

А. В. Скрипник

ОПТОТЕРМИЧЕСКИЙ ВОЛОКОННЫЙ КОНВЕРТЕР ЛАЗЕРНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ

Рассматривается новый перспективный вид преобразователей лазерного излучения — оптотермический волоконный конвертер, используемый в современной лазерной медицине для контактной обработки биотканей. Описан процесс формирования конвертера и исследовано изменение его свойств в зависимости от выбора параметров излучения полупроводникового лазера.

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

Введение. Применение лазерных технологий в биологии и медицине является одной из перспективных областей их практической реализации [1, 2]. Актуальным направлением развития в этой сфере можно считать контактную лазерную хирургию мягких биотканей [3—5]. Использование данного метода хирургии предполагает наличие непосредственного контакта между обрабатываемым биоматериалом и дистальной частью оптического наконечника. В большинстве случаев функцию дистальной части наконечника выполняет выходной торец оптического волокна, по которому передается излучение от лазерного источника. Для диодных лазеров в работах [6, 7] было предложено перед обработкой биоткани предварительно видоизменить выходной торец оптического волокна, осуществив его соприкосновение с поверхностью вещества (пробки, угля или дерева) в течение 1—2 с при средней мощности излучения 1—2 Вт. Подобная процедура имеет общепринятое название „инициализация“, а само используемое вещество называется „инициализирующим“. В результате такой процедуры на выходном торце оптического волокна формируется слой, который, поглощая падающее на него лазерное излучение, способствует нагреванию дистального конца световода, т.е. формируется оптотермический волоконный конвертер (ОТВК). Использование подобных преобразователей позволяет эффективно обрабатывать (коагулировать, разрезать, испарять и т.д.) мягкие биоткани, слабопоглощающие на длине волны лазерного излучения [8], благодаря обеспечению требуемых для обработки температур при минимальных энергетических затратах. Однако свойства ОТВК, формируемых в соответствии с описанной процедурой, крайне нестабильны, что стимулирует поиск альтернативных путей их создания.

В настоящей статье представлены результаты проведенных впервые исследований размерных и оптотермических характеристик ОТВК, формируемого при кратковременном ($t=50$ мс) воздействии излучения диодного лазера на инициализирующее вещество; при этом мощность лазера более чем на порядок превосходила значения, обычно используемые при выполнении подобной процедуры. Приведены также результаты времяразрешающего наблюдения за состоянием конвертера на этапах его формирования и тестирования. Комплекс проведенных исследований направлен на решение задачи более глубокого и точного понимания процессов, происходящих при воздействии лазерного излучения на ОТВК, разрабатываемые для биомедицины.

Материал и метод. В ходе исследования источником излучения служил полупроводниковый лазер “IPG Photonics” (США) с волоконной системой „доставки“ и длиной волны излучения $\lambda=970\pm 5$ нм. Лазерное излучение передавалось по кварцевому оптическому волокну марки “FT400 EMT” (фирмы “Thorlabs”, США) с диаметром световедущей жилы порядка 400 мкм, имеющему числовую апертуру $NA=0,37$. Максимальная средняя

мощность лазерного излучения (P) на выходе такого световода достигала 25 Вт (непрерывный режим).

В процессе исследования были последовательно выполнены два этапа: формирование ОТВК и его тестирование.

На этапе формирования ОТВК выходной торец оптического волокна приводился в контакт с поверхностью инициализирующего вещества, в роли которого использовался уголь в спрессованном состоянии. Плоскость поверхности выходного торца располагалась параллельно поверхности инициализирующего вещества, на которую направлялось лазерное излучение с выхода оптического волокна. В течение всего процесса между выходным торцом волокна и поверхностью вещества поддерживалась постоянная статическая нагрузка общей массой порядка 100 г.

Тестирование оптического волокна с ОТВК производилось в воздушной атмосфере. Цель этапа тестирования — исследование изменений свойств ОТВК при различных параметрах подаваемого на него лазерного излучения. Были рассмотрены ситуации с подачей на ОТВК излучения со средней мощностью 1—10 Вт продолжительностью до 550 мс.

При исследовании были приняты следующие оценочные критерии.

1) *Коэффициент пропускания ОТВК (k)* на длине волны лазерного излучения. Для оценки коэффициента k выходной торец оптического волокна, сначала без ОТВК, а затем со сформированным на торце конвертером, располагался на расстоянии порядка 50 мм от приемной площадки фотоприемника “PDA 100A” (фирмы “Thorlabs”), сигнал которого регистрировался цифровым осциллографом “TDS 2024B” (фирмы “Tektronix”, США). Между оптическим волокном и приемной площадкой фотоприемника, работающего в линейном режиме, размещались светофильтры УФС-1 и УФС-5, назначение которых состояло в селекции лазерной составляющей регистрируемого сигнала.

Коэффициент оптического пропускания ОТВК определялся как

$$k = \frac{A_{\text{ОТВК}}}{A_0} \cdot 100 \%,$$

где $A_{\text{ОТВК}}$ — амплитуда сигнала, регистрируемого фотоприемником на выходе ОТВК; A_0 — амплитуда сигнала, зарегистрированного фотоприемником на выходе оптического волокна до выполнения этапа формирования ОТВК.

2) *Данные времяразрешающего наблюдения* за динамикой состояния ОТВК на этапах формирования и тестирования. Регистрация проводилась видеокамерой “Photron FASTCAM SA4” (фирмы “Photron”, Япония) со скоростью 1000 кадров/с при экспозиции 1 мс. Анализ полученных видеоматериалов позволил визуализировать происходящие процессы и оценить их скорость, а также определить форму и рассчитать объем ОТВК.

3) *Температура разогрева* поверхности ОТВК, вызываемого действием на него лазерного излучения различной мощности. Регистрация проводилась высокоскоростной термокамерой “Flir Titanium 520M” (фирмы “Flir”, США).

Результаты и их обсуждение. На рис. 1, *a—г* приведены изображения, демонстрирующие характерные ситуации, развивающиеся на этапе формирования ОТВК в различные относительно начала лазерного воздействия моменты времени t . Продолжительность данного этапа составила 50 ± 1 мс при средней мощности лазерного излучения $P = 25$ Вт.

Установлено, что на этапе формирования ОТВК лазерное излучение разрушает материал инициализирующего вещества, фрагменты которого (см. рис. 1, *б*), покидая зону воздействия со скоростью порядка 1,5 м/с, частично бомбардируют поверхность оптического волокна. Далее, взаимодействуя таким образом с волокном и продолжая нагреваться в поле действия лазерного излучения (см. рис. 1, *в*), осевшие на оптическом волокне продукты разрушения вещества способствуют образованию ОТВК (рис. 1, *г*).

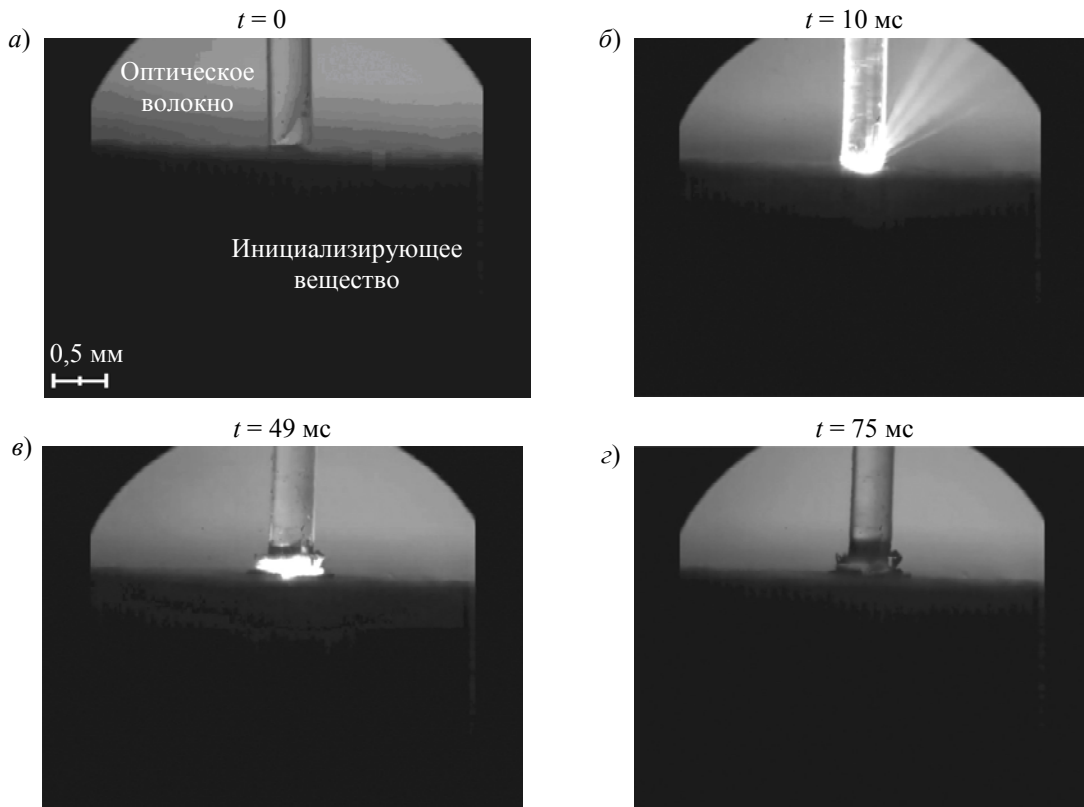


Рис. 1

В ходе тестирования сформированного ОТВК при общей продолжительности лазерного воздействия 250 мс и различных значениях P был выявлен ряд следующих друг за другом эффектов (рис. 2, а—д), а именно: отделение от ОТВК „холодных“ (или несветящихся) фрагментов (а); свечение части объема ОТВК (б); свечение всего объема ОТВК (в); отделение от ОТВК „горячих“ (или светящихся) фрагментов (г); разрушение ОТВК (д).

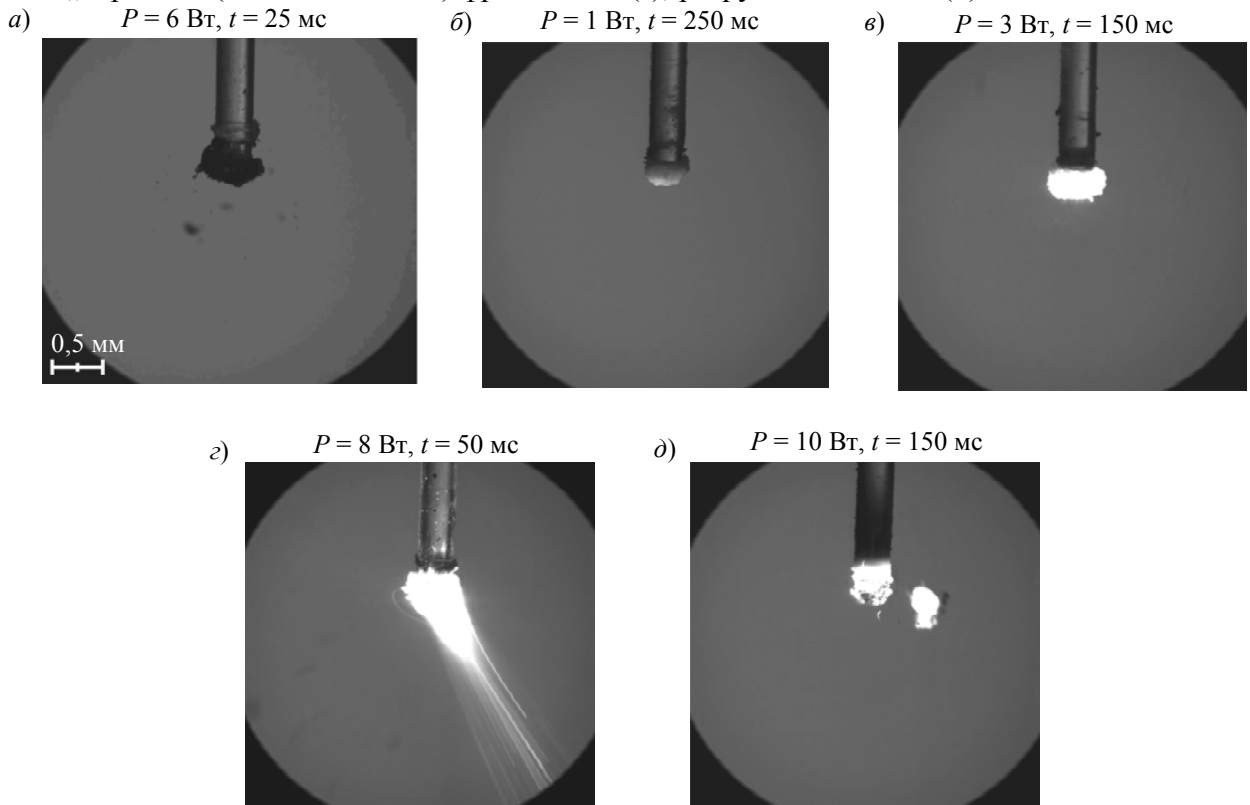


Рис. 2

Следует отметить, что временная последовательность появления каждого из перечисленных выше эффектов зависела от выбора средней мощности лазерного излучения. Так, например, при $P=1$ Вт не удалось зарегистрировать эффект отделения от ОТВК „горячих“ частиц, а при $P \geq 8$ Вт происходило разрушение структуры конвертера. Воздействие же излучения со средней мощностью порядка 6 Вт (при $t=250$ мс) позволило пронаблюдать всю последовательность сменяющих друг друга эффектов, за исключением ситуации с разрушением ОТВК.

Перемещение „холодных“ и „горячих“ фрагментов, отделяемых от ОТВК в процессе лазерного воздействия, происходило с различной скоростью. Так, при $P=10$ Вт максимальная скорость „холодных“ фрагментов составила 80 ± 10 мм/с, а „горячих“ — 740 ± 70 мм/с.

Преобразования ОТВК на этапе тестирования оказали влияние на объем (V) и оптическое пропускание (k), а также на максимальную температуру (T_{\max}), до которой поверхность конвертера была способна разогреться под действием лазерного излучения в течение фиксированного интервала времени ($P=1,5$ Вт, $t=3$ с). Динамика перечисленных параметров ОТВК при однократном лазерном воздействии ($P=6$ Вт) различной продолжительности представлена на рис. 3, а—в.

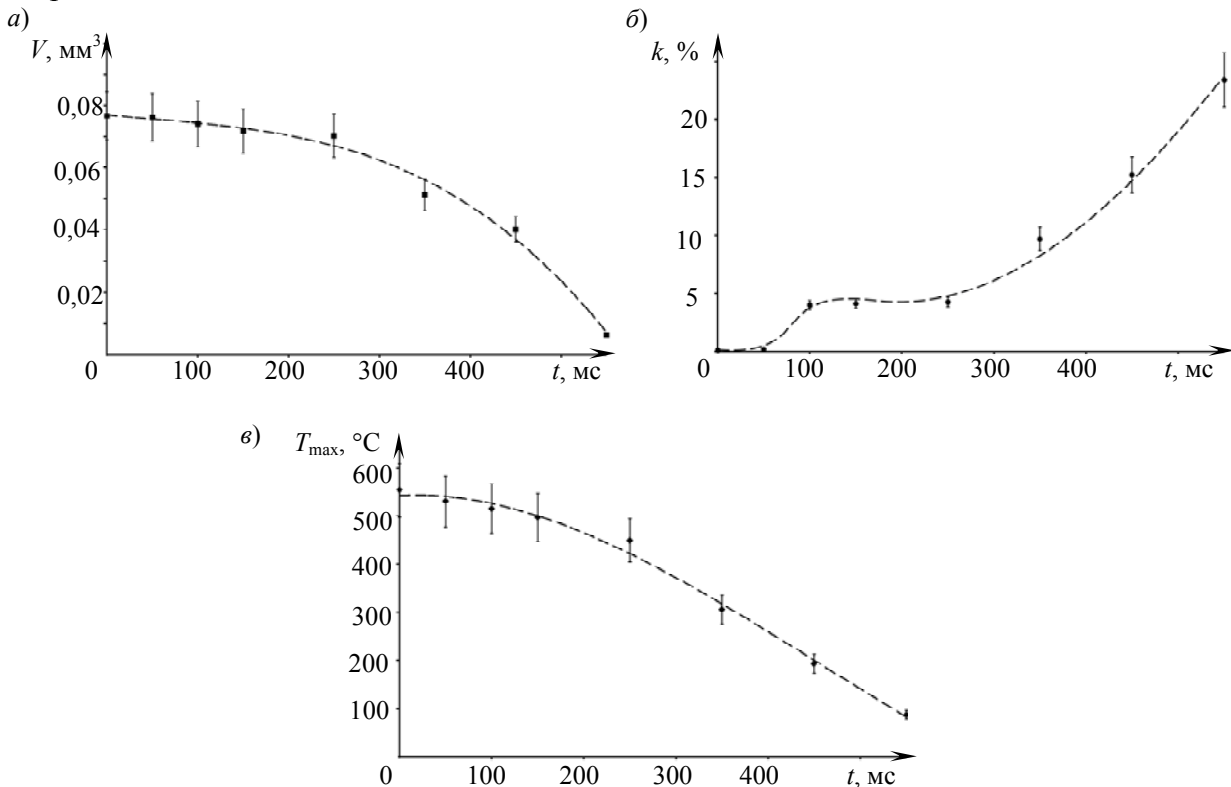


Рис. 3

Обращает на себя внимание тот факт, что объем сформированного ОТВК по сути практически не менялся вплоть до превышения продолжительности лазерного воздействия значения $t > 250$ мс (см. рис. 3, а). Далее же происходило существенное уменьшение значения V , сопровождаемое оплавлением ОТВК и формированием на торце волокна материала, внешний вид которого напоминал стеклокерамику [9]. Аналогичные изменения происходили и с оптическим пропусканием ОТВК (см. рис. 3, б), оцениваемым на длине волны падающего лазерного излучения. Так, если по достижении $t=100$ мс коэффициент $k=4$ % и это значение сохранялось вплоть до $t=250$ мс, то затем происходило резкое увеличение данного параметра, который при $t=550$ мс составил уже более 20 %. Продолжительность лазерного воздействия существенно влияет и на способность ОТВК к последующему разогреву (см. рис. 3, в). Так, если вплоть до $t=150$ мс максимальная температура на поверхности ОТВК составляла в сред-

нем $550\text{ }^{\circ}\text{C}$, то при $t=250\text{ мс}$ она понизилась до $450\text{ }^{\circ}\text{C}$; при увеличении же t до 550 мс температура T_{max} составляла менее $100\text{ }^{\circ}\text{C}$. Такой характер изменений связан, по-видимому, с отмеченным выше оплавлением ОТВК, наблюдаемым как раз при $t > 250\text{ мс}$.

Наблюдаемые в эксперименте явления свидетельствуют о существенном преобразовании структуры ОТВК при воздействии лазерного излучения на этапе тестирования, что проявляется, в частности, в удалении из ОТВК слабосвязанных фрагментов. В результате на дистальном конце оптического волокна формируется новообразование, хорошо поглощающее лазерное излучение и способное к разогреву. Чрезмерное же облучение ОТВК приводит к отделению от него крупных „горячих“ фрагментов и к оплавлению торца оптического волокна.

В ходе исследований было также проанализировано влияние на оптическое пропускание ОТВК количества импульсов (N) лазерного излучения длительностью 50, 150, 250, 350, 450 и 550 мс (при $P=6\text{ Вт}$, $\lambda=970\pm 5\text{ нм}$; рис. 4). При этом пауза между импульсами составляла 5 с: этого времени, согласно проведенным с помощью термокамеры измерениям, достаточно для остывания ОТВК до комнатной температуры.

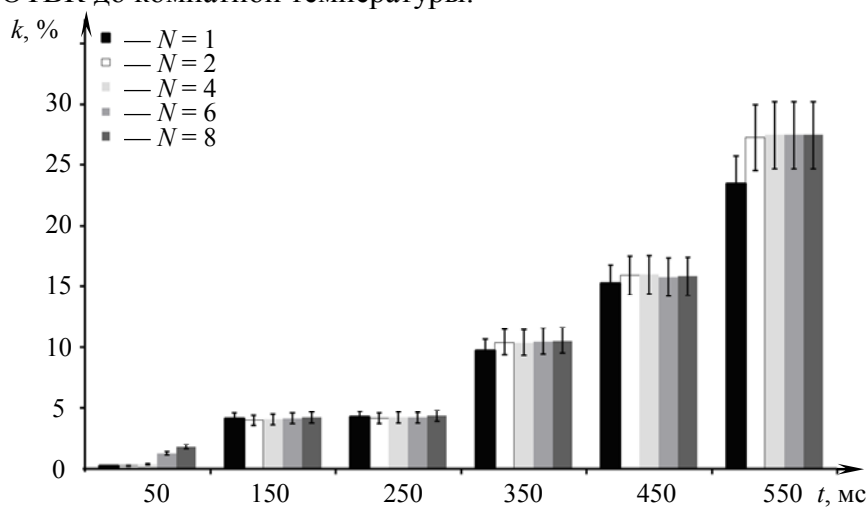


Рис. 4

Следует отметить, что начиная с определенного значения N величина оптического пропускания ОТВК, приняв некое значение, далее существенно не меняется (см. рис. 4). Таким образом, результат преобразований, которые происходят с ОТВК на этапе тестирования, может быть стабилизирован/сохранен. Так, если, например, требуется сформировать ОТВК, характеризующийся воспроизводимым низким, порядка 4 %, пропусканием излучения, то продолжительность воздействия на него лазера необходимо ограничить временным интервалом 100—250 мс (см. также рис. 3, б).

Закключение. По результатам представленного исследования оптотермического волоконного конвертера и анализа процессов, происходящих на этапах его формирования и тестирования, установлено, что осуществить воспроизводимое формирование ОТВК на торце оптического кварцевого волокна возможно при обеспечении его контакта с поверхностью спрессованного угля под действием лазерного излучения с длиной волны $970\pm 5\text{ нм}$, средней мощностью порядка 25 Вт и продолжительностью воздействия $50\pm 1\text{ мс}$.

На этапе тестирования сформированного ОТВК посредством времяразрешающего наблюдения обнаружен ряд эффектов, возникающих в ходе действия на него лазерного излучения, и установлена взаимосвязь этих эффектов с выбором значений средней мощности излучения и продолжительности лазерного воздействия. В зависимости от выбора продолжительности лазерного воздействия оценены объем ОТВК, его оптическое пропускание, а также способность к последующему разогреву. Так, например, при $P=6\text{ Вт}$ и продолжительности воздействия вплоть до $t=250\text{ мс}$ объем ОТВК составлял примерно $0,075\text{ мм}^3$, его оптическое

пропускание не превышало 4 %, а максимальная температура разогрева поверхности находилась на уровне 500 °С.

Установлено, что результат преобразований ОТВК может быть стабилизирован, т.е. чтобы приобретенное первоначально ОТВК оптическое пропускание при дальнейшем лазерном воздействии сохранялось, например, на уровне 4 %, необходимо ограничить продолжительность такого облучения диапазоном 100—250 мс (при $P=6$ Вт).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Тучин В. В. Лазеры и волоконная оптика в биомедицинских исследованиях. Саратов: Изд-во Саратов. ун-та, 1998.
2. Бургонский В. Г. Теоретические и практические аспекты применения лазеров в стоматологии // Современная стоматология. 2007. № 1. С. 10—15.
3. Effects of different contact laser scalpels on skin and subcutaneous fat / J. Hukki, L. Krogerus, M. Castren, T. Schroder // Lasers in Surgery and Medicine. 1988. Vol. 8, N 8. P. 276—282.
4. Contact focusing multimodal microprobes for ultraprecise laser tissue surgery / A. Darafsheh, A. Fardad, N. M. Fried, A. N. Antoszyk, H. S. Ying, V. N. Astratov // Optics Express. 2011. Vol. 19(4). P. 3440—3448.
5. Romanos G., Nentwig G.-H. Diode laser (980 nm) in oral and maxillofacial surgical procedures: clinical observations based on clinical applications // J. of Clinical Laser Medicine & Surgery. 1999. Vol. 17(5). P. 193—197.
6. Advantages of diode laser (940 nm) over surgical blade in management of ankyloglossia: A Case Report / Y. Doshi, M. Shah, N. Khandge, A. Sanghavi // J. of Oral Laser Applications. 2010. Vol. 10, N 4. P. 165—169.
7. Pat. 2012/0123399 A1 US. Dental surgical laser with feedback mechanisms / A. V. Belikov, F. I. Feldchtein, G. B. Altshuler. Publ. 17.05.2012.
8. Verdaasdonk R. M., Van Swol C. F. P. Laser light delivery systems for medical applications // Physics in Medicine and Biology. 1997. Vol. 42. P. 869—894.
9. Production of glass-ceramics from coal ashes / C. Leroy, M. C. Ferro, R. C. C. Monteiro, M. H. V. Fernandes // J. of the European Ceramic Society. 2001. Vol. 21, N 2. P. 195—202.

Сведения об авторе

Алексей Владимирович Скрипник — канд. физ.-мат. наук, доцент; Санкт-Петербургский национальный исследовательский университет информационных технологий, механики и оптики, кафедра лазерной техники и биомедицинской оптики; E-mail: alesch_skrupnik@mail.ru

Рекомендована кафедрой лазерной техники и биомедицинской оптики

Поступила в редакцию
26.04.13 г.