

УТВЕРЖДАЮ
Директор ИПФ РАН,
академик РАН Г.Г. Денисов

«10» июля 2025 г.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Федерального государственного бюджетного научного учреждения «Федеральный исследовательский центр Институт прикладной физики им. А.В. Гапонова-Грехова Российской академии наук» (ИПФ РАН)

по диссертации Курникова Алексея Александровича «Влияние амплитудно-частотных и геометрических характеристик пьезополимерных детекторов на эффективность оптоакустической визуализации» на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук по научной специальности: 1.3.7. Акустика.

Работа выполнена в отделе радиофизических методов в медицине (отд. 360) Федерального государственного бюджетного научного учреждения «Федеральный исследовательский центр Институт прикладной физики им. А.В. Гапонова-Грехова Российской академии наук».

Научный руководитель – Субочев Павел Владимирович, заведующий лабораторией ультразвуковой и оптико-акустической диагностики ИПФ РАН, кандидат физико-математических наук.

В 2021 г. соискатель ученой степени окончил магистратуру в Федеральном государственном автономном образовательном учреждении высшего образования "Национальный исследовательский Нижегородский государственный университет им. Н.И. Лобачевского" по направлению подготовки 03.04.03. Радиофизика.

Сроки обучения в аспирантуре Федерального государственного бюджетного научного учреждения «Федеральный исследовательский центр Институт прикладной физики им. А.В. Гапонова-Грехова Российской академии наук»: с 1 сентября 2021 года по 31 августа 2025 года.

Свидетельство об окончании аспирантуры № 105200 00000033 от 10 июля 2025 года.

В период подготовки диссертации соискатель Курников Алексей Александрович работал младшим научным сотрудником в отделе радиофизических методов в медицине (отд. 360) Федерального государственного бюджетного научного учреждения «Федеральный исследовательский центр Институт прикладной физики им. А.В. Гапонова-Грехова Российской академии наук».

Личное участие аспиранта в получении результатов, изложенных в диссертации

Все результаты диссертационной работы получены автором лично, либо при его непосредственном участии. Анализ и интерпретация полученных результатов проводились совместно с научным руководителем к.ф.-м.н. П.В. Субочевым. Разработка

экспериментальных стендов и пьезополимерных детекторов были выполнено совместно с М.Б. Прудниковым, В.А. Воробьев и д.т.н. В.В. Казаковым. Исследования, включающие работы с лабораторными животными проводились совместно с биологами К.Г. Павловой и к.б.н. А.Г. Орловой.

Научная новизна и основные результаты диссертационного исследования

1. Теоретически установлено и экспериментально подтверждено, что пьезополимерные детекторы на основе ПВДФ-ТрФЭ обеспечивают существенно более высокие характеристики (субпаскальная чувствительность в полосе до десятков МГц) по сравнению с традиционными пьезоэлектрическими детекторами на основе ПВДФ пьезопленок и пьезокерамики. Экспериментально достигнуты субпаскальные значения шумового эквивалента давления для детекторов на основе ПВДФ-ТрФЭ: 0.3 Па в диапазоне частот 1–10 МГц (для пьезопленки толщиной 120 мкм) и 1.2 Па в диапазоне 1–30 МГц (для пьезопленки 20 мкм).

2. Впервые для эффективной оптоакустической визуализации сосудистой сети экспериментальных опухолей разработан пьезополимерный сферически фокусирующий детекторы с высокой числовой апертурой $NA = 0.9$.

3. Впервые реализован прием оптоакустических сигналов в оптоакустической системе с оптическим сканированием через короткофокусный оптический объектив ($NA \sim 1$) высокочувствительными детекторами двух типов: детектор на основе оптически прозрачной ПВДФ-ИТО пьезопленки и игольчатый гидрофон на основе ПВДФ-ТрФЭ пьезопленки. Достигнуты значения шумового эквивалента давления 8.4 Па в полосе 1–16 МГц для детектора на основе ПВДФ-ИТО и 14 Па в полосе 1–25 МГц для гидрофона на основе ПВДФ-ТрФЭ.

4. Для повышения чувствительности оптоакустических микроскопов оптического разрешения впервые предложен пьезополимерный детектор с геометрией сферически фокусирующего кольцевого сегмента.

Степень достоверности результатов проведенных исследований

Достоверность полученных результатов в проводимых исследованиях обусловлена хорошим согласованием экспериментальных результатов с теоретическими расчетами и численными результатами, а также хорошей повторяемостью результатов фантомных и *in vivo* экспериментов. Положения и основные результаты диссертационной работы опубликованы в рецензируемых российских и зарубежных научных журналах и подвергались оценке независимых международных экспертов. Результаты докладывались на всероссийских и международных конференциях и обсуждались на научных семинарах.

Практическая и теоретическая значимость результатов исследования

Теоретические и численные результаты проводимых исследований могут быть использованы для проектирования и последующего изготовления ультразвуковых детекторов, применяемых в системах ультразвуковой и оптоакустической визуализации, где важны высокая чувствительность и широкая полоса приема.

Экспериментальные измерения, подтверждающие теоретические выводы, а также апробация предложенных подходов вносят существенный вклад в развитие оптоакустического метода, приближая его к практическому применению в доклинических и клинических исследованиях. Повышение эффективности неинвазивной визуализации, включая увеличение чувствительности, пространственного разрешения и глубины диагностики, позволит проводить более точный анализ трехмерных сосудистых структур.

Список работ, опубликованных в журналах из Перечня рецензируемых научных изданий, в которых должны быть опубликованы основные научные результаты диссертаций на соискание ученой степени кандидата наук

1. *Kurnikov A. Sanin, A., Ben, X. L. D., Razansky, D., & Subochev, P.* Ultrawideband sub-pascal sensitivity piezopolymer detectors // *Ultrasonics*. 2024. V. 141, P. 107349.
2. *Курников А. А., Павлова К. Г., Орлова А. Г., Хилов А. В., Перекатова В. В., Ковальчук А. В., Субочев, П. В.* Широкополосные (100 кГц–100 МГц) ультразвуковые ПВДФ-детекторы для сканирующей оптико-акустической ангиографии с ультразвуковым разрешением // *Квантовая электроника*. – 2021. Т. 51, № 5. С. 383-388.
3. *Nemirova S., Orlova A., Kurnikov A., Litvinova Y., Kazakov V., Ayvazyan I., Liu Y.H., Razansky D., Subochev P.* Scanning optoacoustic angiography for assessing structural and functional alterations in superficial vasculature of patients with post-thrombotic syndrome: A pilot study // *Photoacoustics*. 2024. V. 38, P. 100616.
4. *Kurnikov A., Volkov G., Orlova A., Kovalchuk A., Khochenkova Y., Razansky D., Subochev P.* Fisheye piezo polymer detector for scanning optoacoustic angiography of experimental neoplasms // *Photoacoustics*. 2023. V. 31, P. 100507.
5. *Liu Y. H., Kurnikov A., Li W., Kazakov V., Ni R., Subochev P., Razansky D.* Sensitive ultrawideband transparent PVDF-ITO ultrasound detector for optoacoustic microscopy // *Optics Letters*. 2022. V. 47, № 16. P. 4163-4166.
6. *Liu Y. H., Kurnikov A., Li W., Subochev P., Razansky D.* Highly sensitive miniature needle PVDF-TrFE ultrasound sensor for optoacoustic microscopy // *Advanced Photonics Nexus*. 2023. V. 2, № 5. P. 056006.

Ценность научных работ диссертанта отражается высоким уровнем публикаций в рецензируемых международных журналах. Основные результаты докладывались на международных и российских конференциях, на которых ни раз отмечались наградами за лучший стендовый доклад.

Результаты, представленные в диссертационной работе, в полной мере изложены в работах, опубликованных соискателем ученой степени. Формулировки результатов изложены в соответствии с личным вкладом автора в каждую из опубликованных статей. Ссылки на источники заимствования материалов оформлены корректно.

Научная специальность, которой соответствует диссертация: 1.3.7. Акустика.

По итогам обсуждения принято следующее заключение:

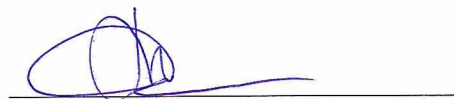
Диссертация соответствует критериям, установленным в соответствии с Федеральным законом Российской Федерации от 23 августа 1996 года № 127-ФЗ "О науке и государственной научно-технической политике".

Диссертация «Влияние амплитудно-частотных и геометрических характеристик пьезополимерных детекторов на эффективность оптоакустической визуализации» Курникова Алексея Александровича рекомендуется к защите на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук по научной специальности: 1.3.7. Акустика.

Настоящее заключение составлено на основании решения Ученого совета отделения нелинейной динамики и оптики ИПФ РАН по проведению итоговой аттестации по программам подготовки научных и научно-педагогических кадров в аспирантуре по научной специальности: 1.3.7. Акустика.

Присутствовало на заседании 15 чел.

Результаты голосования: «за» – 15 чел., «против» – 0 чел., «воздержалось» – 0 чел.
протокол № 3/4 от « 26 » июня 2025 г.



Стародубцев Михаил Викторович,
доктор физико-математических наук,
Председатель Ученого совета отделения
нелинейной динамики и оптики



Шилягин Павел Андреевич,
кандидат физико-математических наук,
Учёный секретарь отделения нелинейной динамики
и оптики, зам. зав. отделом 340