



УДК 621.373.826:537.312.51:616-089.87

ИССЛЕДОВАНИЕ АКУСТИЧЕСКОГО СИГНАЛА ПРИ ЛАЗЕРНОЙ ГИДРОАКУСТИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКЕ БИОТКАНИ МИКРОСЕКУНДНЫМИ ИМПУЛЬСАМИ ИЗЛУЧЕНИЯ ЛАЗЕРА НА ИТТЕРБИЙ-ЭРБИЕВОМ СТЕКЛЕ

А.В. Беликов^а, С.В. Гагарский^а, А.Н. Сергеев^а, С.Н. Смирнов^а, А.М. Загорулько^б^а Университет ИТМО, Санкт-Петербург, 197101, Российская Федерация^б Санкт-Петербургский филиал МНТК «Микрохирургия глаза» им. академика С.Н. Фёдорова, Санкт-Петербург, 192283, Российская Федерация

Адрес для переписки: s.n.smirnov@inbox.ru

Информация о статье

Поступила в редакцию 24.07.18, принята к печати 04.09.18

doi: 10.17586/2226-1494-2018-18-6-939-945

Язык статьи – русский

Ссылка для цитирования: Беликов А.В., Гагарский С.В., Сергеев А.Н., Смирнов С.Н., Загорулько А.М. Исследование акустического сигнала при лазерной гидроакустической обработке биоткани микросекундными импульсами излучения лазера на иттербий-эрбиевом стекле // Научно-технический вестник информационных технологий, механики и оптики. 2018. Т. 18. № 6. С. 939–945. doi: 10.17586/2226-1494-2018-18-6-939-945

Аннотация

Предмет исследования. Представлены результаты исследования акустического сигнала, регистрируемого гидрофоном при воздействии на жидкость микросекундными импульсами лазерного излучения с длиной волны генерации 1,54 мкм и различной временной субструктурой. Обсуждается влияние энергии и временной субструктуры лазерного импульса на величину генерируемых перепадов давления в жидкости и эффективность удаления тканей катарактального хрусталика глаза. **Метод.** Микросекундные импульсы излучения лазера на иттербий-эрбиевом стекле с различной пиковой мощностью «лидирующего» пика и эквивалентной энергией доставлялись в объем дистиллированной воды через оптическое волокно. Акустический сигнал регистрировался игольчатым гидрофоном NP 10-1 (Dapco Inc., США). В условиях *in vitro* проведена гидроакустическая обработка катарактального хрусталика глаза человека. **Основные результаты.** Для импульсов с различной временной субструктурой получены зависимости амплитуды первой (термооптической) и второй (связанной с процессом «коллапс–возобновление» парогозовой полости) компонент акустического сигнала от энергии в импульсе. Установлено, что с увеличением пиковой мощности «лидирующего» пика микросекундного импульса снижается порог появления второй компоненты акустического сигнала, а максимальная амплитуда обеих компонент возрастает. Получены угловые распределения амплитуды компонент акустического сигнала. Выявлено, что первая имеет выраженный максимум амплитуды в направлении, перпендикулярном оптической оси волокна, тогда как угловое распределение второй более равномерно. В эксперименте *in vitro* показано, что увеличение пиковой мощности «лидирующего» пика приводит к существенному увеличению удаленного объема и эффективности удаления тканей катарактального хрусталика глаза человека. **Практическая значимость.** Полученные результаты могут быть использованы при оптимизации параметров лазерного излучения для обработки биоткани, окруженной жидкостью, например, в процессе лазерной экстракции катаракты.

Ключевые слова

лазерная гидроакустическая обработка, лазер на иттербий-эрбиевом стекле, микросекундные импульсы, лидирующий пик, акустический сигнал, гидрофон, парогозовая полость, биоткани.

Благодарности

Работа выполнена при финансовой поддержке Правительства Российской Федерации (Грант 08-08).

STUDY OF ACOUSTIC SIGNAL DURING LASER HYDROACOUSTIC PROCESSING OF BIOLOGICAL TISSUE BY MICROSECOND PULSES OF YTTERBIUM-ERBIUM GLASS LASER RADIATION

A.V. Belikov^а, S.V. Gagarsky^а, A.N. Sergeev^а, S.N. Smirnov^а, A.M. Zagorulko^б^аITMO University, Saint Petersburg, 197101, Russian Federation^бSt. Petersburg Branch of S. Fyodorov Eye Microsurgery Federal State Institution, Saint Petersburg, 192283, Russian Federation

Corresponding author: s.n.smirnov@inbox.ru

Article info

Received 24.07.18, accepted 04.09.18
doi: 10.17586/2226-1494-2018-18-6-939-945
Article in Russian

For citation: Belikov A.V., Gagarsky S.V., Sergeev A.N., Smirnov S.N., Zagorulko A.M. Study of acoustic signal during laser hydroacoustic processing of biological tissue by microsecond pulses of ytterbium-erbium glass laser radiation. *Scientific and Technical Journal of Information Technologies, Mechanics and Optics*, 2018, vol. 18, no. 6, pp. 939–945 (in Russian). doi: 10.17586/2226-1494-2018-18-6-939-945

Abstract

Subject of Research. The paper describes the research results of an acoustic signal recorded by a hydrophone while effect on a liquid by microsecond pulses of laser radiation with a wavelength of 1.54 μm and different time substructure. We discuss the influence of energy and time substructure of the laser pulse on the magnitude of generated pressure drops in the liquid and removal efficiency of cataract eye lens tissues. **Method.** Microsecond pulses of ytterbium-erbium glass laser radiation with different peak power of the "leading" spike and equivalent energy were delivered to the volume of distilled water through an optical fiber. The acoustic signal was registered with "NP 10-1" needle hydrophone (Dapco Inc., USA). An in vitro hydroacoustic treatment of cataract human eye lens was performed. **Main Results.** We obtained the dependences of the amplitude of the first (thermo-optical) and the second (associated with "collapse-rebound" process of a steam-gas cavity) components of the acoustic signal on the pulse energy for laser pulses with different time substructures. It was established that with an increase in the peak power of the "leading" spike of microsecond pulse, the threshold for the appearance of the second component decreases, and the maximum amplitude of both components increases. The angular distributions of the amplitude of acoustic signal components were obtained. It was found that the first component has a pronounced maximum amplitude in a direction perpendicular to the optical axis of the fiber, whereas the angular distribution of the second component is more uniform. In the in vitro experiment, it was shown that an increase in the peak power of the "leading" spike results in a significant increase in the removed volume and removal efficiency of the human cataract eye lens. **Practical Relevance.** The obtained results can be used to optimize the parameters of laser radiation for processing of tissue surrounded by a liquid, for example, during laser cataract extraction.

Keywords

laser hydroacoustic processing, ytterbium-erbium glass laser, microsecond pulses, leading spike, acoustic signal, hydrophone, steam-gas cavity, biological tissues

Acknowledgements

This work was financially supported by the Government of the Russian Federation (Grant 08-08).

Введение

Лазерная импульсная гидроакустическая обработка биоткани сопровождается гидродинамическими процессами и возбуждением акустических волн. Эти явления могут увеличивать эффективность разрушения биоткани за счет непосредственного деструктивного воздействия акустических волн, очищения лазерного кратера от продуктов абляции, эффективной передачи излучения через парогазовую полость и т.д. Такой тип обработки характерен для эндохирургических вмешательств, при которых лазерное воздействие происходит, как правило, в жидкой среде. Лазерная гидроакустическая обработка перспективна для операций, требующих удаления большого патологического участка биоткани либо полного разрушения биообъекта, например, при лазерной экстракции катаракты (ЛЭК) [1, 2].

Как было показано в [3], лазер на иттербий-эрбиевом стекле с длиной волны генерации $\lambda=1,54$ мкм перспективен для применения в офтальмохирургических комплексах ЛЭК благодаря возможности эффективной диодной накачки. Однако коэффициент поглощения для воды – основного хромофора хрусталика в ближнем инфракрасном диапазоне – при $\lambda=1,54$ мкм составляет около 12 см^{-1} , это более чем в два раза уступает поглощению на длине волны $\lambda=1,44$ мкм неосновного перехода Nd:YAG-лазера, успешно применяемой для лазерной фрагментации хрусталика [4]. В связи с этим уменьшается удельное объемное поглощение излучения на длине волны 1,54 мкм в биоткани, и для сохранения эффективности обработки целесообразен переход к более коротким импульсам. Использование импульсов длительностью в единицы микросекунд обеспечивает адиабатичность энерговыклада, т.е. выделяемое в области обработки тепло не успевает распространиться в окружающую ткань. Излучение может быть доставлено по оптическому волокну: как было показано в [3, 5], по обезвоженному кварцевому оптическому волокну диаметром около 470 мкм можно передавать импульсы лазера на иттербий-эрбиевом стекле длительностью менее 10 мкс с энергией порядка сотни миллиджоулей без деградации его входного торца. Отметим, что микросекундные импульсы лазера на иттербий-эрбиевом стекле ранее не использовались для ЛЭК, а информация об акустических сигналах, возникающих при обработке биоткани в жидкости такими импульсами, отсутствует.

Известно, что характер лазерно-индуцированных гидроакустических эффектов зависит от длительности лазерного импульса [6] и объемной плотности поглощенной энергии лазерного излучения [7], определяемой коэффициентом поглощения жидкости на длине волны излучения используемого лазера, а также диаметром сердцевины и числовой апертурой оптического волокна доставки излучения. Адаптируя параметры лазерного излучения (наиболее существенные – длительность лазерного импульса и его субструктура), например, при фрагментации хрусталика глаза, необходимо исследовать гидроакустические эффекты для разных комбинаций этих параметров.

Цель настоящей работы заключается в исследовании углового распределения амплитуды акустических волн, возникающих при воздействии микросекундных импульсов излучения лазера на иттербий-эрбиевом стекле на жидкость (дистиллированную воду), исследовании зависимости величины перепада давления в жидкости от энергии лазерного импульса, установлении влияния временной субструктуры этих импульсов на амплитуду компонент акустического сигнала, а также сравнении эффективности удаления тканей катарактального хрусталика глаза человека при гидроакустической обработке импульсами лазера с различной пиковой мощностью «лидирующего» пика и эквивалентной энергией.

Материалы и методы

В исследовании использовался лазер на иттербий-эрбиевом стекле с ламповой накачкой. Лазер работал в режиме модуляции полезных потерь «глухого» трехзеркального Т-образного резонатора, вывод излучения осуществлялся через оптико-механический затвор, основанный на эффекте нарушения полного внутреннего отражения (НПВО-затвор) [3, 8, 9]. Временная субструктура микросекундных импульсов излучения регулировалась за счет изменения динамики эквивалентного коэффициента отражения выходного зеркала путем изменения формы электрического управляющего импульса, подаваемого на пьезоэлементы затвора.

Микросекундные импульсы лазерного излучения (рис. 1) доставлялись в свободный объем дистиллированной воды через кварц-кварцевое оптическое волокно с числовой апертурой $NA=0,18$ и диаметром сердцевины $df=470\pm 10$ мкм.

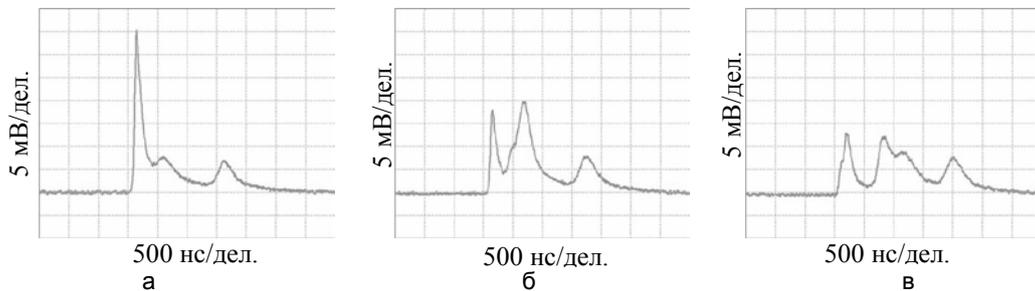


Рис. 1. Микросекундные импульсы излучения лазера на иттербий-эрбиевом стекле с эквивалентной энергией, но различной пиковой мощностью «лидирующего» пика

Импульсы имели эквивалентную энергию, но различную пиковую мощность «лидирующего» пика. В эксперименте исследовались импульсы с временным профилем ВП1 с выраженным высокоинтенсивным «лидирующим» пиком, пиковая мощность которого в пять раз превышала пиковую мощность следующих за ним пиков (рис. 1, а), а также импульсы ВП2 и ВП3 с сопоставимой пиковой мощностью всех пиков (рис. 1, б, в). При энергии в импульсе, близкой к 100 мДж, пиковая мощность «лидирующего» пика для ВП1 достигала 240, для ВП2 – 120, а для ВП3 – 90 кВт. Частота повторения импульсов составляла 1 Гц. Проведенные ранее исследования [3, 5] показали, что при такой частоте повторения оптические свойства возмущенного объема жидкости успевают вернуться в исходное состояние к моменту воздействия последующего импульса.

Схема экспериментальной установки, использованной для регистрации акустического сигнала, приведена на рис. 2.

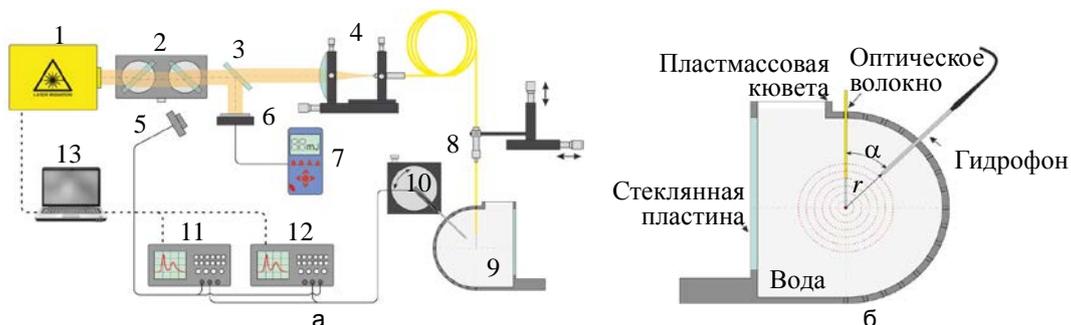


Рис. 2. Схема экспериментальной установки (а) и кювета с жидкостью крупным планом (б).

1 – лазер на иттербий-эрбиевом стекле, 2 – френелевский ослабитель, 3 – светоделитель (кварцевая пластинка), 4 – узел ввода лазерного излучения в оптическое волокно, 5 – фотодиод FGA01 (Thorlabs, Inc., США), 6 – измерительная головка PE10 V2 (Ophir Optronics Ltd., Израиль), 7 – измеритель энергии/мощности излучения Nova II (Ophir Optronics Ltd., Израиль), 8 – оптическое волокно в SMA-держателе, 9 – кювета с жидкостью, 10 – игольчатый гидрофон NP 10-1 (Dapco Inc., США), 11, 12 – осциллографы TDS 2012 В (Tektronix, Inc., США), 13 – компьютер

Энергия возбуждающего лазерного импульса на выходе оптического волокна составляла $E=95\pm 2$ мДж. Угол между оптической осью волокна и нормалью к приемной площадке гидрофона изменялся в диапазоне $\alpha=22,5-157,5^\circ$. Расстояние между приемной площадкой гидрофона и торцом оптического волокна варьировало в пределах $r=10-36$ мм. Для каждой экспериментальной точки проводилось по 15 измерений, полученные значения впоследствии усреднялись. Значения амплитуды акустической волны, полученные при различных r , нормировались на максимальные значения ее амплитуды, полученные при $r=10$ мм.

При исследовании зависимости величины перепада давления в жидкости от энергии и временной структуры лазерного импульса приемная площадка гидрофона была расположена на расстоянии $2,5\pm 0,2$ мм от торца оптического волокна. В качестве емкости для жидкости использовалась стеклянная кювета размером $80\times 30\times 25$ мм. Гидрофон был закреплен таким образом, что угол между оптической осью волокна и нормалью к его приемной площадке составлял $45\pm 1^\circ$. Энергия лазерного импульса в диапазоне 30–100 мДж изменялась с помощью френелевского ослабителя.

Акустический сигнал регистрировался игольчатым гидрофоном NP 10-1, подключенным к двум осциллографам TDS 2012 В через нагрузку 1,5 кОм. Чувствительность гидрофона при такой нагрузке составляла 0,16 В/МПа. Величина перепада давления в жидкости рассчитывалась согласно следующему соотношению:

$$\Delta P = \frac{A}{k},$$

где A (В) – амплитуда зарегистрированного гидрофоном акустического сигнала; k (В/МПа) – чувствительность гидрофона.

Эффективность удаления биоткани путем ее гидроакустической обработки импульсами излучения лазера на иттербий-эрбиевом стекле с различной пиковой мощностью «лидирующего» пика и эквивалентной энергией исследована в эксперименте *in vitro* на образцах хрусталика с катарактой III степени по классификации Буратто [10]. В эксперименте использовались импульсы, имеющие временной профиль ВП1 и ВП3 (см. рис. 1). Лазерное воздействие производилось в жидкости (дистиллированной воде), расстояние между торцом оптического волокна и поверхностью хрусталика составляло 0,5 мм. Эффективность удаления (RE) определялась как отношение удаленного объема тканей катарактального хрусталика (V) к суммарной, затраченной на удаление, энергии лазерных импульсов (E_{Σ}). Удаленный объем соответствовал объему кратера в хрусталике и определялся в результате обработки изображений продольных срезов кратеров.

Результаты и обсуждение

Осциллограмма, характеризующая типичную структуру акустического сигнала, возникающего при воздействии микросекундных импульсов излучения лазера на иттербий-эрбиевом стекле с энергией более 80 мДж на жидкость (дистиллированную воду), представлена на рис. 3. Видно, что сигнал состоит из первой (термооптической) компоненты акустического сигнала (1); второй компоненты (2), связанной с процессом «коллапс–возобновление» первичной парогазовой полости; третьей компоненты (3) с наименьшей амплитудой, обусловленной процессом «коллапс–возобновление» вторичной полости.

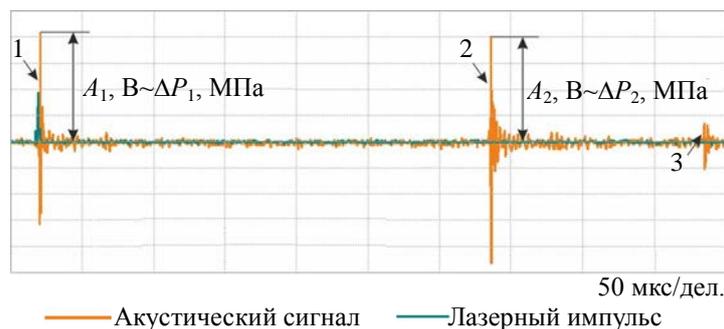


Рис. 3. Типичная осциллограмма лазерного импульса и акустического сигнала, зарегистрированного гидрофоном, при энергии лазерного импульса более 80 мДж

На рис. 4 представлено угловое распределение амплитуды первой и второй компонент акустического сигнала. Точки характеризуют амплитуду сигнала по уровню 0,4 от наибольшего значения, полученного при $r=10$ мм.

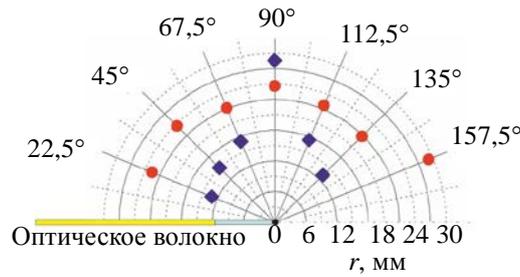


Рис. 4. Угловое распределение первой компоненты акустического сигнала (ромбы) и второй компоненты (круги)

Видно, что амплитуда первой компоненты максимальна в направлении, перпендикулярном оптической оси волокна. Этот факт может быть связан с особенностью геометрии источника тепловыделения. Поскольку диаметр оптического волокна (470 ± 10 мкм) меньше глубины проникновения излучения, которая для $\lambda = 1,54$ мкм в воде составляет ≈ 850 мкм, источник тепловыделения имеет вытянутую форму. Интенсивность излучения падает по экспоненте от торца волокна, т.е. основной нагрев локализуется у торца. При этом отражение акустической волны от торца и дифракция на торце деформируют диаграмму направленности таким образом, что ее максимум отклоняется от оптической оси волокна. Амплитуда второй компоненты акустического сигнала имеет более равномерное угловое распределение. Максимальное значение амплитуды второй компоненты было зарегистрировано при угле $157,5^\circ$, что может быть связано с отражением акустической волны от торца оптического волокна. Зависимости величины ΔP от энергии импульсов лазера на иттербий-эрбиевом стекле с различной пиковой мощностью «лидирующего» пика приведены на рис. 5.

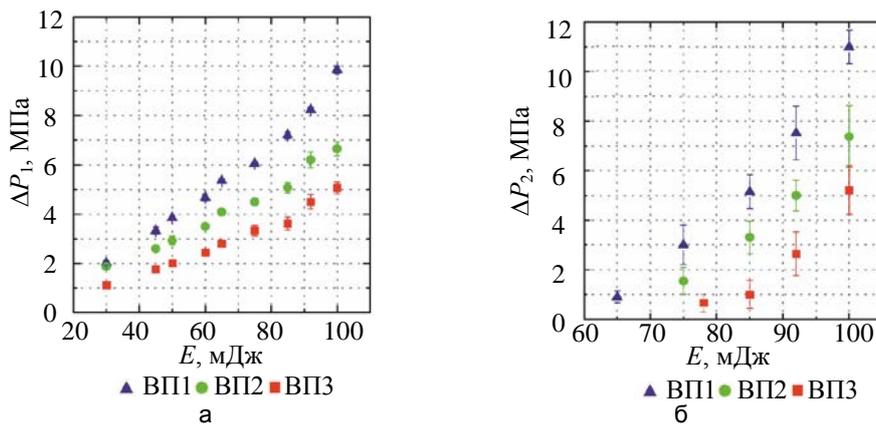


Рис. 5. Зависимости перепадов давления ΔP_1 (а) и ΔP_2 (б) от энергии в импульсе (E) для импульсов с различной временной субструктурой

Из рис. 5 видно, что при воздействии на свободный объем воды микросекундным импульсом излучения лазера на иттербий-эрбиевом стекле с «лидирующим» пичком, пиковая мощность которого в пять раз превышает пиковую мощность следующих за ним пичков, при $E < 60$ мДж (плотность энергии $W_E < 35$ Дж/см²) возникает акустический сигнал, который содержит только одну компоненту (термооптическую). Превышение энергией 60 мДж приводит к появлению второй компоненты, соответствующей процессу «коллапс–возобновление» парогазовой полости. Две компоненты акустического сигнала наблюдаются при энергии в импульсе 60–80 мДж ($35 \leq W_E < 46$ Дж/см²). При дальнейшем повышении энергии в импульсе ($W_E \geq 46$ Дж/см²) появляется третья компонента, соответствующая процессу «коллапс–возобновление» вторичной парогазовой полости. Амплитуда этой компоненты существенно ниже амплитуды первых двух, что позволяет не рассматривать ее вклад в процесс гидроакустической обработки. Порог появления второй компоненты акустического сигнала ниже для импульсов с выраженным высокоинтенсивным «лидирующим» пичком, а амплитуда как первой (термооптической), так и последующих компонент для таких импульсов больше. Полученные данные согласуются с ранее представленными результатами исследования гидроакустических процессов в жидкости методом стробоскопического фотографирования [11], где было показано, что для импульсов с большей пиковой мощностью «лидирующего» пичка порог формирования парогазовой полости ниже, а максимальный объем полости больше. В работах [12, 13] показано, что условия для формирования парогазовой полости могут быть созданы за счет появления растягивающей компоненты термоупругой волны (первая компонента акустического сигнала) при ее дифракции на торце оптического волокна,

доставляющего лазерное излучение в объем жидкости. Таким образом, снижение порога формирования парогазовой полости при увеличении пиковой мощности «лидирующего» пика может быть результатом усиления термооптической компоненты и вовлечения в процесс формирования полости более мелкомасштабных зародышей кавитации [10]. Максимальный перепад давления как для первой, так и для второй компоненты на расстоянии $2,5 \pm 0,2$ мм от центра его возникновения наблюдается для импульсов с ВП1 и составляет порядка 10 МПа при энергии $E=98 \pm 2$ мДж. Поскольку амплитуда второй компоненты акустического сигнала затухает по закону $1/r$ [6, 7, 14, 15], перепад давления на расстоянии 0,5 мм от торца оптического волокна будет порядка 50 МПа. Стоит отметить, что прочность мягких биотканей на разрыв составляет единицы мегапаскалей [16], а прочность на сжатие, как правило, существенно превышает прочность на разрыв. На рис. 6 представлены продольные срезы кратеров, сформированных в хрусталике глаза человека с III степенью катаракты (по классификации Буратто [10]) под действием 100 импульсов излучения с энергией $E=98 \pm 2$ мДж и различной пиковой мощностью «лидирующего» пика.

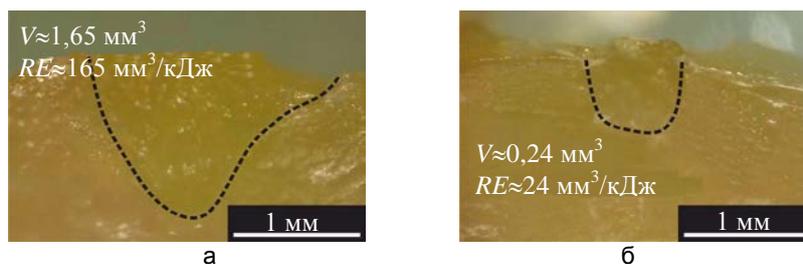


Рис. 6. Фотографии типичных продольных срезов кратеров, сформированных в катарактальном хрусталике глаза человека импульсами с временным профилем ВП1 (а) и ВП3 (б)

Объем сформированного кратера (V) и соответственно эффективность удаления биоткани (RE) оказались в несколько раз больше для импульса с большей пиковой мощностью «лидирующего» пика. Таким образом, увеличение пиковой мощности «лидирующего» пика приводит к существенному увеличению удаленного объема и эффективности удаления тканей катарактального хрусталика глаза человека, что коррелирует с величиной перепада давления в жидкости.

Заключение

Исследован акустический сигнал, регистрируемый гидрофоном при воздействии на жидкость микросекундными импульсами излучения лазера на иттербий-эрбиевом стекле с различной временной субструктурой. Установлено, что с увеличением пиковой мощности «лидирующего» пика возрастает амплитуда как первой (термооптической) компоненты акустического сигнала, так и второй, связанной с процессом «коллапс–возобновление» парогазовой полости, а порог появления второй компоненты уменьшается. Величина перепада давления при возобновлении полости на расстоянии 0,5 мм от торца оптического волокна может достигать 50 МПа при энергии возбуждающего импульса ~ 100 мДж и пиковой мощности «лидирующего» пика ~ 200 кВт. Исследовано угловое распределение первой и второй компонент акустического сигнала. Для первой максимум амплитуды совпадает с направлением, перпендикулярным оптической оси волокна. Угловое распределение второй компоненты носит более равномерный в угловом пространстве характер. Эффективность удаления тканей катарактального хрусталика глаза человека микросекундными импульсами лазера на иттербий-эрбиевом стекле увеличивается с ростом пиковой мощности «лидирующего» пика и коррелирует с величиной перепада давления в жидкости.

Литература

1. Федоров С.Н., Копеева В.Г., Андреев Ю.В., Богдалова Э.Г., Беликов А.В. Техника лазерной экстракции катаракты // Офтальмохирургия. 1999. № 1. С. 3–12.
2. Копеева В.Г., Андреев Ю.В. Лазерная экстракция катаракты. М.: Офтальмология, 2011, 262 с.
3. Беликов А.В., Гагарский С.В., Губин А.Б., Вайнер С.Я., Сергеев А.Н., Смирнов С.Н. Субжоульный лазер на иттербий-эрбиевом стекле с диодной накачкой и модуляцией полезных потерь резонатора для экстракции катаракты // Научно-технический вестник информационных технологий, механики и оптики. 2015. Т. 15. № 6. С. 1021–1029. doi: 10.17586/2226-1494-2015-15-6-1021-1029
4. Hale G.M., Querry M.R. Optical constants of water in the 200-nm to 200- μ m wavelength region // Applied Optics. 1973. V. 12. N 3. P. 555–563. doi: 10.1364/AO.12.000555
5. Беликов А.В., Гагарский С.В., Сергеев А.Н., Смирнов С.Н. Исследование гидродинамических процессов в жидкости

References

1. Fedorov S.N., Kopeeva V.G., Andreev Yu.V., Bogdalova E.G., Belikov A.V. Laser technology of cataract extraction. *Oftalmokhirurgiya*, 1999, no. 1, pp. 3–12. (in Russian)
2. Kopeeva V.G., Andreev Yu.V. *Laser Extraction of a Cataract*. Moscow, Ophthalmologiya Publ., 2011, 262 p. (in Russian)
3. Belikov A.V., Gagarsky S.V., Gubin A.B., Weiner S.Ya., Sergeev A.N., Smirnov S.N. Subjoule diode-pumped ytterbiumerbium glass laser with cavity dumping for cataract extraction. *Scientific and Technical Journal of Information Technologies, Mechanics and Optics*, 2015, vol. 15, no. 6, pp. 1021–1029. doi: 10.17586/2226-1494-2015-15-6-1021-1029
4. Hale G.M., Querry M.R. Optical constants of water in the 200-nm to 200- μ m wavelength region. *Applied Optics*, 1973, vol. 12, no. 3, pp. 555–563. doi: 10.1364/AO.12.000555
5. Belikov A.V., Gagarsky S.V., Sergeev A.N., Smirnov S.N. Study of hydrodynamic processes in liquids under the influence of powerful microsecond Yb,Er:Glass laser pulses. *Journal of*

- при воздействии мощных микросекундных импульсов Yb:Er:Glass-лазера // Изв. вузов. Приборостроение. 2017. Т. 60. № 4. С. 367–374. doi: 10.17586/0021-3454-2017-60-4-367-374
6. Jansen E.D., Asshauer T., Frenz M., Motamedi M., Delacretaz G., Welch A.J. Effect of pulse duration on bubble formation and laser-induced pressure waves during holmium laser ablation // *Lasers in Surgery and Medicine*. 1996. V. 18. N 3. P. 278–293. doi: 10.1002/(SICI)1096-9101(1996)18:3<278::AID-LSM10>3.0.CO;2-2
 7. Frenz M., Pratisto H., Konz F., Jansen E.D., Welch A.J., Weber H.P. Comparison of the effects of absorption coefficient and pulse duration of 2.12- μm and 2.79- μm radiation on laser ablation of tissue // *IEEE Journal of Quantum Electronics*. 1996. V. 32. N 12. P. 2025–2036. doi: 10.1109/3.544746
 8. Bufetova G.A., Nikolaev D.A., Seregin V.F., Shcherbakov I.A., Tsvetkov V.B. Long pulse lasing with Q-switching by FTIR shutter // *Laser Physics*. 1999. V. 9. N 1. P. 314–318.
 9. Денкер Б.И., Осико В.В., Сверчков С.Е., Сверчков Ю.Е., Фелелов А.П., Хоменко С.И. Высокоэффективные лазеры на эрбиевом стекле с модуляцией добротности затвором на основе нарушенного полного внутреннего отражения // *Квантовая электроника*. 1992. Т. 19. № 6. С. 544–547.
 10. Buratto L., Apple D.J., Zanini M. *Phacoemulsification: Principles and Techniques*. 2nd ed. SLACK Incorporated, 2003. 754 p.
 11. Беликов А.В., Гагарский С.В., Загорулько А.М., Сергеев А.Н., Смирнов С.Н. Формообразование парогазовой полости при лазерной гидроакустической обработке биоткани в жидкости микросекундными импульсами излучения // Изв. вузов. Приборостроение. 2018. (в печати)
 12. Frenz M., Paltauf G., Schmidt-Kloiber H. Laser-generated cavitation in absorbing liquid induced by acoustic diffraction // *Physical Review Letters*. 1996. V. 76. N 19. P. 3546–3549. doi: 10.1103/PhysRevLett.76.3546
 13. Paltauf G., Schmidt-Kloiber H., Frenz M. Photoacoustic waves excited in liquids by fiber-transmitted laser pulses // *Journal of the Acoustical Society of America*. 1998. V. 104. N 2. P. 890–897. doi: 10.1121/1.423334
 14. Lu T., Li Z.J. Underwater holmium-laser-pulse-induced complete cavitation bubble movements and acoustic transients // *Chinese Science Bulletin*. 2011. V. 56. N 12. P. 1226–1229. doi: 10.1007/s11434-011-4367-5
 15. Lauterborn W., Kurz T., Geisler R., Schanz D., Lindau O. Acoustic cavitation, bubble dynamics and sonoluminescence // *Ultrasonics Sonochemistry*. 2007. V. 14. N 4. P. 484–491. doi: 10.1016/j.ultsonch.2006.09.017
 16. Duck F.A. *Physical Properties of Tissues: A Comprehensive Reference Book*. London: Academic Press, 2013. 346 p.

Авторы

Беликов Андрей Вячеславович – доктор физико-математических наук, профессор, профессор, Университет ИТМО, Санкт-Петербург, 197101, Российская Федерация, Scopus ID: 7005600018, ORCID ID: 0000-0001-8733-486, meddv@grv.ifmo.ru

Гагарский Сергей Валерьевич – кандидат физико-математических наук, ведущий инженер, Университет ИТМО, Санкт-Петербург, 197101, Российская Федерация, Scopus ID: 49561181400, ORCID ID: 0000-0003-1061-5415, s.gagarsky@mail.ru

Сергеев Андрей Николаевич – кандидат технических наук, ассистент, Университет ИТМО, Санкт-Петербург, 197101, Российская Федерация, Scopus ID: 7201446540, ORCID ID: 0000-0002-2002-9228, mg_phoenix@yahoo.com

Смирнов Сергей Николаевич – аспирант, Университет ИТМО, Санкт-Петербург, 197101, Российская Федерация, Scopus ID: 7202271405, ORCID ID: 0000-0003-1891-9122, s.n.smirnov@inbox.ru

Загорулько Алексей Михайлович – кандидат медицинских наук, доктор экономических наук, заместитель директора по лечебной работе, Санкт-Петербургский филиал МНТК «Микрохирургия глаза» им. академика С.Н. Фёдорова, Санкт-Петербург, 192283, Российская Федерация, ORCID ID : 0000-0001-6118-6521, vigna@mntk.spb.ru

Authors

Andrey V. Belikov – D.Sc., Full Professor, ITMO University, Saint Petersburg, 197101, Russian Federation, Scopus ID: 7005600018, ORCID ID: 0000-0001-8733-486, meddv@grv.ifmo.ru

Sergey V. Gagarsky – PhD, leading engineer, ITMO University, Saint Petersburg, 197101, Russian Federation, Scopus ID: 49561181400, ORCID ID: 0000-0003-1061-5415, s.gagarsky@mail.ru

Andrey N. Sergeev – PhD, Assistant, ITMO University, Saint Petersburg, 197101, Russian Federation, Scopus ID: 7201446540, ORCID ID: 0000-0002-2002-9228, mg_phoenix@yahoo.com

Sergey N. Smirnov – postgraduate, ITMO University, Saint Petersburg, 197101, Russian Federation, Scopus ID: 7202271405, ORCID ID: 0000-0003-1891-9122, s.n.smirnov@inbox.ru

Alexey M. Zagorulko – MD, D.Sc., Medical Director, St. Petersburg Branch of S. Fyodorov Eye Microsurgery Federal State Institution, Saint Petersburg, 192283, Russian Federation, ORCID ID : 0000-0001-6118-6521, vigna@mntk.spb.ru