

ОТЗЫВ  
официального оппонента на диссертационную работу

Титова Сергея Александровича  
«МИНОГОЭЛЕМЕНТАЯ АКУСТИЧЕСКАЯ МИКРОСКОПИЯ»,  
представленную на соискание ученой степени доктора технических наук  
по специальности 1.3.2. – «Приборы и методы экспериментальной физики»

Актуальность работы. Диссертационная работа Титова С.А. посвящена разработке методов и средств ультразвуковой визуализации высокого разрешения. В настоящее время наиболее распространённым является конфокальный сканирующий акустический микроскоп, в котором изображение формируется путем механического перемещения одиночного сфокусированного преобразователя относительно исследуемого объекта. Несмотря на высокое пространственное разрешение, достигаемое единиц микрометров, данный прибор имеет ряд существенных недостатков. В каждом положении фокусирующего элемента микроскопа выходной сигнал определяется свойствами объекта в фокальной области, размер которого сравним с характерной длиной ультразвука. Такая схема позволяет получать дифракционно ограниченное разрешение, однако необходимость механического сканирования приводит к низкой производительности. Кроме того, сигнал конфокального одноэлементного микроскопа является суперпозицией откликов составляющих угловых спектров зондирующей и рассеянной волн, что зачастую приводит к затруднениям при интерпретации изображений и ограничивает возможности проведения количественных исследований. В диссертации предлагается за счет применения в акустической микроскопии многоэлементных схем, построенных с использованием набора ультразвуковых элементов, в значительной степени преодолеть указанные недостатки и получить более высокую точность измерений, информативность и производительность.

Содержание диссертационной работы.

Диссертация имеет общий объем 313 страниц, состоит из введения, девяти глав, заключения, 128 рисунков, 15 таблиц. Список литературы по теме диссертации включает 307 ссылок, а отдельный список публикаций автора насчитывает 120 наименований.

Во введении приводится общая характеристика работы, формулируются актуальность темы и задачи исследования, раскрывается научная новизна и значимость работы и приводятся выносимые на защиту положения.

В первой главе приведен обзор методов акустической микроскопии и других методов ультразвуковой визуализации, раскрыты существующие проблемы и намечены

пути их решения за счет использования схем ультразвуковой визуализации со многими элементами.

Вторая глава посвящена построению исходной теоретической модели многоэлементного микроскопа, на основе которой можно найти выходной сигнал любой пары приемо-передающих элементов в зависимости от их положения, передаточных функций и параметров объекта. Показано, что полный пространственно-временной сигнал микроскопа связан с функцией рассеяния объекта многомерным преобразованием Фурье. Рассматриваются применения этого соотношения для латерально однородных областей образцов и точечных отражателей, показано, что известная теоретическая модель традиционного конфокального микроскопа является частным случаем разработанной модели.

Третья глава посвящена разработке двухлинзового неконфокального микроскопа, в котором фокусы элементов находятся на поверхности исследуемой области образца, а выходной сигнал формируется в зависимости величины смещения приемного элемента вдоль этой поверхности. Разработана методика обработки сигнала и измерения параметров направленных вытекающих волн типа Релея, Лэмба. Проведено сравнение с одноэлементным конфокальным измерительным микроскопом, в котором фокусирующий приемо-передающий элемент перемещается перпендикулярно поверхности. Показано, что двухлинзовый микроскоп обладает более широкой угловой апертурой и более высокой точностью измерений за счет неограниченности интервала регистрации сигнала, и устойчивостью к вариациям свойств иммерсионной среды.

Четвертая глава посвящена разработке измерительного двухканального допплеровского микроскопа с гармоническим зондирующем сигналом. В нем также, как и в традиционном конфокальном микроскопе, выходной сигнал формируется в зависимости от смещения фокусирующего преобразователя перпендикулярно исследуемой границе, однако в предложенной схеме используется дополнительный опорный канал, а выделение полезного сигнала на фоне помех производится за счет эффекта Доплера, возникающего при движении акустического блока. Такая схема позволяет работать на высоких частотах за счет стабильности отсчета координаты сканирования, обеспечивающейся опорным каналом. Кроме того, частоты компонентов принятого допплеровского сигнала монотонно зависят от угла падения соответствующих угловых составляющих отраженных ультразвуковых волн, что позволяет с высокой производительностью оценивать угловую зависимость коэффициента отражения и находить упругие характеристики исследуемой области.

В пятой главе представлена схема двухэлементного линзово-решеточного измерительного микроскопа, в котором сочетается фокусирующий передающий элемент, зондирующий исследуемую поверхность ультразвуковым пучком с широкой угловой

апертурой, и приемная решетка элементов, регистрирующая без механического сканирования пространственно - временное распределение отраженного поля. Подробное исследование погрешностей измерения параметров вытекающих волн показало, что угол наклона апертуры решетки целесообразно располагать параллельно фронту исследуемой вытекающей волны.

В шестой главе предложен однорешеточный измерительный микроскоп, в котором решетка ориентирована параллельно плоскости исследуемой области образца. Учитывая узкую направленность элементов высокочастотных ультразвуковых решеток, такая схема представляется эффективной для измерения параметров объемных волн. В диссертации разработан оригинальный алгоритм обработки пространственно-временных сигналов, основанный на разложении в спектр плоских, импульсных волн, позволяющий находить скорости объемных волн в слоях, их толщину, а в отдельных случаях – плотность и затухание. Для устранения наложения спектральных составляющих, вызываемых разреженностью высокочастотных решеток и приводящих к повышенной погрешности измерений, предложена методика интерполяции сигнала с разделяющимися во времени откликами от границ слоев.

Седьмая глава посвящена многоэлементным микроскопам, работающим в режиме формирования изображений. В решеточном многолинзовом микроскопе в едином блоке объединены традиционные конфокальные ультразвуковые каналы, что позволяет повысить производительность и упростить механический сканер. В безлинзовом матричном микроскопе используется набор плоских элементов, размеры которых существенно превосходят длину волны. Для повышения поперечной разрешающей способности этой схемы при визуализации несплошностей в слоистых объектах разработан алгоритм, основанный на сравнение амплитуды сигнала с пространственной переходной характеристикой элемента и определении расстояний от визуализируемой границы до осевой линии элемента. Теоретически и экспериментально показано, что для несплошностей с плавными границами погрешность определения ее положения может быть существенно меньше периода решетки.

В восьмой главе представлены результаты использования разработанных многоэлементных микроскопов в промышленном неразрушающем контроле, для контроля таких изделий как клевые соединения металлических листов, точечные сварки. Также разработаны методики мониторинга технологических процессов, позволяющих в масштабе реального времени проводить ультразвуковую визуализацию области расплавленного металла в зоне сварки и покрытия, наносимого методом газодинамического напыления.

В девятой главе приводятся сведения по разработке принципиальных узлов и компонентов многоэлементных акустических микроскопов. Для анализа ультразвуковых

элементов разработана оригинальная модель, учитывающая не только свойства пьезоматериала и контактирующих с ним сред, но и электрические параметры входных параметров входного усилителя, что позволило выполнить оптимизацию параметров по критерию максимального отношения «сигнал-шум».

В заключении сформулированы основные результаты работы.

#### Научная новизна результатов и выводов.

Предложено в акустической микроскопии использовать наборы ультразвуковых элементов в различных конфигурациях, размеры которых существенно превышают характерную длину волны на рабочей частоте прибора. Разработана теоретическая модель многоэлементной измерительной системы, на основе которой найдена связь пространственно-временного сигнала микроскопа с функцией рассеяния объекта. Показано, что она может быть найдена в общем случае путем многомерного преобразования Фурье полного сигнала.

Предложены и разработаны двухлинзовый неконфокальный и двухканальный допплеровский микроскопы, предназначенные для измерения упругих параметров латерально однородных областей образца. В этих схемах пространственно-временной сигнал формируется путем механического перемещения фокусирующих элементов вдоль или перпендикулярно исследуемой поверхности, соответственно.

Избавившись от механического сканирования при измерении позволяют предложенные и разработанные схемы двухэлементного линзово-решеточного и однорешеточного микроскопов. В этих схемах регистрация отраженной от образца волны осуществляется с помощью решеток ультразвуковых элементов.

Для режима формирования акустических изображений разработаны решеточный многолинзовый, матричный безлинзовый и матричный однолинзовый микроскопы, имеющие различающие схемы построения, характеристики и области применения. Наиболее информативным представляется матричный однолинзовый микроскоп, в котором как зондирование объекта квазиплоскими волнами, так и прием рассеянных им волн осуществляется под различными углами, количество которых определяется общим числом элементов в матрице. Для матричного безлинзового микроскопа разработан метод визуализации несплошностей в слоистых объектах и методики его применения в неразрушающем контроле и промышленной диагностике.

#### Теоретическая и практическая значимость

В работе предложены разнообразные схемы многоэлементных акустических микроскопов, разработана их теоретическая модель, позволяющая проводить их анализ и являющая основой для разработки методик исследований, алгоритмов обработки сигналов и интерпретации получаемых результатов.

Теоретически и экспериментально показаны преимущества предложенных схем по сравнению с традиционным однолинзовым конфокальным микроскопом по критериям точности измерений, разрешающей способности, информативности и производительности.

Продемонстрировано, что разработанные многоэлементные микроскопы могут успешно применяться в промышленности для неразрушающего контроля изделий и мониторинга технологических процессов.

Подходы, выработанные в ходе выполнения работы, рекомендации по практическому созданию аппаратуры и программного обеспечения могут служить основой для разработки новых высокочастотных ультразвуковых методов и средств.

#### Апробация результатов работы

Основные результаты диссертации Титова С.А. опубликованы в 120 работах, 67 из которых входят в международные базы цитирования Web of Science и Scopus и доложены на 26 российских и международных конференциях.

#### Замечания по работе

1) В алгоритме построения плавной границы расслоений в слоистых образцах по амплитудам сигналов матричного безлинзового микроскопа предполагается (раздел 7.3), что переходная функция элемента обладает осевой симметрией. В эксперименте же использовались квадратные элементы, однако, обоснование правомерности такого приближения не приведено.

2) Работоспособность измерительных акустических микроскопов продемонстрирована в основном на твердотельных образцах, однако остается не ясным возможность измерения с их помощью свойств мягких биологических тканей, которые характеризуются низкой скоростью звука и импедансом.

3) На рис. 13 (стр. 193), рис.8 (стр. 227) для некоторых осей не указаны переменные и масштаб.

4) Во Введении (строка 6) фраза «обеспечивая пространственное разрешение» повторяется подряд дважды.

5) Во втором абзаце Введения в причастии «Приближающееся» (разрешение, приближающееся к дифракционному пределу) сделана ошибка (написано: разрешение приближающиеся).

6) Во Введении при обзорном анализе существующих микроскопических систем отсутствуют ссылки на работы, в которых эти системы описаны, или упоминаются. А в главе 1, где выполнен литературный обзор, нарушена последовательность ссылок на упоминаемые источники ([23-25,217], [26-28,220] и др.).

7) В разделах «Цели и задачи», «Научная новизна» и др. диссертации используется фраза «сфокусированные ультразвуковые элементы». Представляется, что более корректной была бы фраза «Фокусирующий ультразвуковой элемент».

8) В диссертации использованы повторяющиеся по главам нумерации рисунков и формул, что создает определенные неудобства анализа работы в целом в сравнении со сквозной нумерацией.

9) В тексте встречаются описки, например: Стр.104: «половинным апертурный угол».

Следует отметить, что приведенные замечания не влияют на общее высокое качество представленной работы.

Результаты, полученные в диссертационной работе Титова С.А., являются обоснованными, обладают новизной и практической значимостью. Материал диссертации изложен грамотным языком и достаточно полно представлен в публикациях, автореферат соответствует тексту диссертации. Диссертация представляет собой завершенный научный труд, имеющий несомненный научный интерес, в результате которого создано научное направление, открывающее новые возможности для развития методов ультразвуковой визуализации высокого разрешения.

Диссертационная работа Титова Сергея Александровича «Многоэлементная акустическая микроскопия» удовлетворяет требованиям «Положения о присуждении ученых степеней», предъявляемым к докторским диссертациям, ее содержание соответствует паспорту специальности 1.3.2. – «Приборы и методы экспериментальной физики». Автор диссертации Титов С.А. заслуживает присуждения ученой степени доктора технических наук по специальности 1.3.2. – «Приборы и методы экспериментальной физики».

Петров Владимир Владимирович

д.ф.-м.н., профессор, профессор кафедры  
компьютерной физики и метаматериалов, Институт физики  
Саратовского национального исследовательского  
государственного университета имени Н.Г.  
Чернышевского.

почтовый адрес: 410009, г. Саратов, пр. 50 лет  
Октября, дом 7а, кв.9;

телефон (моб): +7 (917)2019812

e-mail: petrovvv@info.sgu.ru; profpetrov@gmail.com.



подпись

« \_\_\_\_ » 2022 г.



Подпись  удостоверяю

Ученый секретарь  И.В. Федусенко

доцент

6.09.2022

6