

Отзыв официального оппонента на диссертационную работу

Титова Сергея Александровича

«Многоэлементная акустическая микроскопия»,

представленную на соискание ученой степени доктора технических наук

по специальности 1.3.2 – «Приборы и методы экспериментальной физики»

Диссертационная работа Титова Сергея Александровича посвящена разработке методов и средств высокочастотной ультразвуковой визуализации. В настоящее время в области высоких частот в ультразвуковой диагностике и неразрушающем контроле используются приборы, основанные на механическом сканировании одиночного фокусирующего преобразователя. Они позволяют достигнуть высокого пространственного разрешения, однако обладают сравнительно низким быстродействием, а в ряде случаев имеют ограниченную область применимости и невысокую точность измерений. С другой стороны, в низкочастотной области успешно применяются системы ультразвуковой визуализации с решетками ультразвуковых элементов, в том числе – фазированными. В диссертационной работе предпринята попытка распространить эффективный подход, основанный на использовании набора индивидуально управляемых ультразвуковых элементов, в высокочастотную область для повышения информативности, точности и быстродействия, поэтому тему диссертации следует признать актуальной.

Диссертация состоит из введения, девяти глав, заключения, списка литературы из 307 ссылок, и списка публикаций автора из 120 наименований. Работа изложена на 313 страницах, имеет логичную структуру и демонстрирует четкость изложения.

В первой главе на основе анализа существующих методов акустической микроскопии, включая атомно-силовую акустическую микроскопию, оптико-акустическую микроскопию, а также методов визуализации с использованием фазированных решеток, показана потенциальная эффективность многоэлементных схемы построения устройств высокочастотной ультразвуковой визуализации.

В второй главе предложены различные схемы многоэлементных акустических микроскопов, построена исходная теоретическая модель, позволяющая связать выходной пространственно-временной сигнал микроскопа с характеристиками исследуемого объекта и параметрами измерительной системы.

В третьей главе предложен двухлинзовый неконфокальный акустический микроскоп, предназначенный для количественной характеристизации локальных латерально однородных участков образца путем измерения параметров вытекающих поверхностных

волн. Разработаны алгоритмы обработки пространственно-временного сигнала, регистрируемого в процессе механического перемещения приемного широкоапертурного ультразвукового элемента вдоль поверхности образца, позволяющие по сравнению с одноэлементным конфокальным микроскопом повысить точность измерений, устойчивость результатов по отношению к действию внешних факторов (температуры) и расширить за счет более широкой угловой апертуры диапазон измеряемых параметров.

В четвертой главе разработан двухканальный допплеровский акустический микроскоп для измерения параметров вытекающих волн, в котором используется продольное механическое перемещение ультразвукового блока относительно исследуемого образца с постоянной скоростью. Особенностью данной схемы является наличие фокусирующего и плоского ультразвуковых элементов, возбуждаемых гармоническими сигналами. Использование эффекта Допплера обеспечивает частотное разнесение угловых компонент отраженной волны, что позволяет с высокой производительностью проводить оценку угловой зависимости коэффициента отражения и измерять упругие параметры в высокочастотном диапазоне.

В пятой главе представлена схема двухэлементного линзово-решеточного микроскопа, в котором возбуждение направленных волн на поверхности образца осуществляется фокусирующим преобразователем, а прием вытекающих волн – неподвижной решеткой ультразвуковых элементов. Показано, что отсутствие механического сканирования и многоканальная регистрация сигналов решетки позволяют проводить измерения исследуемых параметров за время, сравнимое со временем распространения ультразвуковых волн в иммерсионной ячейке прибора.

В шестой главе предложен метод измерения параметров слоистых объектов однорешеточным микроскопом. Разработанный алгоритм обработки сигнала решетки путем его разложения в спектр плоских, импульсных волн позволяет в случае разделяющихся откликов различных волновых мод измерять скорости объемных волн в слоях, их толщину, а также плотность и коэффициент затухания.

В седьмой главе рассмотрены схемы многоэлементных акустических микроскопов, предназначенные для формирования ультразвуковых изображений. В разработанном решеточном многолинзовом микроскопе изображение строится путем механического перемещения ультразвукового блока, объединяющего несколько элементов с соосно расположенными линзами. За счет параллельной регистрации сигналов элементов решетки время формирования изображений может быть сокращено обратно пропорционально числу элементов. В безлинзовом матричном акустическом микроскопе формирование изображений производится двумерной решеткой несфокусированных элементов. Для

специально класса объектов, имеющих расслоения в латеральной плоскости с плавными на масштабе периода решетки границами, разработан алгоритм визуализации этой границы с погрешностью, существенно меньшей периода решетки. Предложенный в диссертации матричный однолинзовый микроскоп построен на сочетании двумерной решетки ультразвуковых элементов с одноочной акустической линзой, обеспечивающей сведение излучаемых элементами ультразвуковых волн в область вокруг геометрического фокуса линзы. Теоретически и экспериментально показано, что в данной схеме микроскопа составляющие многомерного пространственно-временного сигнала определяются соответствующими угловыми компонентами функции рассеяния исследуемой области. Данное соотношение предложено использовать для характеризации непосредственно по сигналам решетки рассеивающих свойств визуализируемых неоднородностей, в том числе тех, размеры которых сравнимы с длиной волны. Также показано, что данная схема за счет электронной фокусировки в точки околофокальной области в сочетании с механическим покадровым сканированием позволяет по сравнению с одноэлементной, однолинзовой схемой производить визуализацию протяженных объектов с повышенной производительностью при сохранении пространственной разрешающей способности.

В восьмой главе представлены примеры применения многоэлементных акустических микроскопов для неразрушающего контроля промышленных изделий и мониторинга технологических процессов. Теоретически обоснован и практически воплощен алгоритм обработки сигналов безлинзового матричного микроскопа, получаемых на слоистых объектах со значительным перепадом акустических импедансов. Эффективность разработанной методики продемонстрирована на клеевых соединениях металлических листов, в частности стали. Сочетание безлинзового матричного микроскопа с установкой газодинамического порошкового напыления позволяет в масштабе реального времени определять профиль наносимого покрытия и оценивать пространственное распределение показателей эффективности процесса.

В девятой главе рассмотрены проблемы разработки и изготовления некоторых узлов многоэлементных акустических микроскопов, таких как ультразвуковые преобразователи, механические позиционеры и сканеры, радиоэлектронные блоки и программное обеспечение. Разработана методика расчета характеристик пьезопреобразователя, соединенного с входными электронными цепями, позволяющая проводить оптимизацию прибора по критерию «сигнал-шум».

В заключении диссертации сформулированы основные полученные результаты работы.

В работе получен ряд новых научных результатов, среди которых наиболее значимыми являются следующие:

1) предложены и разработаны двухканальный допплеровский микроскоп с гармоническим зондирующими сигналом и двухлинзовый неконфокальный микроскоп, которые предназначены для количественной характеристики упругих свойств латерально однородных областей образца и в которых пространственно-временной сигналы формируются путем механического сканирования;

2) предложены и разработаны линзово-решеточный и однорешеточный микроскопы, предназначенные для количественной характеристики упругих свойств без механического сканирования;

3) предложены и разработаны решеточный многолинзовый и матричный безлинзовый акустические микроскопы, в которых формирование изображений производится комбинированием упрощенного механического сканирования и многоканальной электронной регистрации сигналов пьезоэлементов;

4) предложен и разработан матричный однолинзовый микроскоп, способный формировать электронным способом изображения в области геометрического фокуса и производить количественную характеристику объектов путем оценки их функции рассеяния;

5) разработаны методики неразрушающего контроля объектов и мониторинга технологических процессов с помощью матричного безлинзового и решеточного многолинзового микроскопов.

Теоретическая и практическая значимость работы заключается в следующем:

– разработана теоретическая модель многоэлементного акустического микроскопа, позволяющая проводить анализ различных предложенных схем;

– для каждой схемы разработаны методики исследований, алгоритмы обработки сигналов, проведен анализ погрешностей измерений, разрешающей способности, быстродействия, результаты которого подтверждены экспериментально;

– теоретически и экспериментально показано, что использование многоэлементности в высокочастотных ультразвуковых устройствах позволяет повысить точность измерений, быстродействие и расширить области применимости;

– показана эффективность разработанного многоэлементного микроскопа для дефектоскопии изделий и контроля технологических процессов;

– представлены рекомендации по практическому построению ультразвуковых, электронных, механических узлов и разработке математического обеспечения.

Диссертация Титова С.А. является законченной квалификационной работой, основные результаты которой опубликованы в 120 печатных работах, 67 из которых входят в международные базы цитирования Web of Science и Scopus.

В работе необходимо отметить следующие недостатки:

1) в главах 3-6 рассмотрены многоэлементные микроскопы, предназначенные для измерения параметров вытекающих поверхностных волн, объемных волн и толщин слоев в латерально однородных областях объектов, приведено большое количество экспериментальных данных, полученных на тестовых образцах, однако обсуждению практических задач, решение которых было бы эффективно с помощью разработанных приборов в промышленности или материаловедении, уделено существенно меньшее внимание;

2) в главе 5 утверждается, что время регистрации пространственно-временного сигнала в двухэлементном линзово-решеточном микроскопе может быть снижено до времени распространения ультразвуковой волны в иммерсионной ячейке прибора, но не учитывается время цифровой обработки записанных сигналов, необходимое для получения окончательного результата измерений;

3) для режима ручного сканирования в безлинзовом матричном микроскопе не рассмотрено влияние неточности угловой ориентации датчика на погрешность измерения координаты сканирования;

4) обозначения размерностей величин на некоторых рисунках (рис. 2, стр. 217, рис. 6, стр. 226, рис. 10-11, стр. 231) выполнены латинским шрифтом;

5) по тексту диссертации ссылки на работы автора помечены буквой «А», но в списке публикаций автора приводится только номер, что создает некоторое неудобство для читателя.

Вместе с тем, отмеченные недостатки не снижают общего высокого уровня диссертационной работы, ее новизны, научной и практической значимости.

Защищаемые научные положения, выводы и рекомендации, представленные в диссертационной работе Титова С.А. являются обоснованными и достоверными. Основные результаты достаточно полно представлены в публикациях, обладают новизной, теоретической и практической значимостью. Автореферат соответствует тексту диссертации и отражает её основные научные положения. Диссертация представляет собой завершенный научный труд, выполненный на актуальную тему, в результате которого создано новое научное направление «Многоэлементная акустическая микроскопия», имеющее значение для развития высокочастотных устройств и методов ультразвуковой визуализации.

Считаю, что диссертационная работа Титова Сергея Александровича «Многоэлементная акустическая микроскопия» удовлетворяет требованиям Положения о порядке присуждения ученых степеней, предъявляемым к докторским диссертациям, а ее автор Титов С.А. заслуживает присуждения ученой степени доктора технических наук по специальности 1.3.2 – «Приборы и методы экспериментальной физики».

Семенцов Станислав Григорьевич

д.т.н., профессор кафедры «Проектирование и технология производства электронной аппаратуры»
(ИУ4) ФГБОУ ВО «Московский государственный
технический университет имени Н.Э. Баумана
(национальный исследовательский университет)»,



подпись

«13» 09 2022 г.

почтовый адрес: 105005, г. Москва, улица 2-я
Бауманская, д. 5, к. 1

телефон: 8 915 0018986

e-mail: siemens_off@mail.ru

