

УДК 681.327.11, 534.23.

## ПРИБОРЫ ДЛЯ РАЗНОМАСШТАБНОЙ ОПТИКО-АКУСТИЧЕСКОЙ ВИЗУАЛИЗАЦИИ НА ОСНОВЕ СВЕРХШИРОКОПОЛОСНЫХ УЛЬТРАЗВУКОВЫХ АНТЕНН

Субочев П.В.

*Институт прикладной физики РАН  
Нижний Новгород, Российская Федерация*

**Аннотация.** Методы оптико-акустической (ОА) визуализации основаны на регистрации ультразвуковых волн, возбуждаемых при поглощении лазерных импульсов. Способность ОА прибора осуществлять разномасштабную диагностику определяется частотным диапазоном ультразвуковой антенны. В то время как полоса приема коммерческих пьезопреобразователей ограничена 2–3 октавами, изготавливаемые в нашей лаборатории сверхширокополосные антенны из поливинилиден дифлюорида (ПВДФ) достигают полосы приема в 10 октав, наделяя ОА приборы возможностями по разномасштабной ОА диагностике. Представленная в докладе сверхширокополосная (100 кГц–100 МГц) ультразвуковая антенна позволяет осуществлять ОА микроскопию с протранственным разрешением 30 мкм в объеме 1 см<sup>3</sup>. Широкополосная 0,3–38 МГц 512-элементная антенна предназначена для так называемой пятимерной ОА томографии (трехмерной мультиспектральной ОА диагностики в режиме реального времени).

**Ключевые слова:** оптоакустика, фотоакустика, ультразвук, микроскопия, томография.

## DEVICES FOR MULTI-SCALE OPTOACOUSTIC VISUALIZATION BASED ON ULTRAWIDE BAND ULTRASONIC ANTENNAS

Pavel Subochev

*Institute of Applied Physics RAS, Nizhny Novgorod, Russia*

**Abstract.** Methods of optoacoustic (OA) imaging are based on the registration of ultrasonic waves excited by the absorption of laser pulses. The ability of OA device to carry out multi-scale diagnostics is determined by the frequency range of the ultrasonic antenna. While the receiving bandwidth of commercial piezoelectric transducers is limited to 2–3 octaves, ultra-wideband antennas made of polyvinidylene difluoride (PVDF) manufactured in our laboratory reach a receiving bandwidth of 10 octaves, giving OA devices the capabilities of multi-scale OA diagnostics. The ultra-wideband (100 kHz–100 MHz) ultrasonic antenna presented in the report makes it possible to carry out OA microscopy with a spatial resolution of 30 μm in a volume of 1 cm<sup>3</sup>. Broadband 0.3–38 MHz 512-element antenna is designed for the so-called five-dimensional OA tomography (volumetric, multispectral OA diagnostics in real time).

**Key words:** optoacoustics, photoacoustics, ultrasound, microscopy, tomography.

*Адрес для переписки: Субочев П.В., ул. Ульянова, 46, Нижний Новгород 603140, Российская Федерация.  
e-mail: Pavel.Subochev@gmail.com*

Оптоакустическая (ОА) визуализация основана на дистанционной регистрации ультразвуковых сигналов, генерируемых в результате поглощения импульсного лазерного излучения оптическими неоднородностями [1]. Недавние достижения в технологии производства импульсных перестраиваемых лазеров позволили разработать мультиспектральные ОА-томографические системы с видеочастотой [2]. Однако резонансные свойства обычных пьезоэлектрических материалов часто ограничивают возможности регистрации широкополосных ОА-импульсов, и даже при наличии согласующих импедансов полоса пропускания пьезоэлектрических детекторов обычно не превышает центральной частоты [3].

Для расширения полосы ультразвукового детектирования можно использовать чисто оптические технологии [4] или нерезонансные пьезоэлектрические материалы, такие как пленки поливинилиден дифлюорида (ПВДФ) с минимальной частотой, определяемой входным сопротивлением усилительной электроники, и максимальной частота определяемой толщиной пленки [5].

В данной работе мы демонстрируем значительный прогресс в технологии детекторов из ПВДФ, который позволил изготовить одноэлементные и многоэлементные сферические антенны из ПВДФ с рекордной шириной полосы приема 100 кГц – 100 МГц и высокой чувствительностью, характеризующейся низким шумовым эквивалентом давления менее 10 Па.

На рисунке 1 представлен ОА микроскоп (ИПФ РАН, Россия) – прибор, построенный на основе сверхширокополосной сферической ПВДФ антенны с фокусным расстоянием 8 мм и числовой апертурой 0,6. Сигналы с ПВДФ антенны оцифровываются 16-битным АЦП Razor16 (GaGe, США) с частотой 200 МГц.

Антенна имеет отверстие под многомодовое оптическое волокно FG550 (Thorlabs, США) для доставки импульсного лазерного излучения. В качестве источника оптических импульсов используется лазер Wedge HB532 (Bright Solutions, Италия), обладающий энергией импульсов 1 мДж и длительностью импульсов 1,4 нс. Длина волны лазерного излучения выбирается между 532 или

1064 нм при помощи самодельной призмы Глана. В качестве системы растрового зигзагообразного сканирования с шагом 20 мкм в диапазоне 10 мм используется быстрая линейная платформа на основе пьезодвигателя M-640 и медленная линейная платформа на основе шагового двигателя LS-40 (PI, Германия).

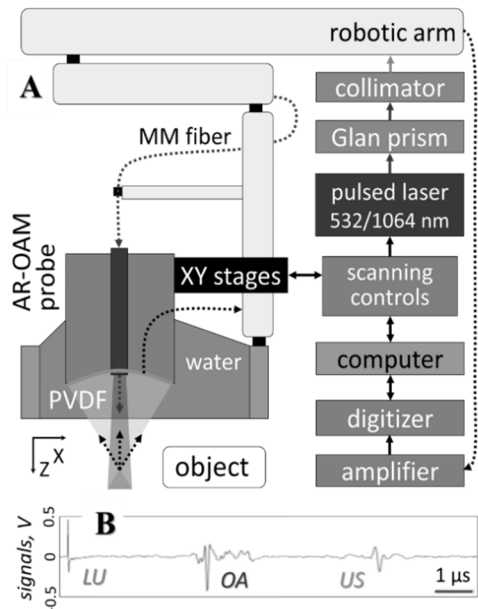


Рисунок 1 – прибор для ОА микроскопии

В качестве объекта сканирования использовалась лабораторная мышь, на левое бедро которой было перевито экспериментальное онкологическое новообразование Colo320 (рак кишечника). Эксперименты по ОА визуализации проводилось на 46 день опухолевого роста по достижению опухолью объема порядка 1 см<sup>3</sup>. Для сканирования была выбрана длина волны 532 нм, обеспечивающая высокий ОА контраст гемоглобина [1] по сравнению с остальными хромофорами, содержащимися в живых тканях. Мышь наркотизировалась посредством газовой анестезии (98 % кислорода и 2 % изофлуорана) и последовательно укладывалась на правый и левый бок.

На рис. 2 представлены примеры ОА изображений живых тканей в норме и при патологии, полученные при помощи ОА микроскопа. Благодаря широкому диапазону ультразвуковой антенны, на ОА ангиограммах различаются как мельчайшие кровеносные сосуды (капилляры) диаметром порядка 10 мкм, так и более крупные сильно-извитые крупные сосуды диаметром более 1 мм, характерные для развивающихся онкологических

заболеваний и сопровождающие процессы неангиогенеза.

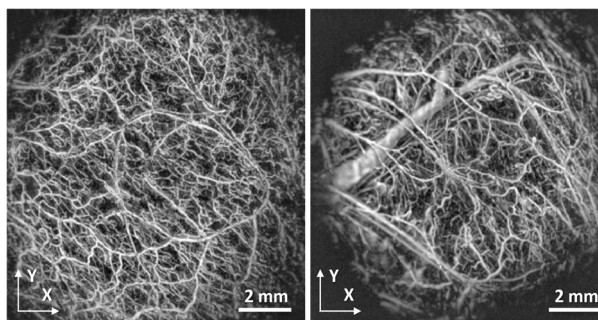


Рисунок 2 – ОА микроскопия биотканей в норме (слева) и при патологии (справа)

В докладе также будет представлена конструкция ОА томографа – прибора на основе 512-элементной сверхширокополосной (0,3–38 МГц) ПВДФ антенны. В рамках коллаборации группы П.Субочева (ИПФ РАН) с группой Проф.Д.Рязанского (ETH Zurich), данный прибор используется для так называемой пятимерной ОА нейроангиографии (трехмерной мультиспектральной ОА визуализации мозга в режиме реального времени).

Наиболее очевидной перспективой практического применения разрабатываемых ОА приборов представляются биомедицина. Тем не менее, разрабатываемые ОА технологии могут быть использованы в качестве преимущественных средств неразрушающей диагностики любых оптически мутных сред.

**Благодарности.** Работа выполнена при финансовой поддержке Российского научного фонда (номер проекта 19-75-10055).

#### Литература

1. Wang, L. V. A practical guide to photoacoustic tomography in the life sciences / L. V. Wang, J. Yao // *Nature methods*. – 2016. – Vol. 13, № 8. – С. 627–638.
2. Deán-Ben, X. L. Optoacoustic micro-tomography at 100 volumes per second / X. L. Deán-Ben, H. López-Schier, D. Razansky // *Scientific reports*. – 2017. – Vol. 7, № 1. – С. 1–8.
3. Omar, M. Optoacoustic mesoscopy for biomedicine / M. Omar, J. Aguirre, V. Ntziachristos // *Nature biomedical engineering*. – 2019. – Vol. 3, № 5. – С. 354–370.
4. Ultrasensitive plano-concave optical microresonators for ultrasound sensing / J. A. Guggenheim [et al.] // *Nature Photonics*. – 2017. – Vol. 11, № 11. – С. 714–719.
5. Optoacoustic imaging of absorbing objects in a turbid medium: ultimate sensitivity and application to breast cancer diagnostics / T. D. Khokhlova [et al.] // *Applied optics*. – 2007. – Vol. 46, № 2. – С. 262–272