

УДК 535.016

ХАРАКТЕРИСТИКИ ВОЛОКОННО-ОПТИЧЕСКИХ ФОТОАКУСТИЧЕСКИХ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЕЙ С МОНОСЛОЕМ МЕТАЛЛИЧЕСКИХ НАНОЧАСТИЦ ДЛЯ СИСТЕМ ТЕХНИЧЕСКОЙ ДИАГНОСТИКИ

Е. П. МИКИТЧУК¹⁾, К. В. КОЗАДАЕВ¹⁾

¹⁾Белорусский государственный университет, пр. Независимости, 4, 220030, г. Минск, Беларусь

Проведены экспериментальные исследования микроструктурных и морфологических свойств наноструктур в виде монослоя наночастиц серебра в составе макета волоконно-оптического фотоакустического преобразователя. Указанные наночастицы имеют гамма-распределение по размерам, средний диаметр 35 нм и среднеквадратичный разброс 12 нм, что позволяет использовать их в качестве сверхтонких поглотителей на торце оптического волокна. Впервые предложен метод одновременного определения эффективности фотоакустического преобразования и измерения частотной характеристики энергетического отклика фотоакустического преобразователя в зависимости от параметров модуляции оптического сигнала в оптоволокне, базирующийся на использовании основного измерительного канала для облучения фотоакустического преобразователя модулированным по интенсивности лазерным сигналом и опорного канала на основе волоконно-оптического разветвителя и фотодиода в составе установки для измерения характеристик фотоакустических преобразователей. Показана генерация ультразвука на частотах 10–18 МГц в макете волоконно-оптического фотоакустического преобразователя. Установлено,

Образец цитирования:

Микитчук ЕП, Козадаев КВ. Характеристики волоконно-оптических фотоакустических преобразователей с монослоем металлических наночастиц для систем технической диагностики. *Журнал Белорусского государственного университета. Физика*. 2020;1:4–15.
<https://doi.org/10.33581/2520-2243-2020-1-4-15>

For citation:

Mikitchuk AP, Kozadaev KV. Characteristics of fiber-optic photoacoustic transducers with monolayer of metal nanoparticles for systems of technical diagnostics. *Journal of the Belarusian State University. Physics*. 2020;1:4–15. Russian.
<https://doi.org/10.33581/2520-2243-2020-1-4-15>

Авторы:

Елена Петровна Микитчук – старший преподаватель кафедры интеллектуальных систем факультета радиоп физики и компьютерных технологий.
Константин Владимирович Козадаев – доктор физико-математических наук, доцент; проректор по учебной работе и интернационализации образования.

Authors:

Alena P. Mikitchuk, senior lecturer at the department of intelligent systems, faculty of radiophysics and computer technologies.
m.helenay@yandex.by
<https://orcid.org/0000-0003-2135-9533>
Konstantin V. Kozadaev, doctor of science (physics and mathematics), docent; vice-rector for academic affairs and international relations.
kozadaeff@mail.ru
<https://orcid.org/0000-0001-6263-8024>

что часовое воздействие модулированного лазерного излучения на созданный макет не вызывает деградации двумерных поверхностных наноструктур, поэтому последние можно использовать неоднократно в составе систем технической диагностики нового поколения.

Ключевые слова: фотоакустическая генерация; монослой наночастиц; металлические наночастицы; оптическое волокно; техническая диагностика.

Благодарность. Работа поддержана грантом совместных научных проектов Белорусского республиканского фонда фундаментальных исследований и Российского фонда фундаментальных исследований для молодых ученых (БРФФИ-РФФИ М-2019) № Ф19РМ-006 «Исследование двумерных плазмонных наноструктур для фотоакустических преобразователей».

CHARACTERISTICS OF FIBER-OPTIC PHOTOACOUSTIC TRANSDUCERS WITH MONOLAYER OF METAL NANOPARTICLES FOR SYSTEMS OF TECHNICAL DIAGNOSTICS

A. P. MIKITCHUK^a, K. V. KOZADAIEV^a

^aBelarusian State University, 4 Niezaliežnasci Avenue, Minsk 220030, Belarus

Corresponding author: A. P. Mikitchuk (m.helenay@yandex.by)

The work is devoted to the experimental study of the microstructural and morphological properties of nanostructures as part of a prototype of fiber-optic photoacoustic transducer. The transducer has been created to confirm the theoretical investigations previously obtained by the authors during the study the conditions of the most effective photoacoustic generation. To solve the main problem that arises when creating photoacoustic transducers, namely reducing the thickness of the absorbing layer, we used a nanostructure based on a monolayer of silver nanoparticles with size gamma-distribution, the average diameter of 35 nm with RMS-size of 12 nm. The method of simultaneous measuring both efficiency of photoacoustic conversion and frequency response of a photoacoustic transducer is proposed for the first time. The method allows experimental investigation of transducers output parameters versus the modulation mode of the optical signal. The proposed method is based on the usage of the main measurement channel for irradiating the photoacoustic transducer and a reference channel based on fiber optical coupler and photodiode. The experiment shows the reliable generation of ultrasound at frequencies of 10–18 MHz with a prototype of photoacoustic transducer. During one hour irradiation, degradation of two-dimensional surface nanostructures has not been observed. This allows such type of photoacoustic transducer to be used as part of a new generation of technical diagnostics systems.

Keywords: photoacoustic transducer; nanoparticles monolayer; metal nanoparticles; optical fiber; technical diagnostics.

Acknowledgements. This work was supported by the grant of joint research projects of the Belarusian Republican Foundation for Fundamental Research and the Russian Foundation for Fundamental Research for Young Scientists No. F19RM-006 «Study of 2D plasmonic nanostructures for photoacoustic transducers».

Введение

В настоящее время существует целый ряд методов неразрушающего контроля [1–4; 5, с. 43–69], что позволяет, например, при своевременной диагностике производственного оборудования предотвратить поломки промышленных машин и механизмов [5, с. 6], а также исключить брак в выпускаемой продукции [4; 5]. Одним из основных подходов является использование ультразвуковых сигналов в качестве диагностического инструмента [6; 7]. По сравнению с другими методами неразрушающего контроля данный способ обладает важными преимуществами: высокой чувствительностью к наиболее опасным дефектам типа трещин; низкой стоимостью; безопасностью для человека (в отличие от рентгеновской дефектоскопии); возможностью вести контроль изделий из разнообразных материалов, без вмешательства в технологический процесс и без повреждения исследуемого объекта [7]. Следует отметить, что методы ультразвукового контроля часто используют, когда нужно получить изображения с высоким разрешением (доступ к СВЧ-сборкам, проверка качества мелкоформатных изделий и обработки поверхностей высокодобротных резонаторов [7; 8], медицинские и биологические исследования [9]). Однако во многих случаях подобная дефектоскопическая диагностика осложняется необходимостью доступа ультразвукового излучателя к местам микросварок и микропаек, проволок и шлейфов разварки, межсоединений в гибридных микросхемах. Зачастую массивность установок неразрушающего контроля затрудняет такой доступ.

Традиционные пьезоэлектрические электроакустические преобразователи требуют высокого напряжения питания, характеризуются большими размерами и весом, чувствительностью к электромагнитным помехам, относительно узкой рабочей полосой частот [6; 10–12]. Альтернативой электроакустическим преобразователям служат фотоакустические преобразователи, в которых поглощение модулированного оптического излучения вызывает циклы деформации фотоакустического материала, порождающие акустические волны в окружающей среде [13; 14]. Однако параметры таких преобразователей значительно ограничиваются двумя основными факторами: полоса частот формируемой акустической волны существенно зависит от толщины слоя, поглощающего модулированное оптическое излучение; компактность преобразователя является одним из ключевых факторов применимости источника ультразвука [15; 16]. Чтобы минимизировать толщину поглощающего слоя, в ультразвуковых преобразователях можно применять наноструктуры в виде монослоя наночастиц (НЧ) благородных металлов на оптически прозрачных подложках. Использование торца оптического волокна в качестве подложки для фотоакустического преобразователя обуславливает ряд преимуществ, таких как компактный размер и малый вес (сотни микрометров и доли грамма), высокая устойчивость к электромагнитным помехам и химическая стойкость, широкая полоса рабочих частот, диэлектрическое исполнение, механическая гибкость [15–20].

Ранее определены условия наиболее эффективной фотоакустической генерации в монослое серебряных и золотых НЧ в составе волоконно-оптического фотоакустического преобразователя: высокий коэффициент поглощения оптического излучения, совпадение с длиной волны коммерчески доступных лазерных диодов, ширина пика поглощения свыше 25 нм, а также стабильная работа наноструктуры без термофизических ограничений и наибольшее быстроедействие монослоя металлических НЧ [21; 22]. При выполнении этих условий достигается ширина полосы рабочих частот по уровню –3 дБ более 40 и 35 МГц в наноструктурах с монослоем НЧ Ag и Au на торце оптического волокна в воздухе соответственно, а для тех же наноструктур в воде – 25 и 18 МГц соответственно.

Настоящая работа посвящена экспериментальному исследованию микроструктурных и морфологических свойств наноструктур в составе макета волоконно-оптического фотоакустического преобразователя, который был создан для подтверждения теоретических выводов, полученных авторами ранее при изучении условий наиболее эффективной фотоакустической генерации. Для решения основной проблемы, которая возникает при изготовлении фотоакустических преобразователей, а именно уменьшения толщины поглощающего слоя, использована наноструктура в виде монослоя НЧ серебра, нанесенная на торец оптического волокна.

Микроскопические параметры наноструктур в составе волоконно-оптического фотоакустического преобразователя

Синтез монослоя НЧ Ag на поверхности торца оптического волокна проводился методом атмосферного лазерного осаждения. Для обеспечения одинаковых условий осаждения изготавливалась оснастка [23; 24], на которой одновременно крепились несколько волокон, предварительно сколотых перпендикулярно оптической оси (максимальная ошибка скола не превышала 1°) и очищенных от защитной оболочки. В эксперименте использовался импульсный YAG : Nd³⁺-лазер (*LOTIS TII*, Беларусь) с длиной волны 1064 нм и полной длительностью импульса на уровне половины интенсивности 20 нс [25].

Исследование поверхности тестовых образцов волоконно-оптических фотоакустических преобразователей проводилось на растровом электронном микроскопе S-4800 (*Hitachi*, Япония), максимальное разрешение которого составляет 1 нм, относительная неопределенность измерения не превышает ± 5 %. Заметим, что здесь и далее в качестве размеров НЧ указаны медианные величины. Бинаризация полученных микрофотографий выполнялась в программном пакете *ImageJ*, что необходимо для определения распределения НЧ по размерам, а также статистических параметров последнего (в том числе масштабного и размерного параметра, среднего размера НЧ), плотности заполнения подложки. Бинаризация микрофотографий подразумевает под собой также применение алгоритма сглаживания шумов, выделение границ и пороговой фильтрации. Все площади НЧ в пикселях с помощью делений калибровочной линейки, которая записана на микрофотографиях с электронного микроскопа, пересчитывались в реальные площади проекций НЧ, а затем с помощью математической обработки рассчитывались размеры НЧ.

На рис. 1 показано распределение НЧ Ag по размерам, полученное путем анализа бинаризованных микрофотографий (обработка проводилась для общего количества НЧ свыше 5,5 тыс.), а также гамма-распределение с размерным параметром $k_T = 8,5$ и масштабным параметром $\theta_T = 4,1$, величины которых подобраны методом нелинейных наименьших квадратов. Плотность заполнения подложки НЧ составляла 3,8 % [23]. Следует отметить, что распределение НЧ по размерам при синтезе с помощью атмосферного лазерного осаждения подчиняется гамма-распределению [24], причем в соответствии

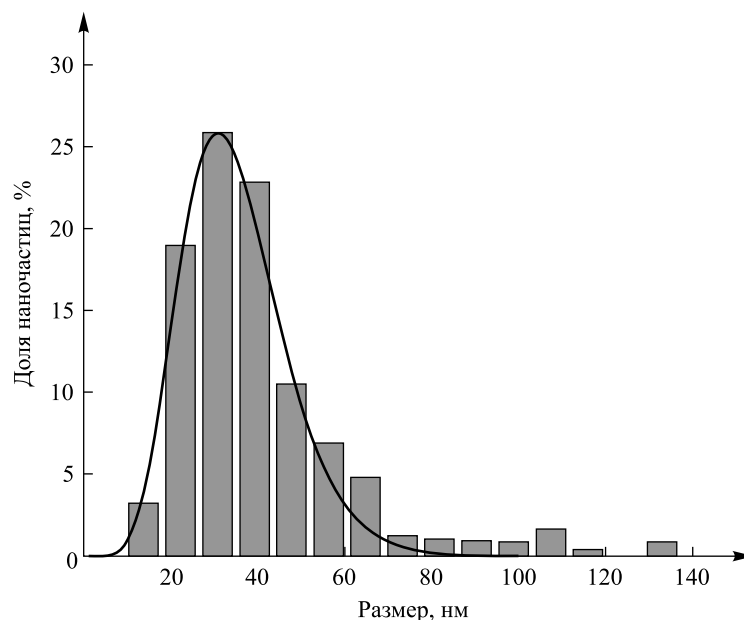


Рис. 1. Распределение наночастиц Ag по размерам, полученное путем анализа бинаризованных микрофотографий (столбчатая диаграмма); гамма-распределение с размерным параметром $k_{\Gamma} = 8,5$ и масштабным параметром $\theta_{\Gamma} = 4,1$, что соответствует среднему диаметру наночастиц 35 нм и среднеквадратичному разбросу по размерам 12 нм (огнивающая кривая)

Fig. 1. Nanoparticle size distribution obtained by means of binarized microphotography analysis (bar chart); gamma-distribution with size parameter of $k_{\Gamma} = 8.5$ and scale parameter of $\theta_{\Gamma} = 4.1$, their values correspond to nanoparticles average size of 35 nm and RMS-size of 12 nm (envelope curve)

со статистическими свойствами последнего математическое ожидание среднего размера и среднеквадратичного разброса НЧ по размерам связано с параметрами данного распределения следующим образом [26, с. 134]:

$$\bar{d} = k_{\Gamma} \theta_{\Gamma},$$

$$\sigma = \sqrt{k_{\Gamma}} \theta_{\Gamma},$$

где параметры гамма-распределения для приведенного случая соответствуют среднему диаметру НЧ 35 нм и среднеквадратичному разбросу по размерам 12 нм.

Элементный состав наноструктуры волоконно-оптического фотоакустического преобразователя с НЧ на торце оптического волокна определялся энергодисперсным спектрометром Quantex 200 с детектором Bruker SDD XFlash 5030 чувствительностью 0,1 ат. %. Результаты растровой электронной микроскопии и энергодисперсионной рентгеновской спектроскопии для НЧ следующие: состав – серебро, плотность заполнения подложки 3,8 %, средний диаметр 35 нм, распределение по размерам – гамма-распределение с размерным параметром $k_{\Gamma} = 8,5$ и масштабным параметром $\theta_{\Gamma} = 4,1$, что соответствует среднему диаметру НЧ 35 нм и среднеквадратичному разбросу по размерам 12 нм. Невзирая на малую плотность заполнения подложки, такие наноструктуры возможно использовать в составе волоконно-оптического фотоакустического преобразователя для оценки быстродействия. В частности, как показали результаты моделирования, быстродействие указанного преобразователя с монослоем НЧ Ag данного диаметра практически не зависит от плотности заполнения подложки [21].

Стенд для исследования волоконно-оптических фотоакустических преобразователей с монослоем металлических наночастиц

На рис. 2 приведена схема стенда для исследования волоконно-оптического фотоакустического преобразователя с монослоем металлических НЧ на торце оптического волокна, который можно использовать в воздухе и различных жидких средах. Вначале от цифрового генератора сигналов произвольной формы в составе измерительного комплекса осциллограф – генератор TiePie HS5 (полоса частот синтезируемых сигналов произвольной формы до 40 МГц) подается зондирующий импульсный сигнал с периодом 10 мс и длительностью 50 нс (амплитуда 12 В), по коаксиальному кабелю распространяющийся к волоконно-оптическому лазерному модулю Laserscom LDI-450-FP-30, в котором лазерный диод

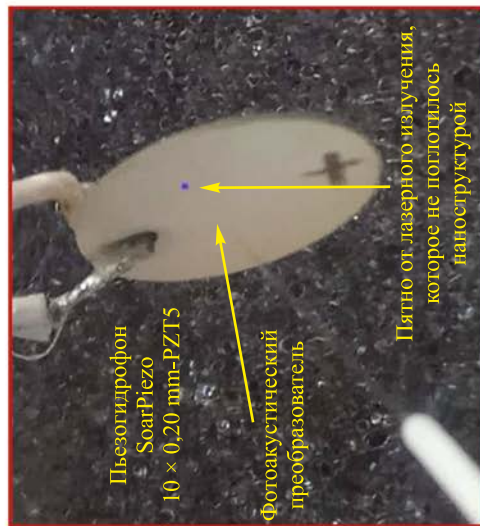
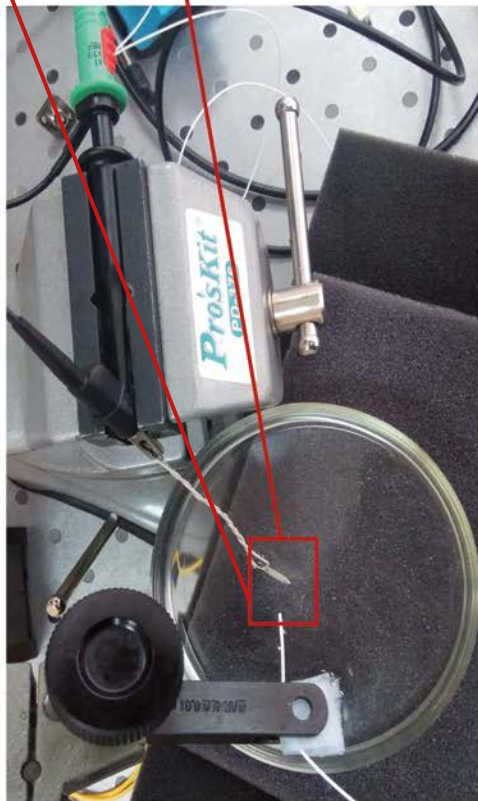


Рис. 2. Схема стенда для исследования волоконно-оптического фотоакустического преобразователя с монослоем наночастиц на торце оптического волокна, погруженного в жидкую среду:

Fig. 2. Layout of setup for investigation of a fiber-optic photoacoustic transducer with nanoparticles monolayer deposited on the fiber-optic edge within liquid surrounding:

I, 2 – oscilloscope ports (macrophotos are presented with contrast dark background)

согласован с одномодовым волокном с диаметром модового пятна 3,6 мкм (стандартное одномодовое оптическое волокно для излучения видимого диапазона RGB400). Оптическое излучение на выходе из волокна имеет гауссовский профиль пространственного радиального распределения интенсивности и пиковую оптическую мощность 40 мВт в импульсном режиме. Длина волны генерации лазерного диода 450 нм, ширина спектра 2 нм. Затем лазерное излучение в оптическом волокне RGB400 делится на две части в волоконно-оптическом разветвителе, в результате чего 1 % излучения поступает на контрольный фотодиод Vishay BPF34 (площадь 7,5 мм², темновой ток до 2 нА, емкость $p-n$ -перехода при смещении 14 В составляет 25 пФ) и регистрируется осциллографом с высоким динамическим диапазоном в составе измерительного комплекса TiePie HS5. Другая часть модулированного по интенсивности оптического сигнала (99 %) с помощью волоконно-оптической розетки Seikoh Giken SNA-1 соединяется с отрезком оптического волокна SMF-28e (диаметр сердцевины 125 мкм), на поверхности которого сформированы наноструктуры фотоакустических преобразователей.

Торец оптического волокна с монослоем НЧ (макет фотоакустического преобразователя) закреплен на координатной системе Standa 7T38XYZ, необходимой для перемещения фотоакустического преобразователя относительно пьезоакустического преобразователя в кювете с деионизованной водой. Акустический сигнал детектируется узкополосным пьезогидрофоном SoarPiezo 10 × 0,20 mm-PZT5 (диаметр 10 мм, резонансная частота 10 МГц, эквивалентная емкость 13,5 нФ, диэлектрическая постоянная 3900 Ф/м ($\pm 10\%$), пьезоэлектрическая константа 460×10^{-12} м/В). Сигнал с гидрофона регистрируется осциллографом высокого динамического диапазона TiePie HS5 с максимальной относительной неопределенностью измерения уровня сигналов 0,25 % (типично – 0,1 %). Следует учесть, что в работе не применялся волоконно-оптический изолятор ввиду того, что стыкуются два оптических волокна: RGB400 и SMF-28e. При этом для используемой длины волны 450 нм волокно RGB400 является одномодовым, а волокно SMF-28e становится многомодовым (эффективный диаметр модового пятна 9,8 мкм, одномодовым оно является для телекоммуникационных длин волн, например 1,31–1,55 мкм). В этом случае из-за разницы эффективных площадей модового пятна одномодового (RGB400) и многомодового (SMF-28e) оптических волокон обеспечивается развязка сигналов (модулированного по интенсивности оптического сигнала и паразитного сигнала обратного отражения), достаточная для обеспечения стационарной генерации лазерного диода без перехода в режим динамических нестабильностей (как при использовании волоконно-оптического изолятора) [21].

При математическом описании стенда для исследования волоконно-оптического фотоакустического преобразователя с монослоем НЧ на торце оптического волокна необходимо учесть ряд особенностей физических процессов, происходящих в оптическом волокне, а также при электрооптическом и оптоэлектронном преобразованиях. При изучении фотоакустических преобразователей необходима оценка спектральной плотности мощности выходного акустического сигнала, полоса частот которого не превышает 100 МГц, при этом оптическая несущая имеет частоту свыше 100 ТГц, поэтому рассматриваемую задачу можно отнести к исследованию узкополосных процессов в оптическом волокне. Считается, что узлы стенда работают в линейном режиме. При измерении сигналов во временной области и последующем пересчете в частотную область удобнее пользоваться двусторонними спектральными плотностями мощности [27, с. 44–47], причем оценка спектральной плотности мощности с помощью метода Уэлча (обобщенного периодограммного метода) ограничивает диапазон частот от $-f_{\max}$ до f_{\max} , когда значение верхней частоты в спектре оказывается заведомо более высоким, чем ширина линии генерации лазера и спектральное положение любой из составляющих модулирующего сигнала. Мощность модулированного по интенсивности лазерного сигнала рассчитывается из спектральной плотности мощности по формуле [27, с. 52–60]:

$$P_{\text{opt}}^{\Sigma} = \int_{-f_{\max}}^{f_{\max}} P_{\text{opt}}(f) df, \quad (1)$$

где $P_{\text{opt}}(f)$ – спектральная плотность мощности модулированного по интенсивности лазерного сигнала; f – частота отстройки от оптической несущей.

Спектральная плотность мощности электрического сигнала опорного канала на выходе фотодиода может быть представлена как

$$U_{\text{PD}}(f) = Z_{\text{out}} S_{\text{PD}}(f) (1 - k) P_{\text{opt}}(f), \quad (2)$$

где Z_{out} – эффективный выходной импеданс фотодиода модуля, учитывающий рассогласование импедансов фотодиода и порта осциллографа; $S_{\text{PD}}(f)$ – частотная характеристика отклика фотодиода, А/Вт; k – коэффициент разветвления волоконно-оптического разветвителя в канал, содержащий фотоакустический преобразователь.

При исследовании фотоакустического преобразователя необходимо с помощью координатной системы добиться того, чтобы плоскость торца оптического волокна с монослоем НЧ Ag, с которой происходит излучение ультразвука, была параллельна плоскости чувствительной площадки гидрофона. Если расстояние между этими плоскостями менее длины волны наиболее высокочастотной составляющей спектра зондирующего электрического сигнала (для частот до 50 МГц и расстояния менее 10 мкм) при учете линейности всей системы, то рассеянием ультразвукового сигнала можно пренебречь. Спектральная плотность мощности давления акустического сигнала на выходе фотоакустического преобразователя может быть представлена в следующем виде:

$$p_{PA}(f) = S_{PA}(f) k P_{opt}(f), \quad (3)$$

где $S_{PA}(f)$ – частотная характеристика энергетического отклика фотоакустического преобразователя, Па²/Вт.

В случае когда площадь пятна акустического сигнала не превышает площадь чувствительной площадки гидрофона, интегральная акустическая мощность на выходе фотоакустического преобразователя с учетом теоремы о равенстве энергии в частотной и временной области [13; 27] равна

$$P_{ac}^{eff} = \frac{v}{K} S_{eff} \int_{-f_{max}}^{f_{max}} p_{PA}(f) df, \quad (4)$$

где v – скорость звука в окружающей среде; K – объемный модуль упругости среды, в которой находится фотоакустический преобразователь; S_{eff} – площадь пятна, приближенно равная эффективной площади модового пятна используемого оптического волокна.

Спектральная плотность мощности выходного электрического сигнала гидрофона представляется в виде

$$U_{PA}(f) = S_{AE}(f) p_{PA}(f), \quad (5)$$

где $S_{AE}(f)$ – частотная характеристика отклика гидрофона, В/Па².

Расчет численного значения эффективности фотоакустического преобразования выполняется по формуле [13]

$$\eta = \frac{P_{ac}^{eff}}{P_{opt}^{\Sigma}}. \quad (6)$$

С учетом того что в эксперименте имеется априорная информация ($S_{AE}(f)$, $S_{PD}(f)$), а также данные измерения ($U_{PA}(f)$, $U_{PD}(f)$), окончательно расчет эффективности фотоакустического преобразования проводится из формулы (6) в следующем виде:

$$\eta = \frac{v}{K} S_{eff} Z_{out} (1-k) \int_{-f_{max}}^{f_{max}} \left[\frac{U_{PA}(f)}{S_{AE}(f)} \right] df \left[\int_{-f_{max}}^{f_{max}} \frac{U_{PD}(f)}{S_{PD}(f)} df \right]^{-1}.$$

Частотная характеристика энергетического отклика фотоакустического преобразователя, в свою очередь, может быть рассчитана на основе формул (1)–(6) с помощью соотношения

$$S_{PA}(f) = \frac{Z_{out}(1-k)}{k} \frac{S_{PD}(f)}{S_{AE}(f)} \frac{U_{PA}(f)}{U_{PD}(f)}.$$

Таким образом, применение опорного волоконно-оптического канала с высокоскоростным фотодиодом при измерении спектральной плотности мощности сигнала с гидрофона при оценке параметров фотоакустического преобразователя, закрепленного на координатной системе, позволяет одновременно определять эффективность фотоакустического преобразования и измерять частотную характеристику энергетического отклика фотоакустического преобразователя в зависимости от параметров модуляции сигнала в оптическом волокне в реальном времени, что дает возможность разрабатывать фотоакустические методы диагностики и анализа структуры и свойств технических систем.

Спектр выходного акустического сигнала и фотостойкость макета фотоакустического преобразователя

Длительность импульса лазерного сигнала по уровню половины амплитуды составляет 50 нс, длительности фронтов не превышают 12 нс. Токовая чувствительность использованного фотодиода на длине волны 450 нм равна 0,07 А/Вт, ширина полосы рабочих частот превышает 40 МГц, пиковая

оптическая мощность оценена в 40 мВт. При исследовании выходного акустического сигнала макета фотоакустического преобразователя с монослоем НЧ Ag в воде необходимо отметить следующие важные особенности эксперимента:

- для приема ультразвукового сигнала с фотоакустического преобразователя (эффективный излучающий диаметр ~ 10 мкм) используется пьезоэлектрический приемник (эффективный диаметр ~ 10 мм), что приводит к существенной неравномерности механических напряжений на поверхности приемника, следствием чего является значительное снижение эффективности акустоэлектрического преобразования;
- в состав макета фотоакустического преобразователя входит монослой НЧ Ag с малой плотностью заполнения поверхности, что также приводит к существенному снижению эффективности фотоакустического преобразования, однако в соответствии с расчетами из-за большого запаса по мощности лазера [21] оказывается возможным применять созданный макет для генерации ультразвуковых сигналов. Значение коэффициента поглощения на длине волны использованного в эксперименте лазера (450 нм), оцененное с помощью фотодиода Vishay BPF34 и волоконно-оптического циркулятора, составляет около 9 %.

В силу этих особенностей параметры выходных акустических сигналов исследовались путем анализа в частотной области. Для оценки спектральной плотности мощности при экспериментальном исследовании применялся метод Уэлча [28, с. 22–24] к нескольким реализациям выходного акустического сигнала во временной области с использованием специализированного программного обеспечения *TiePie HS5 Multi Channel ver. 1.41.1*. Спектральная плотность мощности электрического сигнала ($\text{В}^2/\text{Гц}$) на выходе пьезоэлектрического преобразователя определяется спектральной плотностью мощности давления акустического сигнала ($\text{Па}^2/\text{Гц}$) на выходе фотоакустического преобразователя. На основе ряда реализаций сигнала на выходе пьезоэлектрического преобразователя проведена оценка спектральной плотности мощности электрического сигнала для двух различных макетов (рис. 3), в которых монослой НЧ Ag на торец оптического волокна наносился одновременно при близких условиях, однако плотность заполнения НЧ оказалась различной из-за особенностей эксперимента [24; 25]. Следует отметить, что метрологическая достоверность результатов достигается в случае, если измеряемый уровень спектральной плотности мощности превышает уровень собственного шума измерительной системы по крайней мере на 6 дБ [29, с. 189], что наблюдалось только для частот выше 10 МГц. Величины спектральной плотности мощности акустического отклика для макетов № 1 и 2 отличаются не более чем на 5 дБ, что объясняется тем, что в макете № 2 плотность заполнения поверхности НЧ ниже. Поведение кривых спектральной плотности мощности для обоих макетов очень близкое, в частности, наблюдается фотоакустический отклик в частотном диапазоне 10–18 МГц. Поскольку частота 10 МГц является собственной частотой пьезоэлектрического преобразователя, чувствительность данного приемника значительно снижена на других частотах. Интенсивность фотоакустического отклика в эксперименте на частотах около 18 МГц снижена из-за спада спектральной плотности мощности лазерного импульса на величину порядка 8 дБ (см. рис. 3, кривая зеленого цвета).

Таким образом, для макета волоконно-оптического фотоакустического преобразователя с монослоем серебряных НЧ с гамма-распределением последних по размерам с размерным и масштабным параметрами, величины которых соответствуют среднему диаметру 35 нм и разбросу по размерам 12 нм, сформированным на торце оптического волокна, сколотого стандартным волоконно-оптическим скалывателем Fujikura CT-30A (Япония), при использовании лазерного диода с волоконно-оптическим выводом излучения с пиковой мощностью 40 мВт экспериментально установлен фотоакустический отклик в воде в частотном диапазоне 10–18 МГц даже при достаточно узкополосном пьезоэлектрическом преобразователе в качестве приемника ультразвукового сигнала.

Устойчивость полученных макетов фотоакустических преобразователей в рамках экспериментов по оценке выходных характеристик может служить подтверждением работоспособности таких преобразователей по крайней мере в составе экспресс-систем технической диагностики с высоким разрешением [13; 15]. Для исследования устойчивости и надежности макета фотоакустического преобразователя требуется целый комплекс долговременных испытаний, а также проведение отдельных экспериментов по установлению закономерностей влияния экспозиции, пиковой интенсивности, формата модуляции, режима воздействия на структурную деградацию фотоакустических преобразователей и изменение выходных характеристик во времени.

Микрофотографии поверхности макета волоконно-оптического фотоакустического преобразователя с монослоем НЧ Ag до и после часового воздействия модулированным лазерным излучением (до и после исследования фотоакустической генерации) с эквивалентной экспозицией $\sim 800 \text{ Дж/см}^2$ представлены на рис. 4, из которого видно, что на поверхности появились загрязнения и механические повреждения вне сердцевины оптического волокна, однако при этом не наблюдается деградации спектральной плотности мощности выходного ультразвукового сигнала. Нанесенный на торец оптического волокна монослой НЧ обладает хорошей адгезией: размер НЧ и плотность заполнения подложки не

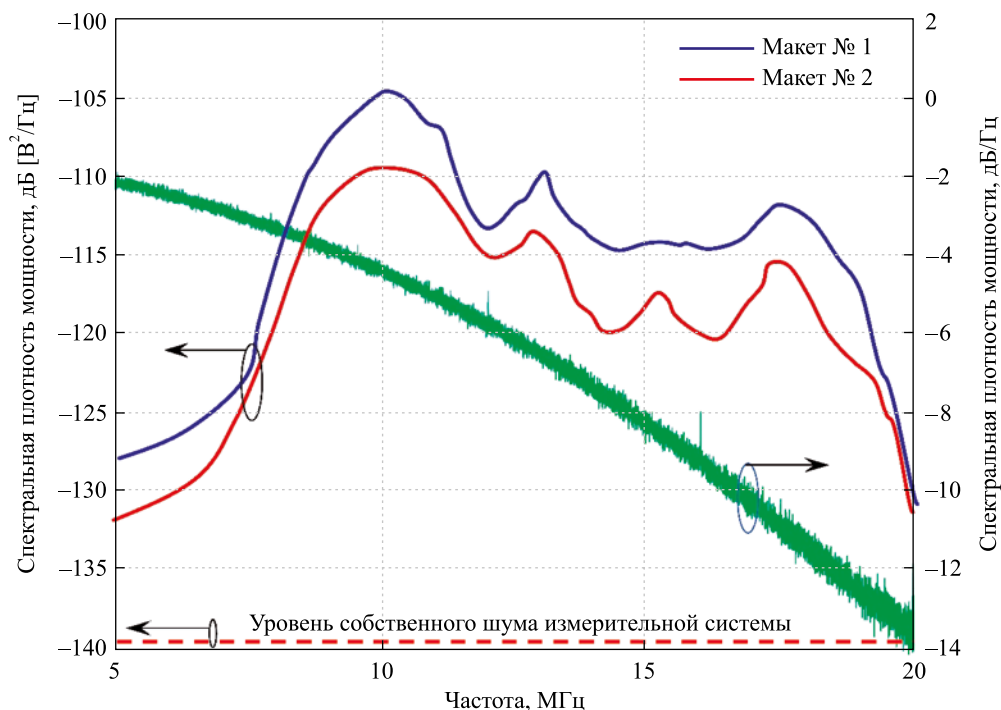


Рис. 3. Зависимость спектральной плотности мощности выходного акустического сигнала макета фотоакустического преобразователя с монослоем НЧ серебра в воде (шкала слева) и спектральной плотности мощности оптического импульса на входе (шкала справа) от частоты

Fig. 3. Power spectrum density of output signal of the prototype of photoacoustic transducer with monolayer of silver nanoparticles within water surrounding (left axis) and power spectrum density of input optical pulse (right axis) from frequency

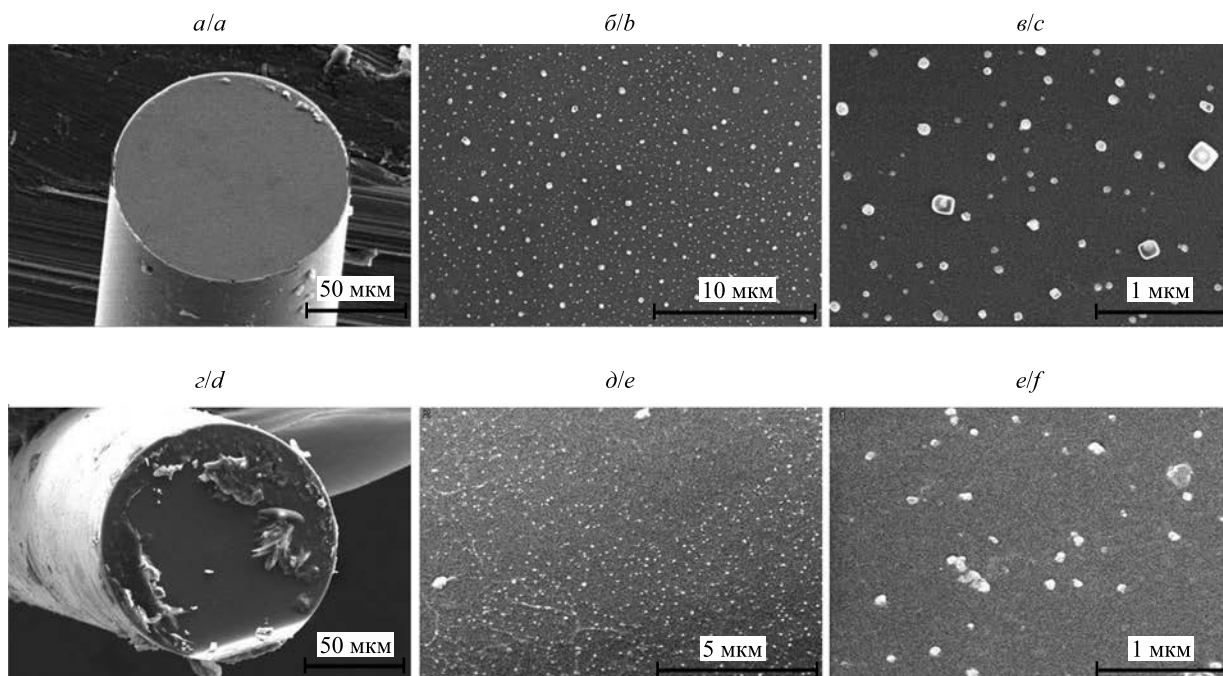


Рис. 4. Микрофотографии поверхности макета волоконно-оптического фотоакустического преобразователя с монослоем наночастиц серебра до (а – в) и после (г – е) измерения ультразвукового сигнала в воде, полученные с помощью растрового электронного микроскопа Hitachi S-4800

Fig. 4. Microphotos of photoacoustic transducer surface with monolayer of silver nanoparticles before (a – c) and after (d – f) measurement of acoustic signal within water surrounding. Microphotos are obtained with scanning electron microscope Hitachi S-4800

изменились, причем на некоторых образцах присутствуют «борозды», связанные с поверхностным загрязнением образцов. Наличие мелкой зернистости на микрофотографиях связано с особенностями растровой электронной микроскопии, когда перед исследованием на образец наносится технологический слой платины.

Таким образом, установлено, что часовое воздействие лазерного излучения на макет волоконно-оптического фотоакустического преобразователя, в котором монослой НЧ серебра на торец оптического волокна нанесен методом атмосферного лазерного осаждения, а также загрязнения и механические воздействия вне сердцевины оптического волокна не вызвали деградации монослоя НЧ, что позволяет использовать такие фотоакустические преобразователи в составе систем технической диагностики и неразрушающего контроля высокого разрешения.

Заключение

Экспериментально продемонстрирована генерация ультразвука на частотах 10–18 МГц в макете волоконно-оптического фотоакустического преобразователя, в котором методом атмосферного лазерного осаждения на торец оптического волокна нанесен монослой серебряных НЧ со средним диаметром последних 35 нм, гамма-распределением их по размерам со среднеквадратичным разбросом по размерам 12 нм и плотностью заполнения подложки 3,8 %. В качестве источника оптического сигнала для фотоакустического преобразователя использовался лазерный диод с волоконно-оптическим выводом с длиной волны 450 нм, обеспечивающий при прямой токовой модуляции генерацию оптических импульсов с длительностями фронтов не более 12 нс.

Показано, что применение опорного волоконно-оптического канала с высокоскоростным фотодиодом при измерении спектральной плотности мощности сигнала с гидрофона при оценке параметров фотоакустического преобразователя, закрепленного на координатной системе, позволяет одновременно определять эффективность фотоакустического преобразования и измерять частотную характеристику энергетического отклика фотоакустического преобразователя в зависимости от параметров модуляции сигнала в оптическом волокне, что открывает возможность для разработки фотоакустических методов диагностики и анализа структуры и свойств технических систем.

Установлено, что часовое воздействие модулированного лазерного излучения с эквивалентной экспозицией ~ 800 Дж/см² на указанный макет волоконно-оптического фотоакустического преобразователя, а также загрязнения и механические воздействия вне сердцевины оптического волокна не вызвали деградации наноструктуры, что позволяет использовать такие преобразователи неоднократно для системы технической диагностики и неразрушающего контроля высокого разрешения.

Библиографические ссылки

1. Hanselka H, Nuffer J. Characterization of reliability. In: Czichos H, Saito T, Smith LE, editors. *Springer handbook of metrology and testing. Chapter 16.7*. New York: Springer; 2011. p. 949–975.
2. Czichos H. Metrology and testing in materials science and technology. *Measurement Science and Technology*. 2009;4(4):46–77. DOI: 10.1080/19315775.2009.11721494.
3. Vesely W. *Fault tree handbook with aerospace applications*. Washington DC: NASA; 2002. 232 p.
4. Worden K, Farrar CR, Manson G, Park G. The fundamental axioms of structural health monitoring. *Philosophical Transactions of the Royal Society A*. 2007;463(2082):1639–1664. DOI: 10.1098/rspa.2007.1834.
5. Czichos H, editor. *Handbook of technical diagnostics*. Heidelberg: Springer; 2013. 566 p. DOI: 10.1007/978-3-642-25850-3.
6. Sposito G, Warda C, Cawley P, Nagyac PB, Scruby C. A review of non-destructive techniques for the detection of creep damage in power plant steels. *NDT International*. 2010;43(7):555–567. DOI: 10.1016/j.ndteint.2010.05.012.
7. Snook KA, Hu C-H, Shrout TR, Shung KK. High-frequency ultrasound annular-array imaging. Part I: Array design and fabrication. *IEEE Transactions on Ultrasonics, Ferroelectrics, and Frequency Control*. 2006;53(2):300–308. DOI: 10.1109/TUFFC.2006.1593368.
8. Sharples SD, Clark M, Somekh MG. Spatially resolved acoustic spectroscopy for fast noncontact imaging of material microstructure. *Optics Express*. 2006;14(22):10435–10440. DOI: 10.1364/OE.14.010435.
9. Baerwald A, Dauk S, Kanthan R, Singh J. Use of ultrasound biomicroscopy to image human ovaries *in vitro*. *Ultrasound in Obstetrics and Gynecology*. 2009;34(2):201–207. DOI: 10.1002/uog.6438.
10. Foster FS, Mehi J, Lukacs M, Hirson D, White C, Chaggares C, et al. A new 15–50 MHz arraybased micro-ultrasound scanner for preclinical imaging. *Ultrasound in Medicine and Biology*. 2009;35(10):1700–1708. DOI: 10.1016/j.ultrasmedbio.2009.04.012.
11. Jadidian B, Hagh NM, Winder AA, Safari A. 25 MHz ultrasonic transducers with lead-free piezoceramic, 1–3 PZT fiber-epoxy composite, and PVDF polymer active elements. *IEEE Transactions on Ultrasonics, Ferroelectrics, and Frequency Control*. 2009;56(2):368–378. DOI: 10.1109/TUFFC.2009.1046.
12. Gottlieb EJ, Cannata JM, Hu C-H, Shung KK. Development of a high-frequency (>50 MHz) copolymer annular-array, ultrasound transducer. *IEEE Transactions on Ultrasonics, Ferroelectrics, and Frequency Control*. 2006;53(5):1037–1045. DOI: 10.1109/TUFFC.2006.1632693.

13. Biagi E, Margheri F, Menichelli D. Efficient laser-ultrasound generation by using heavily absorbing films as targets. *IEEE Transactions on Ultrasonics, Ferroelectrics, and Frequency Control*. 2001;48(6):1669–1680. DOI: 10.1109/58.971720.
14. Buma T, Spisar M, O'Donnell M. A high-frequency, 2-D array element using thermoelastic expansion in PDMS. *IEEE Transactions on Ultrasonics, Ferroelectrics, and Frequency Control*. 2003;50(9):1161–1176. DOI: 10.1109/TUFFC.2003.1235327.
15. Hou Y, Kim JS, Huang SW, Ashkenazi S, Guo LJ, O'Donnell M. Characterization of a broadband all-optical ultrasound transducer-from optical and acoustical properties to imaging. *IEEE Transactions on Ultrasonics, Ferroelectrics, and Frequency Control*. 2008;55(8):1867–1877. DOI: 10.1109/TUFFC.2008.870.
16. Wu N, Zou X, Zhou J, Wang X. Fiber optic ultrasound transmitters and their applications. *Measurement*. 2016;79:164–171. DOI: 10.1016/j.measurement.2015.10.002.
17. Won Baac H, Ok JG, Park HJ, Ling T, Chen S-L, Hart AJ, et al. Carbon nanotube composite optoacoustic transmitters for strong and high frequency ultrasound generation. *Applied Physics Letters*. 2010;97(23):234104. DOI: 10.1063/1.3522833.
18. Hu C, Yu Z, Wang A. An all fiber-optic multi-parameter structure health monitoring system. *Optics Express*. 2016;24(18):20287–20296. DOI: 10.1364/OE.24.020287.
19. Tian Y, Wu N, Zou X, Felemban H, Cao C, Wang X. Fiber-optic ultrasound generator using periodic gold nanopores fabricated by a focused ion beam. *Optical Engineering*. 2013;52(6):065005. DOI: 10.1117/1.OE.52.6.065005.
20. Zou X, Wu N, Tian Y, Wang X. Broadband miniature fiber optic ultrasound generator. *Optics Express*. 2014;22(15):18119–18127. DOI: 10.1364/OE.22.018119.
21. Микитчук ЕП, Козадаев КВ. Моделирование оптических свойств поверхностных наноструктур для фотоакустических преобразователей. *Квантовая электроника*. 2018;48(7):630–636.
22. Mikitchuk AP, Kozadaev KV. Photoacoustic generation with surface noble metal nanostructures. *Semiconductors*. 2018;52(14):1839–1842. DOI: 10.1134/S106378261814018X.
23. Микитчук ЕП, Козадаев КВ, Гавриш ЛА, Гиришова ЕИ, Гончаров ВК, Жигулин ДВ и др. Наноструктуры на торце оптического волокна для фотоакустических преобразователей. *Квантовая электроника. Материалы XII Международной научно-технической конференции; 18–22 ноября 2019 г.; Минск, Беларусь*. Минск: РИВШ; 2019. с. 161–163.
24. Goncharov VK, Kozadaev KV, Mikitchuk AP, Puzyreva MV. Synthesis, structural and spectral properties of surface noble metal nanostructures for fiber-optic photoacoustic generation. *Semiconductors*. 2019;53(14):1950–1953. DOI: 10.1134/S1063782619140070.
25. Kozadaev KV. Physics of laser-induced plasma streams under irradiation of metals with nanosecond laser pulses at atmospheric pressure. *Journal of Engineering Physics and Thermophysics*. 2014;87(3):704–714. DOI: 10.1007/s10891-014-1063-8.
26. Корольок ВС. *Справочник по теории вероятностей и математической статистике*. Москва: Наука; 1985. 640 с.
27. Ахманов СА, Дьяков ЮЕ, Чиркин АС. *Введение в статистическую радиофизику и оптику*. Москва: Наука; 1981. 640 с.
28. Кривошеев ВИ. *Современные методы цифровой обработки сигналов (цифровой спектральный анализ)*. Нижний Новгород: Национальный исследовательский Нижегородский государственный университет им. Н. И. Лобачевского; 2006. 117 с.
29. Rauscher C, Janssen V, Minihold R. *Fundamentals of spectrum analysis*. München: Rohde & Schwarz; 2008. 208 p.

References

1. Hanselka H, Nuffer J. Characterization of reliability. In: Czichos H, Saito T, Smith LE, editors. *Springer handbook of metrology and testing. Chapter 16.7*. New York: Springer; 2011. p. 949–975.
2. Czichos H. Metrology and testing in materials science and technology. *Measurement Science and Technology*. 2009;4(4):46–77. DOI: 10.1080/19315775.2009.11721494.
3. Vesely W. *Fault tree handbook with aerospace applications*. Washington DC: NASA; 2002. 232 p.
4. Worden K, Farrar CR, Manson G, Park G. The fundamental axioms of structural health monitoring. *Philosophical Transactions of the Royal Society A*. 2007;463(2082):1639–1664. DOI: 10.1098/rspa.2007.1834.
5. Czichos H, editor. *Handbook of technical diagnostics*. Heidelberg: Springer; 2013. 566 p. DOI: 10.1007/978-3-642-25850-3.
6. Sposito G, Warda C, Cawley P, Nagyac PB, Scruby C. A review of non-destructive techniques for the detection of creep damage in power plant steels. *NDT International*. 2010;43(7):555–567. DOI: 10.1016/j.ndteint.2010.05.012.
7. Snook KA, Hu C-H, Shrout TR, Shung KK. High-frequency ultrasound annular-array imaging. Part I: Array design and fabrication. *IEEE Transactions on Ultrasonics, Ferroelectrics, and Frequency Control*. 2006;53(2):300–308. DOI: 10.1109/TUFFC.2006.1593368.
8. Sharples SD, Clark M, Somekh MG. Spatially resolved acoustic spectroscopy for fast noncontact imaging of material microstructure. *Optics Express*. 2006;14(22):10435–10440. DOI: 10.1364/OE.14.010435.
9. Baerwald A, Dauk S, Kanthan R, Singh J. Use of ultrasound biomicroscopy to image human ovaries *in vitro*. *Ultrasound in Obstetrics and Gynecology*. 2009;34(2):201–207. DOI: 10.1002/uog.6438.
10. Foster FS, Mehi J, Lukacs M, Hirson D, White C, Chaggares C, et al. A new 15–50 MHz arraybased micro-ultrasound scanner for preclinical imaging. *Ultrasound in Medicine and Biology*. 2009;35(10):1700–1708. DOI: 10.1016/j.ultrasmedbio.2009.04.012.
11. Jadidian B, Hagh NM, Winder AA, Safari A. 25 MHz ultrasonic transducers with lead-free piezoceramic, 1–3 PZT fiber-epoxy composite, and PVDF polymer active elements. *IEEE Transactions on Ultrasonics, Ferroelectrics, and Frequency Control*. 2009;56(2):368–378. DOI: 10.1109/TUFFC.2009.1046.
12. Gottlieb EJ, Cannata JM, Hu C-H, Shung KK. Development of a high-frequency (>50 MHz) copolymer annular-array, ultrasound transducer. *IEEE Transactions on Ultrasonics, Ferroelectrics, and Frequency Control*. 2006;53(5):1037–1045. DOI: 10.1109/TUFFC.2006.1632693.
13. Biagi E, Margheri F, Menichelli D. Efficient laser-ultrasound generation by using heavily absorbing films as targets. *IEEE Transactions on Ultrasonics, Ferroelectrics, and Frequency Control*. 2001;48(6):1669–1680. DOI: 10.1109/58.971720.
14. Buma T, Spisar M, O'Donnell M. A high-frequency, 2-D array element using thermoelastic expansion in PDMS. *IEEE Transactions on Ultrasonics, Ferroelectrics, and Frequency Control*. 2003;50(9):1161–1176. DOI: 10.1109/TUFFC.2003.1235327.
15. Hou Y, Kim JS, Huang SW, Ashkenazi S, Guo LJ, O'Donnell M. Characterization of a broadband all-optical ultrasound transducer-from optical and acoustical properties to imaging. *IEEE Transactions on Ultrasonics, Ferroelectrics, and Frequency Control*. 2008;55(8):1867–1877. DOI: 10.1109/TUFFC.2008.870.

16. Wu N, Zou X, Zhou J, Wang X. Fiber optic ultrasound transmitters and their applications. *Measurement*. 2016;79:164–171. DOI: 10.1016/j.measurement.2015.10.002.
17. Won Baac H, Ok JG, Park HJ, Ling T, Chen S-L, Hart AJ, et al. Carbon nanotube composite optoacoustic transmitters for strong and high frequency ultrasound generation. *Applied Physics Letters*. 2010;97(23):234104. DOI: 10.1063/1.3522833.
18. Hu C, Yu Z, Wang A. An all fiber-optic multi-parameter structure health monitoring system. *Optics Express*. 2016;24(18):20287–20296. DOI: 10.1364/OE.24.020287.
19. Tian Y, Wu N, Zou X, Felemban H, Cao C, Wang X. Fiber-optic ultrasound generator using periodic gold nanopores fabricated by a focused ion beam. *Optical Engineering*. 2013;52(6):065005. DOI: 10.1117/1.OE.52.6.065005.
20. Zou X, Wu N, Tian Y, Wang X. Broadband miniature fiber optic ultrasound generator. *Optics Express*. 2014;22(15):18119–18127. DOI: 10.1364/OE.22.018119.
21. Mikitchuk AP, Kozadaev KV. [Simulation of the optical properties of surface nanostructures for photoacoustic converters]. *Quantum Electronics*. 2018;48(7):630–636. Russian.
22. Mikitchuk AP, Kozadaev KV. Photoacoustic generation with surface noble metal nanostructures. *Semiconductors*. 2018;52(14):1839–1842. DOI: 10.1134/S106378261814018X.
23. Mikitchuk AP, Kozadaev KV, Gavrik LA, Girshova EI, Goncharov VK, Zhigulin DV, et al. [Surface nanoparticles with metal nanoparticles for fiber-optic photoacoustic transducers]. In: *Kvantovaya elektronika. Materialy XII Mezhdunarodnoi nauchno-tehnicheskoi konferentsii; 18–22 noyabrya 2019 g.; Minsk, Belarus* [Quantum Electronics. Materials of the XII International Scientific and Technical Conference; 2019 November 18–22; Minsk, Belarus]. Minsk: National Institute for Higher Education; 2019. p. 161–163. Russian.
24. Goncharov VK, Kozadaev KV, Mikitchuk AP, Puzyreva MV. Synthesis, structural and spectral properties of surface noble metal nanostructures for fiber-optic photoacoustic generation. *Semiconductors*. 2019;53(14):1950–1953. DOI: 10.1134/S1063782619140070.
25. Kozadaev KV. Physics of laser-induced plasma streams under irradiation of metals with nanosecond laser pulses at atmospheric pressure. *Journal of Engineering Physics and Thermophysics*. 2014;87(3):704–714. DOI: 10.1007/s10891-014-1063-8.
26. Koroljuk VS. *Spravochnik po teorii veroyatnostei i matematicheskoi statistike* [Handbook on the probability theory and mathematical statistics]. Moscow: Nauka; 1985. 640 p. Russian.
27. Ahmanov SA, D'jakov YuE, Chirkin AS. *Vvedenie v statisticheskuyu radiofiziku i optiku* [Introduction to statistical radiophysics and optics]. Moscow: Nauka; 1981. 640 p. Russian.
28. Krivosheev VI. *Sovremennye metody tsifrovoy obrabotki signalov (tsifrovoy spektral'nyi analiz)* [Modern methods of digital signal processing]. Nizhny Novgorod: Lobachevsky State University of Nizhni Novgorod; 2006. 117 p. Russian.
29. Rauscher C, Janssen V, Minihold R. *Fundamentals of spectrum analysis*. München: Rohde & Schwarz; 2008. 208 p.

Статья поступила в редколлегию 17.12.2019.
Received by editorial board 17.12.2019.