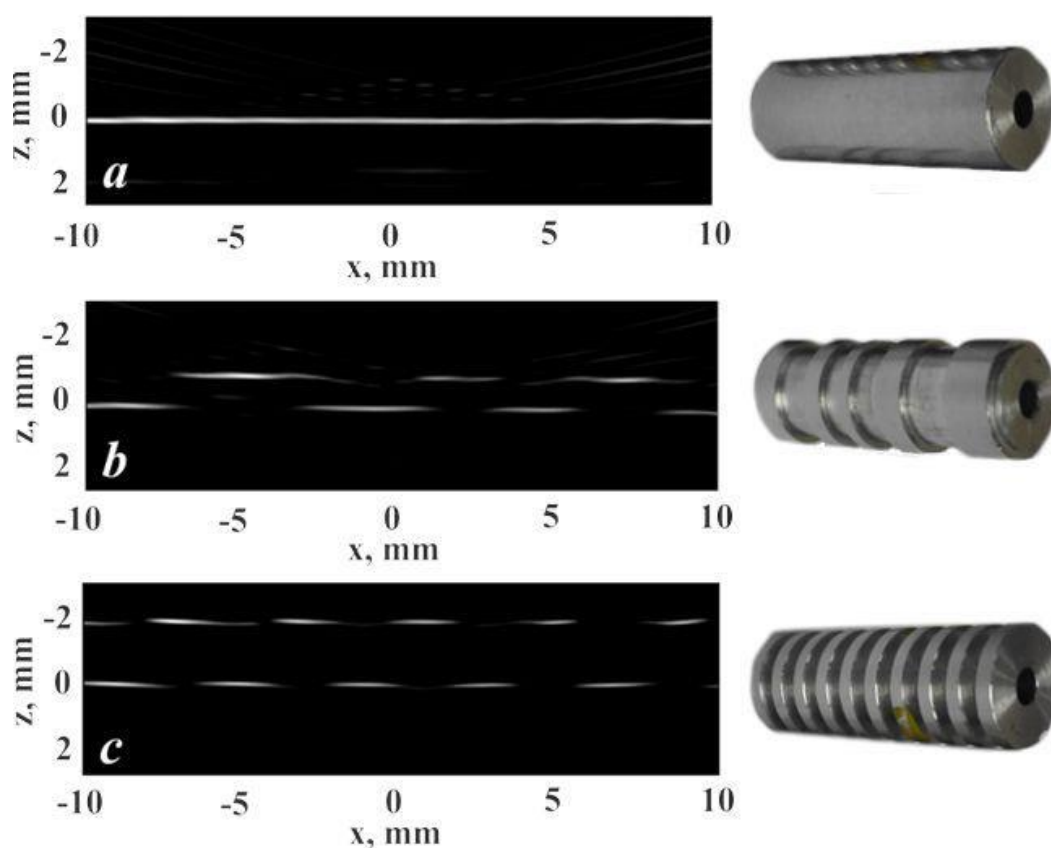


Рисунок 2. Ультразвуковые изображения $\epsilon(x, z)$ дюралюминиевых образцов, построенные при помощи алгоритма фильтрованных обратных проекций: (а) цилиндр диаметром 14 мм, (б) цилиндр диаметром 14 мм с нерегулярными проточками глубиной 1 мм, (с) цилиндр диаметром 14 мм и регулярными проточками глубиной 2 мм. Белые полосы соответствуют отражениям от соответствующих частей поверхности образцов. Изображения $\epsilon(x, z)$ имеют размер 300×1000 пикселей.

Преимуществами такого подхода являются особые свойства лазерно-индуцированных зондирующих импульсов: широкая спектральная полоса, гладкая форма и короткая длительность. Кроме того, диаграмма направленности оптико-акустических излучателей определяется гладким профилем оптического пучка, и поэтому они не имеют боковых лепестков. В используемой конфигурации экспериментальной установки излучение и прием ультразвуковых волн фактически развязаны, что позволяет оптимизировать их по отдельности и минимизировать размер «мертвой зоны». Использование томографических алгоритмов построения изображений позволяет значительно повысить быстродействие установки и работать с объектами более сложных форм. К числу недостатков подхода относятся сравнительно узкий динамический диапазон зондирующих импульсов и возросшая стоимость оборудования за счет использования лазеров.

Распространение ультразвука в среде в основном определяется распределениями плотности и сжимаемости среды. Поэтому решение обратной задачи подразумевает восстановление этих распределений на основе временных зависимостей акустического давления, принятого в наборе точек, соответствующих положениям приемных элементов. В данной работе для ее решения использован алгоритм обратных проекций, подразумевающий излучение принятых сигналов в обратном направлении из центров приемных элементов по так называемым «дугам вероятности», форма которых определяется множеством точек, от

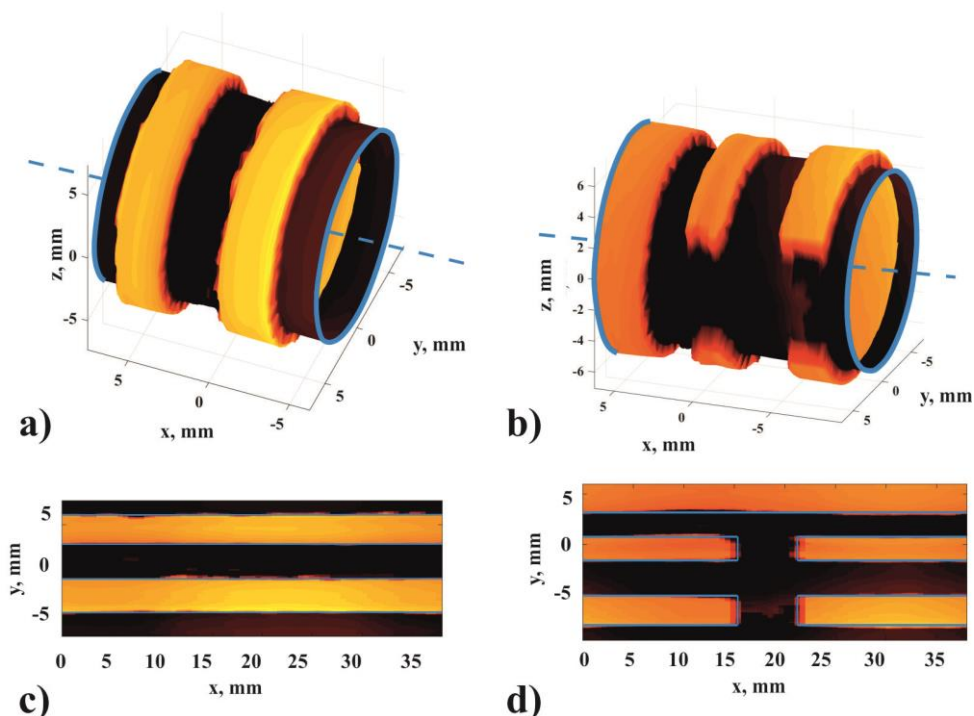


Рисунок 3. (а), (с) Изображения поверхности цилиндра из дюралюминия с нерегулярными проточками. (b), (d) Изображения поверхности цилиндра с нерегулярными проточками, а также модельным дефектом на поверхности. (а), (b) Трехмерные карты поверхности. (с), (d) Двумерные проекции соответствующих трехмерных карт поверхности. Светлые цвета обозначают части образца, более удаленные от центра, темные цвета – более близкие к центру. Голубые линии являются вспомогательными и обозначают границы образца.

которых сигнал приходит на приемный элемент одновременно. Чем больше дуг пересекается в одной точке, тем больше вероятность существования в ней рассеивателя. Однако, при малом числе элементов на изображении существуют дугообразные артефакты, амплитуда которых в работе уменьшается посредством учета диаграммы направленности приемных элементов антенны. Таким образом, распределение эффективных рассеивателей $\epsilon(\mathbf{r})$, являющееся комбинацией распределений сжимаемости и плотности, определяется следующей формулой

$$\epsilon(\mathbf{r}) = \sum_{m=1}^N p(\mathbf{d}_m, t_m) \cdot |\mathbf{d}_m - \mathbf{r}| \cdot D(\mathbf{d}_m, \mathbf{r}), \quad (1)$$

где N – число приемных элементов, \mathbf{d}_m – координаты их центров, $D(\mathbf{d}_m, \mathbf{r})$ – эффективная диаграмма направленности приемных элементов, $p(\mathbf{d}_m, t_m)$ – временная зависимость зарегистрированного на приемных элементах давления, взятая в момент времени $t_m = (z - z_g + |\mathbf{d}_m - \mathbf{r}|)/c_0$, где z_g – координата оптико-акустического излучателя, c_0 – скорость звука в иммерсионной жидкости. На Рис. 2 приведены построенные таким образом ультразвуковые изображения образцов, представляющих собой гладкий цилиндр и цилиндры с регулярными и нерегулярными проточками, изготовленными из дюралюминия. Они четко отображают профиль образцов и могут быть использованы для сегментации профиля.

Сегментация профиля основана на том, что большая часть зондирующего пучка отражается от поверхности объекта – поверхности тела соответствует первый локальный максимум изображений со значительной амплитудой. Поэтому для определения положения профиля в каждом столбце томограммы определялся максимум отражения вдоль оси z . Совокупность таких максимумов будем называть линией максимумов. К ней применялись преобразование Хафа и МНК для определения числа прямолинейных участков, их уравнений и ошибок аппроксимации. Предложенные алгоритмы могут быть модифицированы для работы с поверхностями более сложных форм. Точность измерений в направлении распространения зондирующего пучка составила $\Delta z = 20$ мкм, в поперечном направлении - $\Delta x = 0.3$ мм. Для проверки результатов профилометрии размеры тех же образцов были измерены при помощи рентгеновского томографа Nordson XD7600NT. Результаты измерений обоими методами соответствовали друг другу в пределах 20 мкм.

Построение трехмерных изображений поверхности осуществлялось за счет «склейки» двумерных участков профиля, полученных описанным выше алгоритмом, на каждом шаге вращения образца с заданным углом поворота. На Рис. 3. показан пример трехмерных изображений поверхности образца без повреждений, а также с модельными повреждениями – вырезами. Точность измерений диаметров образца при помощи разработанной системы составила 0.3 мм, и эта ошибка обусловлена в первую очередь несоосностью оси вращения

образца и оси антенны. Экспериментально определено, что максимальный угол наклона поверхности образца к оси приемной антенны, при котором возможна визуализация, составляет 10° .

Отметим, что точность получаемых изображений определяется комплексом свойств как экспериментальной установки, так и исследуемого объекта. Наиболее важными свойствами приемной системы являются число элементов, их ширина, конфигурация приемной системы, стабильность условий проведения экспериментов. Наиболее важное свойство объекта – это шероховатость и мелкомасштабная искривленность поверхности. При диагностике объектов с такими параметрами возможна визуализация только лишь ее локально усредненного положения. Таким образом, разработанный способ является эффективным средством визуализации макрорельефа, или геометрии, поверхности.

Результаты первой главы опубликованы в работах [A1-A5, A9-A12].

Вторая глава посвящена разработке способа иммерсионной ультразвуковой томографии твердых тел, имеющих сложную форму поверхности, с использованием лазерных источников ультразвука и многоэлементной приемной антенны.

В традиционной ультразвуковой томографии обычно предполагается малость неоднородностей среды (например, биологические ткани), что позволяет использовать приближения (Борна, Рытова) для разработки алгоритмов построения ультразвуковых изображений. Однако, они не могут быть применены в случае объектов со значительными акустическими неоднородностями (большинство твердых тел). Поэтому было предложено осуществлять томографию таких тел в два этапа: на первом осуществлять томографию поверхности объекта; на втором этапе – томографию непосредственно внутренней части объектов с учетом преломления зондирующих и рассеянных внутри объекта ультразвуковых волн на его поверхности. Таким образом, основное отличие принципа ультразвуковой томографии от принципа профилометрии состоит в использовании учитывающих преломление алгоритмов (Рис. 3).

Разработанные алгоритмы имеют 3 шага: (1) строится двумерное ультразвуковое изображение с использованием стандартного метода фильтрованных обратных проекций; (2)

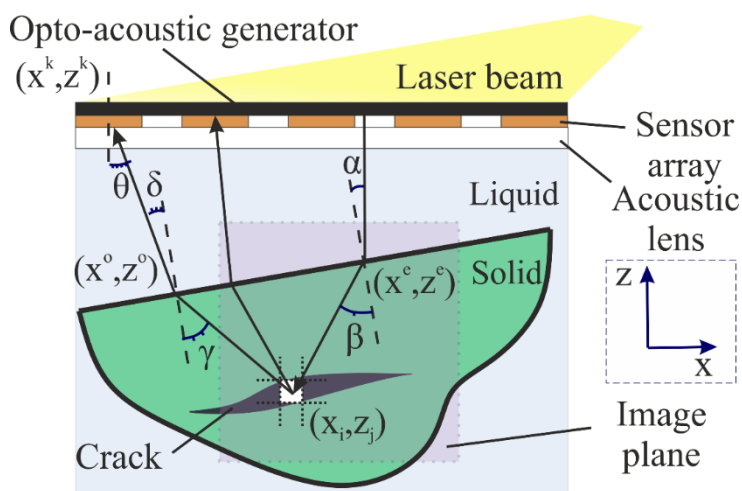


Рисунок 3. Схема разработанного алгоритма и используемые обозначения. Справа – луч, распространяющийся в прямом направлении, слева – в обратном.

на изображении осуществляется сегментация двумерного профиля сечения твердого тела; (3) перестраивается часть полученных изображений, соответствующая внутренностям твердого тела, с учетом преломления ультразвука на его границе. Первые два шага используют алгоритмы профилометрии, и в результате их выполнения получается множество уравнений прямых $z = k_s x + b_s$, определяющих профиль тела.

На третьем шаге осуществляется перестроение части изображения, соответствующего внутренней структуре тела, что означает пересчет значений пикселей $\{(x_i, z_j): z_j < k_s x_i + b_s\}$, находящихся под аппроксимирующими профиль прямыми. Для вычисления точного времени распространения волн с учетом преломления на границе весь путь разделяется на прямой и обратный (Рис. 3). Тогда общее время распространения волны от оптико-акустического генератора до акустической неоднородности в точке изображения $\mathbf{r}_{ij} = (x_i, z_j)$ внутри образца к приемному элементу номер m составляет $t_{ijm} = t_{ijm}^{forw} + t_{ijm}^{back}$, где $t_{ijm}^{forw}, t_{ijm}^{back}$ – времена прямого и обратного пробега соответственно. Для вычисления этих времен необходимо знать координаты точек преломления луча на прямом и обратном путях распространения.

На прямом пути известным является угол, под которым падает зондирующий луч по отношению к линии, составляющей профиль объекта $\alpha = \text{atan } k_s$. Это позволяет вычислить координаты точки преломления луча (x_{ijm}^e, z_{ijm}^e) как точку пересечения одной из прямых профиля и линии, выходящей из пиксела \mathbf{r}_{ij} под углом β , определяемым из закона Снелла $\sin \alpha / c_0 = \sin \beta / c_1$, где c_1 – скорость звука в материале образца. Тогда время прямого пробега может быть вычислено по формуле

$$t_{ijm}^{forw} = \frac{z_{ijm}^e - z_g}{c_0} + \frac{1}{c_1} \sqrt{(x_{ijm}^e - x_i)^2 + (z_{ijm}^e - z_j)^2}. \quad (2)$$

В силу того, что пиксеты предполагаются точечными рассеивателями, они излучают одинаково во все стороны. Поэтому для получения координат точки преломления на обратном пути (x_{ijm}^o, z_{ijm}^o) необходимо соединить лучом пиксел \mathbf{r}_{ij} и каждый из приемных элементов с координатами \mathbf{d}_m . Для этого был применен принцип Ферма, согласно которому времена пробега луча должны быть минимальны. Таким образом, необходимо решать задачу минимизации времени выбором точки на одной из прямых, составляющих профиль тела:

$$\begin{cases} (x_{ijm}^o, z_{ijm}^o) = \text{argmin } t_{ijm}^{back}(x_{ijm}^o, y_{ijm}^o), \\ z_{ijm}^o = k_s x_{ijm}^o + b_s, \end{cases} \quad (3)$$

где формула для расчета времени имеет вид

$$t_{ijm}^{back} = \frac{1}{c_0} \sqrt{(x_m - x_{ijm}^o)^2 + (z_m - z_{ijm}^o)^2} + \frac{1}{c_1} \sqrt{(x_i - x_{ijm}^o)^2 + (z_j - z_{ijm}^o)^2}. \quad (4)$$

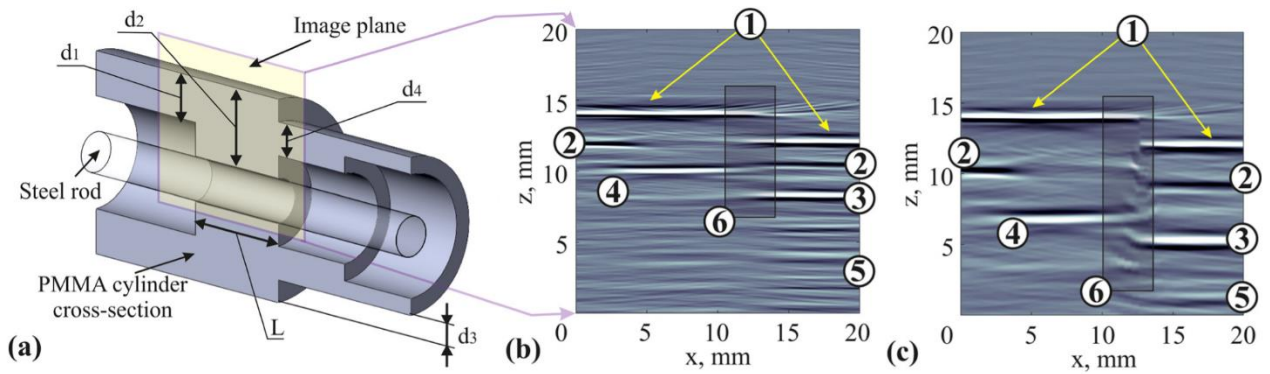


Рисунок 4. (а) Сечение трехмерной модели образца из плексигласа, закрепленного на стальном стержне и погруженного в воду. (б) Первичное ультразвуковое изображение образца (без учета преломления). (в) Итоговое изображение, построенное с учетом преломления. Черные и белые полосы показывают положение границ, отражающих зондирующий ультразвуковой пучок, а также знак коэффициента отражения (черный – отрицательный, белый – положительный). 1 и 2 – внешняя и внутренние поверхности образца и отражение от границы твердое тело – вода, 3 – отражение от стального стержня, 4 – внутренние границы образца и отражение на границе сталь-плексиглас со слоем воды, 5 – переотражения, 6 – участок изображения с артефактами.

Поставленная задача оптимизации решалась методом градиентного спуска. Итоговое выражение для пересчета части изображения, относящейся к внутренней структуре тела, имеет схожий с формулой (1) вид:

$$\epsilon'(\mathbf{r}_{ij}) = \sum_{m=1}^N p(\mathbf{d}_m, t_{ijk}) \cdot D(\mathbf{d}_m, \mathbf{r}_{ij}) \cdot W_{ijk}^{ol} W_{ijk}^{el}, \quad (5)$$

где $W_{ijk}^{ol}, W_{ijk}^{el}$ – коэффициенты преобразования волны на обратном и прямом пробегах. В дальнейшем к полученному изображению применяются дополнительные алгоритмы подавления артефактов и усиления контраста. Корректность разработанных алгоритмов была подтверждена на основе результатов численного моделирования распространения волн в системе «иммерсионная жидкость-образец» при помощи программного пакета k-Wave Toolbox для среды MATLAB.

На Рис. 4 показаны экспериментальные изображения образца, изготовленного согласно численной модели. Построенное без учета преломления экспериментальное изображение образца выглядит «сжатым» вдоль оси z из-за большой разности скоростей в плексигласе и воде. Учитывающие преломление изображения отображают настоящие размеры образца. Коэффициенты отражения от внешней («жидкость – твердое тело») и внутренней (твердое тело – жидкость) границ имеют противоположные знаки за счет того, что плексиглас имеет больший акустический импеданс, чем вода. Это объясняет факт, что внешняя граница 1 белая, а внутренняя 2 – черная (положительные и отрицательные фазы давления соответственно). Образец имеет цилиндрическое отверстие для держателя (малый стальной стержень). Сталь имеет наибольший акустический импеданс, поэтому границы «плексиглас-сталь» и «вода –

сталь» белые (линии **3** и **4**). Отражение **4** формируется на границе «плексиглас – сталь» с тонким слоем воды, поэтому имеет одинаковую полярность с линиями **2**.

Пучок, отраженный от стального стержня, реверберирует в слое воды между стержнем и внутренней поверхностью образца, образуя множественные переотражения **5**. Кроме того, на изображениях присутствуют высокочастотная «шероховатость» и мелкие полосы, вызванные шумами системы. Область, очерченная черным прямоугольником **6**, содержит артефакты изображения, вызванные ограниченным числом приемных элементов и их конечными размерами. Отражения **3** и **4** на Рис. 4(с) приходят от поверхности стального стержня, однако, при этом не образуют прямой линии. Это вызвано заложенным в разработанный алгоритм предположением о том, что после преломления на кусочно-линейной внешней границе образца продольные волны распространяются только в твердом теле и не претерпевают последующих преломлений. Однако, в области $x > 13$ мм (Рис. 4) продольные волны проходят через внешнюю границу **1** и через внутреннюю границу **2** твердого тела. После этого они проходят через слой воды между **2** и **3**, отражаются от стального стержня и распространяются назад. Таким образом, для восстановления размеров тел, находящихся за пределами исследуемого образца, использованное предположение неприменимо.

Таблица 1. Размеры образца, измеренные при помощи лазерной ультразвуковой томографии (ЛУТ), стандартным измерительным инструментом, и на численно моделированных изображениях. Расстояние между отрезками измерено как длина нормали от центра практически горизонтальных линий к соответствующим сегментам. Обозначения введены на Рис. 4.

| Размеры | d_1 , мм | d_2 , мм | d_3 , мм | d_4 , Мм | L , мм |
|---------------------------|------------|------------|------------|------------|----------|
| ЛУТ | 4.02 | 7.04 | 1.97 | 2.91 | 9.98 |
| ЛУТ, поврежденный образец | 3.89 | 7.03 | 1.95 | 2.37 | 10.21 |
| Стандартный инструмент | 3.92 | 7.05 | 1.99 | 2.97 | 10.07 |
| Численное моделирование | 4.01 | 7.00 | 2.01 | 2.99 | 10.12 |

Было проведено сравнение размеров (Табл. 1), определенных при помощи численного моделирования, томографии и стандартного измерительного инструмента, показавшие соответствие результатов в пределах 0.1 мм вдоль оси z (направление распространения зондирующего пучка) и в пределах 0.3 мм вдоль оси x . Для повышения точности сегментации внутренних границ была использована виртуальная модель образцов. В данном случае эта модель – набор уравнений отрезков, представляющих идеальное расположение границ образца. После задания модели осуществляется сдвиг и поворот виртуальной модели таким образом, чтобы совместить профиль виртуальной модели и профиль реального объекта на

изображении. Затем вблизи внутренней поверхности повернутой виртуальной модели осуществляется поиск минимумов или максимумов ультразвуковой томограммы, отображающих внутренние границы реального образца. Подобный подход позволил численно оценивать отклонения (например, возникшие за счет износа, повреждения или производственного брака) реальной формы объекта от заданной (Табл. 1).

Вообще, задача оценки разрешения акустических методов измерения является сложной и зависит от конкретного применения в силу их высокой чувствительности к акустическим свойствам, геометрии и расположения образца, от свойств акустического тракта, склеек, однородности и вариациям скорости звука в иммерсионной жидкости и в материале образца. Вариации скорости звука могут быть связаны с градиентами температуры, остаточными напряжениями, зернистостью материала образца. Воздушные пузырьки, которые появляются в иммерсионной жидкости в различных технологических процессах, приводят к сильному рассеянию зондирующей волны. Поэтому сильное влияние на точность построенных изображений имеет точность использованных значений скоростей звука в иммерсионной жидкости и образце. В общем случае данная проблема может быть частично решена при помощи дополнительных, проводимых параллельно с основными, измерений скорости ультразвука с использованием опорных поверхностей. При проведении экспериментов предварительно при помощи структуроскопа УДЛ-2М в термо-стабилизированных условиях измерялись скорости звука в плоскопараллельных заготовках, в дальнейшем использованных для изготовления образцов, и иммерсионной жидкости.

При использовании разработанных алгоритмов положение вертикальной стенки проточки фактически определяется положением ее угла. Рассеяние зондирующей плоской волны углом приводит к образованию квази-сферической волны. Таким образом, рассеяние на угле аналогично рассеянию на точечном акустическом рассеивателе, а изображение вершины угла – изображению точечного рассеивателя. Размер такого изображения определяет функцию передачи точки системы. Для экспериментальной установки ее ширина в трех измерениях величины оцепеневаается как $(\Delta x, \Delta y, \Delta z) = (0.25, 0.38, 0.08)$ мм. Реально достижимое в экспериментах разрешение превосходит оценки, полученные при помощи функции передачи точки. Так, вдоль оси z пространственное разрешение профилометрии достигает 20 мкм для ровной поверхности за счет использования интерполяции данных при высокой частоте оцифровки. Разрешение вдоль оси x улучшается и достигает 0.2 – 0.3 мм за счет свойств алгоритмов определения профиля: на вертикальной границе происходит выбор между двумя максимумами, соответствующими верхней и нижней поверхностям проточек. Следовательно, при этом частично исключается влияние менее ярких артефактов изображения. Заметим, что, в принципе, более низкое разрешение в поперечном к распространению ультразвукового

пучка направлении свойственно всем ультразвуковым методам, и является ограничивающим фактором их использования.

Ширина полосы приема экспериментальной установки, затухание высокочастотных компонент акустической волны, размеры, геометрическое расположение и количество приемных элементов определяют размер функции передачи точки, области высокой чувствительности, глубину поля и пространственное разрешение лазерной ультразвуковой томографии. Результаты численного моделирования показывают, что при малом количестве приемных элементов возникают полосовые артефакты, которые можно принять за ложные рассеиватели, хотя расчетные карты чувствительности и карты пространственного разрешения слабо зависят от числа приемных элементов при $N \geq 16$. Уровень таких артефактов пропорционален обратному числу приемных элементов $\sim N^{-1}$, в то время как отношение сигнал – шум пропорционально $N^{1/2}$. Цилиндрическая геометрия антенны, использованная в данной экспериментальной установке, обеспечивает наиболее широкую область чувствительности и достаточно низкое разрешение вдоль оси x . Такая конфигурация подходит для сканирования более крупных объектов с более низким пространственным разрешением. Антенны тороидальной конфигурации имеют меньшую область чувствительности и существенно более высокое разрешение вдоль оси x . Таким образом, указанный тип антенн является предпочтительным при сканировании мелких объектов с более высоким разрешением.

Результаты Главы 2 опубликованы в работах [А6, А7, А14].

Третья глава посвящена разработке способа ультразвуковой термометрии с использованием лазерного источника ультразвука и одноканальной приемной системы на примере определения распределений температуры в акусто-оптической квази-коллинеарной ячейке на основе кристалла парателлурита.

Принцип действия таких ячеек основан на акусто-оптическом взаимодействии пучка света, проходящего через кристалл, с распространяющейся в том же направлении медленной сдвиговой ультразвуковой волной. Обычно используется высокочастотный (> 50 МГц) ультразвук значительной мощности (> 1 Вт), который эффективно поглощается веществом кристалла, что приводит к неоднородному тепловыделению в объеме кристалла. Наиболее эффективное акусто-оптическое взаимодействие происходит при частоте фазового синхронизма, которая определяется упругими постоянными и показателями преломления кристалла, зависимыми от температуры. Все это приводит к возникновению искажений оптических характеристик приборов.

Распределения тепловых полей в акусто-оптических кристаллах ранее изучались при помощи полуаналитических методов, численного моделирования, тепловизионных измерений

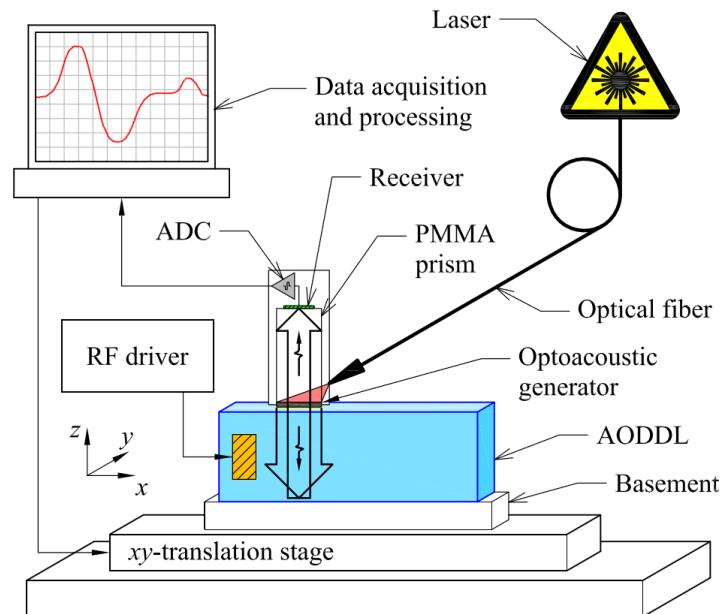


Рисунок 5. Экспериментальная установка для ультразвуковой термометрии акусто-оптической ячейки с использованием лазерного источника ультразвука.

и оптического зондирования. Проведенные исследования позволили определить вклады от двух источников тепла – поглощения звука и электрических потерь на преобразователе. Однако, такие подходы не позволяют определить распределения температуры непосредственно внутри кристалла. Для решения этой задачи было предложено использовать ультразвуковое зондирование ячейки с осуществлением томографии скорости звука и пересчета полученных распределений скорости в температуру на основе известных зависимостей скорости звука в парателлурите от температуры. При этом для обеспечения высокой точности измерений используются лазерные источники зондирующего ультразвука.

Для зондирования кристалла использовался ультразвуковой структуроскоп УДЛ-2М, интегрированный с автоматизированной 3-координатной системой перемещения (Рис. 5). Ультразвуковой зондирующий импульс, возбуждаемый лазерным импульсом в поглощающей пластинке, распространяется через кристалл вдоль оси z , отражается от дна и проходит через акустический тракт приемной системы. После этого осуществляется регистрация волн широкополосным пьезоэлектрическим преобразователем. Ряд отражений от поверхности и дна кристалла приводит к формированию серии пиков на осциллограмме. На основании данных измерений была разработана методика расчета средней температуры кристалла вдоль пути ультразвукового пучка, исключая толщину кристалла из уравнений. Такой подход обеспечил точность измерений скорости звука по времени пролета ~ 2 м/с и температуры – до ~ 2 К. Относительная неопределенность измерений скорости звука составила $\sim 0.1\%$.

На Рис. 6 показаны распределения температуры вдоль плоскости xy , полученные при сканировании кристалла с шагом 0.5 мм. При этом значение каждого пиксела отображает

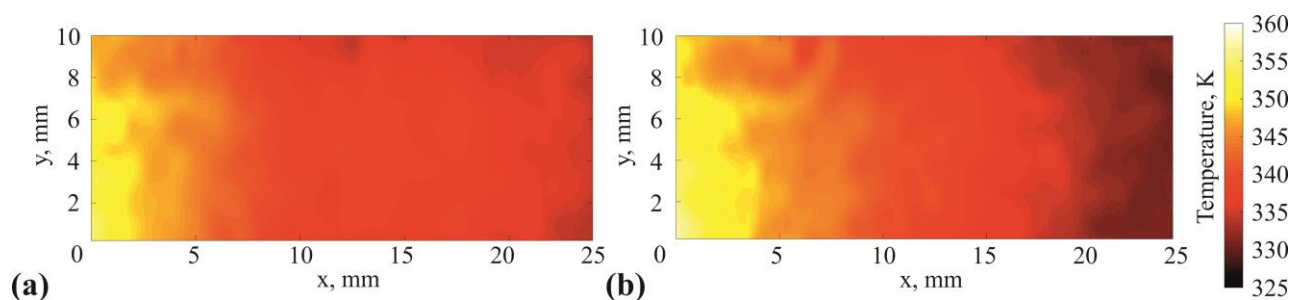


Рисунок 6. Экспериментальные карты распределения температуры по поверхности ячейки при разных частотах ультразвука: (а) $f = 115$ МГц, (б) $f = 160$ МГц.

среднюю температуру по толщине кристалла вдоль пути зондирующего пучка. Максимальную температуру имеет область вблизи пьезоэлектрического преобразователя, что обусловлено двумя близко расположенными источниками тепла – электрическими потерями пьезоэлемента и максимальным тепловыделением за счет поглощения ультразвуковой волны. Минимальная и максимальная измеренные температуры составляют ~ 45 °С и 80 °С соответственно. Градиент температуры вдоль оси x значительно более резкий для частоты $f = 160$ МГц, при этом температура вблизи преобразователя выше, а на удалении – ниже, чем в случае $f = 115$ МГц. Указанные эффекты обусловлены более сильным поглощением звука при большей частоте. Для проверки разработанного способа были проведены дополнительные измерения тепловизором, показавшие хорошее соответствие результатов. Предложенный способ термометрии может служить основой для способа определения трехмерных распределений температуры внутри твердого тела.

Результаты третьей главы опубликованы в работах [А8, А9, А15].

В **заключении** сформулированы общие выводы и результаты всей работы.

Основные результаты работы

1. Разработан и экспериментально реализован иммерсионный способ профилометрии твердых тел, использующий лазерные источники ультразвука и многоэлементную цилиндрически фокусированную приемную антенну. Предложены и реализованы алгоритмы для построения ультразвуковых изображений объектов и сегментации их профиля на изображениях.

2. Разработан и экспериментально реализован иммерсионный способ томографии твердых тел, имеющих сложную форму поверхности, с использованием лазерных источников ультразвука и цилиндрически фокусированной многоэлементной приемной антенны. Продемонстрирована возможность применения способа для количественной оценки износа и повреждения изделий.

3. Разработана автоматизированная экспериментальная установка для профилометрии и томографии в режиме реального времени (частота обновления кадров 10 Гц) с использованием лазерного источника ультразвука и широкополосной приемной антенны из 16

приемных элементов. Точность определения положения внешней границы твердого тела со сложной формой поверхности в направлении распространения зондирующего пучка составила $\Delta z = 20$ мкм, а в перпендикулярном направлении – $\Delta x = 0.3$ мм. Точность определения положения внутренней поверхности образцов из плексигласа и дюралюминия при помощи ультразвуковой томографии составила $\Delta z = 0.1$ мм, $\Delta x = 0.3$ мм.

4. Предложены и реализованы алгоритмы для построения ультразвуковых изображений с учетом преломления волн на границе твердого тела, позволяющие измерять реальные размеры объекта. Разработаны алгоритмы уменьшения артефактов, повышения контраста изображения и сегментации внутреннего профиля тела на изображении с использованием виртуальной модели объекта.

5. Разработан и апробирован способ ультразвуковой термометрии в эхо-режиме с использованием лазерного источника ультразвука и широкополосного приемного элемента. Способ позволил строить двумерные карты средней температуры вдоль пути зондирующего импульса неоднородно нагретого анизотропного кристалла парателлуриата. Сравнение с результатами тепловизионных измерений показало соответствие в пределах 2 К при пространственном разрешении карт 0.5 мм.

ПУБЛИКАЦИИ АВТОРА ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

Публикации в рецензируемых научных журналах, удовлетворяющих Положению о присуждении ученых степеней в МГУ им. М. В. Ломоносова:

A1. **V. Zarubin**, A. Bychkov, A. Karabutov, V. Simonova, E. Cherepetskaya, Laser-induced ultrasonic imaging for measurements of solid surfaces in optically opaque liquids // Applied Optics, 2018, vol. 57, no. 10, pp. C70 – C76, doi: 10.1364/AO.57.000C70.

A2. **В. П. Зарубин**, А. С. Бычков, А. А. Карабутов, В. А. Симонова, И. А. Кудинов, Е. Б. Черепецкая, Профилометрия твердых тел с помощью лазерной ультразвуковой томографии в реальном масштабе времени // Вестник Московского университета. Серия 3: Физика. Астрономия, 2018, том 73, № 1, с. 76 – 83. *Переводная версия:* **V. P. Zarubin**, A. S. Bychkov, V. A. Simonova, I. A. Kudinov, E. B. Cherepetskaya, Real-Time Laser Ultrasound Tomography for Profilometry of Solids // Moscow University Physics Bulletin, 2018, vol. 73, no. 1, pp. 75 – 82, doi: 10.3103/S0027134918010150.

A3. **V. Zarubin**, A. Bychkov, A. Karabutov, V. Simonova, E. Cherepetskaya, A method of laser ultrasound for solid surfaces mapping // MATEC Web of Conferences, 2018, vol. 145, pp. 05009-1 – 05009-7, doi: 10.1051/matecconf/201814505009.

A4. A. Bychkov, V. Simonova, **V. Zarubin**, E. Cherepetskaya, A. Karabutov, The Progress in Photoacoustic and Laser Ultrasonic Tomographic Imaging for Biomedicine and Industry: A Review // Applied Sciences, 2018, vol. 8, no. 10, pp. 1931-1 – 1931-26, doi: 10.3390/app8101931.

A5. A. S. Bychkov, **V. P. Zarubin**, A. A. Karabutov, V. A. Simonova, E. B. Cherepetskaya, On the use of an optoacoustic and laser ultrasonic imaging system for assessing peripheral intravenous access // Photoacoustics, 2017, vol. 5, pp. 10 – 16, doi: 10.1016/j.pacs.2017.01.002.

A6. **V. Zarubin**, A. Bychkov, V. Simonova, V. Zhigarkov, A. Karabutov, E. Cherepetskaya, A refraction-corrected tomographic algorithm for immersion laser-ultrasonic imaging of solids with piecewise linear surface profile // Applied Physics Letters, 2018, vol. 112, no. 21, pp. 214102-1 – 214102-5, doi: 10.1063/1.5030586.

A7. **V. Zarubin**, A. Bychkov, V. Zhigarkov, A. Karabutov, E. Cherepetskaya, Model-based measurement of internal geometry of solid parts with sub-PSF accuracy using laser-ultrasonic imaging // NDT and E International, 2019, vol. 105, pp. 56 – 63, doi: 10.1016/j.ndteint.2019.05.006.

A8. **V.P. Zarubin**, K. B. Yushkov, A. I. Chizhikov, O. Yu. Makarov, V. Ya. Molchanov, S. A. Tretiakov, A. I. Kolesnikov, E. B. Cherepetskaya, A. A. Karabutov, Laser-ultrasonic temperature mapping of and acousto-optic dispersive delay line // NDT and E International, 2018, vol. 98, pp. 171 – 176, doi: 10.1016/j.ndteint.2018.05.010.

A9. **V. Zarubin**, K. Yushkov, A. Chizhikov, V. Molchanov, S. Tretiakov, A. Kolesnikov, E. Cherepetskaya, A. Karabutov, Laser-ultrasonic imaging for evaluation of temperature fields in paratellurite optical crystal // Proceedings of Meetings on Acoustics, 2018, vol. 32, pp. 032002-1 – 032002-5, doi: 10.1121/2.0000722.

Патент:

A10. А. А. Карабутов, Е. Б. Черепецкая, **В. П. Зарубин**, Е. А. Миронова, Н. А. Морозов, И. А. Павлов, И. А. Шибяев, И. Е. Сас, А. С. Бычков, Способ определения макрорельефа поверхности и внутренних включений объекта и устройство для его реализации // Патент на изобретение RU2664993C1 от 23.08.2018.

Тезисы докладов:

A11. **В. П. Зарубин**, Лазерно-ультразвуковая профилометрия // Международная конференция студентов, аспирантов и молодых ученых «Ломоносов 2016». Секция «Физика». Сборник тезисов, М.: Физический факультет МГУ, 2016.

A12. **V. P. Zarubin**, A. S. Bychkov, V. A. Simonova, A. A. Karabutov, E. B. Cherepetskaya, 3D measurement of solid surface using laser ultrasound tomography // 13th School on Acousto-Optics and Applications Abstract Book (19-23 July, 2018, Moscow, Russia), 2018.

A13. A. Karabutov, **V. Zarubin**, V. Simonova, A. Zharinov, I. Kudinov, Laser ultrasound profilometry of solid materials // 5th International Symposium on Laser-Ultrasonics and Advanced Sensing Book of Abstracts (LU2016) (4-8 July, 2016, Linz, Austria), 2016.

A14. **V. Zarubin**, A. Bychkov, V. Simonova, A. Karabutov, E. Cherepetskaya, An algorithm for 2D immersion laser-ultrasonic imaging of solids with piecewise linear surface profile // The 6th International Symposium on Laser Ultrasonics Abstract Book (LU2018) (July 9-13, 2018, Nottingham, UK), 2018.

A15. **V.P. Zarubin**, K. B. Yushkov, A. I. Chizhikov, V. Ya. Molchanov, S. A. Tretiakov, A. I. Kolesnikov, E. B. Cherepetskaya, A. A. Karabutov, Laser-induced ultrasound imaging for evaluation of temperature fields in paratellurite optical crystal // 6th International Congress on Ultrasonics Abstract Book (18-20 December 2017, Honolulu, Hawaii, USA), 2017.