

УДК 621.373.826:535.21:616-0.89.87

СУБДЖОУЛЬНЫЙ ЛАЗЕР НА ИТТЕРБИЙ-ЭРБИЕВОМ СТЕКЛЕ С ДИОДНОЙ НАКАЧКОЙ И МОДУЛЯЦИЕЙ ПОЛЕЗНЫХ ПОТЕРЬ РЕЗОНАТОРА ДЛЯ ЭКСТРАКЦИИ КАТАРАКТЫ

А.В. Беликов^a, С.В. Гагарский^a, А.Б. Губин^b, С.Я. Вайнер^{c, d}, А.Н. Сергеев^a, С.Н. Смирнов^a

^a Университет ИТМО, Санкт-Петербург, 197101, Российская Федерация

^b ООО «Нела», Санкт-Петербург, 190005, Российская Федерация

^c ООО «Оптитаск», Нетания, 4250604, Израиль

^d Софийский университет имени святого Климента Охридского, София, 1504, Болгария

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

Информация о статье

Поступила в редакцию 01.09.15, принята к печати 23.10.15

doi:10.17586/2226-1494-2015-15-6-1021-1029

Язык статьи – русский

Ссылка для цитирования: 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.

Аннотация

Предмет исследования. Представлены результаты макетирования малогабаритного лазера с диодной накачкой. Лазер построен на основе слэбового активного элемента из иттербий-эрбиевого стекла и оптико-механического затвора на эффекте нарушения полного внутреннего отражения. Исследованы особенности воздействия генерируемых им импульсов на водосодержащие среды. Излучатель, работающий в режиме разгрузки резонатора, обеспечивает генерацию одиночных микросекундных импульсов или регулярных пакетов из этих импульсов с пиковой мощностью до 100 кВт при средней выходной мощности до 8 Вт. Лазер позволяет варьировать выходные параметры излучения в широких пределах и предназначен для использования в технологии и в биомедицинских приложениях. Рассмотрены возможности адаптации параметров излучения лазера для использования в составе компактного комплекса лазерной экстракции катаракты. **Метод.** Исследован энергетически эффективный для трехуровневой лазерной среды метод повышения частоты повторения импульсов генерации путем генерации пачек импульсов посредством нескольких срабатываний затвора на одном импульсе накачки. Проведен анализ возможности использования микросекундных лазерных импульсов с длиной волны 1,54 мкм и пиковой мощностью в десятки киловатт при обработке водосодержащих биотканей. Исследован акустический отклик от взаимодействия излучения с модельной средой. **Основные результаты.** В режиме модуляции полезных (активных) потерь резонатора на выходе излучателя получены импульсы с длительностью в единицы микросекунд и с энергией свыше 100 мДж, а также пакеты из таких импульсов с суммарной энергией до 0,5 Дж при эффективной частоте повторения импульсов свыше 60 Гц. На основе проведенных оптоакустических исследований определен минимальный допустимый интервал следования лазерных импульсов в пакете (300 мкс), отвечающий критерию безопасности проведения операции – предотвращению риска повреждения задней капсулы хрусталика лазерным излучением.

Практическая значимость. Результаты, полученные на макете иттербий-эрбиевого лазера с модуляцией полезных потерь резонатора с использованием слэбового активного элемента, являются рекордными на данный момент для излучателей с диодной накачкой, генерирующих на длине волны 1,54 мкм. Полученные в эксперименте результаты измерения акустического отклика на световое воздействие в ранее не исследованном диапазоне параметров световых импульсов полезны при оценке возможности и эффективности использования тех или иных источников излучения для обработки биоткани.

Ключевые слова

лазер на иттербий-эрбиевом стекле, диодная накачка, оптико-механический затвор на эффекте нарушения полного внутреннего отражения, катаракта, акустический отклик.

Благодарности

Авторы выражают благодарность старшему научному сотруднику отдела хирургии хрусталика и интраокулярной коррекции ФГБУ «МНТК «Микрохирургия глаза» им. акад. С.Н. Федорова Минздрава РФ С.Ю. Копаеву за предоставленные образцы катарактальных хрусталиков и обсуждение результатов.

SUBJOULE DIODE-PUMPED YTTERBIUM-ERBIUM GLASS LASER WITH CAVITY DUMPING FOR CATARACT EXTRACTION

A.V. Belikov^a, S.V. Gagarsky^a, A.B. Gubin^b, S.Ya. Weiner^{c,d}, A.N. Sergeev^a, S.N. Smirnov^a

^a ITMO University, Saint Petersburg, 197101, Russian Federation

^b NELA Ltd., Saint Petersburg, 190005, Russian Federation

^c Optitask Ltd., Netanya, 4250604, Israel

^d Sofia University "St. Kliment Ohridski", Sofia, 1504, Bulgaria

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

Article info

Received 01.09.15, accepted 23.10.15

doi:10.17586/2226-1494-2015-15-6-1021-1029

Article in Russian

For citation: Belikov A.V., Gagarsky S.V., Gubin A.B., Weiner S.Ya., Sergeev A.N., Smirnov S.N. Subjoule diode-pumped ytterbium-erbium 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.

Abstract

Subject of Study. The paper discusses the breadboarding results of compact diode pumped laser. The laser is based on Yb,Er:glass slab active element and frustrated total internal reflection (FTIR) shutter and features of the impact of generated pulses at the water-containing media. The transmitter working in cavity dumping mode provides generation of single microsecond pulses or regular trains of these pulses with peak power up to 100 kW and average output power up to 8 W. The laser allows varying output parameters of radiation in wide range and is designed for the usage in technology and biomedical applications. The possibilities of the laser radiation parameters adapting for application in a compact laser cataract extraction complex are examined. **Method.** The energy efficient for three level active medium method of lasing pulses repetition rate increasing was investigated, which comprises the generation of pulse trains by several FTIR shutter switching on one pump pulse. We carried out analysis of application possibility for microsecond laser pulses with peak power of tens of kilowatts at wavelength of 1,54 μm in the processing of water-containing tissues. The acoustic response on the interaction of radiation with a model environment was studied. **Main Results.** In the modulation mode of useful (active) losses lasing pulses have been obtained with microsecond duration and energy more than 100 mJ and trains of pulses with total energy of 0,5 J at the effective pulse repetition rate of more than 50 Hz. The minimal permissible period of laser pulses in train (300 μs) has been established experimentally on the basis of optoacoustic studies. It meets the criteria of operation noninvasiveness consisting in prevention of the risk of posterior lens capsule damage with laser radiation. **Practical Relevance.** The results obtained with the layout of diode pumped Yb,Er:glass laser with cavity dumping and slab active element are presently record for diode-pumped transmitters generating at the wavelength of 1,54 μm. The measurement results of acoustic response to the impact of light action in a previously unexplored range of light pulses parameters obtained in experiment are useful in assessing application effectiveness of various radiation sources for the treatment of biological tissue.

Keywords

Yb,Er:glass laser, diode pumping, frustrated total internal reflection (FTIR) shutter, cataract, acoustic response

Acknowledgements

The authors express their gratitude to S.Yu. Kopaev, senior researcher of the department of eye lens surgery and intraocular correction of FSBI «IRTC «Eye microsurgery» named after Academician S.N. Fedorov» of the Russian Public Health Ministry for providing samples of cataract lenses and discussion of results.

Введение

Лазерное излучение безопасного для глаз диапазона длин волн (1,4–1,8 мкм) с успехом применяется в лазерной локации, линиях передачи информации и в технологии. Благодаря высокому значению коэффициента поглощения излучения этого спектрального диапазона в средах с высоким содержанием молекул воды оно представляет большой интерес и в биомедицинских приложениях. В частности, излучение безопасного для глаз диапазона перспективно для применения в микрохирургии глаза. Так, например, в комплексах серии «РАКОТ» излучение мощного твердотельного лазера на длине волны 1,444 мкм успешно используется для удаления хрусталиков, пораженных катарактой [1–4]. Лазерная технология имеет ряд неоспоримых преимуществ перед наиболее широко распространенным методом ультразвуковой факоэмульсификации. Технология лазерной экстракции, построенная на применении фемтосекундных импульсов [5], предполагает использование дорогостоящей аппаратуры; кроме того, для удаления плотных катаракт требуется дополнительная ультразвуковая факоэмульсификация. Используемый в «РАКОТ» Nd:YAG-лазер с ламповой накачкой генерирует импульсы в режиме свободной генерации с энергией до 300 мДж, длительностью до 200 мкс и частотой повторения до 20 Гц. Низкое значение сечения усиления на штарковских подуровнях неосновного лазерного перехода $^4F_{3/2}$ - $^4I_{13/2}$ ионов неодима [6] определяет необходимость использования источника питания ламповой накачки с киловаттным уровнем средней мощности для достижения требуемых для эффективной работы выходных параметров. Высокое энергопотребление и мощная система охлаждения приводят к тому, что комплекс «РАКОТ» имеет довольно значительные габариты и вес [7], хотя по этим показателям он не уступает сложным фемтосекундным лазерным системам.

Одним из направлений дальнейшего развития аппаратуры этого класса является проектирование малогабаритных мобильных комплексов на базе твердотельных лазеров с диодной накачкой. Помимо

эффективности, повышенной надежности работы и экономической обоснованности, мобильный комплекс должен обеспечивать и высокую производительность процесса фрагментации катарактального хрусталика. Средняя мощность на выходе волокна у используемых в клинической практике излучателей с ламповой накачкой достигает 8 Вт. В соответствии со сложившимися требованиями время проведения операции средней сложности не должно превышать 2–3 мин.

С точки зрения использования диодной накачки экономически привлекательными являются лазеры на иттербий-эрбиевом стекле, так как в них возможна прямая генерация на длине волны 1,54 мкм, находящейся в пределах линии резонансного поглощения воды с максимумом в области 1445 нм. Для получения больших импульсных энергий генерации в лазерах 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).

Открытой задачей для определения возможности использования такого источника является изучение процессов, обуславливающих деструкцию хрусталиковых волокон при воздействии микросекундными импульсами излучения с длиной волны 1,54 мкм.

Коэффициент поглощения воды для излучения с длиной волны 1,54 мкм ($\mu_a \approx 12 \text{ см}^{-1}$) значительно меньше, чем для успешно применяемого в настоящее время излучения с длиной волны 1,444 мкм ($\mu_a \approx 31 \text{ см}^{-1}$). Меньший коэффициент поглощения соответствует меньшей объемной плотности поглощенной энергии, что приводит к снижению производительности деструкции материала при сравнимых энергозатратах. Возможные пути сохранения эффективности лазерного воздействия на биоткань при уменьшении коэффициента поглощения излучения в области обработки – достижение адиабатичности процесса тепловыделения в обрабатываемом объеме, а также использование дополнительных факторов для создания критического давления, достаточного для разрыва межклеточных связей в биоткани. В частности, таким дополнительным фактором может быть увеличение вклада термоупругой составляющей акустического отклика, пропорциональной мощности светового импульса. Это возможно при использовании более коротких, чем в режиме свободной генерации, лазерных импульсов. Нарращивание энергии прилаемого лазерного импульса и увеличение скорости вклада энергии вследствие уменьшения длительности импульса ограничены сверху лучевой прочностью используемого оптического волокна доставки, составляющего для рассматриваемого спектрального диапазона величину порядка 10^9 Вт/см^2 при наиболее часто используемом на практике диаметре обезвоженного кварцевого волокна 400 мкм. Учет этих обстоятельств определяет предпочтительный диапазон для энергии используемых импульсов на длине волны 1,54 мкм – около 100 мДж при длительности в единицы микросекунд.

Лазер на иттербий-эрбиевом стекле с диодной накачкой и модуляцией полезных потерь резонатора

Предварительные эксперименты по деструкции мануально экстрагированного хрусталика микросекундными импульсами на длине волны 1,54 мкм были проведены на макете излучателя, построенном на основе цилиндрических активных элементов. Энергия импульса длительностью 1–3 мкс составляла около 70 мДж при эффективной частоте повторения импульсов 30 Гц. Время деструкции хрусталика с бурой катарактой (рис. 1) с помощью этого излучателя составило 7–8 мин.

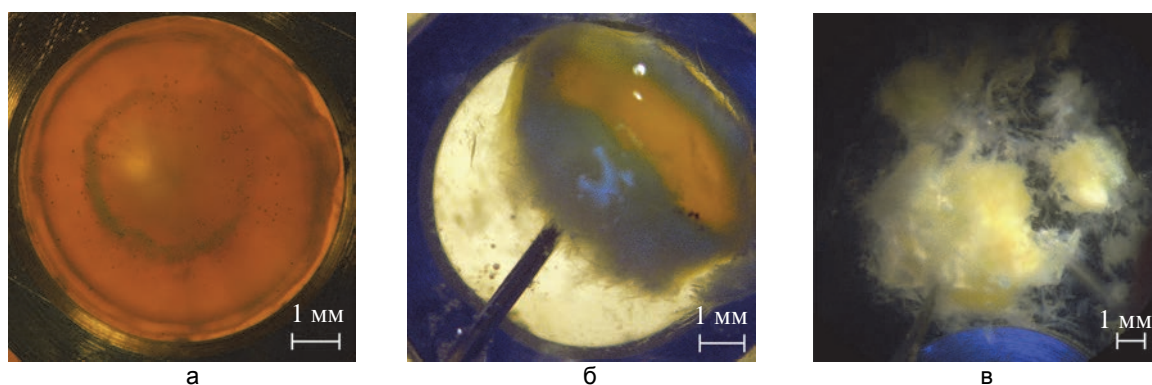


Рис. 1. Стадии лазерной деструкции экстрагированного катарактального хрусталика: стадия вскрытия капсулы (а); промежуточная стадия деструкции (б); фрагментированный хрусталик (в)

Требования современной клинической практики предполагают выполнение подобной процедуры за 2–3 мин. В связи с этим необходимо увеличение как средней мощности излучения, так и энергии отдельных импульсов.

Ключевыми элементами для построения эффективных твердотельных лазеров на основе выбранной лазерной среды являются схема построения резонатора и конфигурация ввода излучения оптической накачки в активный элемент (АЭ) с оптимизированной геометрией. Разработанный для дальнейших экс-

периментальных исследований вариант лазерного излучателя на основе разработанного квантрона с диодной накачкой схематично представлен на рис. 2.

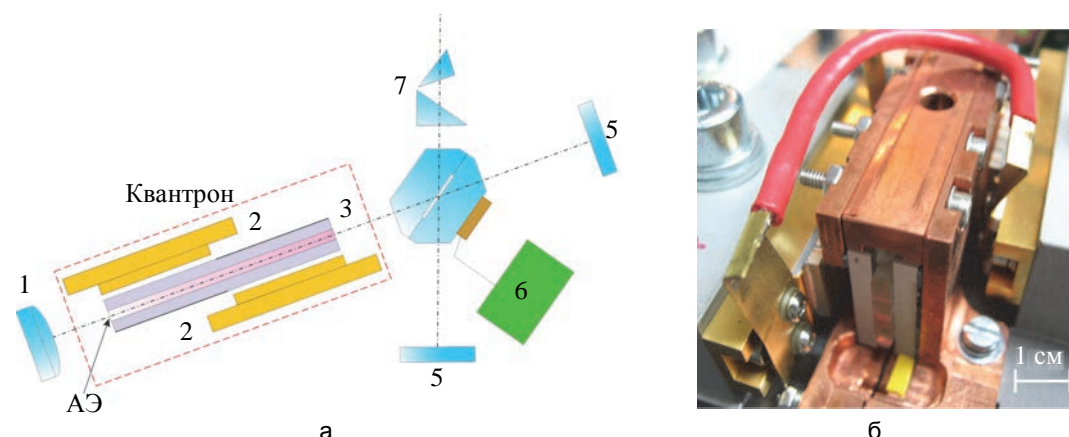


Рис. 2. Схема лазера: 1 – цилиндрическое зеркало (отражательная способность $R > 99,5\%$); 2 – диодный модуль; 3 – активный элемент между 2-х сапфировых пластинок с отражателями ($R \approx 0,97$); 4 – оптико-механический затвор на эффекте нарушения полного внутреннего отражения (НПВО); 5 – плоское зеркало ($R > 99,5\%$); 6 – драйвер НПВО-затвора; 7 – призматический телескоп (а); внешний вид квантрона с диодными модулями (б)

АЭ (иттербий-эрбиевое фосфатное стекло: $N_{Er} = 1,5 \cdot 10^{19} \text{ см}^{-3}$, $N_{Yb} = 1,6 \cdot 10^{21} \text{ см}^{-3}$) был изготовлен в виде слэба $2 \times 12 \times 42$ мм и имел антиотражающее покрытие на рабочих гранях 2×12 мм. Система накачки представляла собой два диодных модуля 2 (QD-Q5608BSS, Quantel Laser) по восемь линеек в каждом, расположенных с двух сторон. Пороговый ток для модулей этого типа составляет 15 А, максимальная мощность излучения составляет 1200 Вт при токе 150 А и допустимой длительности импульсов не более 4 мс в дежурном цикле до 10%. Выбор центральной длины волны излучения накачки (940 нм) в области «полки» полосы поглощения ионов иттербия обеспечивает стабильность поглощенной энергии накачки без точной термостабилизации диодных модулей. Теплоотвод от АЭ осуществлялся через сапфировые пластины (рис. 2, а), на противоположных диодным модулям сторонах которых нанесено отражающее накачку покрытие. В качестве активного модулятора в лазере использовался НПВО-затвор [8], малочувствительный к поляризации излучения и имеющий минимальные внутрирезонаторные потери во включенном состоянии среди известных активных модуляторов, работающих в области длины волны 1,54 мкм. Используемый в экспериментах специально разработанный НПВО-затвор обладает повышенным ресурсом (более 10^8 выстрелов) и может работать в диапазоне частот от 1 до 500 Гц. На рис. 3, а, приведены зависимости энергии генерируемого импульса от длительности тока накачки в следующих режимах:

1. DLQS – режим модуляции добротности при использовании выходного зеркала с оптимальным коэффициентом отражения;
2. ALQS – режим модуляции активных потерь.

В последнем случае использовался резонатор, построенный из трех высокоотражающих зеркал и выводом излучения через НПВО-затвор [8–10]. Эта схема была выбрана для дальнейших экспериментов (рис. 2, а), так как она, одновременно с увеличением эффективности генерации, позволяла при сравнимой с обычным режимом модуляции добротности резонатора энергетике получать более длинные импульсы (от сотен наносекунд до единиц микросекунд). Это обстоятельство оказалось решающим для ввода отдельных импульсов с энергией свыше 100 мДж в оптическое волокно. Расходимость излучения на предельных по выходной мощности режимах составила 10 мрад и 12 мрад по медленной и быстрой осям соответственно. Излучение вводилось в обезвоженное кварцевое волокно с диаметром сердцевины $d = 400$ мкм и числовой апертурой $NA = 0,18$ с помощью линзы с фокусным расстоянием $f = 28$ мм.

Динамическое изменение эффективного коэффициента отражения эквивалентного выходного зеркала обеспечивалось НПВО-затвором, управляемым разработанным драйвером [11]. Поскольку иттербий-эрбиевое стекло представляет собой трехуровневую лазерную среду, энергетически эффективным является режим генерации пачки импульсов при реализации нескольких срабатываний НПВО-затвора на одном импульсе накачки с соответствующим увеличением его длительности. Импульсы следуют с интервалом 0,1–1 мс (рис. 3, б). Длительность отдельных импульсов составляла 1–4 мкс в зависимости от мощности накачки (см. далее рис. 7) и взаимной юстировки глухих зеркал 5 (рис. 2). Для пачек из 4–5 импульсов суммарная энергия достигала 0,49 Дж, а средняя мощность при частоте повторения импульсов накачки до 18 Гц составила 6–8 Вт соответственно, что сравнимо со значением, используемым в повседневной операционной практике. Дальнейший рост средней выходной мощности ограничивался термоиндуцированными деформациями и оптическими искажениями в активном элементе.

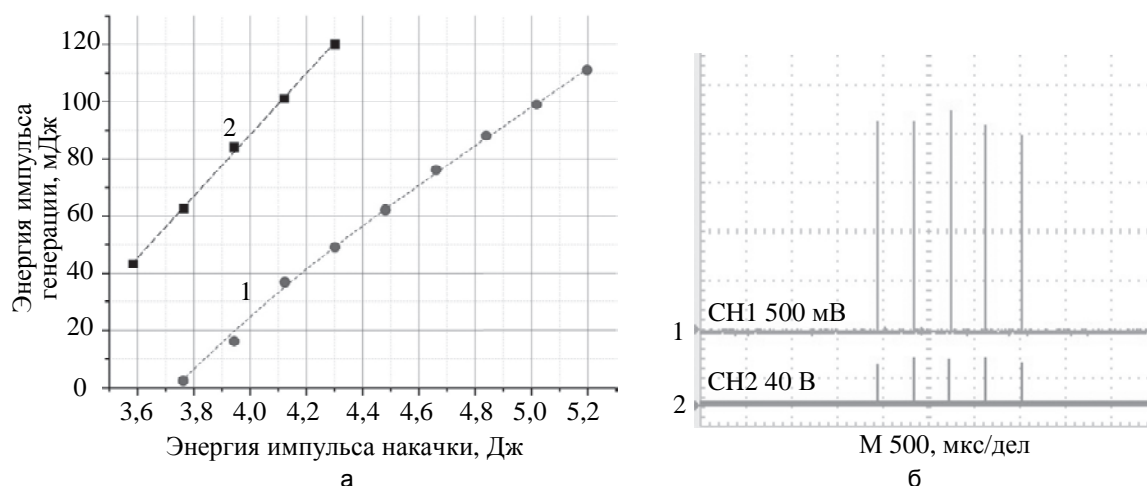


Рис. 3. Зависимость энергии одиночного импульса генерации от энергии импульса накачки в режимах модуляции диссипативных (DLQS – 1) и активных (ALQS – 2) потерь (ток накачки $I=100$ А). Экспериментальные точки соединены линиями для наглядности (а). Осциллограмма пачки импульсов (канал 1 – импульсы генерации; канал 2 – импульсы срабатывания НПВО-затвора); длительность импульса накачки $t_p=3,7$ мс, ток накачки $I=120$ А, период следования импульсов в пачке $T=400$ мкс (б)

Исследование взаимодействия микросекундных импульсов излучения с модельной средой

Для выяснения особенностей воздействия мощных лазерных импульсов на биоткани с высоким содержанием воды мы исследовали динамику акустического сигнала, сопровождающего поглощение лазерного излучения с длиной волны 1,54 мкм с модельной средой (физраствором). Как правило, физраствор используется в качестве аспирационной жидкости при проведении лазерной экстракции катаракты для поддержания внутриглазного давления. Ранее подобные исследования проводились с водой для импульсов свободной генерации и модуляции добротности гольмиевого (Ho:YAG, $\lambda=2,12$ мкм) и эрбиевого (Er:YSGG, $\lambda=2,79$ мкм) лазеров [12–14]. Коэффициенты поглощения излучения водой на этих длинах волн существенно выше, чем для лазера на иттербий-эрбиевом стекле ($\mu_a \approx 25$ и 2500 см^{-1} соответственно), поэтому характер взаимодействия, несмотря на общие закономерности, также может существенно отличаться от случая с использованием длины волны 1,54 мкм. Проведенный авторами анализ полученных сигналов свидетельствует о резкой зависимости акустического отклика как от объемной плотности поглощенной энергии, так и от временной структуры импульса излучения, в том числе пиковой структуры импульса в режиме свободной генерации [13]. Энергии отдельных пиков импульса свободной генерации Er:YSGG-лазера (около 1 мДж) достаточно для испарения воды на глубине проникновения излучения. Таким образом, за импульс формируется кавитационный пузырек в виде тонкого длинного канала, а каждый пикок отражается в акустическом сигнале в виде монополярной волны давления, что связывают с механизмом взрывного испарения. Пиковое значение перепада давления при схлопывании подобного пузырька существенно меньше, чем в случае пузырька сферической или близкой к таковой формы [13]. При воздействии субмикросекундными импульсами излучения Ho:YAG-лазера с энергией около 10 мДж акустический отклик включает в себя два характерных сигнала: первый отвечает ударной волне (за счет резкого термоупругого расширения), которая совпадает по времени с моментом воздействия лазерного импульса; второй – схлопыванию кавитационной полости [12, 14]. В первом случае амплитуда акустического отклика пропорциональна мощности светового импульса, а амплитуда и временная структура акустических импульсов, возникающих в результате схлопывания одного или нескольких сформированных пузырьков, зависят от энергии и длительности лазерного импульса. В рассматриваемом диапазоне параметров амплитуды первичного и вторичного сигналов сравнимы по величине. При использовании длинных импульсов свободной генерации зарегистрированный сигнал указывает на значительное превалирование вторичного перепада давления [12, 13]. Величина перепада давления, вызванного схлопыванием кавитационной полости, сравнима для коротких и длинных импульсов с указанными параметрами. Таким образом, потенциальное преимущество использования сравнительно коротких импульсов состоит в дополнительном механизме разрушения межклеточных связей.

В связи с этим в наших экспериментах проведено изучение акустического сигнала, характерного именно для импульсов микросекундной длительности с энергией около 100 мДж излучения с длиной волны 1,54 мкм. Схема экспериментальной установки изображена на рис. 4. Частота повторения импульсов излучения в данном эксперименте составляла 3 Гц. Анализ полученного сигнала свидетельствует о наличии ударной волны (за счет резкого термоупругого расширения), совпадающей по времени с моментом воздействия лазерного импульса, а также вторичного акустического сигнала, соответствующего схлопыванию кавитационной полости (рис. 5).

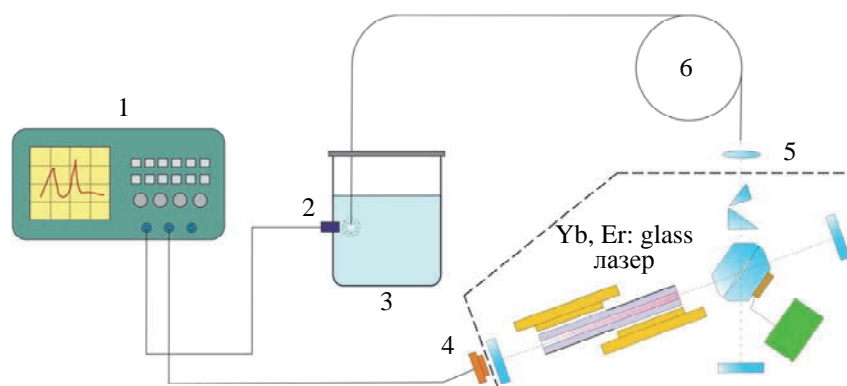


Рис. 4. Схема экспериментальной установки: 1 – осциллограф; 2 – гидрофон; 3 – емкость с физраствором; 4 – фотоприемник; 5 – линза; 6 – оптоволокно (диаметр сердцевины $d=400$ мкм, числовая апертура $NA=0,18$)

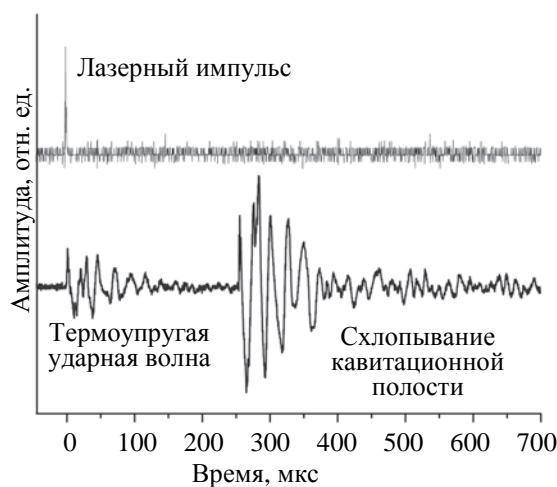


Рис. 5. Осциллограмма лазерного импульса и соответствующий сигнал гидрофона

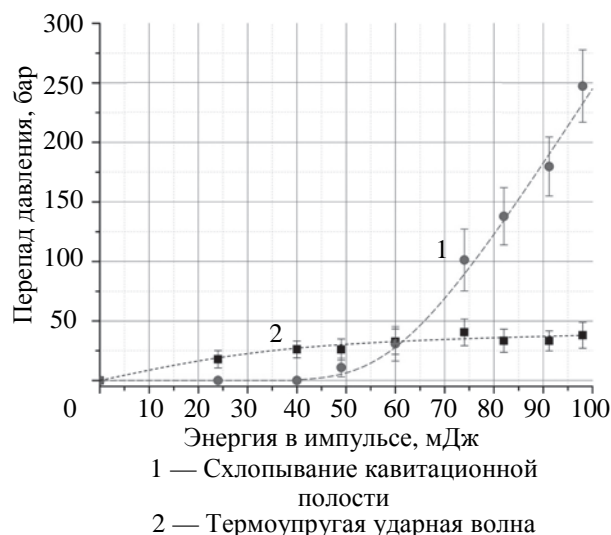


Рис. 6. Зависимость величины перепада давления в зоне воздействия, вызванного генерацией термоупругой ударной волны и схлопыванием кавитационной полости, от энергии в лазерном импульсе. Экспериментальные точки соединены линиями для наглядности

В целях предотвращения повреждения приемной площадки гидрофона давление было измерено на расстоянии 6 мм от нее. Значения перепадов давления были пересчитаны для зоны непосредственного возникновения акустической волны с учетом обратно пропорциональной зависимости амплитуды сигнала от расстояния до точки возникновения [12–16] (рис. 6). Пересчет данных, полученных с осциллографа, проводился в соответствии со следующей зависимостью:

$$\Delta p(z_2) = k \cdot A(z_1) \cdot \left(\frac{z_1}{z_2} \right)^\gamma,$$

где $\Delta p(z_2)$ – значение перепада давления в точке, находящейся на расстоянии z_2 от центра источника возникновения акустической волны (z_2 принималось равным радиусу оптического волокна); k – калибровочный коэффициент гидрофона (0,22 МПа/В); $A(z_1)$ – значение амплитуда сигнала (от пика к пику), зарегистрированное гидрофоном на расстоянии $z_1 = 6$ мм; γ – геометрический фактор (принимался равным 1).

Из рис. 6 видно, что с увеличением энергии амплитуда сигнала, соответствующего схлопыванию кавитационной полости, резко нарастает. При этом при энергии в импульсе от 40 до 60 мДж наблюдается нелинейный этап нарастания сигнала, после 60 мДж величина перепада давления увеличивается линейно, пропорционально энергии лазерного импульса. Нелинейность зависимости амплитуды акустического сигнала от энергии в импульсе и малое приращение величины перепада давления, соответствующего термоупругой ударной волне, можно объяснить тем, что это значение зависит как от плотности энергии излучения, так и от длительности лазерного импульса через префактор термоупругих напряжений [17].

При увеличении энергии накачки (и, следовательно, энергии генерации) длительность лазерного импульса, получаемого в используемом в экспериментах излучателе, возрастает. Пиковая мощность отдельных выбросов остается приблизительно на том же уровне. Примеры временной структуры генерируемых импульсов приведены на рис. 7.

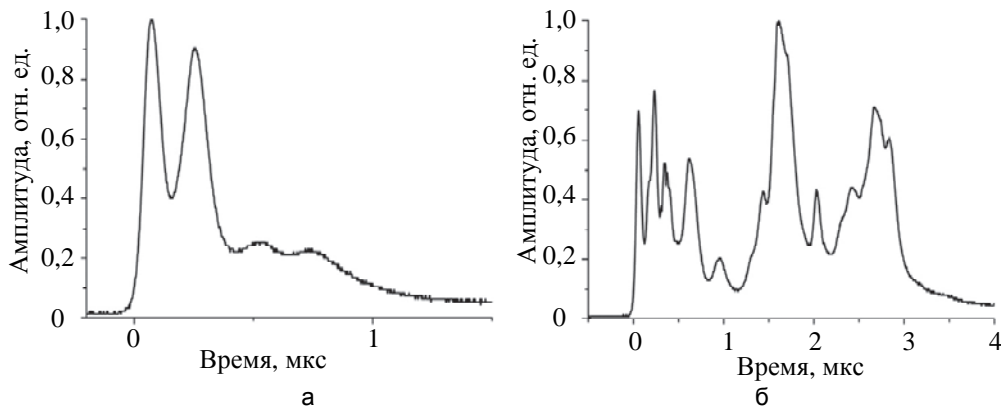


Рис. 7. Временная структура импульсов генерации при различной энергии в импульсе: 40 мДж (а); 100 мДж (б)

Чем больше длительность импульса превосходит время акустической релаксации (время, необходимое для распространения акустической волны на расстояние, равное глубине проникновения излучения), тем меньше термоупругие напряжения развиваются.

Результаты эксперимента свидетельствуют о том, что перепад давления, соответствующий ударной волне, вызванной схлопыванием кавитационного пузырька при воздействии импульсом лазерного излучения с энергией около 100 мДж и длительностью 3 мкс, более чем в 3 раза превышает эту же величину для импульса с энергией около 70 мДж (рис. 6).

Излучение, проходя через кавитационную полость, т.е. через область с малым коэффициентом поглощения, может вызвать повреждение задней капсулы хрусталика, что недопустимо при проведении операции. В связи с этим критерием безопасности операции является правильный выбор периода следования импульсов в пачке. Из рис. 5 видно, что временной промежуток между воздействием лазерного импульса и схлопыванием кавитационной полости составляет около 300 мкс. Для уточнения минимального допустимого периода следования импульсов было измерено пропускание слоя воды. Эксперимент проводился по методике «возбуждение–зондирование». На выходе волокна доставки была сформирована последовательность из двух импульсов с регулируемым временным промежутком между ними. Первый импульс с энергией около 100 мДж создавал кавитационную полость, второй импульс, с малой энергией, зондировал слой воды. Регистрация энергии импульсов осуществлялась дифференциальным измерителем PULSAR-2 с использованием измерительных головок PE50BV (OPHIR). Максимальное пропускание наблюдалось при задержке между импульсами 250 мкс, минимальное – при задержке 300 мкс, и при дальнейшем увеличении задержки не менялось. Таким образом, период следования импульсов в полученных пачках отвечает критерию безопасности проведения операции.

Заключение

Исследованы режимы модуляции диссипативных и активных потерь в слабом лазере на иттербий-эрбиевом стекле с диодной накачкой и волоконным выходом. В режиме модуляции активных потерь резонатора при генерации цугов из 5 импульсов длительностью в единицы микросекунд, энергией каж-

дого импульса около 100 мДж и эффективной частоте повторения свыше 60 Гц, полный коэффициент полезного действия по отношению к вложенной оптической мощности диодов накачки достигал 5,2%, дифференциальный коэффициент полезного действия – 11%. При генерации одиночного импульса полный коэффициент полезного действия составлял 2,5%.

Полученные параметры излучения позволили оценить возможность применения излучения этого типа лазеров для фрагментации пораженных катарактой плотных хрусталиков. В результате исследований акустического отклика водной среды на лазерное воздействие установлен минимально допустимый период следования импульсов, отвечающий критерию безопасного проведения лазерной экстракции катаракты – более 300 мкс. Период следования импульсов в полученных в макете слэбового лазера пачка отвечает критерию безопасности проведения операции. Последующие шаги в исследованиях предполагают дальнейшую оптимизацию энергетических и временных характеристик выходных импульсов, повышение надежности ввода импульсов в оптическое волокно, а также испытания на модельных биологических объектах.

References

1. Fedorov S.N., Kopaeva V.G., Andreev Yu.V., Bogdalova E.G., Belikov A.V. Tekhnika lazernoi ekstraksii katarakty [Laser technology of cataract extraction]. *Oftalmokhirurgiya*, 1999, no. 1, pp. 3–12.
2. Kopaev S.Yu. *Kliniko-eksperimental'noe obosnovanie kombinirovannogo ispol'zovaniya neodimovogo IAG 1.44 mkm i gelii-neonovogo 0.63 mkm lazerov v khirurgii katarakty: dis. ... dok. med. nauk.* Moscow, 2014, 338 p.
3. Kopayeva V.G., Kopayev S.U., Ginoyan A.A., Alborova V.U. Clinical experience in laser cataract extraction. *Vestnik RAEN*, 2012, no. 1, pp. 77–80.
4. Dryagina O.B. *Eksperimental'no-klinicheskoe obosnovanie ispol'zovaniya Nd:YAG lazera s dlinoi volny 1.44 mkm v tekhnologii perednego kapsuloreksisa i distantsionnogo gemostaza: dis. ... kand. med. nauk.* Moscow, 2014, 145 p.
5. Anisimova S.Yu., Anisimov S.I., Trubilin V.N., Novak I.V. Femtolaser-assisted phacoemulsification. The first domestic experience. *Kataraktal'naya i Refraktsionnaya Khirurgiya*, 2012, vol. 12, no. 3, pp. 7–10.
6. 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, no. 17, pp. 1328–1330.
7. *Kompleks dlya Lazernoi Ekstraksii Katarakt RAKOT-6M* [Complex PAKOT-6M for Laser Cataract Extraction]. Available at: <http://ucmg.ru/kompleks-dlya-lazernoy-ekstraksii-katarakt-rakot-6m.html> (accessed 02.11.2015)
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, vol. 9, no. 1, pp. 314–318.
9. Georgiou E., Musset O., Boquillon J.-P., Denker B.I., Sverchkov S.E. 50 mJ/30 ns FTIR Q-switched diode-pumped Er:Yb:glass 1.54 μm laser. *Optics Communications*, 2001, vol. 198, no. 1–3, pp. 147–153. doi: 10.1016/S0030-4018(01)01486-9
10. Gagarskii S.V., Galagan B.I., Denker B.I., Korchagin A.A., Osiko V.V., Prikhod'ko K.V., Sverchkov S.E. Diode-pumped ytterbium-erbium glass microlasers with optical Q-switching based on frustrated total internal reflection. *Quantum Electronics*, 2000, vol. 30, no. 1, pp. 10–12.
11. Malinin S.M., Simin S.A., Shapiro L.L., Batov Yu.N. *Sposob Upravleniya Modulyatorom Opticheskogo Izlucheniya* [Method of Controlling the Optical Radiation Modulator]. Patent RU 2022433, 1994.
12. 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, no. 3, pp. 278–293. doi: 10.1002/(SICI)1096-9101(1996)18:3<278::AID-LSM10>3.0.CO;2-2
13. 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, vol. 32, no. 12, pp. 2025–2036. doi: 10.1109/3.544746
14. Lu T., Li Z.J. Underwater holmium-laser-pulse-induced complete cavitation bubble movements and acoustic transients. *Chinese Science Bulletin*, 2011, vol. 56, no. 12, pp. 1226–1229. doi: 10.1007/s11434-011-4367-5
15. Asshauer T., Rink K., Delacretaz G. Acoustic transient generation by holmium-laser-induced cavitation bubbles. *Journal of Applied Physics*, 1994, vol. 76, no. 9, pp. 5007–5013. doi: 10.1063/1.357212
16. Lauterborn W., Kurz T., Geisler R., Schanz D., Lindau O. Acoustic cavitation, bubble dynamics and sonoluminescence. *Ultrasonics Sonochemistry*, 2007, vol. 14, no. 4, pp. 484–491. doi: 10.1016/j.ultsonch.2006.09.017
17. *Optical-Thermal Response of Laser-Irradiated Tissue*. 2nd ed. Eds. A.J. Welch, M.J.C. van Gemert. Springer, 2011, 951 p. doi: 10.1007/978-90-481-8831-4

- Беликов Андрей Вячеславович* – доктор физико-математических наук, доцент, профессор, Университет ИТМО, Санкт-Петербург, 197101, Российская Федерация, meddv@grv.ifmo.ru
- Гагарский Сергей Валерьевич* – кандидат физико-математических наук, старший научный сотрудник, Университет ИТМО, Санкт-Петербург, 197101, Российская Федерация
- Губин Антон Борисович* – инженер, ООО «Нела», Санкт-Петербург, 190005, Российская Федерация, gab@hotmail.ru
- Вайнер Самуэль Яковлевич* – генеральный директор, ООО «Оптитаск», Нетания, 4250604, Израиль; научный сотрудник, Софийский университет имени святого Климента Охридского, София, 1504, Болгария, sw@optitask.net
- Сергеев Андрей Николаевич* – кандидат технических наук, ассистент, Университет ИТМО, Санкт-Петербург, 197101, Российская Федерация, mg_phoenix@yahoo.com
- Смирнов Сергей Николаевич* – аспирант, Университет ИТМО, Санкт-Петербург, 197101, Российская Федерация, s.n.smirnov@inbox.ru
- Andrey V. Belikov* – D.Sc., Associate professor, Professor, ITMO University, Saint Petersburg, 197101, Russian Federation, meddv@grv.ifmo.ru
- Sergey V. Gagarsky* – PhD, senior research scientist, ITMO University, Saint Petersburg, 197101, Russian Federation, s.gagarsky@mail.ru
- Anton B. Gubin* – engineer, NELA Ltd., Saint Petersburg, 190005, Russian Federation, gab@hotmail.ru
- Samuel Ya. Weiner* – General manager, Optitask Ltd., Netanya, 4250604, Israel; scientific researcher, Sofia University “St. Kliment Ohridski”, Sofia, 1504, Bulgaria, sw@optitask.net
- Andrey N. Sergeev* – PhD, assistant, ITMO University, Saint Petersburg, 197101, Russian Federation, mg_phoenix@yahoo.com
- Sergey N. Smirnov* – postgraduate, ITMO University, Saint Petersburg, 197101, Russian Federation, s.n.smirnov@inbox.ru