

ОТЗЫВ

официального оппонента Сапожникова Олега Анатольевича
на диссертационную работу Курникова Алексея Александровича
«ВЛИЯНИЕ АМПЛИТУДНО-ЧАСТОТНЫХ И ГЕОМЕТРИЧЕСКИХ
ХАРАКТЕРИСТИК ПЬЕЗОПОЛИМЕРНЫХ ДЕТЕКТОРОВ НА
ЭФФЕКТИВНОСТЬ ОПТОАКУСТИЧЕСКОЙ ВИЗУАЛИЗАЦИИ
БИОЛОГИЧЕСКИХ ТКАНЕЙ», представленную на соискание учёной степени
кандидата физико-математических наук по специальности 1.3.7 – Акустика

Проведённые в диссертационной работе А.А. Курникова исследования относятся к области оптоакустической визуализации. Такая визуализация основана на фотоакустическом эффекте и сочетает оптическое возбуждение среды и ультразвуковое обнаружение её отклика, что обеспечивает получение изображений с высоким пространственным разрешением и контрастом. Соответствующие устройства получили название оптоакустических микроскопов (ОАМ). Особое значение в данном контексте имеет визуализация биологической ткани, в частности, кровеносных сосудов. Оптоакустическая ангиография активно развивается последние 15–20 лет. Существенный вклад в становление метода внесли российские исследователи из МГУ (А.А. Карабутов, И.М. Целиванов и др.). В последние годы ряд значимых результатов был получен в ИИФ РАН (И.В. Турчин и др.), в том числе П.В. Субочевым, под руководством которого выполнена рассматриваемая диссертация.

В оптоакустическом методе визуализации биологические ткани облучаются короткими лазерными импульсами. Поглощение излучения приводит к локальному нагреву среды и, как следствие, к возникновению пространственно неоднородных механических напряжений за счёт термоупругого механизма. Эти напряжения служат источниками акустических импульсов, распространяющихся во все стороны, включая направление к поверхности, и несущих информацию о пространственном распределении оптических поглотителей. Наиболее эффективным поглотителем является кровь, содержащая гемоглобин, поэтому сосуды формируют основной фотоакустический контраст. Регистрация акустических сигналов, достигающих поверхности кожи, позволяет локализовать термоупругие источники и тем самым восстановить изображение внутренней структуры среды. Глубина визуализации ограничена проникновением рассеянного оптического излучения в ткани и чувствительностью акустических приёмников. Так, для длины волны 0.532 мкм глубина визуализации составляет порядка 2 мм, тогда как для 1.064 мкм может превышать 10 мм. Следует отметить, что наряду с оптоакустическим методом существует широкий спектр традиционных методов визуализации, включая компьютерную томографию (КТ), магнитно-резонансную томографию (МРТ) и ультразвуковую визуализацию (УЗИ). Однако применительно к ангиографии подкожных слоёв биологических тканей эти методы уступают оптоакустической ангиографии как по пространственному разрешению, так и по способности к селективной визуализации кровеносных сосудов.

При использовании ОАМ для ангиографии уровни мощности лазерного излучения ограничены требованиями безопасности, что приводит к крайне низкой амплитуде генерируемых акустических сигналов. Для их надёжного приёма требуются ультразвуковые детекторы с исключительно высокой чувствительностью. Кроме того, импульсный характер лазерного возбуждения и малые пространственные масштабы визуализируемых сосудистых структур обуславливают широкополосность оптоакустических сигналов (обычно от нескольких десятков кГц до десятков МГц). Несмотря на наличие коммерческих широкополосных ультразвуковых приёмников, большинство из них не удовлетворяют одновременно всем ключевым требованиям оптоакустической ангиографии: высокой чувствительности, широкой полосе пропускания и достаточному угловому апертурному покрытию. Параметры детекторов непосредственно определяют соотношение сигнал/шум, пространственное разрешение и достоверность получаемых изображений. Таким образом, целенаправленное исследование физических принципов приёма оптоакустических сигналов и разработка на этой основе детекторов с улучшенными характеристиками представляют собой важнейшую задачу для дальнейшего развития метода. Именно этой проблеме посвящена диссертационная работа А.А. Курникова. В ней проведён комплексный теоретический и экспериментальный анализ характеристик пьезополимерных ультразвуковых детекторов, разработаны и реализованы новые конструктивно-технологические решения, повышающие их эффективность, а также выполнена апробация предложенных детекторов в составе сканирующих оптоакустических систем с оценкой вклада в качество визуализации.

Изложенное выше свидетельствует о высокой актуальности темы диссертации и её широком потенциале — от практического применения в медицинской диагностике до решения фундаментальных задач волновой физики, связанных с оптоакустикой, пьезоэлектрическим приёмом акустических волн и исследованием распространения ультразвука в сложных средах.

Диссертация состоит из введения, четырех глав, заключения, списка цитируемой литературы (102 наименования) и списка публикаций автора по теме диссертации (7 статей в рецензируемых журналах и тезисы докладов на 2 конференциях). Общий объем работы составляет 108 страниц, включая 39 рисунков и 7 таблиц.

Во введении обоснованы актуальность и степень разработанности темы исследования, сформулированы цель и задачи, положения, выносимые на защиту, приведены научная новизна, теоретическая и практическая значимость, краткое содержание диссертации.

В первой главе диссертации автор проводит теоретический анализ чувствительности пьезополимерных детекторов на основе поливинилиденфторида (ПВДФ) и поливинилиденфторид-трифторэтилена (ПВДФ-ТрФЭ) с использованием модели пьезоэлектрического преобразователя в виде электромеханического четырёхполюсника. В работе проанализировано влияние сопротивления нагрузки, ёмкости электрической цепи и толщины пьезоплёнки на чувствительность детекторов. Проведены экспериментальные

измерения в полосе частот 1 – 30 МГц для пьезоплёнок толщиной от 20 до 120 мкм, показавшие хорошее согласие с теоретическими расчётами. Установлено, что детекторы на основе ПВДФ-ТрФЭ обладают примерно вдвое более высокой чувствительностью по сравнению с ПВДФ-детекторами, а также обеспечивают одновременное преимущество по чувствительности и полосе приёма по сравнению с резонансными пьезокерамическими детекторами.

Вторая глава посвящена исследованию влияния ширины частотной полосы и числовой апертуры сферически фокусированных пьезополимерных детекторов на качество визуализации в сканирующих оптоакустических микроскопах (ОАМ). Автором проводится комплексный анализ методами численного моделирования и экспериментальных исследований на фантомах (включая углеродные микроволокна) и биологических тканях *in vivo*. Экспериментальная часть работы включает сравнительный анализ пьезополимерных детекторов с различными параметрами: толщиной пьезоплёнки (9 и 25 мкм) и числовой апертурой (0.4 и 0.9). Проведённое исследование демонстрирует, как вариация этих параметров влияет на ключевые характеристики визуализации – пространственное разрешение, глубину резкости и способность воспроизводить протяжённые структуры с различной угловой ориентацией относительно плоскости сканирования. Полученные результаты позволяют установить оптимальные соотношения между параметрами приёмников и решаемыми задачами визуализации, что имеет важное практическое значение для разработки специализированных оптоакустических систем диагностики.

В третьей главе диссертации рассматривается задача оптимизации детекторов для оптоакустической микроскопии оптического разрешения, основанной на использовании острофокусированного лазерного излучения для генерации сигналов. Ключевой особенностью таких систем является необходимость регистрации слабых сигналов от микрометровых оптических поглотителей, характеризующихся быстрым затуханием амплитуды сферической волны при распространении. Дополнительным ограничением выступает малое рабочее расстояние применяемых короткофокусных объективов, что предъявляет особые требования к геометрии акустических детекторов. Для решения указанных проблем автором предложены две оригинальные конструкции детекторов. Первый приёмник основан на использовании оптически прозрачной ПВДФ-ГТО пьезоплёнки. Вторым приёмником является миниатюрный гидрофон на основе 20-микронной ПВДФ-ТрФЭ пьезоплёнки. Разработанные детекторы демонстрируют повышенную чувствительность по сравнению с коммерческими аналогами, обеспечивая эквивалентное шумовое давление 8.4 Па в диапазоне частот 1 – 16 МГц и 14 Па в диапазоне 1 – 26 МГц соответственно. Благодаря компактной геометрии предложенные детекторы могут быть легко объединены с оптическими объективами малого рабочего расстояния, что подтверждает их практическую применимость в ОАМ оптического разрешения.

В четвертой главе рассматривается сканирующая оптоакустическая система, использующая в качестве оптического объектива линзу с градиентным показателем преломления (GRIN), установленную на торце одномодового волокна. В отличие от острофокусированных систем, установки на основе GRIN линз характеризуются увеличенной глубиной резкости, что делает применение

стандартных сферических фокусирующих приёмников неоптимальным и ограничивает эффективную глубину визуализации. Для решения этой проблемы А.А. Курниковым предложен детектор на основе ПВДФ-ТрФЭ с геометрией в виде тонкого сферически фокусирующего кольцевого сегмента. Численное моделирование в программном пакете k-Wave показало, что разработанная конструкция обеспечивает как увеличенную акустическую глубину резкости, так и повышенную чувствительность по сравнению со сферическими детекторами. Экспериментальная проверка на фантомах и лабораторных животных подтвердила высокую эффективность детектора для систем с GRIN линзами. Достигнуто отношение сигнал/шум 14 дБ для цельной крови при безопасной плотности потока лазерного излучения (20 мДж/см²). Глубина резкости составила не менее 1 мм при сохранении сопоставимой амплитуды сигнала по всей глубине визуализации.

В заключении суммированы основные результаты диссертационной работы.

К числу наиболее значимых результатов работы можно отнести разработанный во второй главе детектор на основе ПВДФ плёнки с высокой числовой апертурой ($NA = 0.9$). Исследования, проведенные с данным детектором, интегрированным в сканирующий оптоакустический микроскоп, продемонстрировали не только возможность получения детализированных оптоакустических изображений, но и эффективную визуализацию протяженных структур с различной угловой ориентацией относительно плоскости сканирования. Особенно эффективным применение разработанного детектора оказалось при визуализации сосудистой сети опухолей, делая метод более перспективным в задачах экспериментальной онкологии.

Также хотелось бы выделить результат третьей главы диссертации – разработанный миниатюрный гидрофон на основе ПВДФ-ТрФЭ плёнки. Разработанный гидрофон обладает высокой чувствительностью по сравнению с коммерческим аналогом (NH0500, Precision Acoustics). Это позволило с его помощью регистрировать слабые оптоакустические сигналы от источников микронных масштабов (микрососуды, отдельные эритроциты). Перспективность разработки дополняется возможностью её использования в смежных областях науки, требующих точных измерений акустических волн малых амплитуд в широком частотном диапазоне, что представляет дополнительный аспект научной новизны диссертационной работы.

Положительное впечатление произвело и то, что автор органично сочетал экспериментальные исследования с численным моделированием, выбрав для расчётов популярный в медицинской акустике пакет k-Wave. В отсутствие доступа к значительным вычислительным ресурсам он использовал двумерную модель вместо реальной трёхмерной геометрии. Это, разумеется, не позволило получить количественное совпадение с экспериментом, однако моделирование оказалось полезным для выявления качественных закономерностей – таких как изменение контраста изображения, появление артефактов и другие особенности формирования оптоакустического сигнала.

К работе имеются несколько замечаний. К несущественным можно отнести пунктуационные огрехи, несогласованность падежей и отдельные опечатки: например, первое слово в названии главы 2 приведено как «ВлияЕние». Тем не менее подобных ошибок немного, и в целом текст написан грамотным, хорошим языком и легко читается.

Имеется также несколько более содержательных замечаний.

- На с. 24 обсуждаются параметры пьезокерамики, использованной для изготовления приёмника. Автор совершенно оправданно решил самостоятельно измерить диэлектрическую проницаемость, исходя из геометрических размеров пьезодиска и его электрической ёмкости. Однако далее он пишет: «Плотность и коэффициент электромеханической связи, не указанные производителем, были взяты из [42]». Эти параметры также можно было бы достаточно просто определить экспериментально: плотность – с помощью взвешивания (например, гидростатическим методом), а коэффициент электромеханической связи – на основе измерения частот резонанса и антирезонанса.
- В третьей главе представлены два варианта детекторов для повышения чувствительности оптоакустического микроскопа оптического разрешения. Однако в работе отсутствует их сравнительный анализ. Не поясняется, какой из детекторов обеспечивает лучшие характеристики и какой из вариантов предпочтительно использовать в подобных системах.
- В экспериментах с лабораторными животными и в исследованиях на людях в качестве акустической контактной среды использовалась вода. При этом в работе не указано, учитывалось ли преломление (рефракция) акустических волн на границе сред при реконструкции изображений. Преломление на границе вода – биологическая ткань, а особенно вода – череп (в экспериментах четвёртой главы), приводит к смещению фокуса и изменению эффективной числовой апертуры. Это могло повлиять как на качество визуализации, так и на масштаб изображения по сравнению со случаем, когда скорость звука в иммерсионной жидкости и в биоткани одинакова. Было бы полезно обсудить и оценить этот эффект.

Отмеченные замечания не снижают общей положительной оценки проведенных А.А. Курниковым исследований. Автор представил в диссертации обширный материал, являющийся важным научным вкладом в развитие метода оптоакустической микроскопии. Разработанные в диссертации методы, численные алгоритмы расчета и созданные устройства являются оригинальными, а полученные результаты имеют как научное, так и практическое значение. Достоверность результатов и положений, выносимых на защиту, подтверждается согласованностью теоретических расчетов с экспериментальными данными, а также высокой воспроизводимостью результатов фантомных экспериментов и исследований на лабораторных животных, что полностью согласуется с результатами численного моделирования. Работа прошла апробацию в виде достаточного количества научных публикаций в ведущих рецензируемых журналах по тематике проводимых исследований (7 статей, входящих в перечень ВАК и баз данных Scopus и Web of Science). Результаты работы неоднократно докладывались на международных и всероссийских научных конференциях.

Автореферат соответствует тексту диссертационной работы.

Оценивая работу в целом, можно заключить, что представленная диссертация «Влияние амплитудно-частотных и геометрических характеристик пьезополимерных детекторов на эффективность оптоакустической визуализации биологических тканей» соответствует специальности 1.3.7 – Акустика и удовлетворяет всем требованиям «Положения о присуждении учёных степеней», а ее автор, Курников Алексей Александрович, заслуживает присуждения учёной степени кандидата физико-математических наук по указанной специальности.

Я, Сапожников Олег Анатольевич, даю свое согласие на обработку диссертационным советом моих персональных данных, связанных с защитой данной диссертации.



Сапожников О.А.
дата: 08/12/2025

Официальный оппонент: Сапожников Олег Анатольевич, профессор, доктор физико-математических наук, специальность 1.3.7 – Акустика.

Место работы: ФГБОУ ВО «Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова» (МГУ)

Адрес: 119991, г. Москва, Ленинские горы, д. 1, физический факультет МГУ, кафедра акустики

Телефон: +7(495)-939-2952

E-mail: oleg@acs366.phys.msu.ru

Подпись Сапожникова О.А. заверяю

...

И.о. декана физического факультета МГУ им. М.В. Ломоносова
д.ф.-м.н., профессор
Белокуров Владимир Викторович

