

ОПТОАКУСТИЧЕСКИЙ ВОЛОКОННЫЙ КОНВЕРТЕР ЛАЗЕРНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ

А. В. СКРИПНИК

Университет ИТМО, 197101, Санкт-Петербург, Россия
E-mail: alesch_skrypnik@mail.ru

Рассматриваются свойства сформированного в два этапа оптоакустического волоконного конвертера, преобразующего излучение импульсного полупроводникового ИК-лазера в акустическую энергию. Конвертер расположен на торце выходного конца кварцевого волокна, доставляющего излучение лазера, и при помещении в воду формирует направленный поток микропузырей, который может быть использован для очистки поверхности твердого тела от адсорбированных ею продуктов. Представлены результаты сканирующей электронной микроскопии, рентгеноструктурного анализа состава конвертера и термографии его поверхности, а также результаты измерения коэффициента оптического пропускания конвертера и высокоскоростной видеосъемки его работы. Проведена регистрация акустических сигналов, генерируемых конвертером в воде под действием лазерного излучения с длиной волны $\lambda=980\pm 10$ нм.

Ключевые слова: оптическое волокно, полупроводниковый лазер, конвертер, лазерное излучение, высокоскоростная видеосъемка, температура, акустика.

Введение. В настоящее время лазерные технологии развиваются, в том числе, и за счет создания конвертеров, преобразующих лазерное излучение в другие виды энергии [1, 2]. В ряде случаев использование таких конвертеров позволяет существенным образом повысить эффективность и безопасность лазерного воздействия.

Конвертеры, преобразующие лазерное излучение в тепло, достаточно широко используются в медицине [3—6]. Так, в работе [7] описан волоконный оптоакустический конвертер, сформированный на выходном торце кварцевого световода в два этапа. Для некоторых биомедицинских применений, например при хирургическом лечении заболеваний опорно-двигательного аппарата, доминирующими (т.е. определяющими исход операции), по мнению авторов работы [8], являются не тепловые, а гидродинамические процессы, происходящие в зоне лазерного воздействия. Некоторые лазерные медицинские технологии, как отмечается в работе [9], основаны на эффективных гидродинамических процессах, происходящих под действием лазерного излучения в водонасыщенных биотканях.

В работах [8—10] исследованы гидродинамические эффекты, индуцированные в воде непрерывным излучением лазеров средней мощности (1—10 Вт), поступающим через оптическое кварцевое волокно диаметром 400 мкм. Выходной торец световода предварительно „зачернялся“ (blackened) в результате контакта с деревом в течение 1 с при средней мощности лазерного излучения 3 Вт (без этого действия гидродинамические процессы не наблюдались). Отмечается, что гидродинамические процессы в воде связаны со взрывным кипением вблизи нагретой поверхности торца световода, а формирующиеся пузыри размером в десятки микрометров имели скорость до 100 мм/с. При этом наблюдаемые гидродинамические эффекты сопровождаются высокоинтенсивными акустическими сигналами в широком диапазоне частот [9], а также генерацией интенсивных акустических волн и даже ударной волны [10].

Следует обратить внимание на то, что используемый для преобразования лазерной энергии в акустическую волну конвертер был сформирован в результате однократного

воздействия лазерного излучения на дерево, т.е. в один этап. Однако такой конвертер имеет ряд ограничений. Так, в работе [9] анализируется деградация поверхности торца волокна вследствие гидродинамических процессов: показано, что температура в непосредственной близости от поверхности торца может составлять до нескольких тысяч градусов при интенсивности лазерного излучения примерно 10^4 Вт/см². Кавитационный коллапс пузырей в жидкости вблизи поверхности торца волокна приводит к высокой скорости кумулятивных (накопленных) микроструй, которые могут разрушить твердую поверхность [10]. Этот эффект способствует появлению множественных трещин на пленке и в пористой структуре, образованию сверхкритического давления в воде и даже формированию кристаллов наноалмазов.

Таким образом, создание на выходном торце оптического световода конвертера, преобразующего лазерное излучение в акустическую волну, позволяет существенным образом повысить эффективность использования лазеров в медицине.

В настоящей статье рассматривается оптоакустический волоконный конвертер (ОАВК), преобразующий энергию излучения импульсного полупроводникового лазера с длиной волны $\lambda=980\pm 10$ нм в акустическую энергию, и обсуждаются возможные применения такого конвертера.

Конвертер формируется на торце выходного конца кварцевого световода в два этапа [7]. На первом этапе торец волокна соприкасается с поверхностью мишени, содержащей углерод, и производится его облучение при средней мощности 20 Вт в течение 500 мс; на втором этапе торец, размещаемый в воздушной среде, облучается при средней мощности 10 Вт в течение 1000 мс.

Материал и метод. В качестве источника лазерного излучения использовался полупроводниковый лазер "IPG Photonics" (США) с волоконной системой „доставки“ и длиной волны $\lambda=980\pm 10$ нм. Лазерное излучение передавалось по кварцевому оптическому волокну марки "OFS TCL-MB 320H" ("Coastal Connection", США) с диаметром световедущей жилы порядка 320 мкм, имеющему числовую апертуру $NA=0,37$. Максимальная средняя мощность лазерного излучения, достигаемая на выходе оптического волокна в непрерывном режиме генерации, составляла 30 Вт.

Исследования с помощью сканирующей электронной микроскопии (СЭМ) и рентгеноструктурного анализа проводились с использованием сканирующего электронного микроскопа "Carl Zeiss EVO 40" ("Carl Zeiss", Германия) и рентгенофлуоресцентного энергодисперсионного анализатора "INCA-ActX" ("Oxford Instruments", Великобритания). В качестве образцов были использованы кварцевое волокно оптического качества (исходное) и кварцевое волокно, содержащее ОАВК. Перед исследованием образцы предварительно очищались от загрязнений под действием ультразвука в этаноле.

Оценка температуры разогреваемой под действием лазерного излучения поверхности ОАВК, размещенного на воздухе, производилась с помощью высокоскоростной термокамеры "Flir Titanium 520M" ("Flir", США).

Коэффициент оптического пропускания рассчитывался как отношение амплитуды зарегистрированного посредством фотоприемника "PDA 100A" ("Thorlabs", США) и цифрового осциллографа "TDS 2024B" ("Tektronix", США) сигнала с выхода волокна, содержащего ОАВК, к амплитуде сигнала с выхода волокна, не содержащего подобный конвертер.

Процессы, происходящие до, во время и после лазерного воздействия, регистрировались с помощью высокоскоростной видеокамеры "Photron FASTCAM SA4" ("Photron", Япония) при скорости 100 тыс. кадров/с и экспозиции одного кадра 10 мкс. В результате анализа видеоматериалов зарегистрировано образование направленного потока микропузырей воды. Путем измерения длины треков, оставляемых движущимися микропузырями в кадре, оценивалась скорость их перемещения.

Для регистрации акустического сигнала, генерируемого помещенным в воду ОАВК под действием на него лазерного излучения, использовался гидрофон “DAPCO NP 10-3” (DAPCO, США), который располагался на расстоянии 3 мм от центра источника звука. Чувствительность гидрофона 0,077 МПа/В. Исследовались амплитуда и форма акустических сигналов, генерируемых лазерными импульсами длительностью (τ) 1, 5 и 10 мс. Средняя мощность лазерного излучения (P_{cp}) во всех случаях не превышала 2 Вт, пиковая же мощность лазерного излучения $P_{п} \approx 20$ Вт.

В ходе эксперимента также исследовалась возможность использования потока микропузырей для очистки керамической пластины от расположенных на ее поверхности частиц графита.

Результаты и их обсуждение. Оптическое и СЭМ-изображения ОАВК представлены на рис. 1, а, б соответственно. Обращает на себя внимание следующее:

— по сравнению с кварцевым волокном размер конвертера, сформированного на торце выходного конца волокна, превышает его исходные габариты, а именно — поперечный размер ОАВК равен примерно 530 мкм;

— поверхность конвертера выглядит более шероховатой, чем поверхность исходного кварцевого волокна.

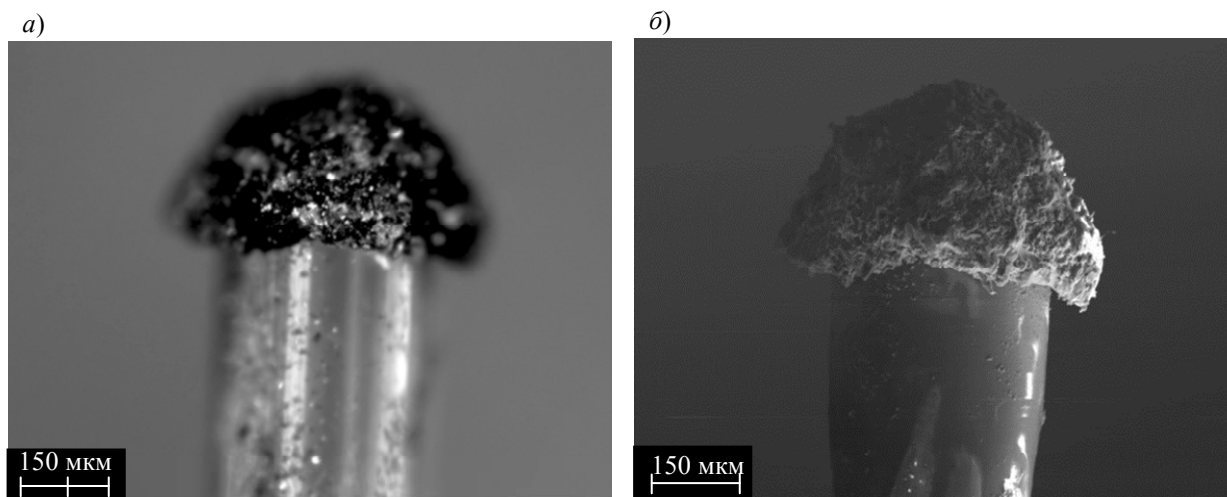


Рис. 1

Рентгеноструктурный анализ исходного кварцевого волокна показал, что оно состоит (в весовых процентах) на 84,53 % из кислорода, на 13,55 % из кремния и на 1,92 % из углерода; после же видоизменения выходного конца волокна — после завершения формирования ОАВК — состав стал следующим: 1,92 % кислорода, 9,04 % кремния, 0,37 % кальция и 88,67 % углерода. Следовательно, основным элементом в составе конвертера является углерод. Присутствие кислорода и кремния можно объяснить наличием их в составе кварца (SiO_2) — основного компонента исходного волокна. Незначительное же количество кальция, по-видимому, является результатом разложения материала мишени, содержащей, помимо углерода, и кальций.

Известно, что углерод имеет высокое поглощение в ИК-области. Так, при $\lambda=980$ нм его коэффициент поглощения достигает $2 \cdot 10^5$ — $4 \cdot 10^5$ см^{-1} [11]. Лазерное излучение, падая на ОАВК, эффективно поглощается содержащимся в нем углеродом; в результате конвертер нагревается. На рис. 2, а, б представлены термограмма (при $P_{cp} = 0,6$ Вт) и зависимость температуры (T) поверхности ОАВК, размещенного на воздухе, от средней мощности подаваемого на него непрерывного излучения с $\lambda=980 \pm 10$ нм. Видно, что тепло распределено по поверхности конвертера неравномерно. Например, при $P_{cp} = 0,6$ Вт максимальная температура 650 °С

наблюдается в центре конвертера, при этом на его периферии, обращенной к волокну, температура составляет $400\text{ }^{\circ}\text{C}$ и ниже (см. рис. 2, а), что, очевидно, связано с отводом тепла от конвертера в объем волокна. При $P_{\text{cp}}=3,0\text{ Вт}$ температура может достигать $1450\pm 50\text{ }^{\circ}\text{C}$ (см. рис. 2, б). При дальнейшем повышении средней мощности конвертер начинал разрушаться, его поглощающая способность уменьшалась и, как следствие, снижалась температура разогрева поверхности.

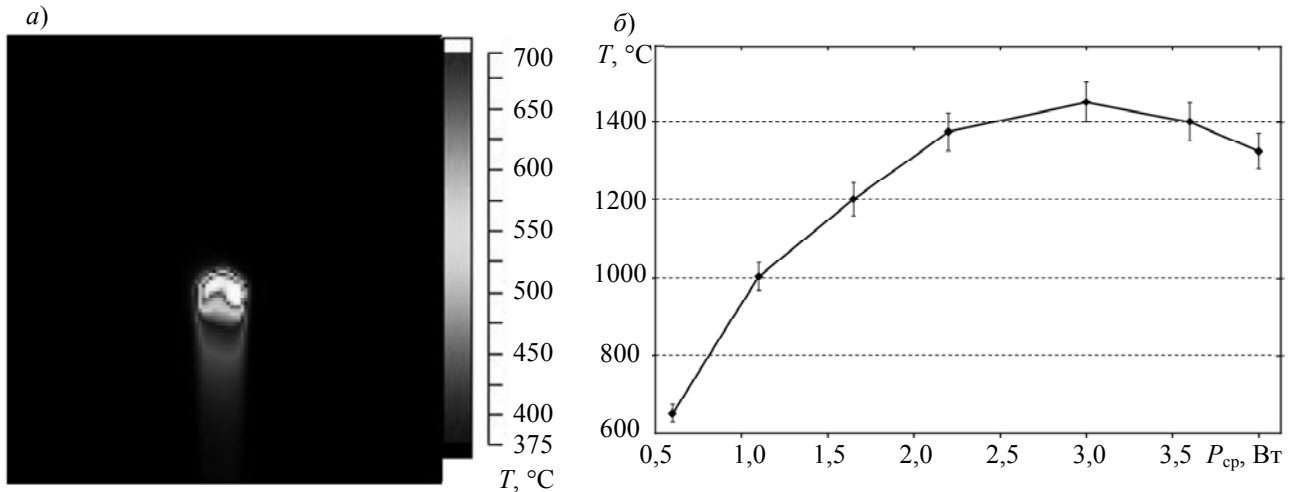


Рис. 2

Измеренное до достижения $T=1450\pm 50\text{ }^{\circ}\text{C}$ значение коэффициента оптического пропускания $k=7\pm 1\%$, тогда как после достижения указанной температуры оптическое пропускание увеличивалось и соответствовало значению $k=10\pm 1\%$. Следует отметить, что разогрев конвертера до температур ниже $1450\pm 50\text{ }^{\circ}\text{C}$ не приводил к заметному изменению коэффициента k .

На рис. 3 представлены фрагменты (стоп-кадры) высокоскоростной видеосъемки процесса, происходящего вблизи поверхности помещенного в воду ОАВК при его облучении полупроводниковым лазером при $\tau=5\text{ мс}$, $P_{\text{cp}}=25\text{ Вт}$ (здесь t — время, прошедшее от момента начала действия лазерного излучения). Видно, что формирующийся здесь поток микропузырей является результатом многократно повторяющегося в течение действия лазерного импульса процесса, состоящего в образовании и в „схлопывании“ одного более „крупного“ пузыря. Установлено, что подобный пузырь образуется каждые $95\pm 15\text{ мкс}$, а его размер достигает $250\pm 50\text{ мкм}$.

Механизм формирования пузырей может быть связан с нестационарным кипением жидкости на внешней поверхности поглощающего слоя конвертера в результате его лазерного разогрева, а также действия ИК-излучения. Следует отметить, что размер области, в которой регистрируется поток микропузырей, увеличивается в течение действия лазерного импульса. По окончании лазерного воздействия формирование потока микропузырей прекращается.

При формировании и „схлопывании“ пузырей, а также при их перемещении генерируется акустическая волна, результаты регистрации которой при $P_{\text{п}}=20\text{ Вт}$ и $\tau=5\text{ мс}$ приведены на рис. 4, а (где 1 — акустический сигнал, 2 — „оггибающая“ акустического сигнала, 3 — лазерный импульс); на рис. 4, б представлены результаты оценивания средних значений скорости перемещения микропузырей (V), произведенного при длительности лазерного импульса 1, 5 и 10 мс.

Анализ осциллограммы (см. рис. 4, а) показывает, что в акустическом сигнале наблюдается очевидное присутствие модуляции, ее частотная характеристика, согласно последующей оценке, находится в диапазоне 8—12 кГц, что коррелирует с периодом формирования пузырей вблизи поверхности ОАВК (см. рис. 3).

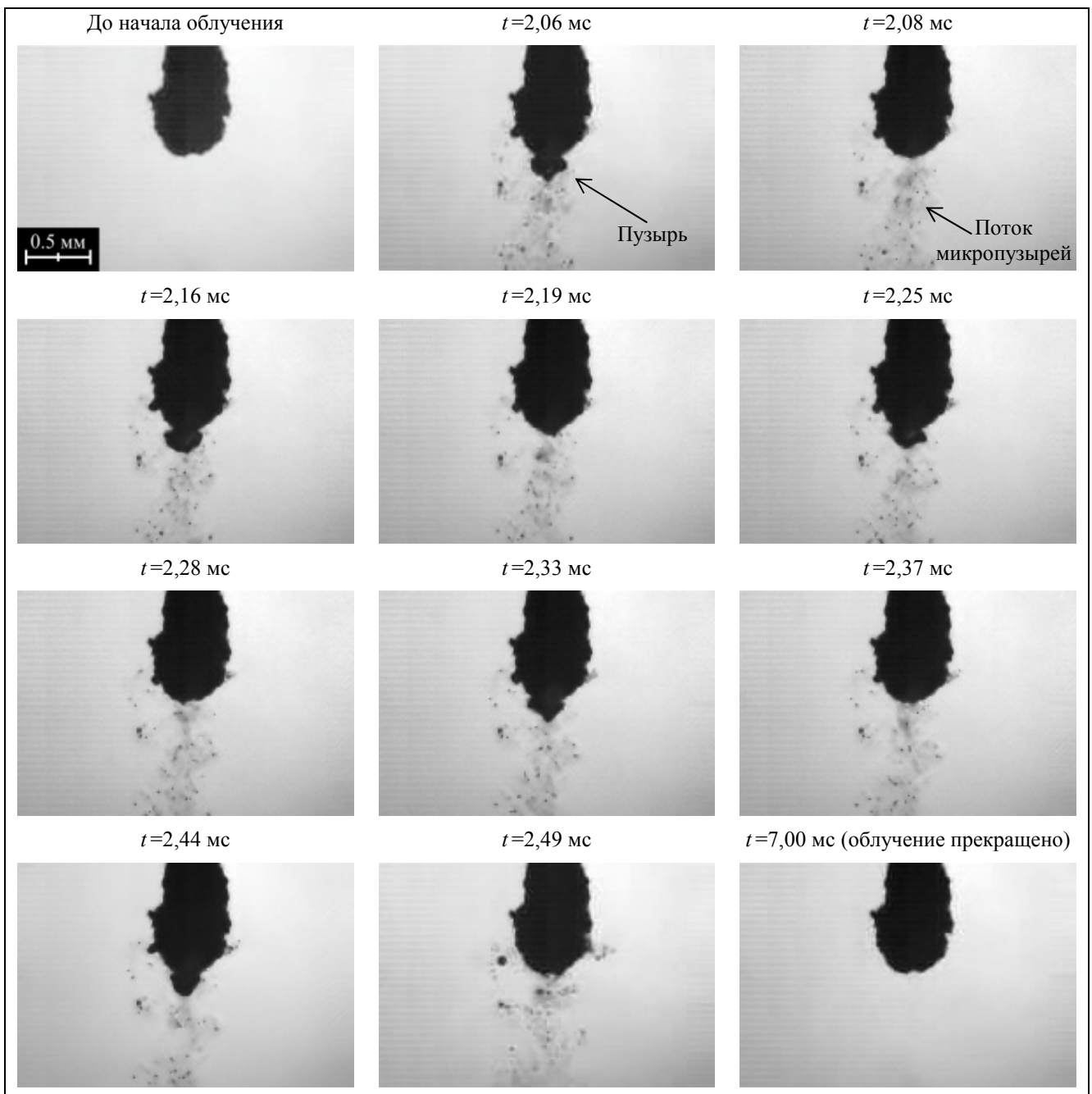


Рис. 3

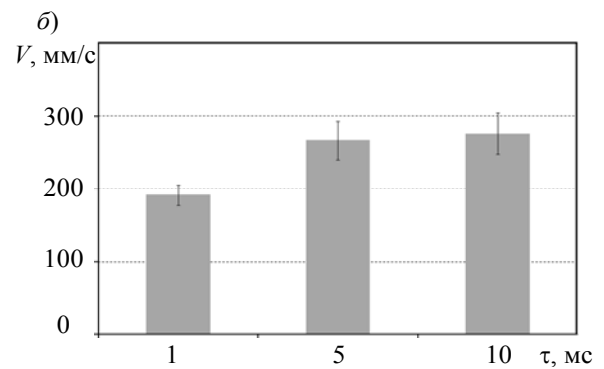
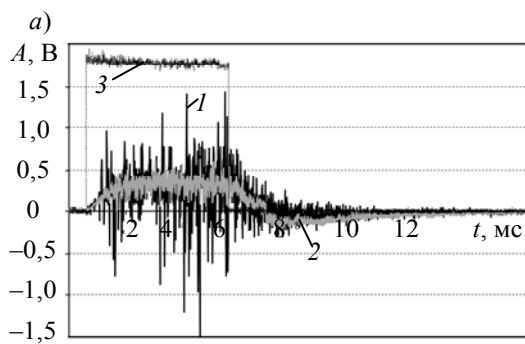


Рис. 4

„Огибающая“ акустического сигнала представляет собой результат арифметического усреднения амплитуд различных зарегистрированных сигналов. Следует отметить, что „огибающая“ содержит как положительный, так и отрицательный компоненты. Положительный компонент может быть связан с увеличением/расширением области „занятой“ потоком микропузырей, а его продолжительность коррелирует с длительностью лазерного импульса. Отрицательный компонент может быть связан с уменьшением области „занятой“ потоком микропузырей, вследствие прекращения лазерного воздействия. Необходимо отметить также, что амплитуда и форма акустической волны, как и скорость перемещения микропузырей зависят от длительности лазерного импульса, а именно: чем больше τ , тем выше значения A и V (см. рис. 4, б). Средняя скорость движения микропузырей достигала здесь 280 ± 30 м/с.

Показатель эффективности преобразования лазерной энергии E_0 в энергию акустической волны E_s определяется как

$$\eta_s = \frac{E_s}{E_0} \cdot 100 \% . \quad (1)$$

Согласно работам [12, 13]

$$E_s = \frac{4\pi r_m^2}{\rho_0 c_s} p_s^2 \Delta t_s , \quad (2)$$

где r_m — расстояние от центра источника звука до гидрофона ($r_m = 3$ мм); p_s — пиковое давление акустического импульса, имеющего длительность Δt_s по полувысоте амплитуды; $c_s = 1494,3$ м/с — скорость звука в воде; $\rho_0 = 997,299$ кг/м³ — плотность воды.

Акустический импульс (см. рис. 4, а) длительностью $\Delta t_s = 4,8$ мс был получен при действии на ОАВК импульса лазерного излучения с $E_0 = 125$ мДж; пиковое давление $p_s = 38,5$ кПа. Тогда согласно выражению (2) получаем, что $E_s = 540$ мкДж. Подставив данные значения E_0 и E_s в формулу (1), получим $\eta_s = 0,4$ %.

Как показано в работе [14], эффективность преобразования излучения, например, гольмиевого лазера (YAG: Ho, $\lambda = 2,12$ мкм) в энергию акустической волны при облучении воды с помощью кварцевого световода составляет около 0,1 %. Таким образом, исследуемый в настоящей статье оптоакустический волоконный конвертер представляется более эффективным, что можно объяснить высоким поглощением им лазерного излучения.

Рассмотренный выше процесс формирования потока микропузырей может быть использован для очистки поверхности керамической пластины.

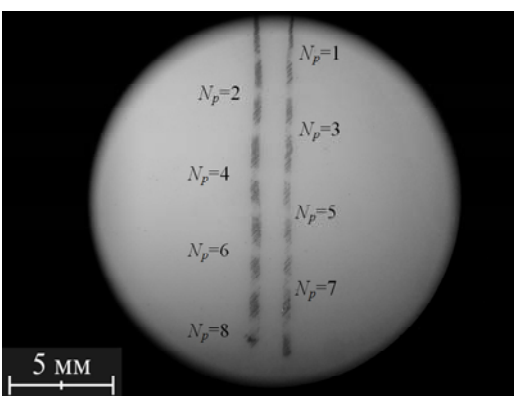


Рис. 5

Керамическая пластина помещалась в воду. Очистка проводилась путем воздействия одиночного лазерного импульса длительностью 100 мс на конвертер, расположенный на расстоянии примерно 0,5 мм напротив участка, содержащего частицы графита (при $P_{\text{л}} \approx 22$ Вт). Фотография поверхности керамической пластины, содержащей частицы графита, до и после очистки ее фрагментов с помощью ОАВК приведена на рис. 5.

Опыт повторялся восемь раз, причем каждый раз количество лазерных импульсов (N_p), действующих на одну и ту же область, содержащую частицы графита, увеличивалось на единицу. В результате было продемонстрировано, что проведение подобным образом организованной очистки поверхности действительно представляется возможным, причем для ее успешной реализации вполне достаточно одного лазерного импульса.

Заключение. Таким образом, впервые совместно исследованы состав, оптические и акустические свойства сформированного в два этапа оптоакустического волоконного конвертера лазерного ИК-излучения. Экспериментально показано, что помещенный в воду конвертер под действием излучения полупроводникового лазера с $\lambda=980\pm 10$ нм и пиковой мощностью до 25 Вт генерирует акустическую волну и поток микропузырей, которые могут быть использованы, например, при очистке керамических поверхностей.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Pat. US 2012/0123399 A1. Dental Surgical Laser with Feedback Mechanisms / *A. V. Belikov, F. I. Feldchtein, G. B. Altshuler*. N 13/379,916. Publ. 17.05.2012.
2. *El-Sharkawy Y. H., Badr Y., Hassan M.* Laser generation and detection of surface acoustic waves: used for breast cancer detection // Proc. of SPIE. 2006. Vol. 6139. P. 61390Y.
3. “Hot tip”: Another method of laser vascular recanalization / *G. S. Abela, A. Fenech, F. Crea, C. R. Conti* // Lasers in Surgery and Medicine. 1985. Vol. 5, N 3. P. 327—335.
4. Advantages of diode laser (940 nm) over surgical blade in management of ankyloglossia: A Case Report / *Y. Doshi, M. Shah, N. Khandge, A. Sanghavi* // J. of Oral Laser Applications. 2010. Vol. 10, N 4. P. 165—169.
5. *Verdaasdonk R. M., Van Swol C. F. P.* Laser light delivery systems for medical applications // Physics in Medicine and Biology. 1997. Vol. 42. P. 869—894.
6. Термооптическая хирургия: новый минимально инвазивный метод контактной хирургии мягких тканей / *Г. Б. Альтиулер, А. В. Беликов, А. В. Скрипник, Ф. Фельдштейн* // Инновационная стоматология. 2012. № 1. С. 2—12.
7. *Скрипник А. В.* Опотермический волоконный конвертер лазерного излучения // Изв. вузов. Приборостроение. 2013. Т. 56, № 9. С. 37—42.
8. *Yusupov V. I., Chudnovskii V. M., Bagratashvili V. N.* Laser-induced hydrodynamics in water-saturated biotissues: 1. Generation of bubbles in liquid // Laser Physics. 2010. Vol. 20, N 7. P. 1641—1646.
9. *Yusupov V. I., Chudnovskii V. M., Bagratashvili V. N.* Laser-induced hydrodynamics in water-saturated biotissues: 2. Effect on delivery fiber // Laser Physics. 2011. Vol. 21, N 7. P. 1230—1234.
10. *Yusupov V. I., Chudnovskii V. M., Bagratashvili V. N.* Laser-induced hydrodynamics in water and biotissues nearby optical fiber tip // Hydrodynamics — Advanced Topics / Ed. *H. Schulz*. Rijeka: InTech, 2011. P. 97—119.
11. *Hennig G. R.* Optical transmission of graphite compounds // J. of Chemical Physics. 1965. Vol. 43, N 4. P. 1201—1206.
12. *Vogel A., Noack J., Nahen K.* et al. Energy balance of optical breakdown in water at nanosecond to femtosecond time scales // Applied Physics B. 1999. Vol. 68, N 2. P. 271—280.
13. *Cole R. H.* Underwater Explosions. Princeton: Princeton Univ. Press, 1948. 438 p. [Электронный ресурс]: <<https://archive.org/stream/underwaterexplos00cole#page/n463/mode/2up>>.
14. *Lü T., Li Z. J.* Underwater holmium-laser-pulse-induced complete cavitation bubble movements and acoustic transients // Chinese Science Bulletin. 2011. Vol. 56, N 12. P. 1226—1229.

Сведения об авторе

Алексей Владимирович Скрипник — канд. физ.-мат. наук; Университет ИТМО, кафедра лазерной техники и биомедицинской оптики; E-mail: alesch_skrupnik@mail.ru

Рекомендована кафедрой
лазерной техники и биомедицинской
оптики

Поступила в редакцию
16.12.14 г.

Ссылка для цитирования: *Скрипник А. В.* Оптоакустический волоконный конвертер лазерного излучения // Изв. вузов. Приборостроение. 2015. Т. 58, № 5. С. 385—392.

FIBER OPTOACOUSTIC CONVERTER OF LASER RADIATION

A. V. Skrypnik

ITMO University, 197101, Saint Petersburg, Russia

E-mail: alesch_skrypnik@mail.ru

Properties of a fiber optic optoacoustic converter (FOAC) of IR pulsed diode laser radiation into acoustical energy are studied. The FOAC is devised in two steps on the end of quartz fiber used for transfer of the laser radiation, and generates a directed stream of microbubbles when placed in the water. Application of the FOAC for cleaning a solid surface of adsorbed material is considered. Data obtained with scanning electron microscopy and X-ray structural analysis of the converter composition are presented as well as results of the converter optical transmission measurements and high-speed shooting of its operation. Acoustic signals generated by the converter in the water under exposure to laser radiation ($\lambda=980\pm 10$ nm) are recorded.

Keywords: optical fiber, semiconductor (diode) laser, converter, laser radiation, high-speed video, temperature, acoustic.

Data on author**Alexey V. Skrypnik**

— PhD, Associate Professor; ITMO University, Department of Laser Technologies and Biomedical Optics; E-mail: alesch_skrypnik@mail.ru

Reference for citation: Skrypnik A. V. Fiber optoacoustic converter of laser radiation // Izvestiya Vysshikh Uchebnykh Zavedeniy. Priborostroenie. 2015. Vol. 58, N 5. P. 385—392 (in Russian).

DOI: 10.17586/0021-3454-2015-58-5-385-392