

На правах рукописи

МУРАТИКОВ Кирилл Львович

ТЕОРИЯ И МЕТОДЫ ЛАЗЕРНОЙ ДИАГНОСТИКИ МАТЕРИАЛОВ,  
ОСНОВАННЫЕ НА ГЕНЕРАЦИИ АКУСТИЧЕСКИХ И ТЕПЛОВЫХ ВОЛН

Специальность 01.04.03 – радиофизика

А в т о р е ф е р а т

диссертации на соискание ученой степени  
доктора физико-математических наук

САНКТ-ПЕТЕРБУРГ

2008

Работа выполнена в Физико-техническом институте им.А.Ф.Иоффе РАН

Научный консультант: доктор физико-математических наук, профессор,  
заслуженный деятель науки РФ **С.Б.Гуревич**

Официальные оппоненты: доктор физико-математических наук, профессор  
**Котов О.И.**

доктор технических наук, профессор, заслуженный  
деятель науки РФ, лауреат Государственной премии  
РФ и премии Правительства РФ

**Потапов А.И.**

доктор физико-математических наук, профессор  
**Самсонов А.М.**

Ведущая организация: Институт аналитического приборостроения РАН

Защита состоится «23» октября 2008 г. в 16 час. 00 мин. на заседании  
диссертационного совета Д212.229.01 в ГОУ ВПО «Санкт-Петербургский  
государственный политехнический университет» по адресу 195251,  
С.Петербург, Политехническая ул., 29 II учебный корпус, ауд. 470

С диссертацией можно ознакомиться в фундаментальной библиотеке ГОУ ВПО  
«Санкт-Петербургский государственный политехнический университет»

Автореферат разослан «    » сентября 2008 г.

Ученый секретарь

диссертационного совета Д212.229.01

доктор технических наук, профессор

Коротков А.С.

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы диссертационной работы определяется тем, что исследование процессов трансформации энергии электромагнитного нестационарного излучения (в частности нестационарного оптического излучения) в энергию тепловых и акустических волн или колебаний в твердотельных объектах открывает принципиально новые перспективы их использования в чисто научных и практических целях.

Уникальные возможности лазерных фотоакустических (ФА) и термоволновых (ТВ) методов исследования обусловили их интенсивное развитие на протяжении многих лет. В научных целях исследования подобного рода способствуют выявлению широкого круга линейных и нелинейных физических свойств современных материалов и структур (в первую очередь оптических, тепловых, акустических или упругих, термоупругих). Часто к этим параметрам добавляется информация и о других важных характеристиках материала. Высокая чувствительность волновых ФА и ТВ методов к приповерхностным свойствам объектов способствует их широкому использованию в современных тонкопленочных технологиях различного рода (например, оптических, полупроводниковых и микроэлектронных), а также в нанотехнологиях.

В рамках данной работы особое значение имело исследование влияния внутренних напряжений на волновые ФА и фототепловые (ФТ) процессы в твердых телах. Изучение вопросов подобного рода представляет специальный интерес, так как регистрация внутренних напряжений в современных материалах является самостоятельной достаточно сложной и важной задачей. Разработка различных физических методов регистрации внутренних напряжений в современных материалах в настоящее время активно проводится в целом ряде ведущих лабораторий мира. Принципиальным достоинством современных ФА и ТВ методов является универсальность, неразрушающий характер, высокая чувствительность, а также возможность производить

измерения интересующих параметров с высоким пространственным разрешением и в широком частотном диапазоне (вплоть до ТГц и выше).

Уникальные возможности ФА и ФТ методов исследования твердотельных объектов обуславливают их интенсивное развитие на протяжении многих лет. На основе полученных фундаментальных результатов в области генерации акустических и тепловых волн с помощью ФА и ФТ процессов, изучения процессов их распространения и рассеяния уже разработаны эффективные методы современной спектроскопии, диагностики теплофизических и упругих параметров объемных материалов и тонкопленочных структур, а также эффективные методы современной микроскопии.

В области спектроскопии использование ФА и ФТ методов обеспечивает возможность изучения объектов с рекордными на сегодняшний день значениями коэффициентов поглощения оптического излучения, как в области малых, так и больших их значений. Развитие современной быстродействующей оптической, оптоэлектронной и лазерной техники сделало возможным проведение измерений ФА и ФТ методами на слоях материалов и тонких пленках с толщинами, находящимися в нанометровом диапазоне. Вместе с тем быстро развивающиеся в последнее время технологии новых материалов и структур требуют усовершенствования уже имеющихся и создания новых диагностических методов, в том числе и на основе волновых ФА и ФТ методов.

С точки зрения практических применений исследования подобного рода направлены на создание научной базы принципиально новых методов диагностики и неразрушающего контроля, а также микроскопии современных материалов и структур как на стадии их изучения, так и контроля в процессе эксплуатации. Особое значение в этом плане имеет разработка ФА и ФТ методов обнаружения и мониторинга внутренних напряжений, роль которых в процессах разрушения материалов в настоящее время общепризнанна.

Среди различных моделей ФА эффекта в конденсированных средах особое положение занимает модель, основанная на преобразования энергии

оптического нестационарного излучения в энергию акустических волн или колебаний по термоупругому механизму. Особая роль этой модели обуславливается ее универсальностью. Генерация акустических волн или колебаний по этому механизму характерна для всех видов твердых тел (диэлектриков, металлов, полупроводников). В виду важности и сложности задач подобного рода интерес к их рассмотрению остается достаточно высоким и сейчас, несмотря на относительно продолжительное время их изучения.

Среди важных проблем, определяющих развитие ФА и ФТ методов в настоящее время, следует выделить, в частности, такие направления как изучение ФА и ФТ волновых и колебательных процессов в структурно-неоднородных объектах, включая объекты с внутренними напряжениями. Для получения количественной информации в данных областях необходимо дальнейшее развитие теории ФА и ФТ волновых и колебательных процессов в таких объектах, включая нелинейные модели, а также разработка соответствующих экспериментальных методов.

К настоящему моменту получены значительные результаты, связанные с решением рассматриваемых проблем, однако многие вопросы в этой области еще требуют дальнейшей проработки.

**Целью диссертационной работы** является проведение фундаментальных теоретических и экспериментальных исследований ФА и ФТ волновых и колебательных процессов в неоднородных материалах и структурах, в объектах с внутренними механическими напряжениями, выяснение фундаментальных связей параметров ФА и ТВ сигналов с параметрами неоднородностей различных типов, разработка методов высокочувствительной регистрации ФА и ТВ процессов.

Для достижения этих целей необходимо было решить следующие задачи:

1. Исследовать в рамках теории возмущений процессы генерации, распространения и рассеяния ТВ в неоднородных объектах сфокусированным на поверхность нестационарным оптическим излучением. Получить

аналитические выражения для ФА колебаний при микрофонном и пьезоэлектрическом способах регистрации сигнала, фотодефлекционных (ФД) и фоторефлекционных (ФР) сигналов, позволяющие связать характеристики неоднородности с параметрами соответствующих ФА и ФТ сигналов. На основе полученных результатов исследовать особенности формирования ФА и ФТ изображений неоднородных объектов.

2. Разработать теорию образования ФД и ФР сигналов в рамках волновой оптики с учетом процессов дифракции зондирующего излучения на нестационарных тепловых неоднородностях вблизи или внутри объекта, а также интерференционных эффектов в плоскости фотоприемников. Установить границы применимости традиционных моделей образования ФД и ФР сигналов, основанных на приближениях геометрической оптики.

3. Выполнить сравнительный теоретический и экспериментальный анализ ФД и интерферометрических методов регистрации ТВ сигналов. Разработать экспериментальные схемы, реализующие основные достоинства интерферометрического метода. Выяснить оптимальные условия применения ФД и интерферометрических методов для регистрации ФТ процессов.

4. Исследовать возможности использования ФА и ФТ волновых и колебательных процессов для локального определения теплофизических и термоупругих характеристик материалов, толщин тонких пленок, параметров трещин, внутренних напряжений.

5. Разработать модель нелинейного ФА эффекта в напряженных материалах. Методами ФА и ТВ микроскопии изучить особенности формирования ФА и ТВ изображений вблизи мест индентации по Виккерсу в хрупких и пластичных материалах. Исследовать особенности трансформации ФА и ТВ изображений областей вблизи зон индентации под действием внешних напряжений.

6. В рамках общей теоретической модели ФА эффекта в напряженных материалах разработать специальную модель формирования ФА колебаний вблизи концов трещин. С помощью ФА микроскопии исследовать особенности

поведения ФА колебаний вблизи концов трещин как при наличии только внутренних напряжений, так и при действии внешних нагрузок.

7. Разработать и создать автоматизированную установку для комплексных исследований твердотельных объектов методами ФА и ТВ микроскопии, позволяющую регистрировать ФА и ФТ колебательные и волновые процессы различными методами, как в исходном состоянии, так и при приложении к ним заданных внешних напряжений.

**Научная новизна диссертационной** работы определяется следующими основными результатами, полученными при решении поставленной задачи:

1. Разработан комплексный системный подход к теоретическому и экспериментальному изучению ФА и ФТ волновых и колебательных процессов в неоднородных твердотельных объектах.

2. Рассмотрены процессы оптической генерации, распространения и дифракции тепловых волн в неоднородных объектах. Найдены передаточные функции систем ФА и ТВ микроскопии при различных способах регистрации сигнала.

3. Разработан новый подход в рамках волновой оптики к механизмам образования ФД и ФР сигналов с учетом процессов дифракции зондирующего излучения в зоне действия тепловых неоднородностей в объекте. Определена связь этих сигналов с теплофизическими параметрами изучаемых объектов. Установлены границы применимости использовавшихся ранее результатов, полученных в рамках геометрической оптики.

4. Проведен сравнительный анализ ФД и интерферометрических методов в рамках волновой оптики и трехмерной модели тепловой диффузии. Сформулированы оптимальные условия использования этих методов в области ТВ микроскопии твердотельных объектов и спектроскопии.

5. Предложены полностью бесконтактные ТВ способы определения теплофизических параметров и толщин тонких слоев непрозрачных материалов. Разработаны ТВ методики детектирования, визуализации и оценки параметров подповерхностных трещин.

6. Разработана модель образования ФА колебаний в материалах с внутренними напряжениями. В рамках предложенных моделей установлены механизмы влияния внутренних напряжений на ФА процессы в материалах с внутренними напряжениями, определена связь ФА сигналов с механическими напряжениями, действующими в их приповерхностных слоях.

7. Разработана теоретическая модель формирования ФА колебаний вблизи концов вертикальных трещин. Установлена связь ФА сигналов с внутренними напряжениями вблизи концов трещин, а также с коэффициентами интенсивности напряжений. Продемонстрировано соответствие полученных теоретических результатов с данными ФА микроскопии для керамик индентированных по Виккерсу.

8. Выявлены особенности образования ФА колебаний вблизи зон индентации по Виккерсу в металлах. Продемонстрировано сильное влияние внешних напряжений на ФА изображения областей, расположенных внутри этих зон.

**Научная значимость** диссертационной работы определяется тем, что в рамках цикла теоретических и экспериментальных исследований заложены и развиты основы нового научного направления – ФА и ФТ волновых и колебательных методов диагностики материалов, включая материалы с внутренними напряжениями. На основании единого подхода к процессам генерации, распространения и рассеяния температурных и акустических волн, разработаны методики расчета ФА и ТВ сигналов от неоднородных объектов. Предложена и разработана нелинейная модель ФА эффекта в напряженных материалах. Выявлены особенности проявления ФА эффекта в напряженных материалах. В рамках волновой оптики разработаны принципиально новые подходы к оптическим методам регистрации ФТ и ФА процессов, позволяющие существенно расширить границы применимости ФТ и ФА методов.

#### **Практическая ценность работы.**

1. Предложен и апробирован метод определения внутренних напряжений ФА методом. Отработаны методики визуализации внутренних напряжений в



керамиках и металлах.

2. Предложена модель формирования ФД и ФР сигналов в рамках волновой оптики, справедливая в широком диапазоне температурных волн. Разработанная модель позволяет существенно расширить диапазон температурных волн для количественных измерений ФД и ФР методами.

3. Определены оптимальные условия использования ФД и интерферометрических методов. Определены условия, при которых интерферометрический метод способен обеспечивать более высокую чувствительность по сравнению с ФД методом.

4. Предложены ФД и ФР методы определения теплофизических параметров объемных материалов и тонких пленок. Продемонстрирована возможность использования этих методов для определения толщин тонких пленок, диагностики процессов облучения полупроводниковых структур быстрыми протонами и ионной имплантации.

5. Разработаны методики расчета передаточных функций систем ФА и ФД микроскопии, проведен сравнительный анализ этих систем. Выявлены особенности влияния различных теплофизических параметров, внутренних напряжений на ФА и ФД изображения, позволяющие делать выводы о характере регистрируемых с их помощью изображений.

6. Разработана и собрана многофункциональная автоматизированная установка для получения изображений объектов ФА и ТВ методами, позволяющая производить измерения теплофизических характеристик образцов. Уникальной особенностью установки является возможность получения изображений объектов, как в исходном состоянии, так и при воздействии заданных внешних напряжений.

**Публикации.** По теме диссертационной работы опубликовано 108 работ, в том числе 1 книга, 1 авторское свидетельство СССР на изобретение. Список публикаций автора по теме диссертации приведен в конце автореферата.

**Апробация работы.** Основные результаты работы докладывались на

Всесоюзном научно-техническом семинаре “Фотоакустическая и акустическая микроскопия твердых тел” (Киев, 1985 г.), XIII Всесоюзной конференции по акустоэлектронике и квантовой акустике (Черновцы, 1986 г.), научно-технической конференции “Акустоэлектрические и фотоакустические методы исследования полупроводников” (Киев, 1986 г.), XI и XII Всесоюзных конференциях “Неразрушающие физические методы контроля” (Москва, 1987 г. и Свердловск, 1990 г.), международной конференции по оптике им.Э.Аббе (Йена, ГДР, 1989 г.), Всесоюзной школе-семинаре “Фотоакустическая спектроскопия и микроскопия (фотоакустические и термоволновые явления)” (Душанбе, 1989 г.), международных конференциях Int. Conf. on Photoacoustic and Photothermal Phenomena – VII (Дорверс, Нидерланды, 1991 г.), VIII (Гваделупа, Франция, 1994 г.), IX (Нанкин, КНР), X (Рим, Италия, 1998 г.), XI (Киото, Япония, 2000 г.), XII (Торонто, Канада, 2002 г.), XIII (Рио де Жанейро, Бразилия, 2004 г.), XIV (Каир, Египет, 2007 г.), международных конгрессах Thermal Stresses - III (Краков, Польша, 1999 г.), IV (Осака, Япония, 2001 г.), V (Блэксбург, США, 2003 г.), VI (Вена, Австрия, 2005 г.); международной школе "Laser Optoacoustics and Photothermal Phenomena", (Ла Хойя (La Jolla), США, 1999 г.), европейских конференциях European Conf. on Thermophysical Properties - 15-ой (Вюрцбург, Германия, 1999 г.), 16-ой (Лондон, Англия, 2002 г.); 5-ом международном семинаре Workshop on Photoacoustic and Photothermics (Катовицы, Польша, 2000 г.), 6-ой международной конференции Int. Conf. on Residual Stresses (Оксфорд, Англия, 2000 г.), Всероссийских съездах по теоретической и прикладной механике - VIII (Пермь, 2001 г.), IX (Нижний Новгород, 2006 г.), международной конференции Int. Conf. on Failure Analysis and Metals Properties Monitoring (Екатеринбург, 2001 г.), конференциях “Лазеры, измерения, информация” (Санкт-Петербург, 2001, 2002, 2004, 2007 гг.), европейском конгрессе "Materials Week 2002" (Мюнхен, Германия, 2002 г.), XV международной конференции Int. Conf “Physics of Fracture and Plasticity of Materials” (Тольятти, Россия, 2003 г.); XXXI - XXXV международных школах-

конференциях Summer School – Conference "Advanced Problems in Mechanics" (Репино, Санкт-Петербург, 2003, 2004, 2005, 2006, 2007 гг.), 14-ой Зимней Школе по механике сплошных сред (Пермь, 2005 г.), международных семинарах Int. Topical Meeting on Optoinformatics, (Санкт-Петербург, 2005, 2006 гг.), 7-ой европейской конференции European Conf. on Residual Stresses (Берлин, Германия, 2006), 24 европейской конференции European Conference on Surface Science (Париж, Франция, 2006), 46 международной конференции “Актуальные проблемы прочности” (Витебск, Белоруссия, 2007), 13 ой международной конференции Int. Conf. on Surface Science (Стокгольм, Швеция, 2007).

Результаты работы как в целом, так и отдельные ее части докладывались также на физических семинарах СПбГПУ, университета им.Ф.Шиллера (Йена, Германия), Штутгартском университете (Штутгарт, Германия), институте проблем машиноведения РАН, институте фундаментальных технических проблем ПАН, ФТИ им.А.Ф.Иоффе РАН.

**Структура диссертации.** Диссертационная работа включает в себя введение, пять глав и заключение. Каждая из глав имеет раздел “Выводы”, в котором суммируются полученные в ней результаты. Все основные полученные результаты и общие выводы по работе приведены в разделе “Заключение”.

Общий объем диссертации составляет 319 страниц машинописного текста, включая список цитируемой литературы из 247 наименований и список из 108 публикаций автора по теме диссертации. Диссертация содержит 77 рисунков и 1 таблицу.

**Личный вклад автора.** Содержание диссертации отражает персональный вклад автора в опубликованные работы. Непосредственное участие коллег и зарубежных партнеров автора диссертации в исследованиях отражено в виде их соавторства в опубликованных работах (см. список публикаций автора). В целом вклад автора в выбор направлений исследований, постановку задач, планирование и проведение теоретических и экспериментальных работ, оценку полученных в работе результатов был определяющим.

### **На защиту выносятся следующие положения:**

1. Развитый в рамках теории возмущений теоретический подход, позволяет производить расчет процессов генерации, распространения и рассеяния температурных, термоупругих и акустических волн в твердотельных объектах с неоднородностями различной формы и различной физической природы – тепловой, термоупругой, упругой. Разработанный подход впервые позволил в общей форме установить связь параметров волновых ФТ и ФА процессов с характеристиками неоднородностей в слабо неоднородных объектах, получить аналитические выражения для передаточных функций систем ФА и ТВ микроскопии при различных режимах работы. Он также создает теоретическую базу для интерпретации широкого круга экспериментальных данных ТВ и ФА микроскопии.

2. Разработанная в рамках волновой оптики теория образования ФД и ФР сигналов позволяет установить границы применимости приближения геометрической оптики при интерпретации данных ФД и ФР экспериментов, касающихся в первую очередь определения теплофизических характеристик твердотельных объектов и структур. Предложенная теория позволяет существенно повысить пространственную разрешающую способность ФД и ФР методов при проведении локальных теплофизических измерений благодаря адекватной интерпретации экспериментальных данных в области тепловых волн высокой частоты. С ее помощью выяснены оптимальные условия применения интерференционного и ФД методов для регистрации ТВ процессов.

3. Предложенная в работе теоретическая модель нелинейного ФА эффекта в напряженных материалах позволяет производить расчет волн термоупругих деформаций и ФА колебаний в объектах с внутренними напряжениями и на основании полученных в работе экспериментальных данных проанализировать степень влияния нелинейных термоупругих и акустических параметров на ФА эффект в напряженных материалах. Ее использование позволяет выяснить связь ФА сигнала с коэффициентами интенсивности полей напряжений вблизи

внутренних дефектов (в первую очередь вблизи концов трещин), что впервые позволило объяснить экспериментальные данные по влиянию напряжений различных типов (нормальных, касательных) на поведение ФА сигнала вблизи концов трещин.

4. Разработка комплексного экспериментального подхода к изучению ТВ и ФА процессов позволила экспериментально обнаружить влияние внешних и внутренних напряжений на ФА колебания в керамиках и металлах, а также позволила независимым образом контролировать вклад теплофизических и термоупругих процессов в ФА сигнал. Предложенные в работе экспериментальные и теоретические методики позволяют производить оценки параметров полей внутренних напряжений по данным ФА микроскопии, определять чувствительность ФА метода к механическим напряжениям в различных материалах, развивать принципиально новые методики неразрушающего контроля внутренних напряжений.

## **КРАТКОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ**

**Во введении** обосновывается актуальность темы исследования, сформулированы цели и задачи работы, ее научная новизна, выдвинуты положения, выносимые на защиту.

**Первая глава** носит обзорный характер. В ней рассмотрено состояние современных ФА и ТВ исследований в области конденсированных сред, отмечены основные проблемы в этой области. Описываются основные механизмы генерации акустических волн и колебаний в твердых телах оптическим излучением. Отмечается, что современные ФА и ТВ методы позволяют производить детальную диагностику состояния теплофизических, упругих и термоупругих свойств материалов. Серьезное внимание уделяется описанию состояния оптических методов регистрации ФА и ТВ процессов.

В первой главе приведен сравнительный анализ различных оптических методов регистрации температурных волн. Показано, что ФД, ФР и интерференционные методы являются наиболее перспективными с точки

зрения чувствительности, разрешающей способности, бесконтактного характера получения информации. Кратко рассмотрены процессы образования сигналов в ФД, ФР и интерференционном методах, проанализированы теоретические модели расчета их сигналов в рамках существующих моделей. Сделан вывод о том, что для расширения границ использования перечисленных методов в область более высоких частот тепловых волн необходимо дальнейшее развитие теоретических моделей образования их сигналов с учетом процессов дифракции зондирующего лазерного излучения на тепловых неоднородностях, генерируемых излучением возбуждающего лазера вблизи объекта или на его поверхности.

Серьезное внимание уделено вопросам применения волновых ФА и ФТ методов для диагностики неоднородных объектов. Рассмотрены общие принципы ФА и ТВ микроскопии и методы расчета процессов оптической генерации, распространения и рассеяния температурных волн в гетерогенных средах. Показана необходимость разработки общего систематического подхода к теоретической проработке этих вопросов. Приведен краткий обзор применений методов ФА и ТВ микроскопии для диагностики теплофизических параметров, кинетических и релаксационных процессов, профилирования по глубине непрозрачных объектов.

Важное внимание уделено анализу состояния ФА исследований в области напряженных материалов. В целом отмечается важность проблемы диагностики внутренних напряжений на современном уровне развития науки и техники. На основании анализа современного состояния подобных ФА исследований делается заключение о необходимости развития теоретических моделей ФА эффекта в напряженных материалах, а также проведения дальнейших экспериментальных исследований в этой области. Отмечается, что дальнейшие экспериментальные исследования необходимо проводить в рамках комплексного подхода, позволяющего независимым образом контролировать теплофизические, термоупругие и упругие процессы в изучаемых объектах.

**Во второй главе** сформулированы основные положения теории ФД, ФР и интерференционных методов с учетом взаимодействия считывающего лазерного излучения с неравномерно и не стационарно нагретой средой (например, “тепловой линзой”) в рамках волновой оптики.

В этой главе впервые развита теория образования ФД сигналов в рамках волновой оптики, отмечается важность подхода подобного рода [1,2]. В рамках такого подхода показано, что вычисление ФД сигнала представляет собой дифракционную задачу особого типа и сводится к определению распределения амплитуды электрического поля в пучке считывающего лазера в плоскости позиционно-чувствительного фотодетектора после его взаимодействия с “тепловой линзой” (см. рис.1).

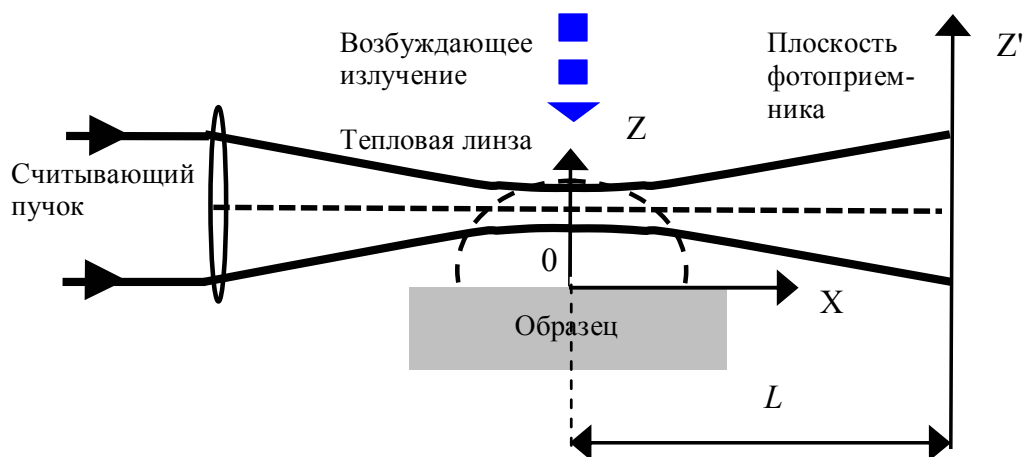


Рис.1. Схема расположения основных элементов оптической системы при регистрации ТВ процессов ФД методом с перпендикулярной геометрией расположения лазерных пучков.

В рамках нашей модели “тепловая линза” рассматривается в виде тонкого прозрачного элемента, а ее показатель преломления модулируется температурными волнами, генерируемыми возбуждающим лазером. Указанная комплексная амплитуда вычисляется с помощью интеграла Френеля-Кирхгофа, учитывая, что расстояние между плоскостью “тепловой линзы” и фотодетектором значительно превышает радиус пучка считывающего лазерного излучения. Специально оценивается возможное влияние волновых эффектов при распространении тепла на параметры ТВ сигналов [3].

Для выяснения роли эффектов волновой оптики при формировании ФД сигналов были поставлены и решены задачи, соответствующие перпендикулярной и параллельной ориентациям пучков считывающего и возбуждающего лазерных пучков относительно друг друга. Для ФД сигналов были получены аналитические выражения, связывающие характеристики этих сигналов с параметрами “тепловой линзы”, зондирующего лазерного излучения и расстоянием между “тепловой линзой” и фотодетектором [1,4-7]. В общем случае выражения для ФД сигналов, полученные в рамках волновой оптики, существенно отличаются от аналогичных результатов, полученных в приближении геометрической оптики. Их совпадение имеет место только в предельном случае, когда радиуса пучка считывающего лазера мал по сравнению с длиной тепловых волн. Полученные аналитические выражения имеют достаточно сложную структуру (содержат, в частности, специальные функции), поэтому их дальнейший анализ проводился численными методами.

Анализ зависимости ФД сигнала от расстояния  $L$  между “тепловой линзой” и фотодетектором показал, что при  $L = L_0 = \frac{2\pi r^2}{\lambda}$  ( $r$  - радиус пучка считывающего лазера в фокальной плоскости,  $\lambda$  - длина его световой волны) сигнал составляет приблизительно 70% от максимальной величины. При  $L > 5L_0$  он практически достигает насыщения. Поэтому дальнейший анализ проводился для условий, соответствующих его максимальной амплитуде, т.е. при  $L \rightarrow \infty$ .

В этом случае, например, для нормальной компоненты ФД сигнала было получено выражение

$$S(t) = K \int dy \int dz I_0(y, z) \varphi(y, z, t) \operatorname{Im} \operatorname{erf} \left( (z - z_0) \sqrt{\frac{ik}{2} \left( \frac{1}{L} + \frac{i}{kr^2} \right)} \right), \quad (1)$$

где  $K$  – коэффициент пропорциональности между интенсивностью света на фотоприемнике и электрическим сигналом,  $I_0$  – распределение интенсивности считывающего пучка,  $\varphi$  – набег фазы излучения считывающего лазера при прохождении тепловой линзы,  $\kappa = 2\pi/\lambda$ .



На основании численных расчетов показано, что отношение сигналов, рассчитанное в рамках волновой оптики и в приближении геометрической оптики, зависит в первую очередь от соотношения между длиной тепловых волн в отклоняющей среде и радиуса считывающего пучка в плоскости “тепловой линзой”. Было установлено, что влияние волновых эффектов на амплитудную и фазовую составляющие ФД сигнала начинает существенно проявляться при  $r \cong \mu$ , где  $\mu$  – длина тепловых волн в отклоняющей среде. Следует отметить, что эффекты волновой оптики сильнее влияют на фазу ФД сигнала, чем на его амплитуду.

Во второй главе приведены результаты экспериментальной апробации предложенной модели образования ФД сигнала [5]. Например, для перпендикулярной конфигурации расположения считывающего и возбуждающего лазерных пучков для воздушной среды она была выполнена в диапазоне частот модуляции от 100 Гц до 10 кГц. Было показано, что волновая модель хорошо описывает поведение сигнала во всем диапазоне радиусов

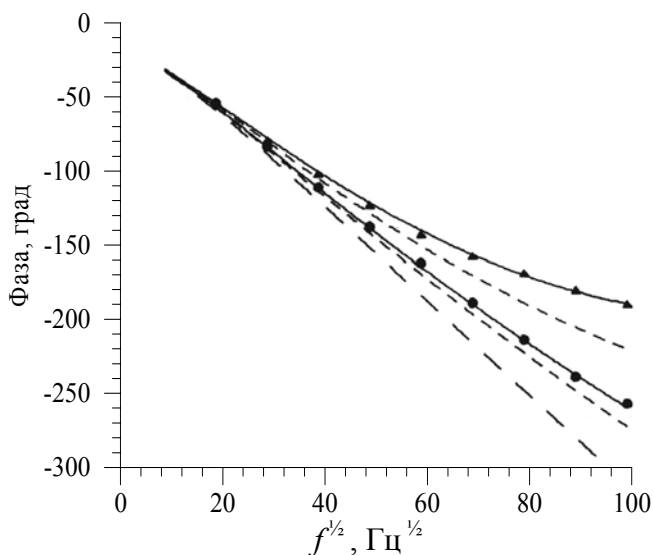


Рис.2. Зависимость фазы ФД сигнала от частоты модуляции. Теоретическому расчету соответствуют кривые: — — — для нулевого радиуса считывающего пучка, — — — .приближение геометрической оптики, ————— волновая оптика. Экспериментальные данные: ●- при  $r = 32$  мкм, ▲ - при  $r = 48$  мкм.

считывающего пучка, тогда как результаты расчета фазы с помощью геометрической модели расходились с данными эксперимента на высоких частотах (см. рис.2). Подобные расхождения могут приводить к значительным неточностям при измерениях теплофизических параметров материалов ФД методом. В связи с этим в работе для количественной интерпретации данных ФД экспериментов для различных материалов использовались результа-

ты, полученные в рамках волновой оптики [8-11].

Полученные результаты для ФД метода были обобщены на случай материалов с анизотропными теплофизическими свойствами. С их помощью ТВ методами были оценены значения коэффициентов тепловой диффузии керамики нитрида кремния [12], а также некоторые параметры трещин в керамиках (величина раскрытия, теплового сопротивления).

Развита модель образования ФР сигнала в рамках волновой оптики [13,14]. Рассмотрены случаи падения пучка зондирующего лазера перпендикулярно и наклонно по отношению к поверхности объекта. Полученные выражения для ФР сигнала показывают, что в общем случае волновые эффекты влияют на характеристики ФР сигнала. В частности, показано, что при отражении от поверхности может происходить модуляция фазы ФР сигнала тепловыми волнами. Выполненный теоретический анализ позволил определить границы применимости геометрической оптики для расчета ФР сигналов.

Разработанные теоретические модели образования ФД и ФР сигналов носят универсальный характер и могут использоваться для интерпретации экспериментальных данных, касающихся различных объектов [12-17].

**В третьей главе** разработаны теоретические и экспериментальные основы интерференционного метода локальной регистрации ТВ для прозрачных и непрозрачных объектов. Получены общие выражения для интерферометрических сигналов при перпендикулярной и параллельной конфигурации расположения пучков зондирующего и возбуждающего лазеров с использованием подходов волновой оптики [4].

Серьезное внимание уделено сравнению интегральной и пороговой чувствительностей интерферометрического и ФД методов при одинаковых экспериментальных условиях. Теоретический анализ проведен для обеих конфигураций этих методов. Установлены условия, при которых интерферометрический метод обладает более высокой чувствительностью при детектировании ТВ [18,19]. Результаты анализа для перпендикулярной

конфигурации показывают, что отношение сигналов зависит от частоты модуляции  $f$  возбуждающего излучения и радиуса  $\rho$  греющего излучения (см. рис.3) [19]. При  $\rho \rightarrow \infty$  отношение интерферометрического сигнала к ФД сигналу достигает максимальной величины, которая обратно пропорциональна  $f^{1/2}$ . С уменьшением  $\rho$  отношение монотонно уменьшается. При  $\rho=0$  это

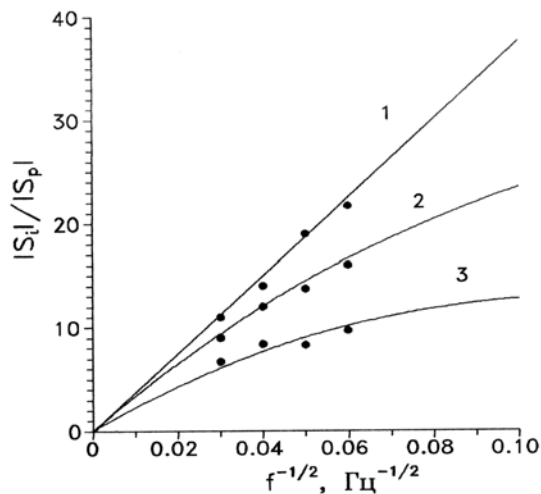


Рис.3. Теоретические и экспериментальные зависимости отношения чувствительностей интерферометрического и ФД методов от  $f^{-1/2}$ . Кривая 1 соответствует  $\rho = 10^3$  мкм, 2 -  $\rho = 10^2$  мкм, 3 -  $\rho = 1$  мкм. Для всех кривых  $z_0 = 30$  мкм,  $\kappa_g = 0.23$  см<sup>2</sup>/с,  $\kappa_s = 1$  см<sup>2</sup>/с.

отношение минимально.

Для параллельной геометрии расположения лазерных пучков исследовалось отношение максимальных амплитуд сигналов. Амплитуда интерферометрического сигнала в этом случае максимальна, если оси пучков совпадают. Для ФД сигналов существует, зависящее от радиусов пучков и длины тепловой диффузии, оптимальное расстояние между осями пучков, которое находилось численно для каждого набора параметров пучков и объекта.

В этом случае характер зависимости отношения амплитуд сигналов от  $f$  и  $\rho$  сохраняется. Отличительной особенностью поведения сигналов в этой геометрии является то, что при  $f \rightarrow \infty$  отношение сигналов не стремится к нулю, а его минимальное значение составляет 5,29. С другой стороны при увеличении  $\rho$  это отношение неограниченно возрастает вследствие уменьшения градиента температурного поля, определяющего ФД сигнал.

Выполнен анализ шумов различной природы для обоих методов. Он показал, что отношение пороговых чувствительностей интерферометрического и ФД методов может быть больше отношения их интегральных чувствительностей. Практическая реализация потенциальных преимуществ

интерферометрического метода зависит от используемой экспериментальной схемы [20]. Предложена и практически реализована интерферометрическая схема с двумя дифракционными решетками для локальной регистрации ТВ [18,19]. Реализованная оптическая схема позволила экспериментально проверить теоретические результаты, полученные в предыдущем разделе, причем для регистрации ФД сигнала использовался пучок в нулевом порядке дифракции [18]. Показано, что принципиальным достоинством предложенной оптической схемы интерферометра является возможность использования дифференциальных схем, компенсирующих шумы временных флуктуаций излучения считывающего лазера и вибрацией элементов оптической системы. Установлено, что предложенная интерферометрическая схема регистрации ТВ более устойчива к акустическим шумам, чем схема, используемая в ФД методе.

Предложенные методы были использованы для исследования многослойных структур типа металл – диэлектрик ( $\text{SiO}_2$ ) – полупроводник (Si). Показана возможность с их помощью регистрации слоя диэлектрика толщиной несколько десятков нанометров [21]. На примере данной структуры было продемонстрировано, что использование интерферометрического метода позволяет в несколько раз сократить время получения ТВ изображений.

Таким образом, теоретически и экспериментально показано, что в герцовом и нижнем килогерцовом диапазоне частот ТВ интерферометрический метод позволяет получить более высокую, чем в ФД метод, чувствительность, а также повысить скорость получения ТВ изображений твердотельных объектов.

**В четвертой главе** разработана методика расчета процессов генерации, распространения и рассеяния температурных волн в неоднородных твердотельных объектах в рамках теории возмущений. Полученные теоретические результаты применены для анализа характеристик систем ТВ микроскопии. В ней развит общий метод расчета ТВ и волновых ФА процессов в твердотельных объектах со слабыми неоднородностями произвольной формы. В рамках теории возмущений с помощью интегральных преобразований Фурье

найжены решения уравнения теплопроводности для неоднородной среды при условии, что вариации теплоемкости и теплопроводности мало отличаются от средних параметров среды. В этом приближении получены выражения для ФД, интерферометрического и ФА сигналов [22,23].

Для систем лазерной ТВ микроскопии введены передаточные функции, описывающие поведение сигнала от неоднородного тонкого слоя параллельного поверхности объекта с теплофизическими параметрами, изменяющимися с определенной пространственной частотой. Анализ полученных передаточных функций систем ФД, интерферометрической и ФА микроскопии показал, что ТВ изображения, обусловленные неоднородностями теплоемкости и теплопроводности, формируются по-разному. Он также показал, во-первых, что при регистрации неоднородностей теплоемкости существует оптимальная частота ТВ, а во-вторых, что при увеличении радиуса пучка возбуждающего лазерного излучения разрешение ФА систем падает значительно быстрее, чем ФД и интерферометрических систем [22,23].

В главе 4 приведены примеры использования методов ТВ микроскопии для диагностики полупроводниковых структур, модифицированных в результате облучения быстрыми протонами или ионами. Показано, что полученные для них экспериментальные данные достаточно хорошо описываются с помощью введенных передаточных функций [24-27].

В главе 4 детально рассмотрены процессы образования сигналов в системах ФА микроскопии, основанных на использовании пьезоэлектрических детекторов [28,29]. В рамках сформулированной задачи считалось, что неоднородный твердотельный объект характеризуется модулями упругости, зависящими от координат. Коэффициент термоупругой связи объекта при этом также считался зависящим от координат. В общем случае решение подобной задачи связано с серьезными математическими сложностями. В связи с этим для ее решения был разработан подход, основанный на теории возмущений и предполагающий, что упругие и термоупругие свойства объекта слабо

изменяются относительно их среднего уровня. Специально проанализированы особенности применения данного подхода к исследованию твердотельных объектов, находящихся в напряженном состоянии.

В работе поставленная задача была решена для объектов с фиксированной и свободной границей [30,31]. При этом для получения аналитических решений использовалось квазистатическое приближение, при котором длина ТВ оказывается существенно меньше длин акустических волн. Следует отметить, что квазистатическое приближение для большинства материалов справедливо вплоть до достаточно высоких частот порядка 1 ГГц. Полученные при этих условиях аналитические выражения для компонент вектора деформаций могут быть использованы для решения широкого круга задач по термоупругости неоднородных объектов. Их знание, в частности, позволило определить сигналы от ФА колебаний неоднородных объектов, регистрируемые с помощью пьезоэлектрического элемента, в следующей форме [30,31]

$$\Delta V(\vec{r}, \omega) = C \int d^3 r' \gamma_1(\vec{r}') T^{(0)}(\vec{r}' - \vec{r}, \omega), \quad (2)$$

где  $C$  – коэффициент, зависящий от параметров пьезодатчика,  $\gamma_1$  – коэффициент термоупругой связи образца, описывающий его неоднородные термоупругие свойства;  $T^{(0)}$  – нестационарное распределение температуры, генерируемое в образце возбуждающим лазерным излучением в точке  $\vec{r} = (x, y, 0)$  на его поверхности,  $\omega$  – частота модуляции лазерного излучения.

Полученные в этой главе выражения для ФА сигналов могут служить основой для интерпретации данных ФА микроскопии, в частности, для напряженных материалов. Продемонстрирована эффективность их использования для анализа ФА данных, полученных на индентированных керамиках и металлах.

**В пятой главе** экспериментально и теоретически исследованы вопросы, касающиеся ФА эффекта в напряженных материалах.

В главе 5 дано детальное описание многофункциональной установки для

проведения исследований различными волновыми ФА и ФТ методами [32-37]. Ее важной особенностью является возможность прикладывать внешнее напряжение к образцу непосредственно в процессе ФА и ФТ измерений [37-39]. Возбуждение тепловых и акустических волн в образцах осуществлялось модулированным во времени излучением аргонового лазера. При проведении ФД, ФР и интерферометрических экспериментов в качестве считывающего использовалось излучение He-Ne лазера. Регистрация ФА колебаний осуществлялась с помощью пьезодатчика, подключенного к тыльной стороне образца. Диапазон рабочих частот модуляции ограничивался пределом измерительной аппаратуры и составлял 20 Гц – 150 кГц. Объект автоматически перемещался в двух направлениях с минимальным шагом 2,5 мкм.

В главе 5 волновые методы ФА, ФД и ФР микроскопии были использованы для изучения зон индентации по Виккерсу в керамике нитрида кремния [33-36] и в керамике  $Al_2O_3-SiC-TiC$  [37,39]. Был выполнен детальный анализ ФД и ФР изображений областей вблизи концов трещин, характеризующихся сильной концентрацией внутренних напряжений. Экспериментально было установлено отсутствие каких-либо особенностей в поведении ФД и ФР сигналов в них. Анализ ФА сигналов показал, что их значения для этих областей существенно превышало их среднего значения для образцов [33-39].

Для подтверждения связи указанных особенностей ФА колебаний с внутренними напряжениями были выполнены специальные исследования по выяснению влияния нагрузки индентации на величину ФА сигналов вблизи концов трещин [36]. В этих исследованиях было установлено, что при небольших нагрузках на индентор с ее увеличением происходит рост ФА сигнала, однако, до определенного значения, соответствующего величине предельно допустимых напряжений для данных материалов. В этом же разделе были выполнены детальные исследования изменения ФА колебаний вблизи концов трещин в керамиках при отжиге [40-42] и продемонстрировано сильное уменьшение ФА сигнала с увеличением времени отжига. При этом после 24

часов отжига при температуре 800°C ФА сигнал не превышал 10% от исходного значения. Таким образом, полученные результаты показали хорошее соответствие изменений ФА сигнала в напряженных областях с характером изменения этих напряжений при воздействиях обоих типов.

В главе 5 сформулированы основные принципы построения нелинейной теории ФА эффекта в напряженных материалах [35,36,42]. Теоретический подход основан на использовании нелинейной модели среды, в которой нелинейные эффекты учитываются введением соответствующих модулей Мурнагана (или эквивалентных им модулей упругости третьего порядка), а также зависящего от напряжений коэффициента термоупругой связи. Плотность энергии материала в данной модели определяется выражением

$$W = (\lambda + 2\mu)\frac{I_1^2}{2} - 2\mu I_2 + (l + 2m)\frac{I_1^3}{3} - 2mI_1I_2 + nI_3 - \gamma_{ik}(u_{ik} - U_{ik})\Delta T, \quad (3)$$

где  $\lambda$  и  $\mu$  - коэффициенты Ламэ;  $l$ ,  $m$ ,  $n$  - постоянные Мурнагана,  $I_1$ ,  $I_2$ ,  $I_3$  - три первых инварианта тензора деформации,  $\gamma_{ik}$  - симметричный тензор, определяющий эффективность преобразования соответствующей деформации в плотность термоупругой энергии твердого тела,  $U_{ik}$  - начальные деформации объекта,  $\Delta T = T - T_0$ ,  $T_0$  - температура окружающей среды.

Разработан метод линеаризации соответствующих этой модели волновых уравнений движения [28,29,36]. Получены аналитические выражения для упругих волн и ФА колебаний в однородно напряженных материалах. Приведены выражения для коэффициента термоупругой связи, объясняющие влияние напряжений на наблюдающиеся в керамиках ФА эффекты.

Важной задачей данной работы являлось изучение особенностей поведения ФА колебаний в напряженных участках материалов вблизи концов трещин [39,43]. С помощью предложенной теории для ФА колебаний вблизи концов вертикальных трещин получен следующий результат

$$\Delta V(r, \theta, \omega) = A \frac{2}{\sqrt{2\pi r}} \left[ \left( K_I^{(0)} + K_I^{(1)} \sin^2 \phi \right) \cos \frac{\theta}{2} - K_{II}^{(1)} \sin \phi \cos \phi \sin \frac{\theta}{2} \right], \quad (4)$$



где  $A$  – некоторый коэффициент пропорциональности,  $K_I^{(0)}$  и  $K_I^{(1)}$ ,  $K_{II}^{(1)}$  – коэффициенты интенсивности напряжений, характеризующие поведение внутренние напряжения вблизи концов радиальных трещин при индентировании и при воздействии внешних нагрузок;  $r$  – расстояние от конца трещины до точки наблюдения,  $\phi$  – угол между направлением трещины и направлением действия внешней нагрузки,  $\theta$  – угол между направлением трещины и направлением на точку наблюдения.

Для проверки приведенной модели формирования ФА колебаний было выполнено сравнение теоретических результатов с ФА экспериментальными данными, полученными из изображений мест индентации в керамиках [37-39,41,42]. На рис.4. приведены типичные изображения этих областей для исходного и нагруженного состояний образцов.

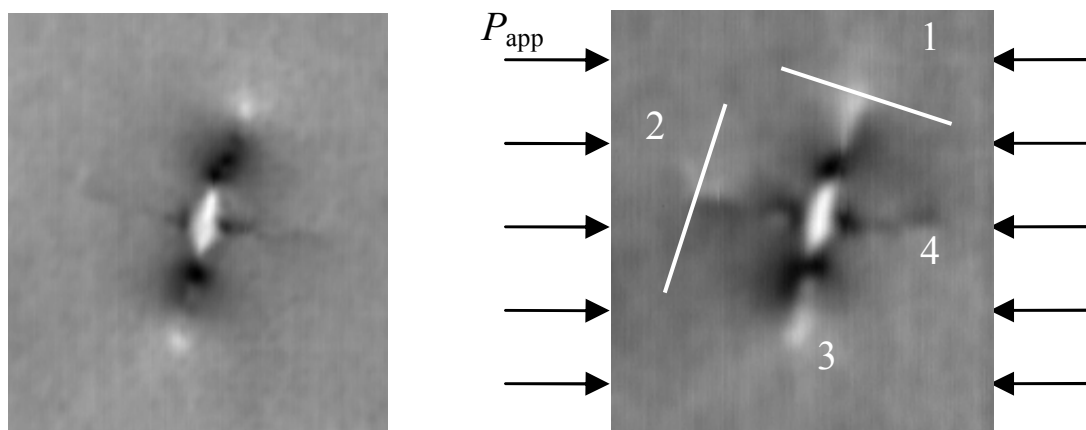


Рис.4. ФА пьезоэлектрическое изображение области индентации в керамике  $\text{Al}_2\text{O}_3\text{-SiC-TiC}$  при отсутствии и воздействии внешней нагрузки 170 МПа. Размер изображения  $480 \times 500 \text{ мкм}^2$ . Частота модуляции возбуждающего излучения 142 кГц.

На рис.5 представлены результаты сравнения теоретических и экспериментальных данных для поведения ФА сигналов вблизи концов трещин 1 и 2 в направлениях, отмеченных на рис.4. Угол  $\phi$  для этих трещин составлял соответственно  $75^\circ$  и  $17^\circ$ . Из рис.5 видно, что оба случая достаточно хорошо описываются в рамках разработанной теоретической модели.

В главе 5 также представлены результаты исследование ФА эффекта для

более сложного случая трещин, расположенных под некоторым произвольным углом относительно направления действия внешней нагрузки [39,42].

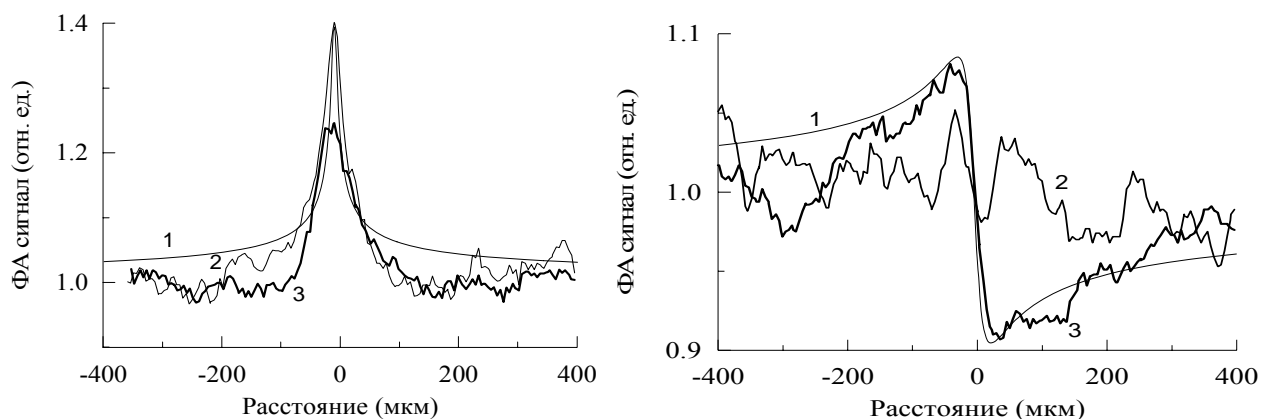


Рис.5. ФА сигнал вблизи концов трещин 1 и 2 без нагрузки и с нагрузкой. Кривая 1 – теоретические результаты, 2 – в исходном состоянии, 3 – под нагрузкой 170 МПа.

Для этого случая было продемонстрировано хорошее соответствие экспериментальных и теоретических результатов следующих из выражений типа (4) при различных соотношениях между нормальными и сдвиговыми напряжениями вблизи концов трещин, а также установлена чувствительность ФА метода к приповерхностным технологическим напряжениям [44].

В главе 5 приведены данные, касающиеся ФА эффекта в напряженных металлах [44-49]. Локализованные внутренние напряжения вводились в металлы индентированием по Виккерсу. Получены ФА изображения индентированных областей для различных металлов, включая наноникель и поликристаллическую медь. Исследовано влияние заданных внешних напряжений на поведение ФА колебаний в металлах. Показано, что на них имеются две характерные зоны. Первая из них захватывает участки, расположенные вблизи отпечатка, а вторая его внутреннюю область. В первом случае показано, что поведение ФА колебаний достаточно хорошо соответствует современным представлениям о характере изменения внутренних напряжений вблизи мест индентации. Во втором случае установлено, что ФА изображения внутренних областей индентации в металлах имеют ярко

выраженную структуру. При этом воздействие внешних напряжений приводит к значительным изменениям ФА изображений, которые могут частично релаксировать к исходному состоянию при снятии внешнего напряжения. На рис.6 приведен типичный пример ФА изображения области вдавливания в металлах в исходном и нагруженном состояниях.

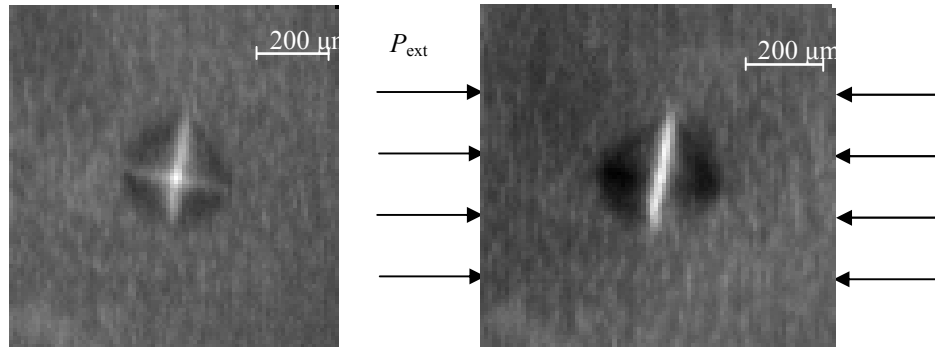


Рис.6. ФА изображения областей индентации по Виккерсу в наноникеле при внешней нагрузке на образец 57 МПа. Размер изображения 1x1 мм<sup>2</sup>. Частота модуляции 142 кГц.

Таким образом, результаты главы 5 продемонстрировали достаточно высокую чувствительность ФА колебаний к механическим напряжениям в керамиках и металлах, а также возможность их использования для визуализации и детектирования внутренних напряжений. В ней показана эффективность предложенных моделей ФА эффекта при интерпретации экспериментальных данных для неоднородных и напряженных материалах.

**В заключении** перечислены основные результаты, полученные в ходе выполнения настоящей диссертационной работы.

### **Основные результаты и выводы работы**

1. Разработан комплексный подход к изучению тепловых и акустических волн и колебаний, генерируемых в неоднородных твердотельных объектах при ФТ и ФА процессах, включающий в себя различные методики диагностики таких процессов, а также соответствующую им теоретическую базу. Разработанный подход носит универсальный характер и может использоваться для изучения волновых ФТ и ФА процессов в материалах различной природы.
2. Развита общий подход к изучению процессов лазерной генерации,

распространения и рассеяния температурных волн в неоднородных объектах. В рамках теории возмущений получены аналитические выражения для передаточных функций систем ФД, интерферометрической и ФА микроскопии. Определены оптимальные условия их применения. Исследовано влияние различных теплофизических параметров на ТВ изображения объектов. Показана возможность определения характера теплофизических неоднородностей объектов путем количественного анализа ТВ изображений.

3. В рамках теории возмущений разработана методика расчета волновых и колебательных ФА процессов, генерируемых лазерным излучением, в неоднородных объектах. В квазистатическом приближении получены аналитические выражения для различных компонент вектора деформаций. Определена связь ФА колебаний при пьезоэлектрическом способе регистрации с неоднородностями термоупругих свойств материала. Полученные в этой области теоретические результаты могут служить научной базой для интерпретации данных ФА и ТВ микроскопии.

4. Разработана теория образования ФД и ФР сигналов в рамках волновой оптики, позволившая существенно расширить границы использования этих методов при ТВ измерениях. На основании полученных аналитических выражений и численных расчетов проведено сравнение ФД и ФР сигналов с аналогичными сигналами, полученными в приближении геометрической оптики. Показано, что при количественном анализе ФД экспериментов необходимо учитывать волновые эффекты при радиусе пучка зондирующего лазера, сравнимом с длиной тепловой волны. Определены границы применимости геометрической оптики при описании ФД и ФР сигналов.

5. Произведено сравнение ФД и интерферометрических методов регистрации тепловых волн. Экспериментально и теоретически установлено, что отношение амплитуд интерферометрического и ФД сигналов увеличивается с уменьшением частоты модуляции и радиуса пучка считывающего излучения. Продемонстрирована более высокая чувствительность интерферометрического

метода по сравнению с ФД методом в указанных условиях. Определены оптимальные условия применения этих методов.

6. Предложена новая оптическая схема реализации интерферометрического метода по регистрации температурных волн в прозрачных и непрозрачных объектах. Экспериментально установлено, что наряду с более высокой чувствительностью использование интерферометрического метода существенно снижает требования к виброизоляции установки по сравнению с ФД методом. Показано, что повышение такой устойчивости позволяет значительно повысить скорость построения ТВ изображений объектов при относительно невысоких частотах.

7. Теоретически и экспериментально отработаны способы определения лазерными ТВ методами теплофизических параметров объемных материалов и многослойных структур. Предложенные способы апробированы на примерах объемных материалов и многослойных структур различных типов (типа металл-диэлектрик-полупроводник, неоднородных полупроводниковых структур, модифицированных быстрыми протонами или ионами), керамик с подповерхностными трещинами. Проанализированы предельные возможности этих методов при решении задач по определению теплофизических и геометрических параметров многослойных структур, трещин в керамиках.

8. Разработана нелинейная теоретическая модель ФА эффекта в напряженных материалах. Разработан метод линеаризации получаемых с ее помощью нелинейных уравнений движения. Определена связь ФА колебаний с термоупругими свойствами напряженных объектов.

9. Теоретически проанализировано поведение ФА колебаний вблизи концов вертикальных трещин. Установлена связь ФА сигнала с полями внутренних и внешних напряжений различных типов (нормальных, касательных), а также с коэффициентами интенсивности напряжений, характеризующих эти поля.

10. Методами ФА микроскопии экспериментально подтверждены основные теоретические выводы предложенной модели о поведении ФА колебаний

вблизи концов трещин при наличии внутренних и внешних напряжений. Показано, что разработанные экспериментальные и теоретические модели позволяют производить количественные оценки коэффициентов интенсивности напряжений для полей напряжений различных типов.

11. Экспериментально установлено сильное влияние внутренних и внешних напряжений на ФА изображения мест индентации в металлах. Показано, что поведение ФА колебаний вблизи области индентации соответствует характеру распределения внутренних напряжений, предсказываемому современными теоретическими моделями. Продемонстрировано сильное влияние внешних напряжений на ФА изображения внутренних областей зон индентации в металлах. Предложены методики оценки внутренних напряжений в металлах по характеру распределения ФА сигналов внутри зон индентации.

Полученные в диссертационной работе теоретические и экспериментальные результаты создают новые физические и информационные подходы к описанию широкого круга волновых и колебательных ФА и ФТ процессов, создают научную базу для разработки новых методов диагностики и микроскопии твердотельных объектов и структур, включая материалы в напряженном состоянии.

### **Основные публикации по материалам диссертации**

1. Glazov A.L., Muratikov K.L. Photodeflection signal formation in thermal wave spectroscopy and microscopy of solids within the framework of wave optics. "Mirage" effect geometry // Opt. Comm. – 1991. – Vol.84. – No.5-6. – pp.283-289.
2. Гуревич С.Б., Муратиков К.Л. Фототермоакустика. М., Знание, 1990, 64с.
3. Муратиков К.Л. Об особенностях поведения температурных волн в твердых телах при описании теплопроводности уравнением гиперболического типа // Письма в ЖТФ. – 1995. – Т.21. - №12. – с.88-94.
4. Глазов А.Л., Муратиков К.Л. ФД и интерферометрический методы регистрации сигнала в ТВ микроскопии и спектроскопии// ЖТФ. –1991. -Т.61. -№11. -С.187-196.
5. Глазов А.Л., Муратиков К.Л. Расчет ФД сигнала в рамках волновой оптики // ЖТФ.

- 1993. - Т.63. - №4. - С.160-166.
6. Glazov A.L., Muratkov K.L. Simulations of PD measurements of thermal diffusivity of solids: Wave optics approach // J. Appl. Phys. – 1994. - Vol.76. – No.6. - pp.3279-3284.
  7. Sandoval-Romero G.E., Garcia-Valenzuela A., Sanchez-Perez C., Hernandez- Cordero J., Muratkov K.L. Device for characterization of thermal effusivity of liquids using PT beam deflection // Rev. Sci. Instrum. – 2007. - Vol.78. – No.10. - p.104901. (7 pages)
  8. Глазов А.Л., Муратиков К.Л. Теория образования ФД сигнала в рамках волновой оптики при лазерных термоволновых экспериментах с твердотельными объектами. Тангенциальная компонента // ЖТФ. – 1994. - Т.64. - №1. - С.118-127.
  9. Муратиков К.Л., Глазов А.Л. К вопросу об измерении теплофизических параметров объемных материалов ФД методом // Письма в ЖТФ. –1995. - Т.21.- №21. - С.32-38.
  10. Glazov A.L., Muratkov K.L. Measurement of thermal parameters of solids by a modified photodeflection method // Opt. Eng. – 1997. - Vol.36. – No.2. - pp.358-362.
  11. Глазов А.Л., Муратиков К.Л. Особенности поведения ФД сигнала в системах ТВ микроскопии и спектроскопии с двумя объективами // ЖТФ. –1993. - Т.63. – №7. - С.115-122.
  12. Муратиков К.Л., Глазов А.Л. Определение теплофизических характеристик и параметров трещин в керамиках ФД методом // ЖТФ. – 2001. - Т.71. -№6. - С.110-115.
  13. Муратиков К.Л. Формирование ФР сигнала в рамках волновой оптики при ТВ экспериментах с твердыми телами // ЖТФ. – 1995. - Т.65. - №2. - С.95-107.
  14. Муратиков К.Л. Формирование фоторефлекционного сигнала в рамках волновой оптики при термоволновых исследованиях твердотельных объектов // Оптика и Спектроскопия. – 1996. - Т.80. - №4. - С.665-670.
  15. Muratkov K.L., Glazov A.L, Walther H.G. Photothermal measurement of the thermal parameters of volume materials and thin films by the photodeflection method // High Temperatures-High Pressures. – 1999. - Vol.31. - pp.69-73.
  16. Muratkov K.L., Usov I.O., Walther H.G., Karge H., Suvorov A.V. Photothermal reflectance investigation of ion implanted 6H-SiC // Appl. Phys. Lett.– 1997.- Vol.71. – No.20. - pp.3001-3003.
  17. Вальтер Х.Г., Карге Х., Муратиков К.Л., Суворов А.В., Усов И.О. Исследование имплантированных слоев в карбиде кремния модуляционным фоторефлекцион-

- ным методом. Письма ЖТФ. – 1997. – Т.23. - №13. – С.11-20.
18. Глазов А.Л., Муратиков К.Л. О фотодефлекционном и интерферометрическом методах регистрации сигнала в термоволновой микроскопии и спектроскопии // Письма в ЖТФ. – 1990. - Т.16. - N18. - с.81-87.
  19. Walther H.G., Friedrich K., Haupt K., Muratikov K.L., Glazov A.L. New phase interference technique applied for sensitive photothermal microscopy // Appl. Phys. Lett.- 1990. - Vol.57. - No.16.- pp.1600-1601.
  20. Гуревич С.Б., Муратиков К.Л. Сигналы и шумы в фотоакустической системе // Тез. докладов II Всесоюзной научно-технической конференции «Проблемы развития радиоптики», М., 1985.- Часть 2.- С.230-231.
  21. Глазов А.Л., Муратиков К.Л. Исследование многослойных твердотельных структур фотодефлекционным методом // Дефектоскопия.- 1989.- №9.- С.35-41.
  22. Глазов А.Л., Муратиков К.Л. Об изображениях твердотельных объектов, формируемых системами ФА микроскопии //ЖТФ.-1987. - Т.57. - №11.- С.2184-2191.
  23. Глазов А.Л., Гуревич С.Б., Муратиков К.Л. О характеристиках ФА систем для построения изображений твердотельных объектов //ЖТФ. -1987.-Т.57.-№3.-С.600-602.
  24. Глазов А.Л., Калиновский В.С., Муратиков К.Л. Исследование влияния облучения GaAs высокоэнергетическими протонами на характеристики термоволновых сигналов // Письма в ЖТФ. – 1992. - Т.18. - №5. - С.9-14.
  25. Glazov A.L., Muratikov K.L., Suvorov A.V. Thermal wave measurement of ion implanted semiconductors in the mirage effect geometry // Appl. Phys. Lett. – 1992. - Vol.61. – No.5. - pp.569-571.
  26. Глазов А.Л., Муратиков К.Л., Суворов А.В. Влияние процессов ионной имплантации на характеристики термоволновых сигналов от полупроводниковых материалов в геометрии эффекта “миража” // ЖТФ. – 1993. - Т.63. - №2. - С.160-166.
  27. Глазов А.Л., Муратиков К.Л. Исследование процессов формирования изображений твердотельных объектов в системах фотодефлекционной микроскопии // ЖТФ. - 1989. - Т.60. - №2. - С.164-170.
  28. Муратиков К.Л. К теории генерации механических колебаний лазерным излучением в твердых телах с внутренними напряжениями // Письма в ЖТФ. – 1998. Т.24. -№13. - С.82-88.



29. Муратиков К.Л. Теория генерации механических колебаний лазерным излучением в твердых телах с внутренними напряжениями на основе термоупругого эффекта // ЖТФ. – 1999. - Т.80. - №4. - С.665-670.
30. Муратиков К.Л. О формировании изображений неоднородных объектов лазерным фотоакустическим методом // Письма в ЖТФ. – 2004. - Т.30. - №22. - С.58 - 64.
31. Муратиков К.Л. О формировании изображений неоднородных объектов со свободной границей лазерным ФА методом // Письма в ЖТФ. – 2005. - Т.31. - №19. - С.59 - 66.
32. Ганжерли Н.М., Глазов А.Л., Григорьев Г.К., Муратиков К.Л. Способ определения теплофизических и упругих параметров твердых материалов. А.С. СССР № 1805285, 1992 (приоритет от 23.11.1988).
33. Муратиков К.Л., Глазов А.Л., Роуз Д.Н., Думар Д.Е., Квай Г.Х. ФД и ФА микроскопия трещин и остаточных напряжений, образующихся в керамике нитрида кремния при вдавливании по Виккерсу // Письма в ЖТФ. – 1997. - Т.23. - №5. - С.44-52.
34. Муратиков К.Л., Глазов А.Л., Роуз Д.Н., Думар Д.Е. Исследование влияния остаточных напряжений на теплофизические и термоупругие свойства керамики нитрида кремния ФТ и ФА методами // Письма в ЖТФ 1998. - Т.24. - №5. - С.40-48.
35. Муратиков К.Л., Глазов А.Л. Теоретическое и экспериментальное исследование фотоакустического и электронноакустического эффектов в твердых телах с внутренними напряжениями // ЖТФ. – 2000. - Т.70. - №8. - С.69-76.
36. Muratikov K.L., Glazov A.L., Rose D.N., Dumar J.E. Photoacoustic effect in stressed elastic solids // J. Appl. Phys. – 2000. - Vol.88. – No.5. - pp.2948-2955.
37. Муратиков К.Л., Глазов А.Л., Роуз Д.Н., Думар Д.Е. О влиянии внешней механической нагрузки на поведение фотоакустического сигнала от радиальных трещин в  $Al_2O_3-SiC-TiC$  керамике // Письма в ЖТФ. – 2002. - Т.28. - №9. - с.48-57.
38. Muratikov K.L., Glazov A.L., Rose D.N., Dumar J.E. Photoacoustics of the stressed state in solids. Abstr. of the 11th Int. Conference on Photoacoustics and Photothermal Phenomena. - Toronto, Canada, 2002, p.200 (invited).
39. Муратиков К.Л., Глазов А.Л. Влияние внешней механической нагрузки на упругие напряжения вблизи радиальных трещин в  $Al_2O_3-SiC-TiC$  керамике, регистрируемые

- фотоакустическим методом // ЖТФ. – 2003. - Т.73. - №8. - С.90-97.
40. Муратиков К.Л., Глазов А.Л., Николаев В.И., Роуз Д.Н., Думар Д.Е. Влияние отжига на поведение фототермического и фотоакустического сигналов от  $Al_2O_3$ -SiT-TiC керамики // Письма в ЖТФ. – 2001. - Т.27. - №12. - С.33-41.
41. Muratikov K.L., Glazov A.L., Rose D.N., Dumar J.E. Photoacoustics of the stressed state in solids // Rev. Sci. Instrum. – 2003. - Vol.74. – No.7. - pp.3531-3535. (materials of the invited lecture at 12 ICPPP)
42. Muratikov K.L., Glazov A.L. Theoretical and experimental investigation of the photoacoustic effect in solids with residual stresses // Central European Journal of Physics. – 2003. - Vol.1. - N3. - pp. 485-515. (review paper) (<http://www.cesj.com>).
43. Muratikov K.L. Theory of the stresses influence on the photoacoustic thermoelastic signal near the vertical crack // Rev. Sci. Instrum. – 2003. - Vol.74. – No.1 - pp.722-724.
44. Muratikov K.L., Glazov A.L. Laser photoacoustic microscopy of mechanical stresses in modern ceramics and metals // Mat. Sci. Forum. – 2006. - Vols. 524-525. - pp 471-476.
45. Muratikov K.L., Glazov A.L. Influence of external and technological stresses on PA images of Vickers indented ceramics and metals // Proc. SPIE. – 2007. - Vol.6594. - p. 65941J. (9 pages).
46. Муратиков К.Л., Глазов А.Л., Николаев В.И. ФА термоупругий эффект вблизи области индентации по Виккерсу в наноникеле // Письма в ЖТФ. – 2005. - Т.31. - №16. - С.19 - 25.
47. Muratikov K.L., Glazov A.L. Laser PA microscopy of mechanical stresses in modern materials. Proc. Int. Topical Meeting on Optoinformatics. - St.Petersburg, Russia, 2005, pp.25 - 26 (invited).
48. Муратиков К.Л., Глазов А.Л. Лазерная ФА микроскопия механических напряжений в современных материалах // Оптический журнал. – 2006. - Т.73. - №9. - С.92-100.
49. Муратиков К.Л., Глазов А.Л. О возможности детектирования и мониторинга внутренних напряжений в керамиках и металлах методом фотоакустической микроскопии. Труды XLVI международной конференции “Актуальные проблемы прочности”. - Витебск, Белоруссия, 2007, ч.1, с.360-365.