

УТВЕРЖДАЮ

Директор Федерального государственного  
бюджетного учреждения науки  
Института радиотехники и электроники им.  
В.А. Котельникова Российской академии  
наук (ИРЭ им. В.А. Котельникова РАН),  
член-корр. РАН



С.А. Никитов

«28» сентября 2018

### ОТЗЫВ

ведущей организации на диссертацию Морокова Егора Степановича «Импульсная акустическая микроскопия для визуализации малоразмерных элементов в объеме материалов и на границах их соединений», представленную на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.04.01 – «Приборы и методы экспериментальной физики»

Методы ультразвукового контроля высокого разрешения остаются востребованными во многих практических и научных областях, от диагностики космических аппаратов, самолетов и контроля качества микросхем до решения фундаментальных проблем разрушения и старения и деградации материалов. Несмотря на столь широкое применение, развитие и совершенствование ультразвуковых технологий, как правило, связано с постановкой и решением новых задач в материаловедении. Создание быстрых и эффективных методик, позволяющих проводить оценку объемной структуры с разрешением в десятки микрон, остается актуальной задачей. Кроме того, анализ получаемых ультразвуковых данных требует развития теоретических подходов, описывающих физические процессы при взаимодействии зондирующих пучков с элементами объемной структуры изучаемых объектов.

Диссертационная работа Е.С. Морокова посвящена разработке методов и подходов импульсной акустической микроскопии для визуализации высокого разрешения элементов объемной микроструктуры и внутренних границ раздела материалов. В рамках работы изучаются особенности взаимодействия коротких фокусированных импульсов высокочастотного ультразвука с акустически твердыми и акустически мягкими рассеивателями ( $a \ll \lambda$ ) в объеме твердотельного материала, рассматриваются принципы отображения эхо-импульсов, создаваемых такими рассеивателями на акустических изображениях. Исследуются экспериментально и рассматриваются

теоретически механизмы формирования эхо-сигналов, отраженных от внутренних границ раздела разной степени совершенства. Изучаются принципы формирования акустических изображений внутренних границ и неразрушающей оценки качества соединения материалов на этих границах. В качестве основных объектов экспериментального исследования были выбраны плотные керамики, обладающие сложноорганизованной внутренней микроструктурой.

Диссертация состоит из введения, пяти глав, заключения и списка литературы, включающего 140 наименований.

Во Введении обосновывается актуальность работы, поставлена цель и задачи, научную и практическую значимость полученных результатов. Вкратце дается структура диссертации и содержание отдельных глав.

Первая глава содержит обзор литературы, в котором описываются принципы акустической микроскопии, характеристики фокусированных пучков, методы анализа упругих свойств материалов. Представлены основные режимы акустической визуализации.

Во 2-ой главе представлено описание керамических материалов. За последние годы наблюдается существенный прогресс в технологии изготовления керамических материалов – сохранив твердость, современные керамики стали существенно более прочными и стойкими к динамическим нагрузкам. Высокие прочностные свойства керамик связаны, прежде всего, с изменением их микроструктуры. Однако в объеме керамических материалах присутствует значительное количество пор и включений с размерами от нескольких микрон до десятков микрон. Представлен обзор механизмов адгезии при формировании границы контакта с керамикой. Независимо от природы сформированной границы надежность контакта характеризуется, в первую очередь, дефектами адгезии в зоне контакта. Потеря адгезии может происходить в виде полной потери контакта на ограниченном участке границы (отслоения, газовые и воздушные пузыри), либо в форме частичного контакта. Представлен краткий обзор методов, позволяющих проводить оценку внутренней структуры и границ соединения керамических материалов.

Третья глава посвящена проблеме приема эхо-сигнала от рассеивателя, расположенного в объеме твердого материала. В результате теоретического анализа взаимодействия фокусированного пучка с одиночным элементом внутренней структуры был адаптирован критерий Рэлея для оценки размеров рассеивателей, визуализированных на акустических изображениях. Данный подход был применен для оценки размеров пор, отображаемых на изображениях объемной микроструктуры

керамики  $ZrO_2$ , используемой в качестве основанного экспериментального материала. Показано, что акустические линзы с рабочей частотой 100 МГц, которой соответствует длина волны в  $ZrO_2$  70 мкм, позволяют визуализировать отдельные мягкие включения размером от 5 мкм.

В 4-ой главе представлены результаты экспериментального исследования внутренней микроструктуры керамики и ее упругих характеристик. Описана экспериментальная установка и методика эксперимента. Автором показано хорошее сопоставление теоретического подхода и экспериментальных результатов при визуализации малоразмерных рассеивателей в объеме  $ZrO_2$ . Представлены данные о значениях скоростей звуковых волн и средних значениях упругих модулей в зависимости от пористости, среднего размера зерна и кристаллической модификации.

5-я глава посвящена экспериментальному изучению взаимодействия фокусированных пучков с внутренними границами раздела и неразрушающей оценки степени адгезии соединения материалов. Анализируется влияние дефектов на амплитуду и форму эхо-сигналов, принимаемых от области контакта, и особенности отображения структурных элементов границы на акустических изображениях. Представлены результаты экспериментального изучения области контакта сходящимися пучками продольных и поперечных волн. Пространственное разрешение, определяемое длиной волны для различных волновых мод лучше для поперечных волн, обладающих меньшей скоростью распространения. С другой стороны, поперечные волны, возбуждаемые только за счет наклонных компонент пучка, обладают меньшей интенсивностью по сравнению с продольными волнами, значительный вклад в амплитуду которых обеспечивается параксиальной составляющей пучка. Различия в амплитудах отраженных эхо-сигналов от границы контакта сказывается на чувствительности акустической системы к определению точечных и протяженных дефектов адгезии соединенных материалов, а также фиксировать изменения акустического импеданса при росте дефектных участков границы соединения подверженной механическим нагрузкам. Результаты экспериментального наблюдения динамики изменения качества контакта керамика-стеклокерамика при пошаговом увеличении механической нагрузки вызывают особый практический интерес.

При общей высокой оценке диссертационной работы следует сделать ряд замечаний:

1. Во введении не вынесены отдельным пунктом научная новизна и практическая значимость, тем не менее, они прослеживаются в общем тексте повествования и приведены в автореферате;

2. В представленном обзоре первой главы отсутствует сравнение последних достижений акустической микроскопии с другими методами (например, рентгеновской), что не позволяет понять область исключительного преимущества акустического подхода.

3. В работе представлен теоретический подход для оценки минимально возможного рассеивателя на акустическом изображении, однако, задача определения точного размера элемента внутренней структуры по амплитуде регистрируемого эхо-сигнала выглядела бы намного интереснее.

4. К достоинствам работы можно отнести адаптацию критерия Рэлея для оценки размеров рассеивателей, визуализированных на акустических изображениях. Однако авторы не вынесли этот результат в положения.

5. Упомянутая в Положении 3 зависимость упругих характеристик керамик от пористости, среднего размера зерна и типа кристаллической модификации представляется очевидной. Более интересным было бы установить вид этой зависимости теоретически и подтвердить его экспериментально на одном из конкретных материалов.

6. Вызывает сомнение точность измерения скорости акустических волн (менее 1%) и упругих модулей (менее 5%). Но даже при этой точности в Главе 4 не следовало приводить значения модулей до 3-й значащей цифры.

7. В тексте диссертации присутствуют опечатки, например на стр 108 в подписи к рисунку «...*переотражение продольных волн...*»; и пунктуационные ошибки: стр 85 «*Дефекты расположенные выше фокуса...*»;

Приведенные замечания носят рекомендательный характер и не затрагивают сути работы, ее основных выводов и результатов. Упомянутые замечания не снижают общей положительной оценки работы.

Изложенные в работе результаты представлены развернуто и корректно оформлены. Результаты опубликованы в рецензируемых журналах, а также на научных всероссийских и международных конференциях. Автореферат полностью отражает содержание диссертационной работы.

Диссертационная работа Е.С. Морокова является законченной научно-квалификационной работой, в которой изложены новые научно обоснованные теоретические и экспериментальные подходы, имеющие существенное значение для развития методов акустической микроскопии и неразрушающего контроля высокого

разрешения. Все основные выводы и научные положения обоснованы, а сформулированные задачи успешно решены.

Диссертационная работа по своей актуальности, научной новизне и значимости полученных результатов отвечает всем требованиям Положения о порядке присуждения ученых степеней, а её автор Мороков Е.С. заслуживает присуждения ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.04.01 – «Приборы и методы экспериментальной физики».

Доклад Морокова Е.С. заслушан на научно-квалификационном семинаре (НКС) ИРЭ им. В.А. Котельникова РАН «Физика полупроводников и полупроводниковая электроника» и утвержден на заседании НКС 27.09.2018, протокол №1. Отзыв подготовлен профессором РАН, д.ф.-м.н. Кузнецовой И.Е. и д.ф.-м.н. Анисимкиным В.И.

Гл.научн.сотр. ИРЭ им.В.А.Котельникова РАН,  
профессор РАН, д.ф.-м.н., доцент

Кузнецова И.Е.

Ирен Евгеньевна Кузнецова  
Адрес: Моховая, 11, к.7, Москва 125009  
e-mail: [kuziren@yandex.ru](mailto:kuziren@yandex.ru)  
Тел. +79152379880

Гл.научн.сотр. ИРЭ им.В.А.Котельникова РАН,  
д.ф.-м.н.

Анисимкин В.И.

Владимир Иванович Анисимкин  
Адрес: Моховая, 11, к.7, Москва 125009  
e-mail: [anis@cplire.ru](mailto:anis@cplire.ru)  
Тел. +7(495)629-3361