

ИССЛЕДОВАНИЕ ГИДРОДИНАМИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ В ЖИДКОСТИ ПРИ ВОЗДЕЙСТВИИ МОЩНЫХ МИКРОСЕКУНДНЫХ ИМПУЛЬСОВ Yb,Er:GLASS-ЛАЗЕРА

А. В. БЕЛИКОВ, С. В. ГАГАРСКИЙ, А. Н. СЕРГЕЕВ, С. Н. СМИРНОВ

*Университет ИТМО, 197101, Санкт-Петербург, Россия
E-mail: s.n.smirnov@niuitmo.ru*

Представлены результаты исследования гидродинамических процессов, возбуждаемых в жидкости импульсами излучения Yb,Er:Glass-лазера с длиной волны 1,54 мкм, энергией 100 ± 5 мДж и длительностью в единицы микросекунд. С целью получения объективного и полного представления о возбуждаемых в жидкости под воздействием лазерного излучения процессах в исследовании использовались методы регистрации акустического сигнала, оптического зондирования и высокоскоростной видеосъемки. Установлена корреляция между полученными с помощью этих методов данными. Анализ полученных изображений и осциллограмм показал, что импульсы лазерного излучения, доставленные в физиологический раствор через кварц-кварцевое оптическое волокно с диаметром сердцевины 470 мкм, возбуждают в растворе термоупругие волны, а также вызывают образование парогазовой полости (пузыря). Установлено, что изменение оптических свойств жидкости под воздействием излучения Yb,Er:Glass-лазера связано в основном с образованием пузыря. Показано, что стадия роста парогазовой полости начинается через 5—10 мкс после начала адиабатического воздействия лазерного импульса. Полость достигает максимального размера (3 мм в диаметре) спустя в среднем 140 мкс, а затем схлопывается до критического размера (около 0,5 мм) за 120 мкс и отделяется от поверхности торца оптического волокна. Полученные данные могут быть полезны при оптимизации временных и энергетических параметров лазерного излучения для задач лазерной обработки погруженных в жидкость объектов, в том числе при эффективном и безопасном воздействии на биологические объекты.

Ключевые слова: *Yb,Er:Glass-лазер, микросекундные импульсы, гидродинамика, оптическое зондирование, акустический сигнал, высокоскоростная видеосъемка*

Введение. Излучение лазеров ближнего и среднего инфракрасного диапазона широко используется в науке, технике и медицине [1, 2]. Развитие лазеров стимулирует проведение новых исследований, позволяющих лучше понять особенности взаимодействия лазерного излучения с веществом, в том числе с биотканями, биологическими жидкостями и водой как основным компонентом мягких биотканей [2].

Воздействие интенсивного лазерного излучения ближнего и среднего инфракрасного диапазона длин волн на мягкие биоткани и биологические жидкости в ряде случаев вызывает генерацию акустических волн и гидродинамические процессы, что может приводить к разрушению тканей [3], стимулировать вынос продуктов разрушения из зоны обработки, влиять на эффективность разрушения, например, за счет формирования парогазовой полости, изменяющей строение и оптические свойства среды в зоне обработки [4] и т.д.

Особый интерес представляют лазеры с длиной волны 1,4—1,8 мкм, этот диапазон принято называть безопасным для глаз [5]. Излучение этих лазеров эффективно поглощается водой и в основном используется в дальнометрии [5] и офтальмологии [6—10]. В дальнометрии нашли применение лазеры, работающие в режиме модуляции добротности, излучающие короткие лазерные импульсы (от единиц до десятков наносекунд) [11]. В офтальмологии

излучение с длиной волны около 1,44 мкм (Nd:YAG-лазер, генерация на переходе ${}^4F_{3/2} \rightarrow {}^4I_{13/2}$) успешно применяется в малоинвазивной хирургии катаракты для фрагментации катарактальных хрусталиков [6, 7], а излучение с длиной волны 1,54 мкм (Yb,Er:Glass-лазер) — в рефракционной лазерной кератопластике, а также в лечении инфекционных, грибковых, дистрофических и опухолевых заболеваний наружных отделов глаза [8]. Эти лазеры, как правило, работают в режиме свободной генерации (длительность импульса от сотен микросекунд до единиц миллисекунд). Лазерное излучение безопасного для глаз спектрального диапазона с импульсами длительностью в единицы микросекунд не нашло широкого применения.

Nd:YAG-лазер ($\lambda=1,44$ мкм) с ламповой накачкой, используемый в комплексе для лазерной экстракции катаракт „РАКОТ“, работает в режиме свободной генерации [6, 7]. Длительность импульса излучения этого лазера ~ 200 мкс, энергия в импульсе — порядка 200 мДж (импульсная мощность ~ 1 кВт), частота повторения импульсов — до 30 Гц. Для доставки излучения используется кварц-кварцевое волокно с диаметром световедущей жилы 440 ± 20 мкм. Малое значение сечения усиления на штарковских подуровнях неосновного лазерного перехода ${}^4F_{3/2} \rightarrow {}^4I_{13/2}$ ионов неодима [12] определяет необходимость использования источника питания ламповой накачки с высокой (до нескольких киловатт) средней мощностью. Высокое энергопотребление и мощная система охлаждения комплекса „РАКОТ“ обуславливают его значительные габариты и вес [13]. Очевидно, что одним из направлений дальнейшего развития аппаратуры этого класса является создание малогабаритных мобильных комплексов на базе твердотельных лазеров с диодной накачкой.

В качестве альтернативы Nd:YAG-лазера возможно использовать для экстракции катаракт излучение Yb,Er:Glass-лазера с диодной накачкой. Лазерная среда Yb,Er:Glass позволяет получить прямую генерацию на длине волны 1,54 мкм, которая находится в пределах линии резонансного поглощения воды (максимум в области 1,45 мкм) [14]. Для получения больших энергий импульсов генерации лазеров на основе этой среды не требуется высокая мощность лазерных диодов из-за большого времени жизни верхнего лазерного уровня рабочих ионов Er^{3+} (около 8,5 мс) [15].

В работе [10] продемонстрирована возможность получения на Yb,Er:Glass-лазере импульсов длительностью 0,2—5 мкс с энергией до 100 мДж при эффективной частоте их повторения свыше 60 Гц. При этом максимальная пиковая мощность импульсов достигала 100 кВт.

Показатель поглощения воды на длине волны 1,54 мкм составляет около 11 см^{-1} , что практически втрое меньше показателя поглощения на длине волны 1,44 мкм [14]. Фрагментация катарактальных хрусталиков с использованием лазеров с длиной волны 1,44—1,54 мкм происходит за счет эффективного поглощения излучения в объеме хрусталика, что приводит к генерации акустических волн и разрушению. Проведенные ранее исследования взаимодействия с биологическими жидкостями импульсного излучения лазеров Nd:YAG ($\lambda=2,12$ мкм) [16—19] и Er:YSGG ($\lambda=2,79$ мкм) [19], работающих в режиме свободной генерации и в режиме модуляции добротности, показали, что параметры лазерно-индуцированных гидродинамических процессов сильно зависят от объемной плотности вложенной энергии и длительности лазерных импульсов.

Гидродинамические процессы, сопровождающие воздействие на биологические ткани и жидкости мощных микросекундных импульсов лазерного излучения с длиной волны 1,54 мкм, освещены в литературе недостаточно полно. Между тем эти процессы могут оказывать значительное влияние на эффективность лазерного разрушения биотканей [3, 4]. В работе [10] возмущения, возникающие в физиологическом растворе при воздействии мощных импульсов излучения Yb,Er:Glass-лазера микросекундной длительности, исследованы только методом регистрации акустического сигнала. Характерный вид осциллограммы сигнала, зарегистрированного гидрофоном, позволил авторам настоящей работы сделать предположение о воз-

буждении термоупругой волны расширения и кавитации, а также оценить временную динамику этих лазерно-индуцированных процессов. Однако использованный в работе [10] метод не позволяет достоверно определить размеры образующейся области возмущения (область с измененными оптическими свойствами), поскольку акустический отклик не несет информации о форме этой области. Для оценки размеров парогазовой полости сферической формы можно воспользоваться уравнением Рэлея [20], устанавливающим связь между временем схлопывания полости и ее максимальным радиусом. Очевидно, что для оптимизации лазерного воздействия на биоткани, находящиеся в водной среде, необходима точная информация о динамике размеров области возмущения.

В последнее время кроме регистрации акустического сигнала для детектирования сопровождающих лазерное воздействие процессов довольно часто применяются метод высокоскоростной видеосъемки [3, 21, 22] и метод оптического зондирования (beam-deflection probe) [23—26]. Для получения наиболее широкого представления о возбуждаемых лазерным излучением процессах в биологических тканях и жидкостях целесообразно совместное использование этих трех методов.

Цель настоящей работы — исследование временных и пространственных характеристик гидродинамических процессов в жидкости (физраствор), индуцируемых микросекундными импульсами излучения Yb,Er:Glass-лазера ($\lambda=1,54$ мкм) с энергией около 100 мДж, при помощи трех независимых методов: регистрации акустического сигнала, высокоскоростной видеосъемки и оптического зондирования.

Материалы и методы. Схема экспериментального стенда представлена на рис. 1 (*a* — схема стенда для регистрации акустического сигнала и оптического зондирования, *б* — для высокоскоростной видеосъемки). Цифрами обозначены: 1 — Yb,Er:Glass-лазер ($\lambda=1,54$ мкм); 2 — оптическое волокно; 3 — кювета с жидкостью; 4 — гидрофон (Dapco, Inc., США); 5 — фотоприемник (Ge); 6 — осциллограф TDS2022B (Tektronix, США); 7 — блок питания лазерного диода; 8 — непрерывный лазерный диод ($\lambda=450$ нм) с линзой; 9 — фотоприемник (Si) DET210 (Thorlabs, Inc., США); 10 — осветитель DCR III (Schott, Германия); 11 — волоконный жгут осветителя; 12 — ноутбук; 13 — высокоскоростная камера FASTCAM SA4 RV (Photron, Япония); 14 — генератор импульсов Г5-63 (СССР).

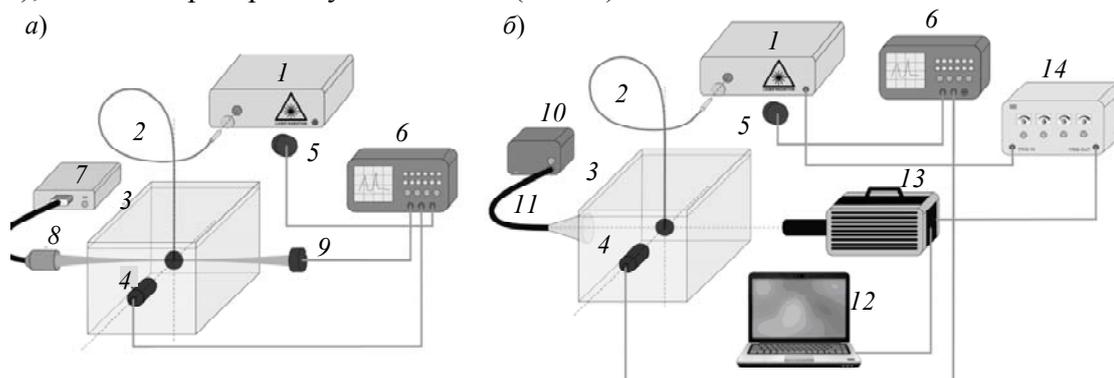


Рис. 1

В качестве источника высокоинтенсивного лазерного излучения использовался Yb,Er:Glass-лазер ($\lambda=1,54$ мкм). Резонатор лазера был образован тремя „глухими“ зеркалами. Лазер работал в режиме модуляции полезных потерь НПВО-затвором, через который осуществлялся вывод излучения из резонатора [27, 28]. Трехзеркальная конфигурация резонатора и специально разработанный пьезодрайвер позволяли изменять длительность лазерного импульса в диапазоне от сотен наносекунд до единиц микросекунд. Лазер генерировал импульсы излучения длительностью 3—4 мкс (рис. 2) и энергией 100 ± 10 мДж. Излучение доставлялось в объем жидкости на глубину 15 ± 1 мм через кварц-кварцевое оптическое волокно с

диаметром световедущей жилы 470 ± 5 мкм (числовая апертура $NA=0,18$). В экспериментах жидкость имела температуру 21 ± 3 °С. Мощность в импульсе лазерного излучения достигала 100 ± 10 кВт, а пиковая интенсивность в области взаимодействия — 100 МВт/см², при этом образование плазмы вблизи дистального торца волокна, погруженного в жидкость, не наблюдалось.

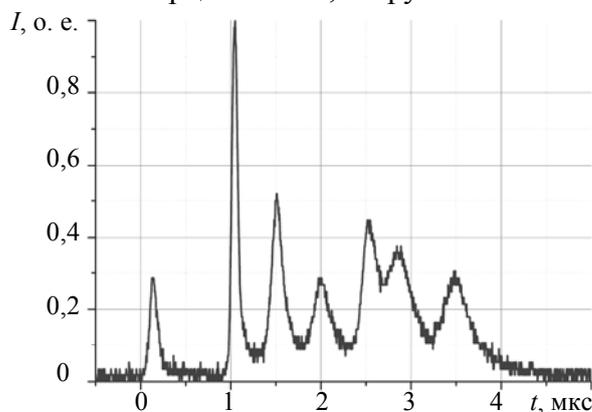


Рис. 2

Для регистрации сопровождающего лазерное воздействие акустического сигнала был использован PVDF гидрофон с шириной полосы 5 МГц и диаметром приемной площадки 14 мм. Акустический сигнал регистрировался на расстоянии $9,2 \pm 0,1$ мм от дистального торца волокна.

Работу видеокамеры и лазера синхронизировал генератор импульсов Г5-63, который запускался управляющим сигналом НПВО-затвора с пьезодрайвера. В эксперименте видеосъемка производилась со скоростью 10^5 с⁻¹.

Область вблизи дистального торца оптического волокна зондировалась пучком излучения непрерывного диодного лазера ($\lambda=450$ нм) при его сканировании с шагом $0,2 \pm 0,05$ мм в плоскости, перпендикулярной плоскости, проходящей через ось оптического волокна. Зондирующее излучение регистрировалось кремниевым фотоприемником Thorlabs DET210 с шириной полосы 350 МГц, подключенным через нагрузку 50 Ом к осциллографу Tektronix TDS2022B. Перед фотоприемником был установлен рассеиватель (матовое стекло). Изменение оптического сигнала свидетельствовало об изменении оптических свойств жидкости на пути распространения зондирующего излучения. Для каждой точки массива сканирования оптический сигнал усреднялся по 16 измерениям.

Результаты и обсуждение. Характерный вид осциллограмм, полученных в эксперименте по оптическому зондированию области вблизи дистального торца оптического волокна в жидкости с одновременной регистрацией акустического отклика, представлен на рис. 3.

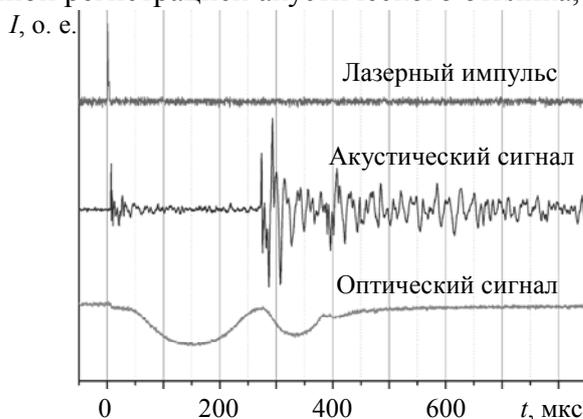


Рис. 3

Видна корреляция между акустическим и оптическим сигналом. Стоит отметить, что длительность лазерного импульса меньше характерного времени изучаемых процессов. Акустический сигнал имеет две составляющие: первая соответствует термоупругой волне расши-

рения, возникающей в момент воздействия лазерного импульса, вторая может быть связана со схлопыванием кавитационной полости после лазерного воздействия.

Видно, что регистрируемый оптический сигнал изменяется во времени. Так, невозмущенному состоянию соответствует уровень начального пропускания зондирующего излучения. После лазерного воздействия амплитуда регистрируемого оптического сигнала изменяется, что может быть связано с изменением оптических свойств жидкости на пути распространения зондирующего излучения (с изменением показателя преломления вследствие распространения волны давления или динамикой парагазового пузыря). Этот процесс может повторяться несколько раз. Пространственные распределения коэффициента ослабления зондирующего оптического излучения ($\lambda=450$ нм) вблизи дистального торца оптического волокна, погруженного в жидкость, в различные моменты времени после начала лазерного воздействия ($\lambda=1,54$ мкм) представлены на рис. 4, а. Результаты представлены в градациях серого, большему ослаблению соответствует более темный оттенок (9 % черного — невозмущенное состояние, 86 % — максимальное ослабление, достигнутое в экспериментах). При обработке данных, полученных в эксперименте, величина коэффициента ослабления излучения A в каждой точке определялась согласно следующей формуле:

$$A(t) = 1 - U_n(t), \quad U_n(t) = \frac{U(t) - U_{\min}}{U_{\max} - U_{\min}},$$

где t — время, U_n — нормированная от 0 до 1 величина напряжения сигнала с осциллографа, U_{\max} — напряжение до лазерного воздействия (начальное пропускание), U_{\min} — минимальная по всем исследуемым точкам величина напряжения, соответствующая возмущенному состоянию жидкости (минимальное пропускание).

Кадры высокоскоростной видеосъемки области вблизи дистального торца оптического волокна, погруженного в жидкость, в различные моменты времени после начала лазерного воздействия ($\lambda=1,54$ мкм) представлены на рис. 4, б.

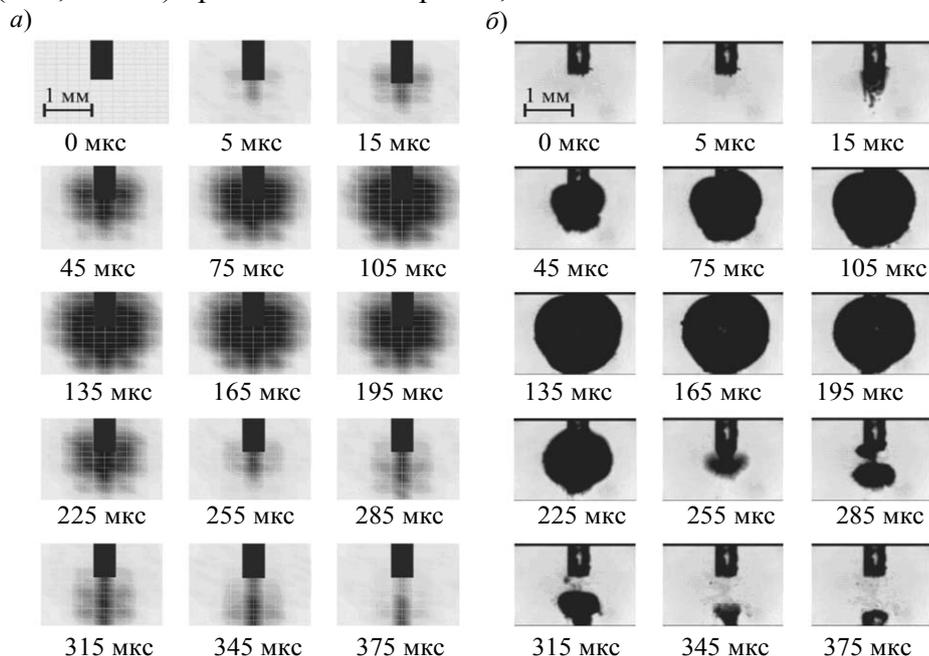


Рис. 4

Проанализировав полученные данные, можно сделать вывод, что наблюдаемое изменение оптических свойств жидкости в результате воздействия импульсов излучения Yb,Er:Glass-лазера с энергией около 100 мДж и длительностью в единицы микросекунд связано в основном с образованием парагазовых пузырей. Стадия роста парагазовой полости (парагазового пузыря) начинается через 5—10 мкс после начала адиабатического лазерного облучения. Пузырь

достигает максимального размера (3 мм) в среднем на 140-й мкс от начала лазерного импульса. Затем он схлопывается до критического размера (около 0,5 мм) за 120 мкс и отделяется от поверхности торца волокна. При этом в непосредственной близости от дистального торца волокна можно наблюдать облако мелких пузырей и мощный поток жидкости в направлении поверхности торца. Затем на расстоянии, сравнимом с диаметром волокна, появляется новый пузырь. Повторные фазы расширения-схлопывания заканчиваются примерно через 450 мкс после лазерного воздействия.

Максимальный перепад давления $0,6 \pm 0,05$ МПа (peak-to-peak) соответствовал моменту схлопывания парогазовой полости на расстоянии $9,2 \pm 0,1$ мм от эпицентра схлопывания при воздействии микросекундным лазерным импульсом с энергией около 100 мДж. С учетом обратно пропорционального расстоянию ($1/r$) затухания сферической волны в дальней акустической зоне [16, 17, 29] значение перепада давления на расстоянии 200 мкм от эпицентра схлопывания будет равно $27,6 \pm 2,3$ МПа.

Следует отметить, что образующаяся парогазовая полость представляет собой область с меньшим по сравнению с невозмущенной жидкостью коэффициентом поглощения на длине волны излучения возбуждающего лазера [18]. В этой связи в течение времени жизни полости возможна доставка излучения с меньшими, чем в случае невозмущенной жидкости, потерями. Возникающие в момент действия лазерного импульса и при схлопывании парогазовой полости акустические волны создают возможность очищения области воздействия от продуктов разрушения, что может способствовать повышению эффективности и производительности разрушения погруженного в жидкость биоматериала, например, катарактального хрусталика глаза.

Таким образом, показано, что использование трех методов — оптического зондирования, регистрации акустического отклика и высокоскоростной видеосъемки — позволяет получить объективное представление о процессах в жидкости, возникающих в результате воздействия лазерного излучения. Полученные данные могут быть использованы при оптимизации параметров лазерных источников для эффективной и безопасной обработки находящихся в жидкой среде биологических объектов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Handbook of Laser Technology and Applications (Three-Volume Set) / Ed. by C. E. Webb, J. D. C. Jones. IOP Publishing, 2004. 2752 p.
2. Niemz M. H. Laser-Tissue Interactions. Fundamentals and Applications. Springer, 2007. 316 p. DOI: 10.1007/978-3-540-72192-5.
3. Vogel A., Schmidt P., Flucke B. Minimization of thermo-mechanical side effects and increase of ablation efficiency in IR ablation by use of multiply Q-switched laser pulses // Proc. SPIE. 2002. Vol. 4617. DOI: 10.1117/12.472512.
4. Zhang X., Chen C., Chen F. et al. In vitro investigation on Ho:YAG laser-assisted bone ablation underwater // Lasers Med. Sci. 2016. Vol. 31, Iss. 5. P. 891—898. DOI: 10.1007/s10103-016-1931-x.
5. Hecht J. Photonics Frontiers: Eye-Safe Lasers – Retina-safe wavelengths benefit open-air applications // LaserFocusWorld. March 1, 2008.
6. Федоров С. Н., Конаева В. Г., Андреев Ю. В., Богдалова Э. Г., Беликов А. В. Техника лазерной экстракции катаракты // Офтальмохирургия. 1999. № 1. С. 3—12.
7. Конаева В. Г., Андреев Ю. В. Лазерная экстракция катаракты. М.: Офтальмология, 2011. 262 с.
8. Гацу А. Ф. Инфракрасные лазеры (1—3 мкм) в хирургии наружных отделов глаза: автореф. дис. ... док. мед. наук. СПб, 1995.
9. Agarwal S., Agarwal A., Apple D. J. Textbook of Ophthalmology. Vol. 1. Jaypee Brothers Publishers, 2002. 3086 p. DOI: 10.5005/jp/books/10931.

10. Беликов А. В., Гагарский С. В., Губин А. Б., Вайнер С. Я., Сергеев А. Н., Смирнов С. Н. Субджоульный лазер на иттербий-эрбиевом стекле с диодной накачкой и модуляцией полезных потерь резонатора для экстракции катаракты // Науч.-техн. вестн. информационных технологий, механики и оптики. 2015. Т. 15, № 6. С. 1021—1029. DOI: 10.17586/2226-1494-2015-15-6-1021-1029.
11. Chen Y. F., Chen S. W., Tsai S. W., Lan Y. P. High-repetition-rate eye-safe optical parametric oscillator intracavity pumped by a diode-pumped Q-switched Nd:YVO₄ laser // Applied Physics B. 2003. Vol. 76, Iss. 3. P. 263—266. DOI: 10.1007/s00340-002-1086-2.
12. Hodgson N., Nighan W. L., Golding D. J., Eisel D. Efficient 100-W Nd:YAG laser operating at a wavelength of 1.444 μm // Optics Letters. 1994. Vol. 19, N 17. P. 1328—1330. DOI: 10.1364/OL.19.001328.
13. Комплекс для лазерной экстракции катаракт ПАКОТ-6М [Электронный ресурс]: <<http://ucmg.ru/kompleks-dlya-lazemoy-ekstraksii-katarakt-rakot-6m.html>>.
14. Hale G. M., Querry M. R. Optical Constants of Water in the 200-nm to 200-μm Wavelength Region // Appl. Opt. 1973. Vol. 12, N 3. P. 555—563. DOI: 10.1364/AO.12.000555.
15. Karlsson G., Laurell F., Tellefsen J., Denker B., Galagan B., Osiko V., Sverchkov S. Development and characterization of Yb-Er laser glass for high average power laser diode pumping // Appl. Phys. B. 2002. Vol. 75, Iss. 1. P. 41—46. DOI: 10.1007/s00340-002-0950-4.
16. 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. Vol. 18, Iss. 3. P. 278—293. DOI: 10.1002/(SICI)1096-9101(1996)18:3<278::AID-LSM10>3.0.CO;2-2.
17. Lu T., Li Z. J. Underwater holmium-laser-pulse-induced complete cavitation bubble movements and acoustic transients // Chinese Sci Bull. 2011. Vol. 56, N 12. P. 1226—1229. DOI: 10.1007/s11434-011-4367-5.
18. Stock K., Steigenhofer D., Pongratz T., Graser R., Sroka R. Investigation on cavitation bubble dynamics induced by clinically available Ho:YAG lasers // Photonics & Lasers in Medicine. 2016. Vol. 5, Iss. 2. P. 141—150. DOI: 10.1515/plm-2015-0039.
19. Frenz M., Pratisto H., Konz F., Jansen E. D. 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 J. of Quantum Electronics. 1996. Vol. 32, Iss. 12. P. 2025—2036. DOI: 10.1109/3.544746.
20. Lord Rayleigh. On the pressure developed in a liquid during the collapse of a spherical cavity // Philosoph. Magazine Ser. 6. 1917. Vol. 34, Iss. 200. P. 94—98. DOI: 10.1080/14786440808635681.
21. Blanken J., De Moor R. J., Meire M., Verdaasdonk R. Laser Induced Explosive Vapor and Cavitation Resulting in Effective Irrigation of the Root Canal. Part 1: A Visualization Study // Lasers in Surgery and Medicine. 2009. Vol. 41, Iss. 7. P. 514—519. DOI: 10.1002/lsm.20798.
22. Sugimoto Y., Yamanishi Y., Sato K., Moriyama M. Measurement of Bubble Behavior and Impact on Solid Wall Induced by Fiber-Holmium:YAG Laser // J. of Flow Control, Measurement & Visualization. 2015. Vol. 3, N 4. P. 135—143. DOI: 10.4236/jfcmv.2015.34013.
23. Vogel A., Lauterborn W., Timm R. Optical and acoustic investigations of the dynamics of laser-produced cavitation bubbles near a solid boundary // J. Fluid Mech. 1989. Vol. 206. P. 299—338. DOI: 10.1017/S0022112089002314.
24. Petkovsek R., Mozina J., Mocnik G. Optodynamic characterization of shock waves after laser-induced breakdown in water // Opt. Express. 2005. Vol. 13, N 11. P. 4107—4112. DOI: 10.1364/OPEX.13.004107.
25. Petkovsek R., Gregorcic P., Mozina J. A beam-deflection probe as a method for optodynamic measurements of cavitation bubble oscillations // Meas. Sci. Technol. 2007. Vol. 18, N 9. P. 2972—2978. DOI: 10.1088/0957-0233/18/9/030.
26. Petkovška R., Gregorčič P. A laser probe measurement of cavitation bubble dynamics improved by shock wave detection and compared to shadow photography // J. Appl. Phys. 2007. Vol. 102, Iss. 4. P. 044909. DOI: 10.1063/1.2774000.
27. Bufetova G. A., Nikolaev D. A., Seregin V. F. et al. Long pulse lasing with Q-switching by FTIR shutter // Laser Physics. 1999. Vol. 9, N 1. P. 314—318.
28. Денкер Б. И., Осико В. В., Свэрчков С. Е. и др. Высокоэффективные лазеры на эрбиевом стекле с модуляцией добротности затвором на основе нарушенного полного внутреннего отражения // Квантовая электроника. 1992. Т. 19, № 6. С. 544—547.

29. Frenz M., Könz F., Pratisto H., Weber H. P., Silenok A. S., Konov V. I. Starting mechanisms and dynamics of bubble formation induced by a Ho:Yttrium aluminum garnet laser in water // J. Appl. Phys. 1998. Vol. 84. P. 5905—5913. DOI: 10.1063/1.368906.

Сведения об авторах

- Андрей Вячеславович Беликов** — д-р техн. наук, профессор; Университет ИТМО; кафедра лазерных технологий и систем; E-mail: meddv@grv.ifmo.ru
- Сергей Валерьевич Гагарский** — канд. физ.-мат. наук; Университет ИТМО; кафедра лазерных технологий и систем; E-mail: s.gagarsky@mail.ru
- Андрей Николаевич Сергеев** — канд. техн. наук; Университет ИТМО; кафедра лазерных технологий и систем; E-mail: mg_phoenix@yahoo.com
- Сергей Николаевич Смирнов** — аспирант; Университет ИТМО; кафедра лазерных технологий и систем; E-mail: s.n.smirnov@niuitmo.ru

Рекомендована кафедрой
лазерных технологий и систем

Поступила в редакцию
18.10.16 г.

Ссылка для цитирования: Беликов А. В., Гагарский С. В., Сергеев А. Н., Смирнов С. Н. Исследование гидродинамических процессов в жидкости при воздействии мощных микросекундных импульсов Yb,Er:Glass-лазера // Изв. вузов. Приборостроение. 2017. Т. 60, № 4. С. 367—374.

STUDY OF HYDRODYNAMIC PROCESSES IN LIQUIDS UNDER THE INFLUENCE OF POWERFUL MICROSECOND YB,ER:GLASS LASER PULSES

A. V. Belikov, S. V. Gagarsky, A. N. Sergeev, S. N. Smirnov

ITMO University, 197101, St. Petersburg, Russia
E-mail: s.n.smirnov@niuitmo.ru

Results of the study of hydrodynamic processes induced in liquid by the Yb,Er:Glass (wavelength of 1,54 μm) laser radiation pulses of microsecond duration with an energy of 100 ± 5 mJ are presented. The investigations carried out using three methods — acoustic signal detection, optical probing, and high-speed video recording — allow for objective and comprehensive picture of excited processes. The correlation between data obtained using these methods are established. The analysis of images and oscillograms demonstrates that the laser pulses, delivered in a bulk of saline (0,9 % sodium chloride aqueous solution) via quartz-quartz optical fiber with a core diameter of 470 μm , induce thermoelastic waves and the formation of steam-gas cavity (bubble). Dynamics of optical properties of the liquid under exposure to Yb,Er:Glass laser pulse appears to be related mostly to the bubble formation. It is shown that the build-up stage of the steam-gas cavity occurs at 5—10 μs after the beginning of adiabatic laser exposure with the energy of about 100 mJ. The cavity reaches the maximum size (up to 3 mm in diameter) at 140 μs (on average) relative to laser pulse rising edge. After that, it collapses to the critical size of 0.5 mm at about 120 μs and detaches from the fiber end surface. The presented data on the steam-gas cavity size dynamics may be useful when optimizing the temporal and energy parameters of laser radiation for laser processing of submerged objects, including effective and safe treatment of biological objects.

Keywords: Yb,Er:Glass laser, microsecond pulses, hydrodynamics, optical probing, acoustic signal, high-speed video

Data on authors

- Andrey V. Belikov** — Dr. Sci., Professor; ITMO University, Department of Laser Technologies and Systems; E-mail: meddv@grv.ifmo.ru
- Sergey V. Gagarsky** — PhD; ITMO University, Department of Laser Technologies and Systems; E-mail: s.gagarsky@mail.ru
- Andrey N. Sergeev** — PhD; ITMO University, Department of Laser Technologies and Systems; E-mail: mg_phoenix@yahoo.com
- Sergey N. Smirnov** — Post-Graduate Student; ITMO University, Department of Laser Technologies and Systems; E-mail: s.n.smirnov@niuitmo.ru

For citation: 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 Instrument Engineering. 2017. Vol. 60, N 4. P. 367—374 (in Russian).

DOI: 10.17586/0021-3454-2017-60-4-367-374