

С. В. ГАГАРСКИЙ, П. А. ГНАТЮК, А. Н. СЕРГЕЕВ, В. Ю. ХРАМОВ

ТВЕРДОТЕЛЬНЫЕ ЛАЗЕРЫ С ДИОДНОЙ НАКАЧКОЙ ДЛЯ 3D-МАРКИРОВКИ В ОБЪЕМЕ ПРОЗРАЧНЫХ ДИЭЛЕКТРИКОВ

Определены параметры лазерных импульсов килогерцового диапазона, обеспечивающих воспроизводимую запись информации в результате создания локальных лазерно-индуцированных изменений оптических свойств в объеме различных прозрачных материалов. Приведены данные по разработанным твердотельным лазерам с диодной накачкой, предназначенных для применения в микротехнологиях и научных исследованиях.

Ключевые слова: твердотельные лазеры с диодной накачкой, лазерная маркировка, объемная маркировка, лазерно-индуцированный оптический пробой, лазерно-индуцированные люминесцентные центры.

Первые попытки использования лазерно-индуцированного объемного пробоя [1, 2] для создания декоративных изделий и маркировки под поверхностью стекла были проведены практически сразу после появления лазеров с модулированной добротностью [3]. Значительный прогресс в развитии промышленных установок для внутриобъемной маркировки и гравировки прозрачных диэлектриков достигнут лишь после появления доступных килогерцовых твердотельных лазеров с диодной накачкой, обеспечивающих высокую скорость обработки и долговременный ресурс работы гравировальных установок.

В современных технологических комплексах символы, рисунки и изображения наносятся путем сканирования сфокусированного лазерного пятна в выбранной плоскости, расположенной в объеме заготовки. В результате воздействия нано-, пико- или фемтосекундных лазерных импульсов в объеме материала происходят необратимые изменения, связанные либо с нарушением макроструктуры материала (оптический пробой), либо с локальными изменениями вещественной или мнимой части показателя преломления материала, либо с созданием лазерно-индуцированных центров люминесценции, образующихся в результате изменения химической структуры отдельных молекул, внедренных в матрицу заготовки [4—6]. Высокая скорость и точность позиционирования перетяжки лазерного пучка в пределах рабочего поля обеспечивается, как правило, прецизионным двухосевым гальваносканером. Увеличение поперечных размеров создаваемого образа достигается относительным перемещением прозрачной заготовки в XY-направлении с последующим перекрытием полей сканирования. Последовательная смена слоев, в которых наносится маркировка, осуществляется перемещением плоскости фокусировки лазерного пучка с помощью линейных трансляторов, управляемых шаговыми или пьезоэлектрическими двигателями. Минимально допустимые расстояния между соседними слоями и пикселями в одном слое ограничены нежелательным слиянием соседних точек маркировки в результате механических или температурных воздействий и определяются как параметрами сфокусированного пучка, так и физической природой вносимых в материал изменений структуры, приводящих к появлению внутренних напряжений в матрице [7], значение которых, в свою очередь, зависит от технологических параметров процесса лазерной обработки. Допустимые размеры отдельного пикселя варьируются от десятков микрометров при образовании микроповреждений, возникающих в результате оптического пробоя диэлектриков, до десятков нанометров при записи светоиндуцированных фазовых неоднородностей, центров окраски или центров люминесценции.

Требования к лазерным источникам, предназначенным для гравировки в объеме прозрачных диэлектриков, существенно отличаются от требований к лазерам, используемым для поверхностной гравировки материалов. Во-первых, пороговые значения плотности световой

энергии, необходимой для разрушения объема диэлектрика, как правило, выше порогов повреждения поверхности. При использовании наиболее широко распространенных неодимовых лазеров и стандартных гальваносканеров с входной апертурой 12—14 мм и фокусным расстоянием объектива 100 мм, обеспечивающих рабочее поле 60×60 мм, пороговая энергия лазерного импульса длительностью 5—10 нс и с коэффициентом модуляции, вызванной частичной синхронизацией мод, составляет величину порядка 0,7 мДж на длине волны $\lambda_g=1,06$ мкм, 0,4 мДж при $\lambda_g=0,532$ мкм и 80 мкДж при $\lambda_g=355$ нм при условии, что расходимость лазерного пучка близка к дифракционной. Во-вторых, по экономическим соображениям (относительно ресурса систем диодной накачки и затрат на систему охлаждения) в промышленных наносекундных системах обычно используется импульсный режим накачки с прерыванием на время перемещения между отдельными фрагментами записи или смене образцов. Это приводит к необходимости использования дополнительных систем стабилизации, обеспечивающих воспроизводимость пространственных и энергетических параметров излучения от импульса к импульсу вне зависимости от интервала прерывания процесса записи информации. Кроме того, в ряде случаев для реализации полутонных изображений, а также для компенсации оптических потерь в объеме материала требуется динамическое управление энергией импульсов.

Необходимость учета указанных требований привела к разработке твердотельных лазеров на основе неодимсодержащих кристаллов серии VLC3 с импульсной продольной лазерной накачкой, электрооптической модуляцией добротности и возможностью динамического управления энергией в каждом импульсе с частотами повторения до 5 кГц. Разработка осуществлена сотрудниками кафедры лазерной техники и биомедицинской оптики и Лазерного центра НИУ ИТМО совместно с компанией “Vitro Laser” (Германия).

Оптическая схема и внешний вид лазерного излучателя VLC3.4V-G приведены на рис. 1, а, б соответственно. Продольная накачка активного элемента (АЭ) 4 осуществляется от импульсного диодного модуля с волоконным выходом. В резонаторе излучателя расположены глухое 1 и выходное 2 зеркала, призма Дове 5 с нанесенным поляризатором, два оборачивающих зеркала 3 или призма БР180 и электрооптический затвор 6 на основе кристалла ВВО. В зависимости от модели преобразование частоты излучения обеспечивается кристаллами КТР или LBO 8 после коррекции состояния поляризации фазовой пластиной 7. Далее пучок разворачивается на 180° дихроичными зеркалами 9, 10 и попадает в выходной телескоп с выбранным увеличением.

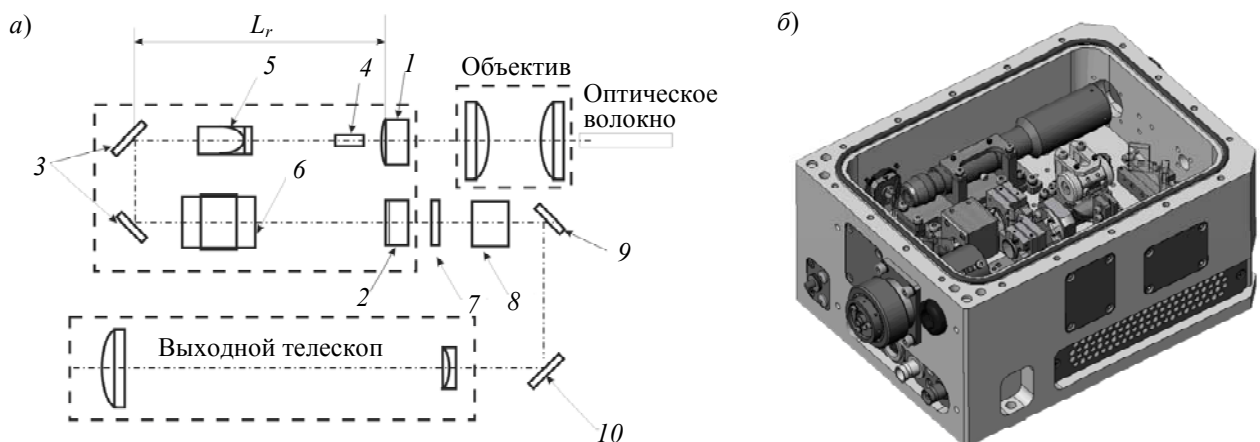


Рис. 1

Существенной особенностью разработанного лазерного излучателя является наличие систем, обеспечивающих стабилизацию температуры эмиттера диода накачки и тепловой линзы в активном элементе, а также температуры рабочей области нелинейных преобразователей частоты излучения вне зависимости от перерыва между соседними рабочими импульсами.

В основном этот результат достигается управлением формой тока подставки (I_{bias}) и задержкой момента включения электрооптического затвора относительно момента достижения максимального усиления активного элемента (ΔT_{QS}).

Диаграмма, поясняющая принцип работы систем стабилизации и управления параметрами выходных импульсов лазера в режиме 3D-маркировки представлена на рис. 2.

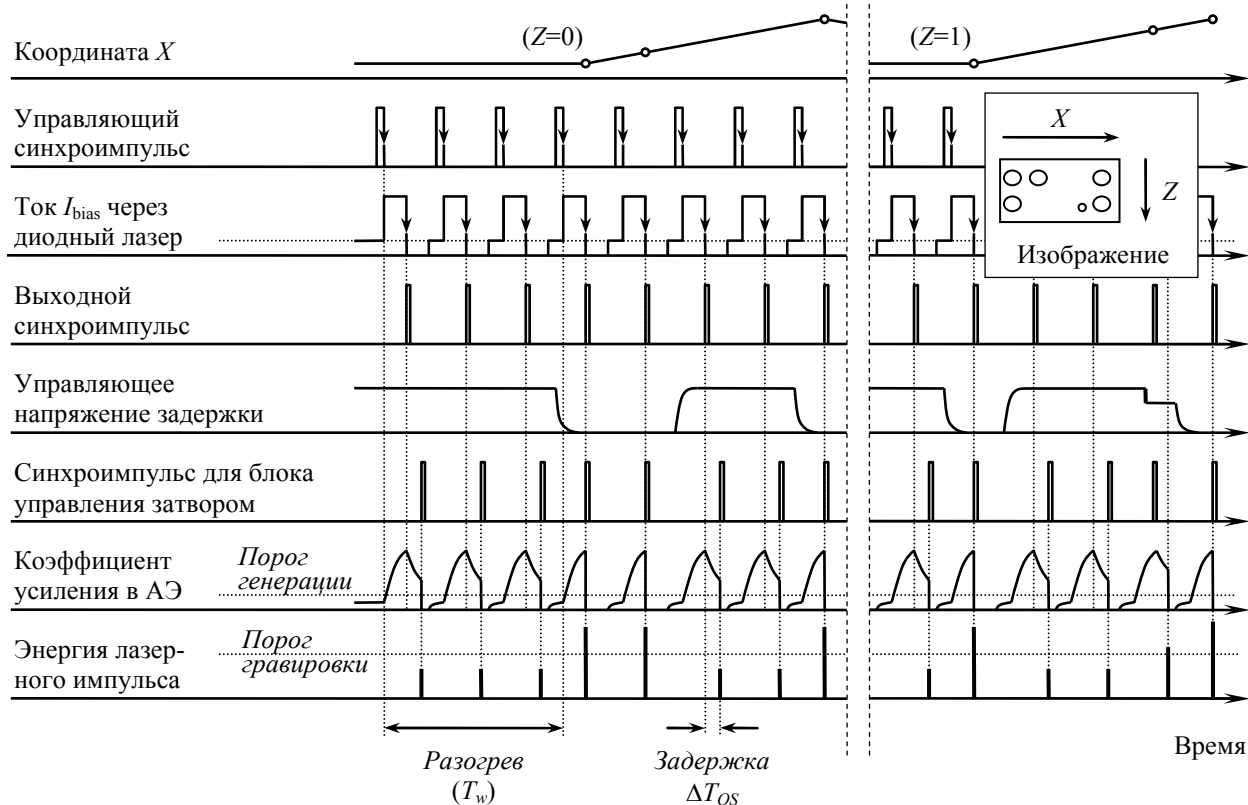


Рис. 2

Управляющий синхроимпульс подается на блок питания диодного модуля в момент достижения зеркалами сканера заданного положения. Задержка синхроимпульса открывания электрооптического затвора относительно заднего фронта импульса накачки задается текущим значением управляющего напряжения. Она определяет уровень энергии лазерного импульса, доставленного в заданную точку образца. В простейшем случае значение управляющего напряжения, изменяющего ΔT_{QS} , функционально связано с координатами точки маркировки в образце: $\Delta T_{QS} = f(X, Y, Z)$, и компенсирует изменение поперечных размеров сфокусированного лазерного пучка, а также потери излучения на поглощение и рассеяние в зависимости от координат наносимой точки. Для более сложных случаев компенсации фазовых искажений в объеме образца и для нанесения полутонных изображений значения ΔT_{QS} могут задаваться компьютерной программой после обработки исходного файла изображения и введения информации об оптической однородности образца. Количество предварительных импульсов разогрева в течение времени T_w и время удержания тока подставки I_{bias} вырабатываются программой и зависят от временного интервала между нанесением последующих точек маркировки.

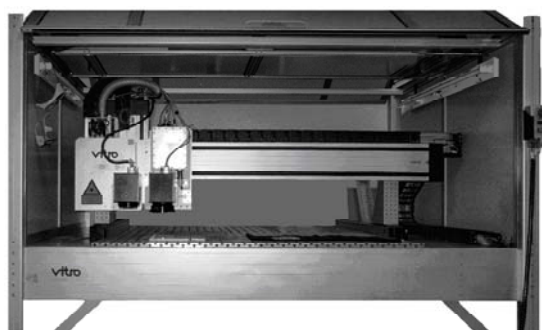
Общее управление разработанными для излучателей этой серии блоком питания диодных лазерных модулей LDMPS-100 [8], драйвером управления затвором HVSw6 [9] и лазерным бортовым контроллером LBC-4 осуществляется компьютерной программой. Программа обеспечивает доступ к изменению параметров накачки, температуры элементов, энергии импульсов генерации на лазерной частоте и частотах гармоник, а также индикацию состояния компонентов излучателя.

Использование систем стабилизации и динамического управления энергией в разработан-

ном лазерном источнике позволило значительно расширить инструментальные возможности при маркировке оптической продукции и создании декоративных изделий, а также при параметрической записи цифровой информации [5, 10—12]. Основные технические характеристики лазерных излучателей серии VLC3.4 (модификация 4 для серии VLC3) приведены в таблице.

Характеристика	VLC3.4G-IR	VLC3.4G-V	VLC3.4V-IR	VLC3.4V-G	VLC3.4V-UV
Активный элемент	Nd:YAG		Nd:YVO ₃		
Параметры импульса накачки:					
длина волны, нм	807		807		
максимальная энергия, мДж	9		5		
длительность импульса, мкс	180		105		
λ_g , нм	1064	532	1064	532	355
Максимальная энергия в импульсе E_{gmax} , мДж, более	1,8	0,8	1,3	0,6	0,4
Максимальная частота повторения импульсов, кГц	1,3	1,3	5	5	5
Длительность импульсов, нс	8	7,6	5	4,2	3,8
Качество выходного пучка M^2 , не хуже	1,5	1,5	1,6	1,6	1,6
Нестабильность энергии импульсов в течение 8 ч непрерывной работы RMS, %, не хуже	1,6	2,2	1,6	2,2	2,2
Максимальная нестабильность энергии от импульса к импульсу, %, не хуже	5	7	4	7	7
Диапазон регулировки энергии отдельного импульса генерации внешним напряжением	(0,01...1) E_{gmax}				
Увеличение выходного телескопа излучателя Γ^x	1—14	1—12	1—14	8—12	10
Диаметр выходного пучка D , мм	$0,9 \cdot \Gamma^x$	$0,7 \cdot \Gamma^x$	$0,8 \cdot \Gamma^x$	$0,65 \cdot \Gamma^x$	$0,55 \cdot \Gamma^x$
Расходимость излучения Θ , мрад	$M^2 \lambda_g / D$				
Габариты излучателя, мм	166×114×270				
Вес излучателя, кг	4,5				
Рабочий температурный диапазон, ...°C	15—30				

Лазеры серии VLC3 используются в составе технологических комплексов типа VITROLUX-C,-UC,-MC, производимых компанией “Vitro Laser”. Примеры гравировальных комплексов с использованием излучателей серии VLC3 приведены на рис. 3.



VITROLUX-2H



VITRO MC-1

Рис. 3

Минимальное расстояние между соседними пикселями в объеме коммерческого стекла марки BK7, достигаемое в комплексах, оснащенных ультрафиолетовыми лазерами VLC3.4V-UV с использованием объектива с фокусным расстоянием $F=56$ мм, составляет 12—14 мкм.

Для увеличения плотности записи информации в объеме прозрачных изделий с толщиной стенок менее 1 мм без повреждения внешних оптических поверхностей разработаны излучатели на основе микрочип-лазеров с пассивной модуляцией добротности. Лазеры серии VLC5 на основе композитных элементов $\text{Nd}^{3+}:\text{YAG}-\text{Cr}^{4+}:\text{YAG}$ обеспечивают генерацию отдельных субнаносекундных импульсов на длине волны третьей гармоники неодимсодержащих кристаллов (спектральный диапазон генерации в области 355 нм) с энергией до 80 мкДж либо генерацию пачек импульсов (в количестве до 4), предназначенных для нанесения матричных кодов в изделиях. Синхронизация положения перетяжки сфокусированного пучка в изделии, задаваемого текущими углами зеркал гальваносканера и моментом генерации субнаносекундного импульса, обеспечивается формой импульса накачки, в профиле которого присутствуют дополнительные субимпульсы длительностью 2—4 мкс, достаточные для превышения порога генерации моноимпульса в режиме пассивной модуляции добротности. В результате сокращения длительности импульсов и улучшения качества лазерного пучка (параметр M^2 , характерный для излучателей этого типа, составляет 1,15) минимальное допустимое расстояние между соседними пикселями записи в условиях, описанных для излучателя VLC3.4V-UV, сократилось до 8 мкм.

Примеры использования в различных областях рассмотренных лазерных источников приведены на рис. 4, 5: рис. 4, а — результат лазерной гравировки в объеме стекла марки ВК7; рис. 4, б — нанесение матричного кода в стенке контейнера для лекарств (толщина стенки 1 мм, появление микротрещин на поверхностях не допускается); рис. 5, а — тестовый скан для определения лучевой прочности и порога двухфотонной записи люминесцирующих центров в хрононах [6], внедренных в полимерную матрицу: точка 1 — присутствует оптический пробой матрицы, точка 2 — люминесцентная метка без пробоя; рис. 5, б — зависимость интенсивности люминесценции P_{lum} от радиальной координаты dr вдоль направления 3 (см. а), энергия наносекундного лазерного импульса на длине волны записи 532 нм уменьшается от периферии к центру по заданному закону.

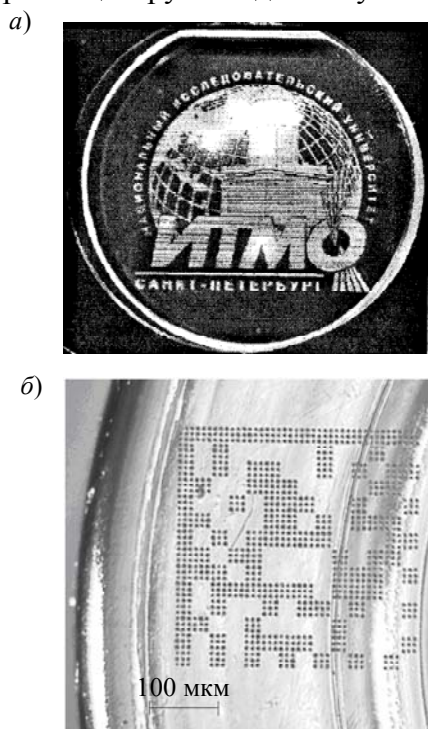


Рис. 4

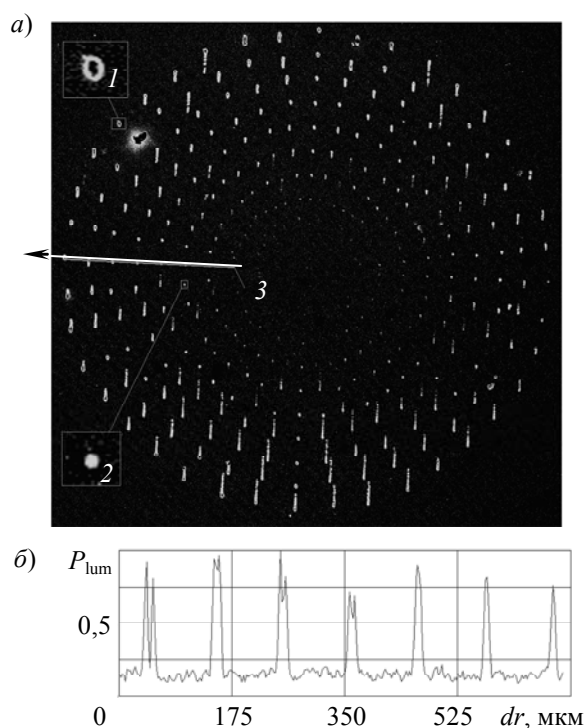


Рис. 5

Результатом проведенных работ, описанных в данной статье, стало создание промышленных твердотельных лазеров, предназначенных для использования в микротехнологиях, медицине и научных исследованиях. Лазеры серии VLC3 обеспечивают генерацию наносе-

кундных импульсов миллиджоульного уровня энергии с килogerцовой частотой повторения в одномодовом режиме, а лазеры серии VLC5 генерируют одномодовые одночастотные субна- носекундные импульсы с энергией порядка сотен микроджоулей и обеспечивают дискретную запись информации в объеме прозрачных материалов с повышенной плотностью.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Glass A. J., Guenther A. H.* Damage in laser glass-review — A status report // *Applied Optics*. 1973. Vol. 12, Iss. 4. P. 637—649.
2. *Маненков А. А., Прохоров А. М.* Лазерное разрушение прозрачных тел // *Успехи физ. наук*. 1986. Т. 148, вып 1. С. 5—38.
3. Пат. 321422 СССР. Метод изготовления декоративных изделий / *В. В. Агаджанов, В. И. Гостев, В. В. Груздев, Л. А. Карпоносков, В. И. Лавров* // Б.И. 1971. № 35.
4. *Troitski I.* Laser-induced image technology (yesterday, today, and tomorrow) // *Proc. of SPIE*. 2005. Vol. 5664. P. 293—301.
5. *Gnatyuk V. A., Kanev K. K., Gagarsky S. V.* Features of transparent material marking with nano- and subnanosecond laser pulses // *J. of Advanced Research in Physics*. 2011. Vol. 2, Iss. 2. P. 1—5.
6. *Barachevsky V. A., Krayushkin M. M., Kyiko V. V., Grebennikov E. P.* Light-sensitive organic recording media for 3D optical memory // *Phys. Status Solidi C* 8. 2011. N 9. P. 2841—2845.
7. *Морозов Н. Ф., Зимин Б. А., Семенов Б. Н., Судьенков Ю. В., Баранов Г. А., Беляев А. А., Цветков Г. В.* Исследование динамической прочности объема кварцевого стекла методом оптического пробоя // *Письма в ЖТФ*. 2004. Т. 30, № 6. С. 38—44.
8. *Тогатов В. В., Гагарский С. В., Гнатюк П. А., Черевко Ю. И.* Импульсный блок питания лазерных диодных модулей для накачки твердотельных лазеров // *Приборы и техника эксперимента*. 2007. № 2. С. 158—159.
9. *Тогатов В. В., Гагарский С. В., Гнатюк П. А., Терновский Д. С.* Высоковольтный импульсный наносекундный модулятор // Там же. 2007. № 6. С. 134—135.
10. *Гагарский С. В., Ермолаев В. С., Сергеев А. Н., Пузык М. В.* Исследование лучевой прочности диэлектрических покрытий, нанесенных на оптическую поверхность // *Изв. вузов. Приборостроение*. 2012. Т. 55, № 7. С. 80—84.
11. www.vitro.de, www.looxis.com
12. *Ayt A., Kiyko V., Gagarsky S., Barachevsky V., Kraushkin M., Iglev H.* An investigation of two-photon photochromism in thin-photochromic films // *Abstracts of Phenics Intern. Network Simp., Nantes, France*. 2012.

Сведения об авторах

- Сергей Валерьевич Гагарский** — канд. физ.-мат. наук; Санкт-Петербургский национальный исследовательский университет информационных технологий, механики и оптики, кафедра лазерной техники и биомедицинской оптики; E-mail: s.gagarsky@mail.ru
- Петр Анастасьевич Гнатюк** — Санкт-Петербургский национальный исследовательский университет информационных технологий, механики и оптики, кафедра лазерной техники и биомедицинской оптики; инженер; E-mail: gnatyuk@mail.ru
- Андрей Николаевич Сергеев** — аспирант; Санкт-Петербургский национальный исследовательский университет информационных технологий, механики и оптики, кафедра лазерной техники и биомедицинской оптики; E-mail: mg_phooenix@yahoo.com
- Валерий Юрьевич Храмов** — д-р техн. наук, профессор; Санкт-Петербургский национальный исследовательский университет информационных технологий, механики и оптики, кафедра лазерной техники и биомедицинской оптики; заведующий кафедрой; E-mail: khramov@grv.ifmo.ru

Рекомендована кафедрой лазерной техники и биомедицинской оптики

Поступила в редакцию
26.04.13 г.