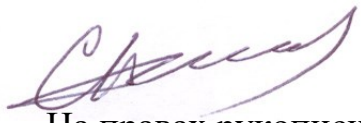
ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ НАУКИ
НАУЧНО-ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЙ ЦЕНТР
УНИКАЛЬНОГО ПРИБОРОСТРОЕНИЯ
РОССИЙСКОЙ АКАДЕМИИ НАУК



На правах рукописи

Титов Сергей Александрович

МНОГОЭЛЕМЕНТНАЯ АКУСТИЧЕСКАЯ МИКРОСКОПИЯ

Специальность: 1.3.2. «Приборы и методы экспериментальной физики»

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени

доктора технических наук

Москва – 2022 г.

Работа выполнена в Федеральном государственном бюджетном учреждении науки «Научно-технологический центр уникального приборостроения» Российской академии наук (ФГБУН НТЦ УП РАН).

Официальные оппоненты: **Карабутов Александр Алексеевич,**
д.ф.-м.н., доцент, профессор кафедры общей физики и волновых процессов, Физический факультет, ФГБОУ ВО «Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова».
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.
Семенцов Станислав Григорьевич,
д.т.н., профессор, профессор кафедры экологии и промышленной безопасности ФГБОУ ВО «Московский государственный технический университет имени Н.Э. Баумана (национальный исследовательский университет)»

Ведущая организация: Федеральное государственное бюджетное научное учреждение «Технологический институт сверхтвердых и новых углеродных материалов» (ФГБНУ ТИСНУМ)

Защита состоится «28» сентября 2022 года в 15:00 на заседании диссертационного совета 24.1.185.01 (Д 002.135.01) на базе Научно-технологического центра Уникального приборостроения РАН по адресу 117342, Москва, ул. Бутлерова, 15, в конференц. зале.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Научно-технологического центра уникального приборостроения РАН и на сайте
http://ntcup.ru/zashhita-dissertacij/

Автореферат разослан «___» _____ 2022 года

Ученый секретарь
диссертационного совета 24.1.185.01 (Д 002.135.01),
к.т.н. В.И. Батшев

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы исследования

Сканирующая акустическая микроскопия дает возможность посредством высокочастотных ультразвуковых волн неразрушающим способом регистрировать и визуализировать вариации упруго–вязкостных параметров образца в поверхностных, подповерхностных и глубинных областях, а в ряде случаев проводить измерения их локальных значений. Характерный частотный диапазон акустического микроскопа простирается от десятков МГц до единиц ГГц, обеспечивая пространственное разрешение от десятков микрометров до долей микрометров. Благодаря чувствительности к структурно-механическим свойствам исследуемых объектов сканирующая акустическая микроскопия, сформировавшаяся как самостоятельная область приборостроения, имеет в своем арсенале разнообразные методики, эффективность которых была продемонстрирована в многочисленных приложениях. Современные сканирующие акустические микроскопы серийно производятся несколькими компаниями для исследований в материаловедении, биологии, медицине, неразрушающем контроле и других областях науки и техники.

В традиционной схеме линзового, одноэлементного микроскопа в режиме отражения излучение и прием волн производится с помощью одиночного ультразвукового элемента, а изображение формируется путем механического сканирования акустического узла микроскопа относительно исследуемого объекта. За счет фокусировки ультразвуковых волн акустический микроскоп позволяет получить пространственное разрешение, приближающиеся к дифракционному пределу. Вместе с тем в одноэлементном микроскопе положения излучателя и приемника волн совпадают, а его выходной сигнал определяется суперпозицией всех принимаемых составляющих углового спектра рассеянных объектом волн, которые порождаются сфокусированной зондирующей волной. Таким образом в одноэлементном микроскопе оказывается невозможной непосредственная регистрация откликов этих составляющих. Данное обстоятельство во многих случаях является причиной возникновения затруднений при анализе и интерпретации изображений, а также при проведении измерений акустических параметров локальных областей объекта.

Для преодоления этих затруднений были предложены различные модификации одноэлементного микроскопа и соответствующие методики исследований. Так для повышения избирательности микроскопа к определенным особенностям объекта и

повышения контраста изображений используются акустические узлы, размеры и форма элементов которых позволяют возбуждать и принимать наиболее информативные составляющие углового спектра волн. Однако такие специально разработанные элементы имеют узкую область применимости. Разделить в выходном сигнале отклики составляющих углового спектра и измерить параметры слоисто однородной области объекта позволяет метод, основанный на регистрации сигнала при смещении элемента перпендикулярно поверхности образца и обработке записанного сигнала. Однако максимальное смещение элемента ограничено рабочим расстоянием акустического объектива, от величины которого зависят угловая разрешающая способность и точность измерений. Кроме того, данный метод является неприемлемым в случае неоднородного распределения свойств объекта вдоль его поверхности.

В низкочастотной области (как правило до 20 МГц) в настоящее время широко используются устройства с решетками ультразвуковых преобразователей, обладающие гибкостью, информативностью и быстродействием. Однако в силу технологических ограничений на размеры элементов затруднительно выполнить фазированные решетки для более высокочастотного диапазона.

Возможность более подробного исследования структуры поля рассеянной объектом волны предоставляет многоэлементный акустический микроскоп. В общем случае в многоэлементном микроскопе выходной пространственно–временной сигнал формируется при различных положениях передающего и приемного элементов друг относительно друга и образца. В многоэлементном микроскопе могут использоваться ультразвуковые элементы с размерами, существенно превышающими характерную длину волны, а формирование выходного сигнала может производиться путем как механического, так и электронного сканирования. Наличие в одном устройстве множества элементов, которые к тому же могут иметь разные параметры, позволяет гибко модифицировать схему микроскопа для решения того или иного класса исследовательских задач. Многоэлементная микроскопия за счет формирования и обработки многомерного пространственного–временного сигнала предоставляет возможность исследования сложных характеристик объектов, например, таких как функция рассеяния. Также она по сравнению с одноэлементной микроскопией позволяет проводить измерения большего числа параметров с повышенной точностью и в более широких диапазонах их изменения.

Кроме того, использование решеток ультразвуковых элементов совместно с многоканальной электронной аппаратурой дает возможность в значительной степени упростить устройства механического сканирования или полностью отказаться от них, что обуславливает повышение быстродействия прибора, упрощение его конструкции и исключение составляющих погрешностей измерений, вызванных несовершенством механических сканеров.

Таким образом, переход к многоэлементной акустической микроскопии позволяет достигнуть более высоких информативности, точности и производительности, поэтому тему исследований данной работы следует признать актуальной.

Цели и задачи диссертационной работы

Цель работы состоит в разработке принципов построения многоэлементных акустических микроскопов и методик их применения для акустической визуализации структуры исследуемого объекта и измерения акустических параметров его локальных областей.

Для достижения указанной цели в работе решались следующие задачи:

1. Построение базовой теоретической модели многоэлементного микроскопа, позволяющей найти связь выходного пространственно–временного сигнала со свойствами исследуемого объекта и параметрами микроскопа.
2. Разработка методов и средств измерения характеристик образцов в схемах с разделением отдельных фокусирующих элементов.
3. Разработка методов и средств измерения характеристик образцов в схемах с одномерной решеткой (линейкой) элементов.
4. Разработка методов и средств отображения и качественного анализа свойств образцов с использованием двумерных решеток (матриц) элементов.
5. Разработка методов и средств исследования образцов в режимах механического сканирования, электронного сканирования, ручного сканирования и без какого-либо перемещения, а также в смешанных режимах.
6. Разработка методов извлечения из регистрируемых данных информации о механических, акустических, упруго-вязких и геометрических свойствах образцов.
7. Разработка методов управления параметрами акустических микроскопов в режиме измерения и анализа свойств образцов и обработки поступающих потоков данных.
8. Сравнение разрабатываемых схем построения с классической однолинзовой

конфокальной схемой микроскопа. Получение теоретических и экспериментальных оценок погрешности измерения и пределов применения разрабатываемых методик.

9. Разработка методик практического применения многоэлементных акустических микроскопов для неразрушающих исследований материалов и изделий, а также мониторинга технологических процессов.

Научная новизна результатов и выводов

1. Построена базовая теоретическая модель многоэлементного акустического микроскопа, передающие и приемные элементы которого в общем случае могут занимать различные положения относительно друг друга и образца. В предположении линейности, пространственной и временной инвариантности показано, что выходной пространственно-временной сигнал микроскопа, представленный в виде функции координат передающего и приемного элементов и времени, выражается многомерным обратным преобразованием Фурье от произведения передаточных функций излучающих и приемных элементов и слоя иммерсионной жидкости на функцию рассеяния объекта.
2. Предложена и реализована схема **двухлинзового неконфокального** акустического микроскопа с поперечным (поверхностным) механическим сканированием. Разработана методика для измерения с его помощью акустических характеристик (скорости и затухания поверхностных волн) латерально однородных областей образца. Впервые показано теоретически и экспериментально, что в сравнении с классической однолинзовой конфокальной схемой с продольным (по глубине) сканированием эта схема имеет следующие преимущества: существенно более широкий диапазон углов падения (10^o – 80^o) за счет большей реализуемой угловой апертуры в схеме косого облучения поверхности, большую точность измерения скорости за счет существенно большего диапазона пространственного перемещения и возможность измерения температурных зависимостей скорости волн за счет устойчивости к вариации характеристик иммерсионной жидкости благодаря инвариантности длины проходимого в жидкости пути в разработанной схеме.
3. Разработан и впервые исследован измерительный **двухканальный допплеровский** акустический микроскоп на основе движущегося по нормали к границе спаренного приемо-передающего блока, формирующего падающие на

поверхность фокусированные и опорные плоские волны. Использование гармонического зондирующего сигнала позволяет осуществлять регистрацию в непрерывном режиме, а наличие допплеровского сдвига выходного сигнала позволяет снизить влияние частотно-зависимого затухания ультразвуковых волн с исследуемой среде и иммерсионной жидкости на точность измерения скоростей поверхностных и объемных волн и плотности образца. Показано, что использование опорного канала повышает устойчивость измерений к механическим вибрациям и к вариациям свойств иммерсионной среды.

4. Предложено для реализации режимов акустической микроскопии без механического сканирования использовать решетки (линейки) ультразвуковых пьезоэлементов. В частности, предложена и впервые реализована схема **двухэлементного линзово-решеточного** акустического микроскопа для исследований свойств латерально однородных областей образца. Комбинация излучающего сфокусированного элемента и принимающей решетки, оси которых наклонены к поверхности образца позволяет измерять характеристики поверхностных вытекающих волн. Также предложена и впервые реализована схема измерительного **однорешеточного** акустического микроскопа на основе решетки, расположенной параллельно поверхности объекта и выполняющей функции и испускания, и приема волн. Эта схема позволяет измерять в образцах, содержащих слой материала, его толщину и плотность, а также характеристики объемных волн (для достаточно толстого слоя с разделяющимися откликами от границ).

   Для этих схем построены теоретические модели, разработаны методы измерений и обработки пространственно-временных сигналов, в том числе основанные на разложении сигнала в спектр плоских импульсных волн, и проведен анализ источников погрешностей. Теоретически и экспериментально установлено, что вследствие низкой частоты пространственной дискретизации сигнала, формируемого высокочастотной решеткой микроскопа, в рассчитываемом спектре возникают помехи, приводящие к снижению точности измерений. Предложен и апробирован метод подавления этих помех, заключающийся в повышении частоты дискретизации путем интерполяции по пространственной координате откликов волновых мод, разделенных во временной области.

5. Предложен и разработан **решеточный многолинзовый** изображающий акустический микроскоп, в котором каждому ультразвуковому элементу

соответствует соосно расположенная акустическая линза, а вся линейка элементов выполняет роль приемо-передатчика. Формирование полного (двумерного) изображения осуществляется путем поперечного механического перемещения всей системы совместно с электронной регистрацией откликов элементов. Разработана методика, позволяющая строить синтезированное изображение исследуемой области с более высоким разрешением при повторном сканировании той же области со смещением акустического блока в перпендикулярном направлении на долю периода решетки.

6. Предложена и реализована схема **матричного безлинзового** изображающего акустического микроскопа на основе двумерной решетки пьезоэлементов, размер которых существенно больше длины волны. Выходной сигнал микроскопа формируется как набор откликов элементов, работающих независимо друг от друга. Разработан оригинальный метод визуализации структуры объектов без перемещения в предположении наличия однородных включений на однородном фоне и основанный на поиске плавной границы, разделяющей разные области. Показано теоретически и экспериментально, что погрешность нахождения границ по данной методике может снижаться до четверти периода решетки.

   Предложено и реализовано развитие этого метода путем использования медленного механического перемещения. Разработан метод формирования изображений в таком комбинированном режиме, основанный на определении смещения в процессе движения путем анализа пространственно–временных сигналов, поступающих от элементов решетки, расположенных вдоль направления движения. Показано, что в этом режиме погрешность нахождения границ может быть еще более снижена по сравнению со статическим режимом. В то же время точность локализации точечных включений, не превосходит размера элемента решетки.

7. Предложена, разработана и исследована схема **матричного однолинзового** изображающего акустического микроскопа, в котором двумерная решетка плоских пьезоэлементов располагается в задней фокальной плоскости единственной акустической линзы. В параксиальном приближении показано, что составляющие временного спектра пространственно–временного сигнала микроскопа пропорциональны функции рассеяния объекта, взятой при соответствующих значениях аргументов и на этой основе разработан алгоритм обработки сигнала, обеспечивающий электронную фокусировку в точках трехмерной области вокруг

геометрического фокуса линзы. Теоретически и экспериментально показано, что пространственное разрешение микроскопа не уступает разрешению одноэлементного конфокального микроскопа, а поле зрения ограничивается в основном наличием помех из-за разреженности решетки, уровень которых возрастает при удалении точки фокусировки от оси.

8. Разработаны методики применения **матричного безлинзового** изображающего микроскопа для исследования внутренней структуры слоистых объектов и для мониторинга технологических процессов в реальном времени. Построена теоретическая модель формирования ультразвуковых откликов в многослойных объектах, имеющих существенные различия акустических импедансов слоев, и на этой основе предложены и апробированы алгоритмы обработки сигналов микроскопа, позволяющие обнаруживать и визуализировать дефекты расслоения между слоями. Проведена модификация аппаратуры и программного обеспечения **матричного безлинзового** микроскопа для наблюдения динамики технологических процессов. Продемонстрирована его способность получать не только временную, но и пространственную информацию о процессах.

Теоретическая и практическая значимость работы

1. Построенная теоретическая модель многоэлементного акустического микроскопа, устанавливающая связь его выходного пространственно–временного сигнала с параметрами исследуемого объекта, является основой для построения различных схем многоэлементных микроскопов и разработки соответствующих этим схемам методик исследования объектов и алгоритмов обработки пространственно-временных сигналов.
2. Для изотропных и анизотропных латерально однородных образцов измерение скорости и затухания поверхностных акустических волн материала, а также их температурный коэффициент могут в разработанной **двухлинзовой неконфокальной** схеме быть проведены с более высокой точностью и в более широком угловом диапазоне, чем в классической однолинзовой конфокальной схеме.
3. Одновременное измерение скорости как поверхностных, так и объемных акустических волн, а также плотности образца могут быть проведены с использованием разработанного **двухканального допплеровского** акустического

микроскопа. Эти измерения могут проводиться в условиях промышленного производства – в присутствии значительных механических вибраций. При этом быстродействие системы, работающей в режиме быстрого непрерывного механического перемещения оказывается выше, чем у классического (однолинзового конфокального) микроскопа, работающего в импульсном режиме, в котором требуется ожидать затухания переотражений от каждого излученного импульса.

4. Многие характеристики латерально однородных образцов и образцов, содержащих слой вещества, могут быть определены без механического сканирования с использованием разработанных **решеточных** акустических микроскопов. Эти методы применимы для измерения, как параметров акустических волн (поверхностных и объемных волн), так и характеристик слоя (толщины и плотности вещества). При этом время регистрации может быть снижено до времени распространения волн в иммерсионной среде и образце. С использованием разработанного метода обработки данных в таких акустических микроскопах для повышения их пространственного разрешения можно использовать область ультразвуковых частот с длиной волны менее размеров пьезоэлемента решетки.
5. Быстрое выявление упругой неоднородности объекта и наличия структуры может быть проведено с использованием разработанного **решеточного** многолинзового изображающего микроскопа путем однократного перемещения его вдоль поверхности, что в сравнении с классическим однолинзовым микроскопом ускоряет регистрацию пропорционально числу элементов в линейке при сохранении пространственной разрешающей способности. В соответствии с задачей быстрого построения ультразвукового изображения объекта в такой системе механический сканер может быть выполнен по упрощенной схеме. Особенностью прибора является возможность построения более четкого изображения при повторном сканировании исследуемой области со смещением.
6. Экспресс-анализ неоднородности объекта в виде точечных или однородных включений в однородную среду может быть выполнен без механических перемещений с использованием разработанного **матричного** безлинзового изображающего микроскопа. При этом локализация точечных включений (дефектов) ограничивается размером элемента матрицы (пиксела), а погрешность оценки положения границ и, соответственно, размеров включений, может быть

существенно меньше этого размера. Последняя может быть еще более уменьшена в сравнении с периодом решетки при использовании комбинированного (сканирующего) режима анализа, в котором регистрация сигналов решетки сочетается с механическим движением, которое можно осуществлять и в ручном режиме. Все эти особенности обеспечивают эффективность и надежность использования **матричного** безлинзового микроскопа в промышленных условиях для быстрого анализа образцов на наличие дефектов.

7. Указанный «грубый» экспресс-анализ может быть дополнен быстрым (без механического сканирования) анализом выявленных точечных дефектов объекта в локальной области с предельно высоким (дифракционно ограниченным) пространственным разрешением путем использования разработанного **матричного** однолинзового акустического микроскопа. Разработанный алгоритм обработки сигнала позволяет обнаруживать неоднородность объекта в области вокруг геометрического фокуса линзы путем электронной фокусировки в заданные точки области. Оценка достижимого быстродействия микроскопа показывает, что оно, по крайней мере, на порядок превосходит быстродействие классического одноэлементного акустического микроскопа при решении этой задачи.
8. Построение теоретической модели формирования ультразвуковых откликов в слоистых объектах, имеющих существенные различия акустических импедансов слоев, позволило разработать для многоэлементного микроскопа методику визуализации расслоений в таких структурах и адаптировать ее для неразрушающего контроля качества клеевых и сварных соединений. Модифицированный матричный безлинзовый микроскоп был использован для исследования динамики технологических процессов. Показано, что микроскоп позволят проследить в реальном масштабе времени изменения толщины и диаметра расплавленного ядра при контактной точечной сварке, а также измерить пространственное распределение эффективности нанесения покрытий и оценить их адгезию в ходе порошкового газодинамического напыления.

Положения, выносимые на защиту

1. Разработанный **двухлинзовый неконфокальный** акустический микроскоп с латеральным сканированием по сравнению с классическим акустическим микроскопом (однолинзовым конфокальным) позволяет измерять свойства

латерально однородных областей объекта в существенно более широком диапазоне углов падения (10° – 80°) и с большей достижимой точностью, а также позволяет измерять температурный коэффициент скорости поверхностных волн с погрешностью порядка 10^{-5} 1/К.

2. Разработанный **двухканальный допплеровский** акустический микроскоп позволяет измерять скорости как поверхностных, так и объемных волн, а также плотность образца, и при этом устойчив к механическим вибрациям и к вариациям свойств иммерсионной среды.
3. Разработанные **решеточные** акустические микроскопы как с приемной, так и с приемо-передающей линейкой ультразвуковых пьезоэлементов позволяют измерять без механического сканирования скорость и затухание поверхностных волн, а в определенных случаях – скорость и затухание объемных волн в слое, его толщину и плотность.
4. Разработанный и созданный **матричный** безлинзовый изображающий акустический микроскоп позволяет за время, сравнимое со временим распространения эхо-импульсных сигналов, без механического сканирования обнаруживать наличие во всем поле зрения точечных дефектов, а с использованием разработанного метода обработки данных формировать изображение гладкой границы области включений или внутренних расслоений объекта с погрешностью, составляющей четверть периода решетки, что важно для таких приложений, как экспресс-анализ изделий и дефектоскопия точеной сварки и клеевых соединений.
5. Разработанный матричный однолинзовый акустический микроскоп позволяет без механического сканирования за время регистрации пространственно-временного сигнала элементов проводить анализ на неоднородность области вокруг геометрического фокуса линзы и с использованием разработанного алгоритма обработки сигнала осуществлять построение ее изображения с дифракционно ограниченным пространственным разрешением.

Апробация работы

Основные результаты исследований докладывались на следующих международных и всероссийских конференциях:

1. International congress on ultrasonics (Vienna, Austria, 2007; Metz, France, 2015; Bruges, Belgium, 2019),

2. IEEE International Ultrasonic Symposium (Toronto, Canada, 1997; San Juan, Puerto Rico, USA, 2000; Atlanta, USA, 2001; Munich, Germany, 2002; Vancouver, Canada, 2006; New York, USA, 2007; San Diego, USA, 2010; Dresden, Germany, 2012),
3. International Symposium on Acoustical Imaging (Santa Barbara, USA, 1998; Bristol, United Kingdom, 2000, Windsor, Canada, 2001; Saarbrucken, Germany, 2003; San Diego, USA, 2005, Monterey, USA, 2009),
4. Review of Progress in Quantitative Nondestructive Evaluation (San-Diego, USA, 1997; Snowbird, Utah, USA, 1998; Ames, Iowa, USA, 2000, Green Bay, Wisconsin, USA, 2003, Kingston, Rhode Island, USA, 2009),
5. SAE 2012 World Congress and Exhibition (Detroit, USA, 2012),
6. 2nd International Conference "Computer methods and inverse problems in nondestructive testing and diagnostics" (Minsk, Belarus, 1998),
7. III International Workshop “Advances in signal processing for nondestructive evaluation of materials” (Quebec City, Canada, 1997),
8. Annual British conference on NDT (Stratford-upon-Avon, UK, 2006; Telford, UK, 2013),
9. The 9th European Conference on Non-Destructive Testing (Berlin, Germany, 2006), 16th World Conference on nondestructive testing, (Montreal, Canada, 2004),
10. The 5th Pan American Conference for NDT (Cancun, Mexico, 2011),
11. XV Sheet Metal Welding Conference (Livonia, Michigan, USA, 2012),
12. International Thermal Spray Conference (Las Vegas, Nevada, USA, 2009; Hamburg, Germany, 2011; Houston, Texas, USA, 2012),
13. An ASNT Topical Conference “Automotive Industry Advancements with NDT” (Birmingham, AL, USA, 2006; Dearborn, MI, USA, 2007),
14. 21st Annual ASNT Research Symposium and spring conference (Dallas, USA, 2012),
15. The ASNT conference “NDT of composites” (Seattle, USA, 2013),
16. National Technical Association Annual National Conference & 80 th Anniversary Celebration (Chicago, USA, 2006),
17. Materials Science and Technology Conference and Exhibition (MS&T’07) (Detroit, MI, USA, 2007),
18. The 61st Canadian Association of Physicists Annual Congress (St. Catharines, Ontario, Canada, 2006),
19. 49 - 58 научно-технических конф. МИРЭА (Москва, 2000 - 2009),,

20. Международной конф. «Оптико-электронные приборы и устройства в системах распознавания образов, обработки изображений и символьной информации» (Курск, 1999, 2001),
21. XV, XVI Международных конференциях «Оптические методы исследования потоков» (Москва, 2019, 2021),
22. международных науч.-техн. конф. «Фундаментальные проблемы радиоэлектронного приборостроения» (Москва, 2007 – 2010; 2012),
23. IV, V Международных конф. "Информационные технологии и технологии коммуникаций. Современные достижения" (Астрахань, 2020, 2021),
24. XXX, XXXI, XXXII Всероссийских школах-семинарах «Волновые явления: физика и применения» имени А.П. Сухорукова (Красновидово, 2019; Москва, 2020, 2021),
25. 11, 12, 13, 14 Международных конференциях «Акустооптические и радиолокационные методы измерений и обработки информации» ARMIMP (Суздаль, 2018; Москва, 2019 и 2020; Астрахань, 2021),
26. 22 Всероссийской конф. по неразрушающему контролю и технической диагностике (Москва, 2020).

Работа выполнялась в рамках госбюджетного финансирования и при поддержке грантов: «Методы акустической микроскопии для неразрушающей характеризации объемной микроструктуры и изучения микромеханики разрушения композитов, армированных волокнами» (проект РФФИ 18-29-17039, 2018-2020); "Пьезоэлектрические микрочастицы в электромагнитных и ультразвуковых полях как инструмент для исследования биологических объектов" (проект РФФИ 17-02-007352, 017-2019; "Изучение особенностей распространения коротких импульсов фокусированного ультразвука в слоистых системах для получения 3D акустических изображений и повышения точности методов локального измерения упругости" (проект РФФИ 15-02-04994-А, 2015-2016); "Разработка методов и средств акустической микроскопии для экспертной диагностики дефектов, микроструктуры и физико-механических свойств углепластиков и конструкций из них, в т.ч. элементов летательных аппаратов" (проект РНФ № 15-12-00057, 2015-2017), (в качестве исполнителя), «Разработка методов характеризации структурно–механических свойств материалов наноэлектроники методами акустической микроскопии» (проект РФФИ 16-07-01236, 2016-2018). (в качестве руководителя).

По теме диссертации опубликовано 120 работ, в том числе 67 статей в изданиях, включенных в перечень ВАК и/или международные базы цитирования Web of Science и Scopus, 6 патентов США и 3 главы в монографиях.

Личный вклад автора

Все результаты, представленные в работе, получены диссертантом лично, либо в соавторстве при его непосредственном участии.

Структура и объем диссертации

Диссертационная работа состоит из Введения, 9 Глав и Заключения, изложена на 313 страницах и содержит 128 рисунков, 15 таблиц, и 307 библиографических ссылок.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во **Введении** обоснована актуальность темы диссертационной работы, сформулированы ее основные задачи, показана научная новизна и практическая значимость результатов, представлены выносимые на защиту научные положения, а также структура диссертации.

В **Главе 1** приводятся результаты анализа существующих методов акустической микроскопии, выполненного на основе обзора современной научно-технической литературы.

Сканирующая акустическая микроскопия дает возможность посредством ультразвуковых волн с частотами от десятков МГц до единиц ГГц визуализировать вариации упруго–вязкостных параметров образца, а в ряде случаев проводить измерения их локальных значений. Формирование пространственно-временного сигнала в этом методе обычно производится за счет механического сканирования одиночного фокусирующего ультразвукового элемента, работающего в эхо-импульсном режиме. Существующая теория конфокального одноэлементного микроскопа показывает, что его выходной сигнал может быть представлен в виде суперпозиции всех спектральных компонентов рассеянных объектом волн по всем составляющим зондирующей волны, а определение отдельных пространственно-временных спектральных откликов объекта в общем случае представляется невозможным.

Для повышения качества и информативности формируемых изображений объектов различных классов было разработано несколько модификаций акустического конфокального линзового узла микроскопа с различными передаточными функциями, что позволило реализовать режим темного поля, осуществить подавление в изображениях артефактов от поверхностной волны, повысить чувствительность к анизотропии, увеличить относительный отклик от внутренних неоднородностей объекта. Также для количественной характеризации латерально однородных областей объектов применялись неконфокальные измерительные микроскопы с двумя ультразвуковыми элементами. Так в схеме с плоским приемным элементом представляется возможным регистрация отдельных составляющих пространственного спектра за счет выбора угла наклона приемника. Акустические микроскопы с двумя фокусирующими элементами с фиксированным расстоянием между ними были успешно использованы для наблюдения анизотропии упругих свойств. Разделение различных мод волн Лэмба в двухэлементной схеме было получено путем обработки сигнала, записанного как функция смещения приемного узко-апертурного фокусирующего элемента вдоль исследуемой поверхности. Таким образом известные отдельные случаи использования двухэлементной неконфокальной схемы демонстрируют ее эффективность. Вместе с тем в настоящее время не разработана общая теория формирования и обработки пространственно–временного сигнала в двухлинзовом неконфокальном импульсном акустическом микроскопе и основанные на ней методики измерений.

Формировать сложные пространственно-временные сигналы, регистрировать отдельные спектральные составляющие, перестраивать положение фокуса позволяют устройства ультразвуковой визуализации на основе фазированных решеток. Они находят широкое применение в медицине и неразрушающем контроле вследствие высокого быстродействия, качества формируемых изображений и возможностью гибко, программными средствами менять методику исследования. Однако вследствие ограниченности практически достижимого числа элементов в подавляющем большинстве случаев используются одномерные фазированные решетки, что позволяет производить электронную фокусировку ультразвуковых волн только в одной плоскости. Размеры элементов фазированных решеток не должны заметно превышать длину волны ультразвука, поэтому из-за проблем технологического характера их рабочие частоты как правило не превышают 10 МГц. Таким образом, непосредственное использование фазированных решеток в акустической микроскопии, для которой характерны

существенно более высокие частоты в настоящее время представляется затруднительным.

Диссертационная работа посвящена разработке методов и средств многоэлементной акустической микроскопии, основанной на использовании высокочастотных ультразвуковых преобразователей, размеры которых существенно превосходят характерную длину волны.

В **Главе 2** содержатся результаты построения теоретической модели многоэлементного акустического микроскопа.

В модели предполагается наличие иммерсионных передающих и приемных ультразвуковых элементов, которые могут занимать различные положения относительно объекта. Элементы в зависимости от конфигурации могут быть механически перемещаемыми либо неподвижными, располагаясь в виде решетки. Выходной пространственно–временной сигнал микроскопа образован временными откликами пар передающих и приемных элементов при всех их возможных положениях. В предположении линейности и пространственно–временной инвариантности показано, что сигнал равен обратному многомерному Фурье–преобразованию произведения функции рассеяния образца $S\left(\vec{k}_1,\vec{k}_2,\omega\right)$, передаточных функций преобразователей и передаточных функций слоев иммерсионной жидкости:

$$v\left(-\vec{r}_1,\vec{r}_2,t,z_1,z_2\right)=F^{-1}_{\vec{k}_1,\vec{k}_2,\omega}\left[S\left(\vec{k}_1,\vec{k}_2,\omega\right)H_T\left(\vec{k}_1,\omega\right)\cdot H_R\left(\vec{k}_2,\omega\right)\exp\left(ik_{z1}z_1+ik_{z2}z_2\right)\right], \qquad (1)$$

где $\left(\vec{r}_1,z_1\right)$ и $\left(\vec{r}_2,z_2\right)$ есть координаты, задающие положения передающего и приемного элементов, $H_T\left(\vec{k}_1,\omega\right)$ и $H_R\left(\vec{k}_2,\omega\right)$ их передаточные функции, ω – частота, $\left(\bar{k}_1,k_{z1}\right)$, $\left(\bar{k}_2,k_{z2}\right)$ – компоненты волновых векторов . Традиционный одноэлементный конфокальный микроскоп, в котором оси передающего и приемного элементов совпадают, может рассматриваться как частый случай модели. Разработанная модель использована в работе для анализа рассматриваемых схем многоэлементных микроскопов.

В **Главе 3** содержатся результаты разработки методов количественной характеризации латерально однородных объектов с помощью двухлинзового неконфокального микроскопа с поперечным механическим сканированием (Рис. 1,а).

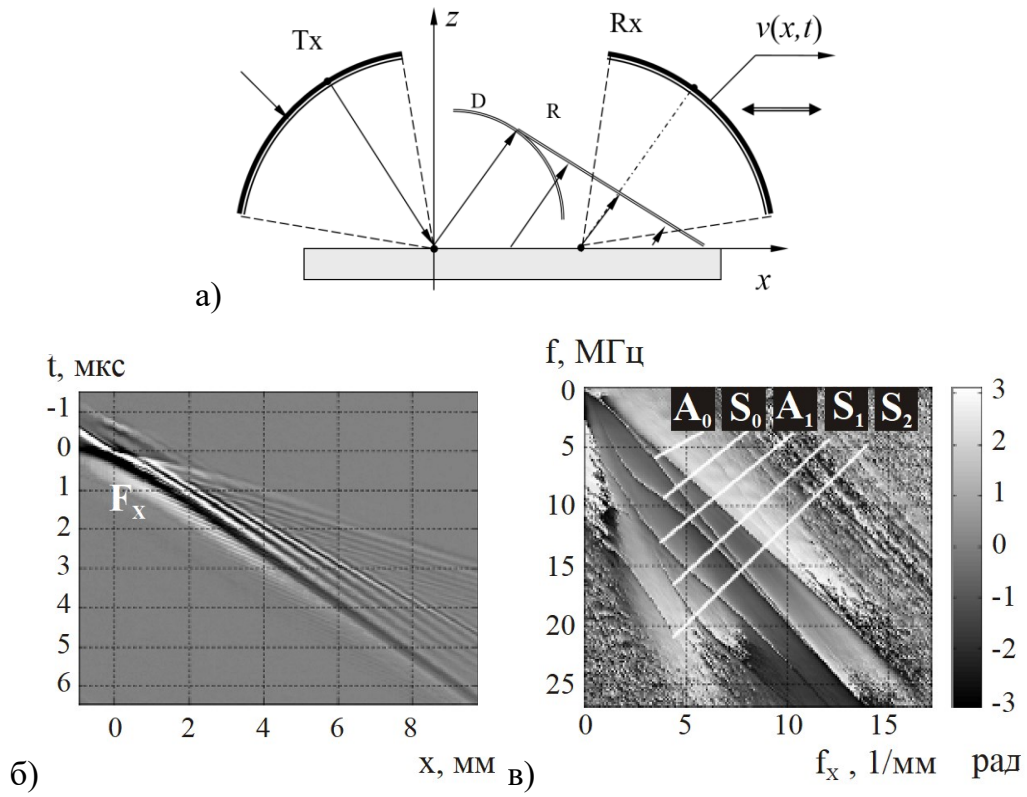


Рис. 1. Схема двухлинзового неконфокального микроскопа (а), сигнал $v(x,t)$ для латунной фольги (б) и фаза его спектра (в).

В этой схеме фокусирующий передающий элемент Tx возбуждает на границе ряд волновых мод D, R, которые регистрируются приемным элементом Rx в зависимости от x. Сигнал $v(x,t)$, измеренный для латунной фольги с толщиной 0.2 мм, имеет сложную структуру (Рис. 1,б), но фаза его спектральной плотности (Рис. 1,в) показывает дисперсионные зависимости симметричных S_0, S_1, S_2 и антисимметричных A_0, A_1 вытекающих волн Лэмба.

Двухэлементный микроскоп по сравнению с одноэлементным микроскопом с продольным сканированием позволяет проводить исследования в более широком диапазоне углов падения, с большим угловым разрешением. Кроме того, результаты измерений, полученные при поперечном сканировании, являются более устойчивыми по отношению к вариациям свойств иммерсионной среды, что позволяет проводить измерения в значительном диапазоне температур и измерять температурный коэффициент скорости вытекающей волны.

Проведенные тестовые измерения температурного коэффициента скорости поверхностной волны стальных образцов показали, что в результате закалки этот

коэффициент возрастает со значения –0.21 м/(с·K) до величины –0.30 м/(с·K) при незначительном изменении самой скорости волны.

Результаты проведенного теоретического анализа погрешностей этой схемы подтверждены экспериментально на примере ряда тестовых образцов. Характерная погрешность измерения скорости поверхностных волн, достигнутая в разработанной экспериментальной установке, составляет 0.1%, погрешность измерения температурного коэффициента скорости – 10^{-5} 1/K.

В **Главе 4** рассмотрен двухканальный допплеровский измерительный акустический микроскоп с продольным сканированием, в котором используются элементы – фокусирующий 1 и плоский 2 (Рис. 2). Выходные сигналы элементов $v_D(t)$, $v_{DR}(t)$ формируются за счет допплеровского сдвига, возникающего при отражении от поверхности образца при механическом движении вдоль оси z с постоянной скоростью.

Сигнал плоского элемента $v_{DR}(t)$ используется в качестве опорного, что повышает стабильность измерений по отношению к механическим вибрациям и вариациям свойств иммерсионной среды. Применение гармонического зондирующего сигнала с частотой ω_0 позволяет снизить влияние частотно–зависимых искажений импульсных сигналов в высокочастотной области и обеспечивает высокое быстродействие. Движение элементов со скоростью C_D вызывает появление допплеровского сдвига составляющих отраженной волны $\omega_D = 2\omega_0 C_D C_W^{-1}\cos\theta$, где θ – угол падения, C_W – скорость звука в иммерсии.

Применение общего выражения (1) позволяет выразить принимаемый сигнал в виде обратного преобразования Фурье произведения передаточной функции и коэффициента отражения исследуемой поверхности R:

$$v_D(t) = \frac{\exp(-i\omega_0 t)}{2C_D} F^{-1}_{\omega_D}\left[H_D\left(\frac{\omega_D}{2C_D}, \omega_0\right) R\left(\frac{\omega_D}{2C_D}, \omega_0\right)\right]. \qquad (2)$$

Таким образом путем спектрального анализа сигнала можно проводить оценку коэффициента отражения и определять параметры исследуемой поверхности. С помощью приборов, работающих по данной схеме на частотах 30–300 МГц, были проведены измерения скоростей поверхностных волн различных типов, а по рассчитанным в области критического релеевского угла значениям фазы коэффициента отражения осуществлялось нелинейное оценивание плотности и скоростей объемных волн исследуемого изотропного материала.

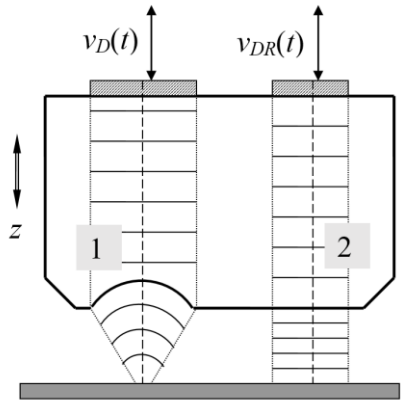


Рис. 2. Схема двухканального допплеровского микроскопа с продольным сканированием

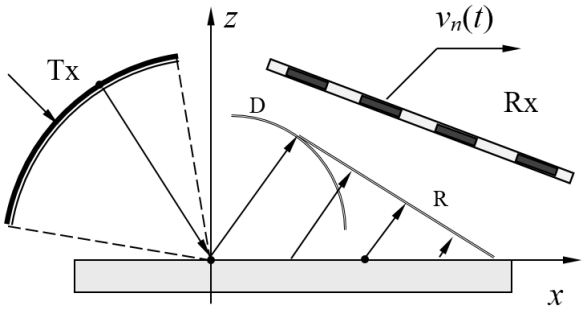


Рис. 3. Схема двухэлементного линзово-решеточного микроскопа без механического сканирования

В **Главе 5** представлен метод измерения параметров латерально однородных объектов линзово-решеточным акустическим микроскопом с фокусирующим передающим элементом и линейной решеткой приемных элементов (Рис. 3).

В этой измерительной схеме вытекающие волны, возбуждаемые фокусирующим передающим элементом Tx, принимаются элементами приемной решетки Rx. На основе общей теоретической модели (1) было показано, что комплексная амплитуда гармонических сигналов, принимаемых элементами решетки, может быть представлена в виде:

$$v_n = u_1 \cdot \exp\left(-\alpha_x np \frac{\cos(\theta_R - \theta_0)}{\cos\theta_R}\right) \cdot \exp\left\{inp \cdot k_0 \cdot \sin(\theta_R - \theta_0)\right\}, \qquad (3)$$

где p – период решетки, θ_0 – угол ее наклона, n – номер элемента, θ_R – направление распространения вытекающей волны, α_x – коэффициент ее затухания. Таким образом плоский волновой фронт вытекающей волны, падая на решетку, возбуждает ее элементы с задержками, линейно зависящими от номера элемента. Амплитуда же этих откликов экспоненциально изменяется вдоль апертуры решетки в соответствии с коэффициентом затухания вытекающей волны. Скорость и коэффициент затухания исследуемой поверхностной волны могут быть определены по измеренному сигналу.

Для высокочастотных решеток, применимых в акустической микроскопии, диаграммы направленности элементов являются сравнительно узкими. Поэтому, как показывает анализ погрешностей измерений, решетку следует ориентировать приблизительно перпендикулярно направлению прихода волны. Результаты

теоретического рассмотрения подтверждены экспериментально на примере исследования ряда материалов с известными свойствами. Показано, что погрешность измерения с помощью данной экспериментальной реализации прибора не превосходит 1% и 10% для скорости и коэффициента затухания поверхностных волн, соответственно.

В **Главе 6** представлен метод измерения параметров слоистых объектов с помощью решетки приемо-передающих элементов (Рис. 4,а). На основании развитой выше теории формирования сигнала в многоэлементном микроскопе предложен алгоритм обработки пространственно-временного сигнала $v(x,t)$ путем его разложения в спектр плоских, импульсных волн:

$$W(s,\tau) = \Re\{v(x,t)\} = \int_{-\infty}^{\infty} v(x,\tau + sx)dx\,, \tag{4}$$

где s – проекция вектора медленности на горизонтальную ось. На Рис. 4,б приведен пример измеренного сигнала $v(x,t)$, в котором различаются отклик D, отраженный от верхней поверхности слоя, и отклики L, T, LT, даваемые продольной, поперечной и продольно-поперечной модами внутри слоя. Также на рисунке нанесены линии, вдоль которых осуществляется направленное интегрирование сигнала (4). Показано, что спектр отраженных от границ слоев откликов имеет вид:

$$W\,(s,\tau) = R\,(s)\cdot W_H\,(s,\tau) \overset{\tau}{*} \delta(\tau - \tau_s)\,, \tag{5}$$

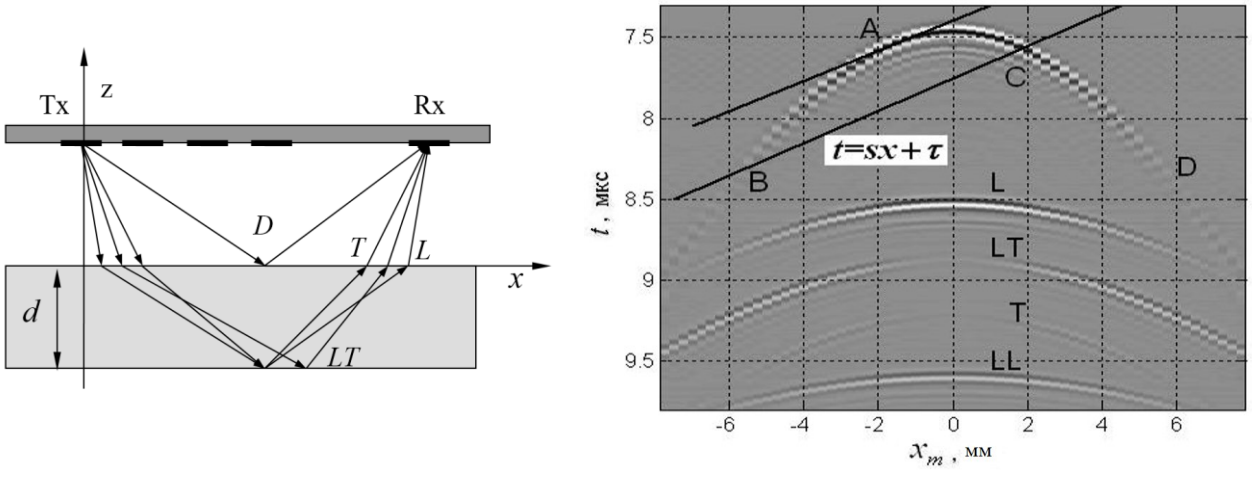
где $W(s,\tau)$ – характеристика измерительной системы, $R(s)$ – амплитудный коэффициент, зависящий от коэффициентов отражения и прохождения на границах слоев, τ_s – суммарная задержка, приобретаемая плоской волной при прохождении через слои:

$$\tau_s = \sum 2d_j\sqrt{C_j^{-2} - s^2}\,, \tag{6}$$

где d_j , C_j – толщина и скорость объемной волны в j-том слое. Разложение в спектр плоских волн позволяет разделить в принятом сигнале вклады, даваемые отдельными слоями, и по измеренным задержкам определять скорость звука и толщину, а по амплитудному коэффициенту – плотность и коэффициент затухания соответствующей волновой моды.

Проведенный анализ погрешностей измерения показал, что существенную роль имеют искажения спектра плоских волн, возникающие из-за недостаточной частоты пространственной дискретизации сигнала. Особенно важным данное ограничение является для акустической микроскопии, из-за больших размеров элементов высокочастотных ультразвуковых решеток. В значительной мере данное ограничение

позволяет преодолеть разработанный алгоритм повышения частоты пространственной дискретизации, основанный на интерполяции сигнала с разделяющимися во временной области откликами слоев.



(а) (б)

Рис. 4. Однорешеточный акустический микроскоп: схема измерений (а) и пространственно–временной сигнал $v(x,t)$ (б)

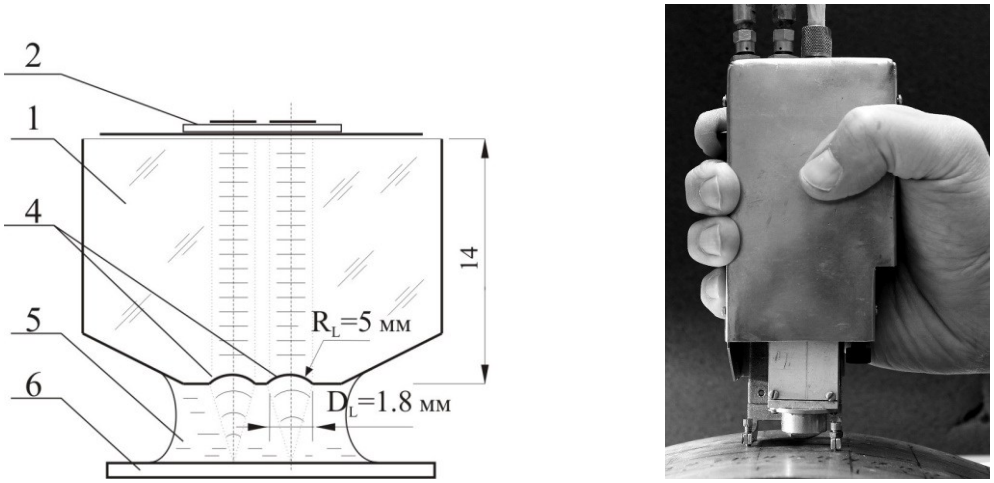
Экспериментальные исследования, выполненные с помощью 32-х элементной решетки диапазона 20 МГц, показали, что характерная погрешность для твердых материалов типа плавленого кварца, составляет примерно 0.1% для толщины и скорости продольной волны, 0.5% – для скорости поперечной волны и 5% – для плотности, а для пластиков типа полистирола возможно измерение коэффициента затухания продольной и поперечной волн с погрешностью 10-15 %.

В **Главе 7** приведены методы формирования изображений с помощью многоэлементных акустических микроскопов.

В решеточном многолинзовом микроскопе ультразвуковой блок 1 объединяет несколько ультразвуковых пьезопреобразователей 2, каждому из которых соответствует соосно расположенная акустическая линза 4 (Рис. 5,а). Формирование изображения в микроскопе такого типа осуществляется путем механического перемещения всего датчика совместно с электронным переключением элементов.

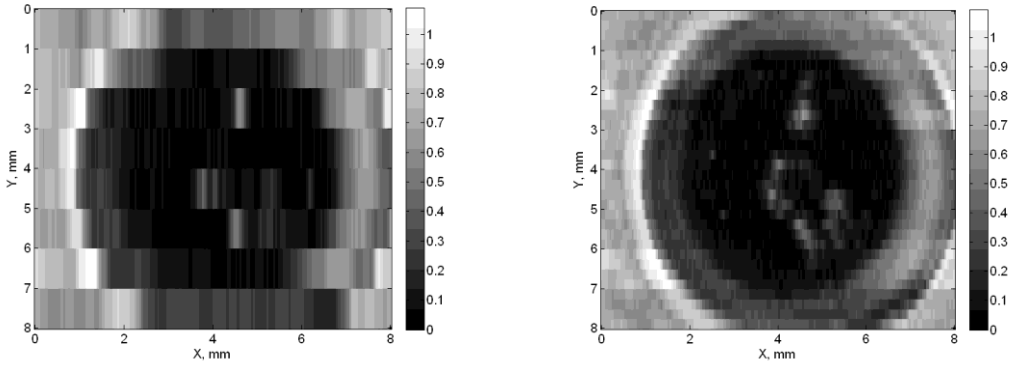
Разработанный малогабаритный прибор (Рис. 5,б) имел N=8 элементов с центральной частотой 100 МГц, расположенных с периодом p_y=1 мм. Одномерное механическое сканирование позволяет построить изображение с числом строк N (Рис. 6,а). Повторение таких проходов со смещением датчика на доли периода p_y обеспечивает повышение разрешения в перпендикулярном направлении (Рис. 6,б). По сравнению с

однолинзовым одноэлементным микроскопом время сбора данных может быть уменьшено обратно пропорционально числу элементов.



(а) (б)

Рис. 5. Решеточный многолинзовый изображающий микроскоп: схема (а) и макет (б).



(а) (б)

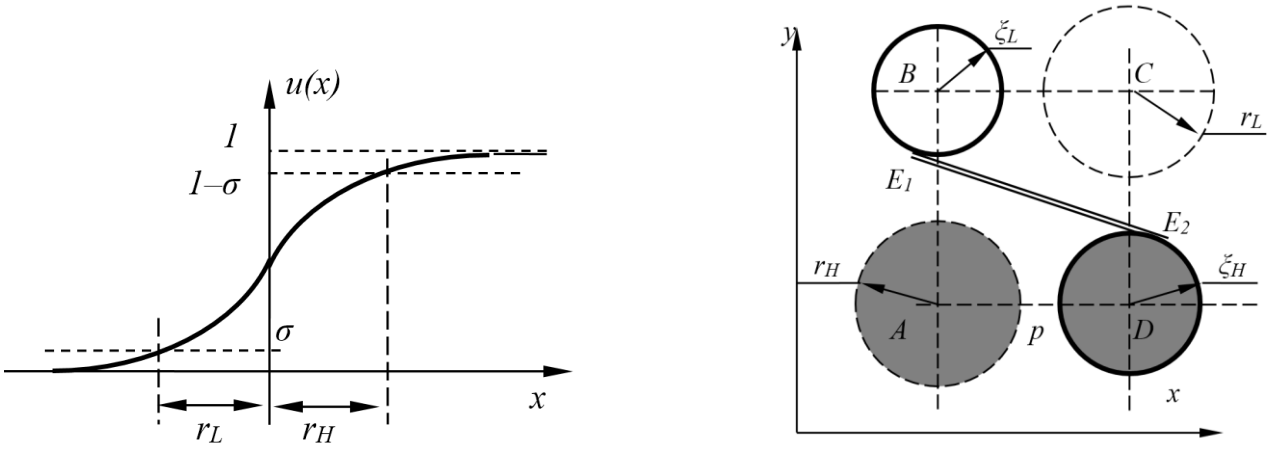
Рис. 6. Изображения ядра точечной сварки при одном (а) и 4-х (б) проходах.

В безлинзовом матричном микроскопе формирование изображений производится с помощью двумерной решетки несфокусированных, плоских элементов. Поперечное пространственное разрешение рассматриваемой системы акустической визуализации является сравнительным с периодом решетки *p*. Учитывая, что размер элементов в типичных высокочастотных ультразвуковых решетках существенно больше длины волны, безлинзовый микроскоп существенно уступает приборам с фокусирующими элементами. Однако безлинзовый матричный микроскоп может быть эффективен не только для визуализации крупных неоднородностей, но и для обнаружения малых отражателей без определения их точного положения и формы. Кроме того, для

визуализации объектов с однородной отражающей способностью и плавными в латеральной плоскости границами был разработан алгоритм, основанный на сравнении амплитуд откликов элементов решетки с пространственной переходной характеристикой элементов.

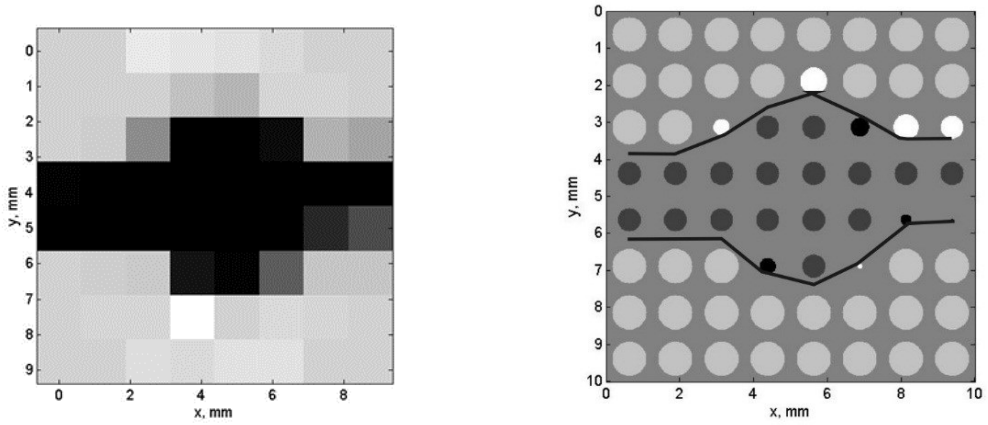
Пусть $u(x)$ – нормированная переходная характеристика ультразвукового элемента, σ – уровень шума, a_A, a_B, a_C, a_D – амплитуды сигналов, принятых элементами решетки A,B,C,D, соответственно (Рис. 7). Пусть также для определенности $a_A > 1-\sigma$, $\sigma < a_B < u(0)$, $a_C < \sigma$, $u(0) < a_D < 1-\sigma$. Тогда круг с центром в A и с радиусом r_H целиком лежит внутри отражателя, круг с центром в C и с радиусом r_L целиком лежит вне отражателя, а граница может быть аппроксимирована отрезком E_1E_2, касательным к окружностям с радиусами ξ_L и ξ_H, где $u(-\xi_L) = a_B$, $u(\xi_H) = a_D$.

Экспериментальное исследование погрешности метода проведено с помощью решетки из 8×8 элементов с периодом $p = 1.25$ мм. Сравнение построенного изображения (Рис. 8) с известными размерами тестового отверстия, показывают, что погрешность не превосходит величины теоретической оценки $p/4$.



(а) (б)

Рис. 7. Переходная характеристика элемента $u(x)$ (а), схема построения границы (б).



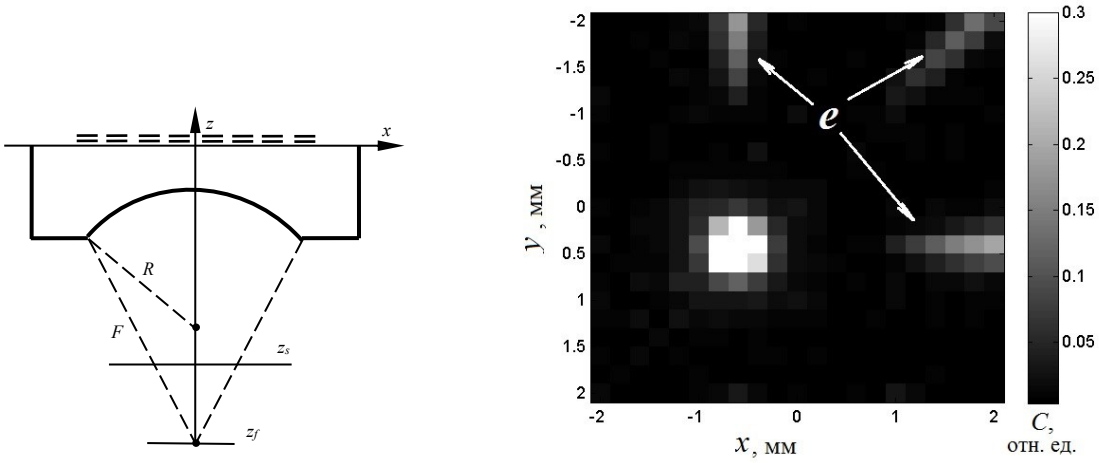
(а) (б)

Рис. 8. Изображение тестового отверстия (а), и результат построения его границы (б).

В однолинзовом матричном микроскопе решетка ультразвуковых элементов располагается на торце звукопровода, на противоположном торце которого имеется акустическая линза (Рис. 9,а). Учет наличия линзы в теоретической модели (1) показывает, что гармонический выходной сигнал в параксиальном приближении представим в виде свертки импульсных откликов элементов h_r, h_t с функцией рассеяния объекта S:

$$v(-\mathbf{r}_t, \mathbf{r}_r) = \left(\frac{k_0}{F}\right)^2 \iint_{-\infty}^{\infty} h_t(\mathbf{r}_1 - \mathbf{r}_t) h_r(\mathbf{r}_2 - \mathbf{r}_r) S\left(k_0 \frac{\mathbf{r}_1}{F}, k_0 \frac{\mathbf{r}_2}{F}\right) d\mathbf{r}_1 d\mathbf{r}_2, \qquad (7)$$

где F – фокусное расстояние линзы, k_0 – волновое число. Данное соотношение позволяет использовать линзовый многоэлементный микроскоп для оценки функции рассеяния исследуемых неоднородностей со спектральным разрешением $\Delta k = k_0 p (2F)^{-1}$ непосредственно по регистрируемому сигналу. Экспериментально было показано, что малые неоднородности, размеры которых сравнимы с разрешающей способностью и которые практически не различаются между собой на изображениях, могут иметь различные функции рассеяния, что позволяет использовать однолинзовый матричный микроскоп для исследования их свойств, например, ориентации. Для латерально однородных объектов пространственно-временной сигнал является пропорциональным коэффициенту отражения, что обуславливает эффективность его использования для измерения параметров слоистых объектов.



(а) (б)

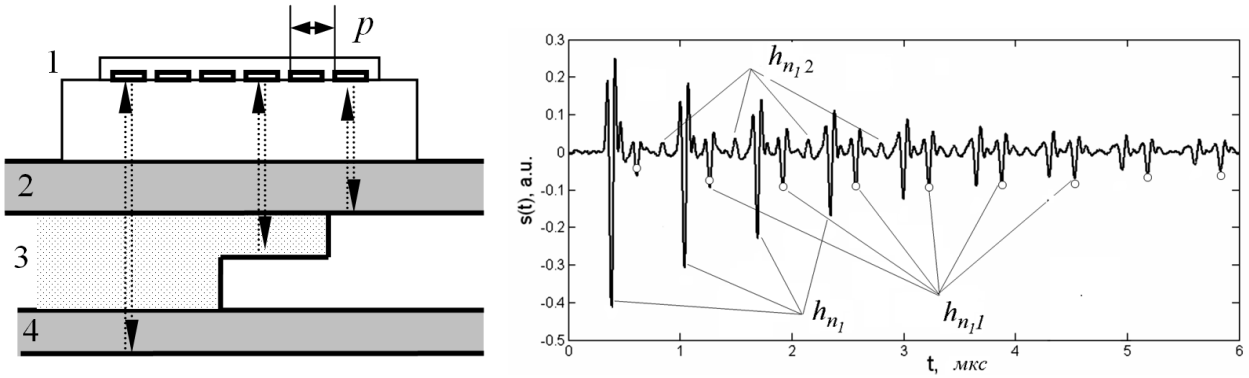
Рис. 9. Схема **матричного** однолинзового изображающего микроскопа (а), полученное отображение тестового объекта (б).

Для построения изображений производится суммирование сигналов всех пар приемо-передающих элементов с компенсаций задержек, приобретаемых сигналами при распространении из фокуса линзы в точку фокусировки и обратно. Теоретически и экспериментально показано, что пространственные разрешения многоэлементного и традиционного, одноэлементного микроскопов равны. Вместе с тем, область электронного сканирования ограничивается величиной $x_p \approx \pi F\left(2k_0 p\right)^{-1}$ во избежание возникновения характерных помех *e* (Рис. 9,б), возникающих в изображениях из-за недостаточно высокой частоты пространственной дискретизации. Для построения изображений протяженных объектов предложено использовать покадровый режим, в котором электронное сканирование дополняется механическим сканированием с большим шагом. Данная схема представляется эффективной для ультразвуковой визуализации небольших объектов с изменяющейся во времени структурой, таких как живые биологические организмы.

В **Главе 8** приведены примеры применения разработанных многоэлементных микроскопов для исследования промышленных изделий и мониторинга технологических процессов.

Схема исследования многослойного объекта, например, клеевого соединения, с помощью безлинзового матричного микроскопа с двумерной решеткой представлена на Рис. 10,а. При исследовании подобных объектов возникают проблемы, связанные с уменьшением амплитуды сигналов при прохождении границ слоев и наложения

полезного сигнала, отраженного от дефекта, на многократные импульсы *h*, вызываемые переотражениями в слоях (Рис. 10,б).



(а) (б)

Рис. 10. Схема исследования клеевого соединения структуры «сталь/компаунд/воздух» (а) и принятый сигнал (б): 1 – многоэлементный микроскоп; 2,4 – металл; 3 – компаунд.

Был разработан алгоритм обработки подобных сигналов элементов микроскопа, позволяющий выделить отклики от границ клей–металл. В качестве критерия наличия контакта верхнего металлического листа с клеем, использовалось среднеквадратическое значение сигнала, вычисленное в некотором временном окне. Как показали результаты испытаний, этот параметр является устойчивым к погрешностям эксперимента, а его отображение по элементам микроскопа визуализирует распределение клея в соединении (Рис. 11).

Безлинзовый матричный микроскоп был также применен для мониторинга технологических процессов, например процесса точечной сварки путем встраивания ультразвукового модуля в электрод сварочного станка. Исследовать динамику нанесения покрытий в установке газодинамического напыления позволяет методика, схема которой приведена на Рис. 12.

В этой методике элементы акустического микросокпа излучают ультразвуковые волны, которые распространяются через подложку и отражаются от поверхности наносимого материала. В соотвествии с ростом толщины слоя *h* увеличиваются задержки принимаемых сигналов A, B, C (Рис. 13,а), что позволяет определить профиль покрытия и оценить пространственное распределение коэфициента эффективности процесса α (Рис. 13,б). Кроме того, в принятом сигнале обнаруживаются сигналы акустической эмиссии AE, порождаемые столкновениями наносимых частиц материала с подложкой.

Пространственно-временное распределение сигналов акустической эмиссии также является источником ценной информации о параметрах технологического процесса, например о скорости потока и размерах частиц.

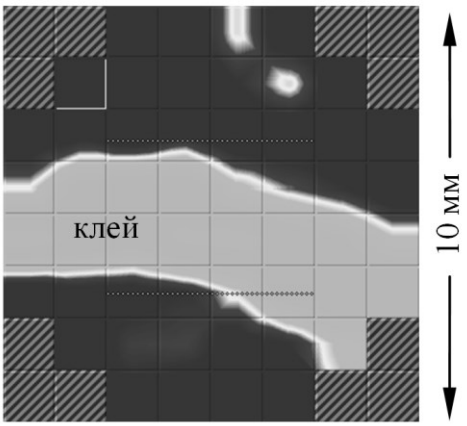


Рис. 11. Изображение распределения клея в соединении

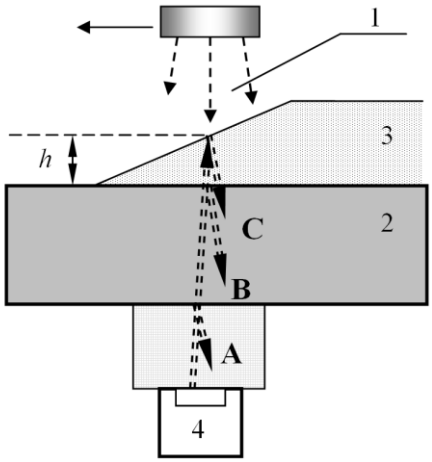
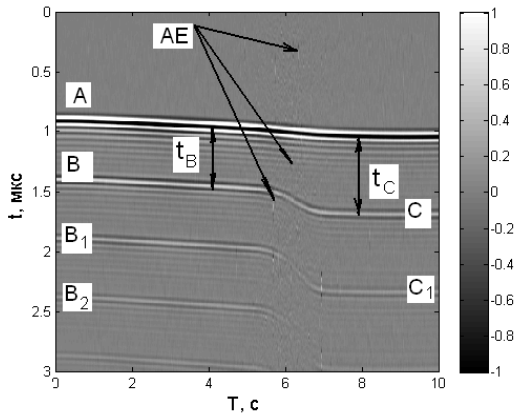
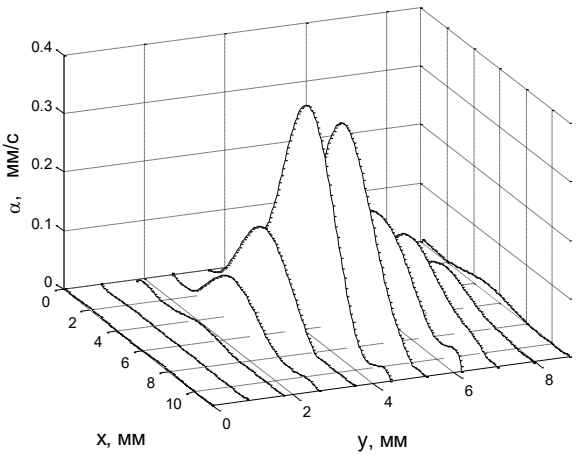


Рис. 12. Схема установки газодинамического напыления
с ультразвуковым мониторингом:
1 – поток газа с порошком; 2 – подложка;
3 – напыляемое покрытие; 4 – микроскоп.



(а)



(б)

Рис. 13. Сигнал, регистрируемый элементом микроскопа, (а) и измеренная функция эффективности напыления (б).

В **Главе 9** рассмотрены принципы построения специфических узлов многоэлементных акустических микроскопов.

На основе теоретической модели пьезопреобразователя проведен анализ частотных, импульсных и шумовых характеристик приемо-передающего тракта микроскопа с учетом влияния параметров ультразвуковых элементов и аналоговых

радиоэлектронных компонентов (Рис. 14,а,б). Свидетельством эффективности разработанных теоретических, методических и конструкторско–технологических принципов построения многоэлементных акустических микроскопов является доведение матричного микроскопа с двумерной решеткой до серийного производства и коммерческого использования (Рис. 15).

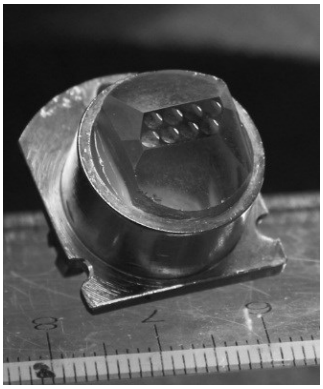
(а)  (б)

Рис. 14. Многоэлементные ультразвуковые преобразователи с центральной частотой 100 МГц (а) и 20 МГц (б).

Рис. 15. Матричный безлинзовый 64–канальный акустический микроскоп.

В **заключении** перечислены наиболее важные выполненные исследования и сформулированы основные результаты работы.

1. В работе разработаны основы многоэлементной акустической микроскопии, в которой для исследования объекта используется набор высокочастотных ультразвуковых элементов. По сравнению с традиционным одноэлементным микроскопом в многоэлементном микроскопе источники и приемники волн могут занимать различные положения друг относительно друга, что позволяет более подробно исследовать структуру рассеянных объектом волн и создавать разнообразные схемы измерений с учетом особенностей решаемых задач.

В предположении линейности, пространственной и временной инвариантности построена базовая теоретическая модель многоэлементного акустического микроскопа. Показано, что выходной пространственно–временной сигнал микроскопа, представленный в виде функции координат передающего и приемного элементов и времени, выражается многомерным обратным Фурье преобразованием произведения функции рассеяния объекта, передаточных функций передающего и приемного элементов и передаточных функций слоев иммерсионной жидкости. Данная модель являлась основой для анализа схем многоэлементных микроскопов и соответствующих методик исследования, рассмотренных в работе, а также она может быть использована в перспективных разработках в будущем.

2. Рассмотрен двухлинзовый неконфокальный акустический микроскоп с поперечным механическим сканированием, предназначенный для количественной характеризации локальных областей образца путем измерения скорости и затухания поверхностных волн для изотропных и анизотропных материалов, а также оценки коэффициента отражения плоской волны в зависимости от угла падения. Двухэлементный микроскоп по сравнению с одноэлементным микроскопом позволяет проводить исследования в широком диапазоне углов падения (примерно 10° – 80°), а протяженность интервала регистрации сигнала является неограниченной в направлении распространения волны. Кроме того, результаты измерений, полученные при поперечном сканировании, являются более устойчивыми по отношению к вариациям свойств иммерсионной среды, что позволяет измерять температурный коэффициент скорости вытекающей волны. Характерная погрешность измерения скорости поверхностных волн, достигнутая в разработанной экспериментальной установке, составляет 0.1%, погрешность измерения температурного коэффициента скорости – 10^{-5} 1/K.

3. Разработан двухканальный допплеровский микроскоп с продольным сканированием, в котором используются фокусирующий и плоский элементы, возбуждаемые гармоническими сигналами. Выходные сигналы элементов формируются за счет допплеровского сдвига, возникающего при отражении зондирующих волн от поверхности образца при механическом сканировании. Использование гармонического сигнала позволяет устранить искажения сигнала вследствие частотно–зависимого затухания ультразвука в среде на высоких частотах, а по входному сигналу плоского элемента возможно производить прецизионный отсчет координаты сканирования. Таким

образом, двухэлементный допплеровский микроскоп представляется высокопроизводительным прибором для измерения параметров поверхностных волн и оценки угловой зависимости коэффициента отражения, достижимый частотный диапазон которого простирается вплоть до единиц гигагерц.

4. Избавиться от механического сканирования при измерении локальных свойств объекта позволяют многоэлементные микроскопы с решетками ультразвуковых элементов, в которых время регистрации полного пространственно–временного сигнала быть сравнимо со временем распространения волн в иммерсионной среде. Поскольку диаграммы направленности элементов применяемых высокочастотных решеток являются сравнительно узкими, для измерения параметров вытекающих поверхностных волн целесообразно использовать линзово-решеточную схему с приемной решеткой, наклоненной навстречу фронту принимаемой волны. Теоретически показано, что скорость и коэффициент затухания поверхностной волны могут быть определены по измеренным задержкам и амплитудам откликов, принимаемых элементами решетки. Теоретически и экспериментально установлено, что погрешность измерений может быть снижена путем ориентации решетки перпендикулярно направлению прихода фронта волны, а также путем оптимального выбора периода решетки и числа ее активных элементов. Погрешность измерений, экспериментально оцененная для разработанного прибора, не превосходит 1% и 10% для скорости и коэффициента затухания поверхностных волн, соответственно.

5. Для исследования объемных волн в слоистых структурах более эффективно использовать однорешеточную схему микроскопа с решеткой, расположенной параллельно исследуемой поверхности. Разработана методика определения скоростей и коэффициентов затухания объемных волн, а также толщины и плотности слоя, основанная на разложении пространственно–временного сигнала в спектр плоских волн. Установлено, что частота пространственной дискретизации сигнала, формируемого используемыми высокочастотными решетками, не удовлетворяет критерию Найквиста. Данное обстоятельство приводит к возникновению помех в рассчитываемых спектрах и росту погрешностей измерений. Предложен метод подавления этих помех, заключающийся в повышении частоты дискретизации путем интерполяции по пространственной координате откликов волновых мод, разделенных во временной области. Экспериментально оценена характерная погрешность определения параметров слоя методом разложения сигнала по плоским волнам. Для твердых материалов типа

плавленого кварца, погрешность составляет примерно 0.1% для толщины и скорости продольной волны, 0.5% – для скорости поперечной волны и 5% – для плотности.

6. Разработаны многолинзовый и безлинзовый матричные микроскопы, в которых формирование изображений производится с помощью набора независимо работающих сфокусированных или несфокусированных элементов. По сравнению с однолинзовым одноэлементным микроскопом время сбора данных в этих схемах является существенно уменьшенным за счет использования электронного переключения элементов.

7. Для безлинзового матричного микроскопа разработана методика построения изображений, основанной на сравнении амплитуд откликов элементов решетки с пространственной переходной характеристикой элементов. Показано, что для объектов с границами, которые являются плавными в латеральной плоскости, погрешность нахождения границы и оценки размеров объектов в данной методике меньше периода решетки. Предложен также способ формирования изображений, в котором механическое движение датчика осуществляется вручную, а координата датчика определяется путем анализа пространственно–временных сигналов элементов решетки, расположенных вдоль направления движения. Экспериментально установлено, что точность измерения положения для объектов, акустические свойства которых достаточно быстро меняются вдоль направления движения, не превосходит размера элемента решетки.

Матричный безлинзовый микроскоп благодаря относительной простоте, надежности и информативности представляется эффективным прибором для исследования промышленных изделий и мониторинга технологических процессов. В работе приведены примеры его использования для неразрушающего контроля качества клеевых и сварных соединений, а также для наблюдения в реальном времени процессов плавления и отверждения металла в зоне точечной сварки и роста наносимых покрытий в ходе порошкового газодинамического напыления.

8. Предложена схема однолинзового матричного микроскопа, в котором двумерная решетка плоских элементов располагается в задней фокальной плоскости единственной акустической линзы. В параксиальном приближении установлено, что многомерный пространственно-временной сигнал микроскопа непосредственно определяется функцией рассеяния объекта. Путем аппаратной или цифровой обработки сигнала микроскопа возможно формировать изображения путем фокусировки в точки трехмерной области. Показано, что однолинзовый матричный микроскоп по пространственному разрешению не уступает классическому одноэлементному

конфокальному микроскопу, а по достижимой производительности превосходит его по крайней мере на порядок.

9. Таким образом на основе представленных результатов можно сделать вывод об эффективности развитого в работе направления. Перспективы развития многоэлементной акустической микроскопии заключаются в создании различных модификаций схем многоэлементных микроскопов и соответствующих методик исследований, ориентированных на решение различных классов задач, совершенствовании высокочастотных многоэлементных акустических узлов, отработке конструкций прибора и его программного обеспечения.

СПИСОК ОСНОВНЫХ ПУБЛИКАЦИЙ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

Статьи в журналах, включенных в перечень ВАК и/или международные базы цитирования Web of Science и Scopus

1. Титов, С.А. Измерение скорости и затухания вытекающих поверхностных акустических волн ультразвуковым микроскопом с двумя фокусирующими преобразователями / С.А. Титов, Р.Г. Маев, А.Н. Богаченков // Письма в ЖТФ. — 2001. — Т. 27. — № 4. — С. 19–25.
2. Титов, С.А. Импульсный ультразвуковой измеритель скоростей поверхностных акустических волн / С.А. Титов, Р.Г. Маев, А.Н. Богаченков // Приб. и техн. эксп. — 2006. — Т. 49. — № 1. — С. 121–127.
3. Titov, S. Wide–aperture, line–focused ultrasonic material characterization system based on lateral scanning / S. Titov, R. Maev, A. Bogachenkov // IEEE Trans. Ultrason. Ferroelectr. Freq. Control. — 2003. — V. 50. — No. 8. — P. 1046–1056.
4. Бахрах, Л.Д. Исследование обобщенной апертурной функции сканирующего акустического микроскопа / Л.Д. Бахрах, С.А. Титов // Письма в ЖТФ. — 1989. — Т. 15. — № 14. — С. 17–21.
5. Бахрах, Л.Д. Сканирующий акустический микроскоп с доплеровским смещением спектра отраженного сигнала / Л.Д. Бахрах, С.А. Титов // Акустич. журн. — 1990. — Т. 36. — № 3. — С. 552–554
6. Титов, С.А. Измерительный сканирующий акустический микроскоп с гармоническим зондирующим сигналом / С.А. Титов, Р.Г. Маев, А.Н. Богаченков // Акустич. журн. — 2000. — Т. 46. — № 5. — С. 601–608.

7. Титов, С.А. Двухканальный измерительный акустический микроскоп / С.А. Титов, Р.Г. Маев, А.Н. Богаченков // Приб. и техн. эксп. — 2000. — Т. 43. — № 2. — С. 140–144.
8. Титов, С.А. Применение решетки ультразвуковых преобразователей для измерения скорости и затухания вытекающих акустических волн / С.А. Титов, Р.Г. Маев, А.Н. Богаченков // Письма в ЖТФ. — 2004. — Т. 30. — № 20. — С. 89–94.
9. Titov, S. Measurements of velocity and attenuation of leaky waves using an ultrasonic array / S. Titov, R. Maev, A. Bogachenkov // Ultrasonics. — 2006. — V. 44. — No. 2. — P. 182–187.
10. Титов, С.А. Измерение скорости акустической волны и толщины образца при помощи решетки ультразвуковых преобразователей / С.А. Титов, Р.Г. Маев, А.Н. Богаченков // Письма в ЖТФ. — 2009. — Т. 35. — № 22. — С. 8–14.
11. Титов, С.А. Определение параметров изотропного слоя по пространственно-временным сигналам ультразвуковой решетки / С.А. Титов, Р.Г. Маев // Акустич. журн. — 2013. — Т. 59. — № 5. — С. 648–656.
12. Titov, S.A. An ultrasonic array technique for material characterization of plate samples / S.A. Titov, R.G. Maev // IEEE Trans. Ultrason. Ferroelectr. Freq. Control. — 2013. — V. 60. — No. 7. — P. 1435–1445.
13. Титов, С.А. Малогабаритный многоканальный сканирующий акустический микроскоп / С.А. Титов, Р.Г. Маев, А.Н. Богаченков // Приб. и техн. эксп. — 2009. — Т. 52. — № 5. — С. 116–120.
14. Titov, S.A. Pulse-echo NDT of adhesively bonded joints in automotive assemblies / S.A. Titov, R.Gr. Maev, A.N. Bogachenkov // Ultrasonics. —2008. — V. 48. — No. 6–7. — P. 537–546.
15. Maev, R.Gr. Ultrasonic evaluation of adhesive coverage in bonded joints using a 2D array technique / R.Gr. Maev, S. Titov, A. Bogachenkov, B. Ghaffari, K. Lazarz, D. Ondrus, L. Barsanti // Materials Evaluation. — 2013. — V. 71. — No. 7. — P. 875–882.
16. Maev, R. In situ monitoring of particle consolidation during low pressure cold spray by ultrasonic technique / R. Maev, S. Titov, V. Leshchynsky, D. Dzhurinskiy, M. Lubrik // J. of Thermal Spray Technology. — 2011. — V. 20. — No. 4. — P. 845–851.
17. Maev, R.Gr. Passive and pulse–echo ultrasonic monitoring of cold spray process / R.Gr. Maev, S. Titov, V. Leshchynsky // J. of Thermal Spray Technology. — 2012. — V. 21. — No. 3–4. — P. 620–627.

18. Титов, С.А. Сканирующий акустический микроскоп в режиме визуализации ультразвуковых полей / С.А. Титов // Письма в ЖТФ. — 1988. — Т. 14. — вып. 1. — С. 22–24.
19. Титов, С.А. Линзовый акустический микроскоп с двумерной ультразвуковой решеткой / С.А. Титов, Р.Г. Маев // Письма в ЖТФ. — 2016. — Т. 42. — № 9 — С. 8-15.
20. Титов, С.А. Обработка пространственно–временного сигнала акустического микроскопа для определения параметров изотропного слоя / С.А. Титов, В.М. Левин, Ю.С. Петронюк // Акустич. ж. — 2017 — Т. 63. — № 6. — С. 692-699.
21. Титов, С.А. Линзовый многоэлементный акустический микроскоп в режиме измерения параметров слоистых объектов / С.А. Титов, Р.Г. Маев, А.Н. Богаченков // Акустич. ж. — 2017. — Т. 63. —№ 5. — С. 546-552.
22. Титов, С.А. Применение плоских импульсных акустических волн в устройствах с фазированными решетками для ультразвуковой визуализации в слоистых средах / С.А. Титов // Письма в ЖТФ. — 2018. — Т. 44. —№ 16. — С. 41-47.
23. Zinin, P.V. Near-Field Defects Imaging in Thin DLC Coatings Using High-Frequency Scanning Acoustic Microscopy / P.V. Zinin, I.B. Kutuza, S.A. Titov // J. of Surface Investigation. — 2018. — V. 12. — No. 6. — P. 1285-1293.
24. Титов, С.А. Формирование ультразвуковых изображений через слои с неизвестными параметрами / С.А. Титов, П.В. Зинин // Акустич. ж. — 2020. — Т. 66. — Вып. 2. — С. 206-212.
25. Бурлаков, А.Б. Сонография сердца вьюна Misgurnus fossilis на предличиночной стадии развития / А.Б. Бурлаков, С.А. Титов, А.Н. Богаченков // Акуст. ж. — 2021. — Т. 67 — № 5 — С. 571–580.
26. Титов, С.А. Система акустической визуализации с матричным ультразвуковым датчиком / С.А. Титов, Р.Г. Маев, А.Н. Богаченков // Датчики и системы. — 2010. — № 7. — С. 18–21.
27. Titov, S.A. Measurement of the velocity and attenuation of leaky surface acoustic waves by an ultrasonic microscope with two focusing transducers / S.A. Titov, R.G. Maev, A.N. Bogachenkov // Russian Ultrasonics. — 2000. — V. 30. — No. 6. — P. 269–274.
28. Ghaffari, B. Nondestructive Evaluation of Adhesively-Joined Aluminum Alloy Sheets Using an Ultrasonic Array / B. Ghaffari, J. Dekam, K. Haddix, K. Lazarz, S. Titov, R. Maev // SAE Technical Paper. – 2015. – 2015-01-0702.

29. Petronyuk, Y.S. Shape of short ultrasonic echo-pulses focused in the solid plate / Y.S. Petronyuk, V.M. Levin, S.A.Titov // Physics Procedia. – 2015. – V.70. – P. 626–630.
30. Ghaffari, B. A matrix array technique for evaluation of adhesively bonded joints / B. Ghaffari, K. Lazarz, D. Ondrus, R. Maev, S. Titov, A. Bogachenkov // SAE Technical Paper. – 2012. —No. 2012-01-0475.
31. Titov, S.A. Measurement of composite material strain using correlation of ultrasonic images 2020 / S.A. Titov, Y.S. Petronuk, V.M. Levin, E.S. Morokov // J. Phys.: Conf. Ser. – 2020. – V. 1636. – N. 012025.
32. Maev, R. NDT of adhesively-bonded sheet metal joints with ultrasonic matrix array technique / R. Maev, S. Titov, A. Bogachenkov, L. Barsanti // Proc. 52th Ann. Conf. of British Inst. NDT. – 2013, 10-12 September 2013, Telford, UK. — 6 p.
33. Maev, R. Ultrasonic evaluation of anticorrosive copper cold spray coating of steel nuclear waste containers / R. Maev, S. Titov, D. Doyle, D. Hatton // Proc. of the 52th Annual Conference of The British Institute of Non-Destructive Testing NDT 2013, 10-12 September 2013, Telford, UK. — 6 p.
34. Titov, S.A. Ultrasonic imaging system based on two–dimensional array of ultra-wavelength transducers / S.A. Titov, R.G. Maev, A.N. Bogatchenkov // Proc. of 2012 IEEE International Ultrasonics Symp., October 7-10, 2012, Dresden, Germany. — P. 2446 – 2449.
35. Titov, S.A. An ultrasonic array technique for velocity of bulk waves and sample thickness measurement / S.A. Titov, R.G. Maev, A.N. Bogachenkov // Proc. of 2010 IEEE International Ultrasonics Symp., October 11-14, 2010, San Diego, USA. — P. 2384–2387.
36. Kustron, P. In-Line ultrasonic investigation of spot weld quality using multi-transducer set-up / P. Kustron, J. Kosimski, A. Chertov, S. Titov, R. Maev // Review of Progress in Quantitative Nondestructive Evaluation, July 26 – 31, 2009, Kingston, Rhode Island, USA. — V. 29. — P. 1675–1622.
37. Titov, S.A. Elastic property measurements by the inversion of pulsed V(z,t) data / S.A. Titov, R.G. Maev, A.N. Bogachenkov // Review of Progress in Quantitative Nondestructive Evaluation. – 16–20 July 2000, Ames, Iowa, USA. — V. 20. — P. 1354–1361.
38. Titov, S.A. Angular spectrum approach to time–resolved acoustic microscopy / S.A. Titov, R.G. Maev // Acoustical Imaging. Proc. of 25th International Symposium, March 19–22, 2000, Bristol, United Kingdom. — V. 25. — P. 247–252.

39. Titov, S.A. Fundamentals of spatio–temporal Fourier spectroscopy in quantitative acoustic microscopy / S.A. Titov, R.G. Maev, A.N. Bogachenkov // Acoustical Imaging. Proc. of 27th International Symposium, March 24–27, 2003, Saarbrucken, Germany. — V. 27. — P. 431–438.
40. Titov, S.A. LSAW measurement accuracy in ultrasonic material characterization systems with mechanical and electronic scanning / S.A. Titov, R.G. Maev // Proc. of International Congress on Ultrasonics, 9-13 April 2007, Vienna, Austria. — Paper No. 1572. — 4 p.
41. Titov, S.A. Quantitative Acoustic Microscopy based on the array approach / S.A. Titov, R.G. Maev // Advances in acoustic microscopy and high resolution imaging: from principles to applications / Ed.: Maev R. Gr. — Berlin: Wiley–VCH, 2013. — P. 125–152.
42. Titov, S.A. Portable Ultrasonic Imaging Devices / S.A. Titov, R.G. Maev, F.M. Severin // Advances in acoustic microscopy and high resolution imaging: from principles to applications / Ed.: Maev R. Gr. — Berlin: Wiley–VCH, 2013. — P. 71–92.
43. Maev R. G. Nondestructive Evaluation of Cold Spray Coatings / R. G. Maev, S. Titov // Cold Gas Dynamic Spray / Ed. Maev R. and Leshchynsky V. – Boca Raton: CRC Press, 2016. – P. 231–247.

Патенты

1. Maev R.G., Maslov K., Titov S.A. Multieyed acoustical microscopic lens system // Pat. USA 6116090. Sept. 12, 2000.
2. Lee H.-T., Maev R. Gr., Maeva E. Y., Titov S. A. Method and system for assessing quality of spot welds // Pat. USA 7132617. Nov. 7, 2006.
3. Lee H.-T., Maev R. Gr., Maeva E. Y., Titov S. A. Method and system for assessing quality of spot welds // Pat. USA 7516022. April 7, 2009.
4. Maev R.Gr., Ewasyshyn F.J., Titov S.A., Paille J.M., Maeva E.Y., Denisov A.A., Seviaryn F.M. Method and apparatus for assessing quality of spot welds // Pat. 7789286 USA. Sept. 7, 2010.
5. Maev R.Gr., Ewasyshyn F.J., Titov S.A., Paille J.M., Maeva E.Y., Denisov A.A., Seviaryn F.M. Method and apparatus for assessing quality of spot welds // Pat. USA 775415. August. 17, 2010.
6. Maev R.Gr., Titov S.A., Bogachenkov A.N. Method and system for assessing the quality of adhesively bonded joints using ultrasonic waves // Pat. USA 9933397. April 3, 2018.

Публикации в других рецензируемых изданиях

1. Титов, С.А. Формирование ультразвуковых изображений и характеризация визуализируемых неоднородностей в многоэлементном линзовом акустическом микроскопе / С.А. Титов // Физ. осн. приборостроения. – 2017. – Т.6. – № 4 (26). – С. 74– 81.
2. Левин, В.М. Обработка пространственно–временного сигнала акустического микроскопа для определения скоростей объемных ультразвуковых волн и толщины слоистых объектов / В.М. Левин, Ю.С. Петронюк, С.А. Титов // Физ. осн. приборостроения – 2016. – Т.5. – № 4 (21). – С. 80– 89.
3. Титов, С.А. Линзовый акустический микроскоп с линейной решеткой в режиме измерения параметров слоистых объектов / С.А. Титов, Р.Г. Маев, А.Н. Богаченков // Росс. технологический ж. – 2016. – Т.4.– № 2 (11). – С. 25–30.
4. Титов, С.А. Визуализация и характеризация малых объектов в линзовом акустическом микроскопе с двумерной решеткой / С.А. Титов, А.Н. Богаченков // Росс. технологический ж. 2018. – Т.6. – № 6. – С. 66–73.
5. Титов, С.А. Определение координаты сканирования в системе акустической визуализации по сигналам многоэлементного ультразвукового преобразователя / С.А. Титов, А.Н. Богаченков // Научный вестник МИРЭА. — 2009. — № 2(7). — С. 112–117.
6. Титов, С.А. Цифровая коррекция импульсного отклика широкополосных ультразвуковых преобразователей / С.А. Титов, Р.Г. Маев, А.Н. Богаченков // Научный вестник МИРЭА. —2011. — № 1(10). — С. 57– 64.