

М. В. ИНОЧКИН, В. В. НАЗАРОВ, Д. Ю. САЧКОВ, О. П. СИДОРОВА,  
Л. В. ХЛОПОНИН, В. Ю. ХРАМОВ

## ОСОБЕННОСТИ МНОГОЧАСТОТНОЙ ГЕНЕРАЦИИ ИЗЛУЧЕНИЯ ЭРБИЕВЫХ ЛАЗЕРОВ

Теоретически и экспериментально исследована динамика многочастотной генерации излучения Er:YLF-лазера с диодной накачкой при наличии неоднородностей распределения накачки и потерь излучения в резонаторе. Получена генерация на четырех длинах волн: 2,66, 2,71, 2,81 и 2,84 мкм.

*Ключевые слова:* эрбиевый лазер, диодная накачка, многочастотная генерация.

**Введение.** Одно из актуальных направлений в современной лазерной технике — разработка малогабаритных лазеров для медицинских применений. Среди лазеров подобного типа большими перспективами обладают лазеры на эрбиевых кристаллах, излучающие в области 3 мкм. Особенность эрбиевых лазеров заключается в возможности генерации ряда импульсов на разных длинах волн (в пределах трехмикронного перехода  ${}^4I_{11/2}—{}^4I_{13/2}$ ) в течение одного импульса накачки [1]. В настоящей статье теоретически и экспериментально исследуется динамика процесса многочастотной генерации излучения Er:YLF-лазера с диодной накачкой в условиях малого числа поперечных мод и наличия неоднородностей поперечного распределения излучения накачки и потерь излучения в резонаторе.

**Пространственная модель маломодового лазера.** Для построения численной модели использовался экспериментальный Er:YLF-лазер, имеющий резонатор, образованный плоским и сферическим зеркалами. Апертурной диафрагмой, определяющей максимальный порядок поперечных мод, служила апертура активного элемента ( $\varnothing 2,1$  мм без учета фасок). Согласно выражениям для диаметров мод высших порядков, приведенным в работе [2], в данном резонаторе способны возбуждаться лаггерр-гауссовы моды с радиальным индексом не выше 2. При этом учитывалось, что генерация одной поперечной моды в какой-либо области сечения активного элемента подавляет генерацию остальных мод в этой области [3]. Как показал расчет возможных наборов поперечных мод генерации, в большинстве случаев размер пространственных областей перекрытия возбуждающихся мод не превышает 15 % от их площади.

Данный факт позволяет пренебречь взаимным влиянием поперечных мод, присутствующих в сгенерированном излучении. В этом случае поперечное сечение активного элемента можно разбить на ряд условно неперекрывающихся зон, в каждой из которых генерация считается независимой. В разработанной модели Er:YLF-лазера принималось, что зоны генерации имеют форму коаксиальных колец (кроме первой зоны, имеющей форму круга с центром на оси активного элемента), в пределах которых интенсивность излучения распределена равномерно.

При расчетах площадь поперечного сечения активного элемента разбивалась на 3 зоны. Диаметр центральной зоны задан равным диаметру основной гауссовой моды  $TEM_{00}$ . Внешний диаметр второй зоны равен диаметру лаггерр-гауссовой моды с радиальным индексом 0 и азимутальным индексом 1. Внешний диаметр третьей зоны выбирался с учетом размера фасок по краям активного элемента (по 0,2 мм) и соответствовал моде с радиальным индексом 1.

Предложенный метод позволяет учесть неравномерность поперечного распределения излучения накачки в активном элементе, а также разные величины потерь излучения на

разных модах. Путем отдельного численного расчета были определены характеристики распределения поглощенной мощности накачки и потерь излучения в пределах выбранных зон генерации (см. таблицу; здесь  $D$  — диаметр зоны генерации).

Номер зоны	Поглощенная мощность излучения накачки, %	$D$ , % от диаметра активного элемента	Неактивные потери, %, за полный обход резонатора при $\lambda$ , равном			
			2,66 мкм	2,71 мкм	2,81 мкм	2,84 мкм
1	14	28	1,4	1,6	2	2,1
2	16	45	1,5	1,7	2,1	2,2
3	70	80	4	4,5	4,7	4,8

Для расчета динамики процесса генерации излучения в каждой зоне предлагается использовать следующую систему балансных уравнений для населенностей ( $n_j$ ) шести нижних уровней иона эрбия и плотности потока фотонов излучения генерации ( $s_i$ ) на четырех длинах волн:

$$\left. \begin{aligned}
 \frac{dn^k_1}{dt} &= -n^k_1 A_{10} + n^k_2 A_{21} + n^k_3 A_{31} + n^k_4 A_{41} + n^k_5 A_{51} + W_{21} n^k_2 + 2\alpha_1 n^k_0 n^k_3 + \alpha_2 n^k_0 n^k_4 + \\
 &\quad + \alpha_3 n^k_0 n^k_5 - 2\gamma^k_1 (n^k_1)^2 - \gamma_3 n^k_1 n^k_2 - \gamma_4 n^k_1 n^k_3 + \sum_{i=1}^4 s^k_i (\sigma_e(\lambda_i) n^k_2 - \sigma_a(\lambda_i) n^k_1); \\
 \frac{dn^k_2}{dt} &= -n^k_2 (A_{20} + A_{21}) + n^k_3 A_{32} + n^k_4 A_{42} + n^k_5 A_{52} + W_{32} n^k_3 - W_{21} n^k_2 + \alpha_2 n^k_0 n^k_4 + \\
 &\quad + 2\alpha_4 n^k_0 n^k_5 - 2\gamma^k_2 (n^k_2)^2 - \gamma_3 n^k_1 n^k_2 + R^k - \sum_{i=1}^4 s^k_i (\sigma_e(\lambda_i) n^k_2 - \sigma_a(\lambda_i) n^k_1); \\
 \frac{dn^k_3}{dt} &= -n^k_3 \left( \sum_{i=0}^2 A_{3i} + W_{32} \right) + n^k_4 A_{43} + n^k_5 A_{53} + W_{43} n^k_4 - \alpha_1 n^k_0 n^k_3 + \alpha_3 n^k_0 n^k_5 + \\
 &\quad + \gamma_1 (n^k_2)^2 - \gamma_4 n^k_1 n^k_3; \\
 \frac{dn^k_4}{dt} &= -n^k_4 \left( \sum_{i=0}^3 A_{4i} + W_{43} \right) + n^k_5 (A_{53} + W_{54}) - \alpha_2 n^k_0 n^k_4 - \gamma_3 n^k_1 n^k_2; \\
 \frac{dn^k_5}{dt} &= -n^k_5 \left( \sum_{i=0}^4 A_{5i} + W_{54} \right) - (\alpha_3 + \alpha_4) n^k_0 n^k_5 + \gamma_3 (n^k_2)^2 + \gamma_4 n^k_1 n^k_3; \\
 \frac{ds^k_1}{dt} &= \nu \mu s^k_1 \left( (\sigma_e(\lambda_1) n^k_2 - \sigma_a(\lambda_1) n^k_1) - \delta^k(\lambda_1) \right) + n^k_2 q; \\
 &\dots\dots\dots \\
 \frac{ds^k_4}{dt} &= \nu \mu s^k_4 \left( (\sigma_e(\lambda_4) n^k_2 - \sigma_a(\lambda_4) n^k_1) - \delta^k(\lambda_4) \right) + n^k_2 q,
 \end{aligned} \right\} (1)$$

где  $n^k_0 = n_{\text{tot}} - \sum_{j=1}^5 n^k_j$  — населенность основного состояния ( $^4I_{15/2}$ ) в  $k$ -й зоне,  $n_{\text{tot}}$  — общая

концентрация частиц активатора;  $A_{xy}$  — вероятность спонтанного излучательного перехода между уровнями  $x$  и  $y$ ;  $W_{xy}$  — вероятность спонтанного безызлучательного перехода между уровнями  $x$  и  $y$ ;  $\gamma_z$ ,  $\alpha_z$  — коэффициенты, характеризующие скорости процессов апконверсии ( $\gamma_z$ ) и самотушения ( $\alpha_z$ );  $q$  — коэффициент, учитывающий „вклад“ спонтанного излучения в

плотность потока фотонов в резонаторе;  $v=c/n_{\text{ар}}$  — скорость света в активном элементе, здесь  $n_{\text{ар}}$  — показатель преломления материала активного элемента (active rod);  $\sigma_e(\lambda_i)$  — сечение вынужденного излучения на  $i$ -й длине волны;  $\sigma_a(\lambda_i)$  — сечение поглощения на  $i$ -й длине волны;  $s_i^k$  — плотность потока фотонов в резонаторе на  $i$ -й длине волны в  $k$ -й зоне;  $\mu$  — коэффициент заполнения резонатора активной средой и излучением основной моды;  $\lambda_i$  — длина волны, на которой осуществляется генерация ( $\lambda_1=2,66$  мкм,  $\lambda_2=2,71$  мкм,  $\lambda_3=2,81$  мкм,  $\lambda_4=2,84$  мкм);  $R^k$  — скорость накачки на верхний лазерный уровень в  $k$ -й зоне;  $\delta^k(\lambda_i)$  — показатель полных потерь излучения в активном элементе на  $i$ -й длине волны в  $k$ -й зоне.

При расчете коэффициента заполнения резонатора учитывается, что активный элемент заполняет не весь его объем, и тогда значение  $\mu$  рассчитывается по формуле  $\mu = n_{\text{ар}}l_{\text{ар}} / (L + (n_{\text{ар}} - 1)l_{\text{ар}})$ , где  $l_{\text{ар}}$  — длина активного элемента,  $L$  — длина резонатора.

Неоднородность поперечного распределения излучения накачки определяется с учетом параметра скорости накачки  $R^k$ , рассчитываемого для каждой зоны по формуле

$$R^k = \frac{\xi P_p}{h\nu_p V^k}, \quad (2)$$

где  $\xi$  — доля мощности излучения накачки, поглощенной в пределах  $k$ -й зоны;  $P_p$  — общая мощность излучения накачки,  $h\nu_p$  — энергия кванта накачки,  $V^k$  — объем  $k$ -й зоны.

Неоднородность поперечного распределения потерь излучения в резонаторе учитывается через параметр общих неселективных потерь  $\delta^k(\lambda_i)$ . При этом логично предположить, что потери излучения в первой (центральной) зоне минимальны и возрастают с увеличением внешнего диаметра зоны. Потери излучения в первой зоне могут быть определены в ходе серии экспериментов по значениям пороговой энергии накачки с помощью методики, описанной в работе [4]. Значения потерь в остальных зонах определяются на основе известных показателей  $\delta^1(\lambda_i)$  и, по сути, являются свободными параметрами.

Для расчетов были использованы численные значения вероятностей излучательных и безызлучательных переходов (см. работу [5]) и сечений вынужденного излучения на рассматриваемых длинах волн (см. работу [6]). Коэффициенты скоростей апконверсии ( $\gamma_z$ ) и самогашения ( $\alpha_z$ ), рассчитаны по формулам, приведенным в работе [5].

**Результаты расчетов.** Расчеты, проведенные в рамках описанной модели, показывают, что длина волны генерируемого излучения должна последовательно меняться от наиболее короткой к наиболее длинной (рис. 1). При этом наблюдается перекрытие по времени генерации на „соседних“ по спектру длинах волн, что связано с различной величиной задержки начала генерации на разных длинах волн в каждой зоне. Отметим, что в пределах одной зоны генерация на разных длинах волн осуществляется строго последовательно, без перекрытий по времени.

Последовательность переключения длин волн связана с заселением нижнего лазерного уровня в течение генерируемого импульса, а также с разными отношениями сечений вынужденного излучения  $\sigma_e(\lambda_i)$  и поглощения  $\sigma_a(\lambda_i)$  на разных длинах волн.

Вариации времени задержки начала генерации в разных зонах являются прямым следствием неоднородностей накачки и потерь. В данном случае в центральной зоне (№ 1) скорость накачки выше, чем в среднем по активному элементу. При этом потери излучения в этой зоне минимальны. По этой причине время задержки начала генерации на каждой длине волны в зоне № 1 меньше соответствующего времени для зон № 2 и 3. Таким образом, в то время как в зоне № 1 значение длины волны изменилось (например, с 2,66 на 2,71 мкм), в зонах № 2 и 3 генерация продолжается на длине волны 2,66 мкм.

Отметим, что наибольшая доля энергии излучается в зоне № 3, имеющей самую большую площадь. Соответственно и дифференциальный КПД генерации в основном определяется параметрами этой зоны.

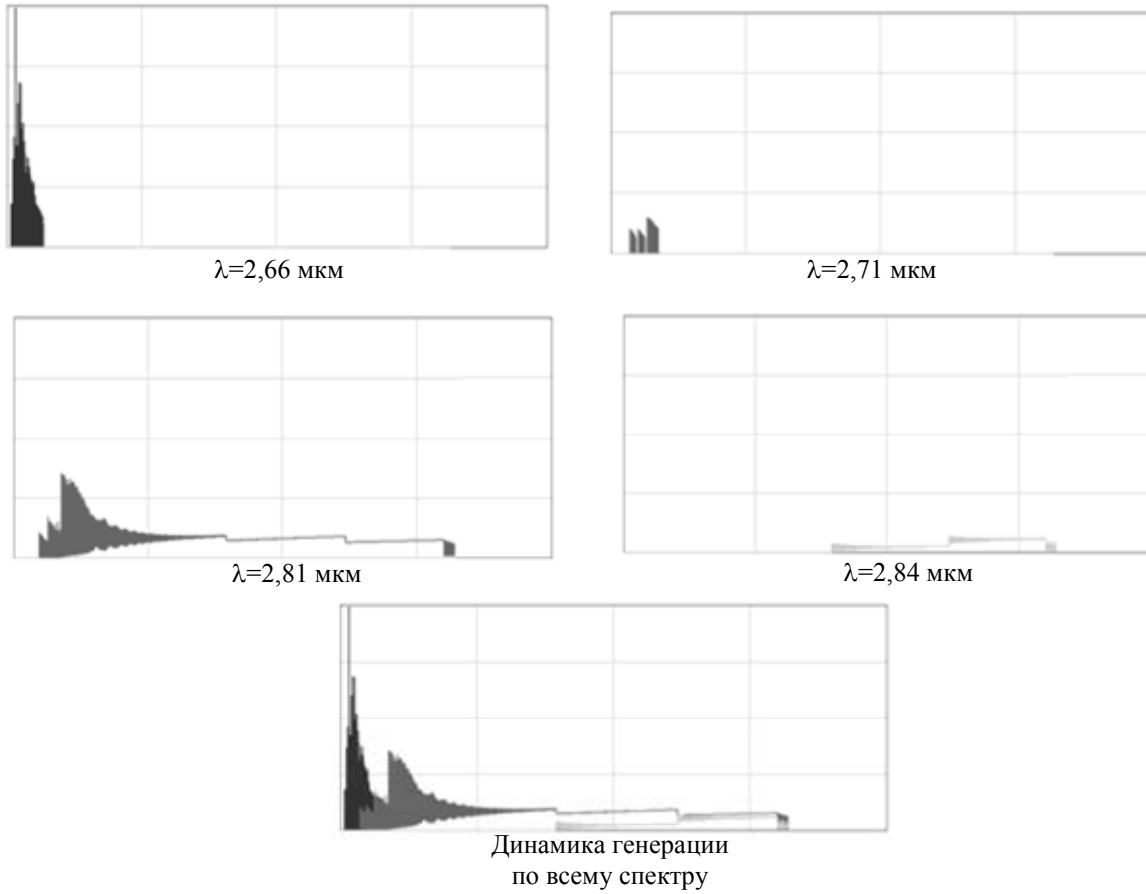


Рис. 1

**Результаты экспериментов.** На рис. 2 представлена схема экспериментального стенда. Активным элементом 2 исследуемого лазера служит кристалл  $\text{Er:YLF}$  с концентрацией эрбия 15 %, накачиваемый по продольно-поперечной схеме излучением матрицы лазерных диодов 1.

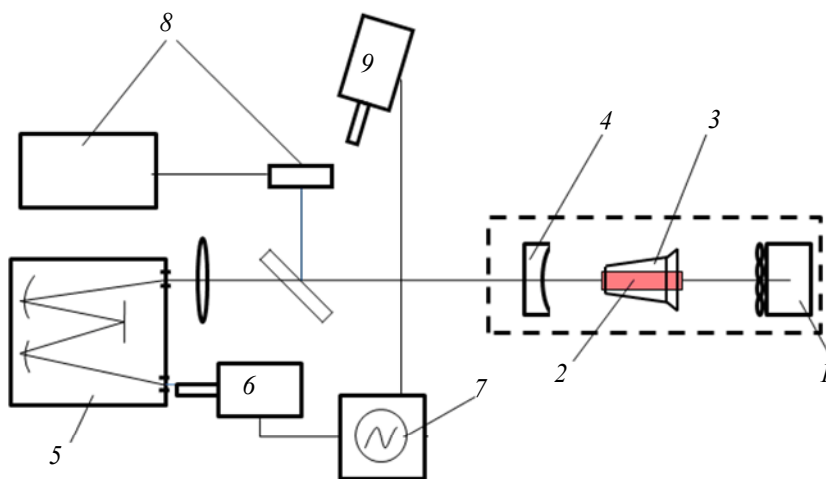


Рис. 2

Продольно-поперечная схема накачки, реализованная посредством призмы полного внутреннего отражения 3 и приклеенных к матрице диодов микролинз, призвана обеспечить прокачку всего объема активного элемента. Резонатор лазера образован плоским диэлектрическим

зеркалом, напыленным на торце активного элемента ( $R_{3 \text{ мкм}} > 99 \%$ ,  $T_{0,97 \text{ мкм}} > 99 \%$ ), и внешним сферическим зеркалом 4.

Динамика генерации излучения лазера по всему спектру наблюдалась с помощью фотодиода 9, а по отдельным спектральным компонентам — с помощью монохроматора 5 и фотодиода 6. Сигналы фотодиодов принимались осциллографом 7. Энергия импульса генерируемого излучения определялась измерителем 8 энергии и мощности.

Основные параметры элементов лазера приведены ниже.

Коэффициент отражения выходного зеркала, %	
при длине волны 2,66 мкм .....	95
2,71 мкм .....	95
2,81 мкм .....	95,5
2,84 мкм .....	96
Длина резонатора, мм .....	100
Размеры активного элемента, мм .....	$\varnothing 2,1 \times 35$
Мощность накачки, Вт .....	340
Показатель преломления материала активного элемента .....	1,45
Средняя длина волны излучения накачки, нм .....	976
Радиус кривизны выходного зеркала, м .....	0,5
Концентрация ионов эрбия в активном элементе, ат. % .....	15

Как и ожидалось согласно расчетам, в экспериментах наблюдалась генерация излучения на четырех длинах волн трехмикронного диапазона: 2,66, 2,71, 2,81 и 2,84 мкм: см. рис. 3 (длительность импульса накачки 2 мс, мощность накачки 340 Вт). При этом существовало перекрытие по времени генерации на „соседних“ длинах волн, что наиболее отчетливо видно в области  $\lambda=2,81 \text{ мкм}$  и  $\lambda=2,84 \text{ мкм}$ .

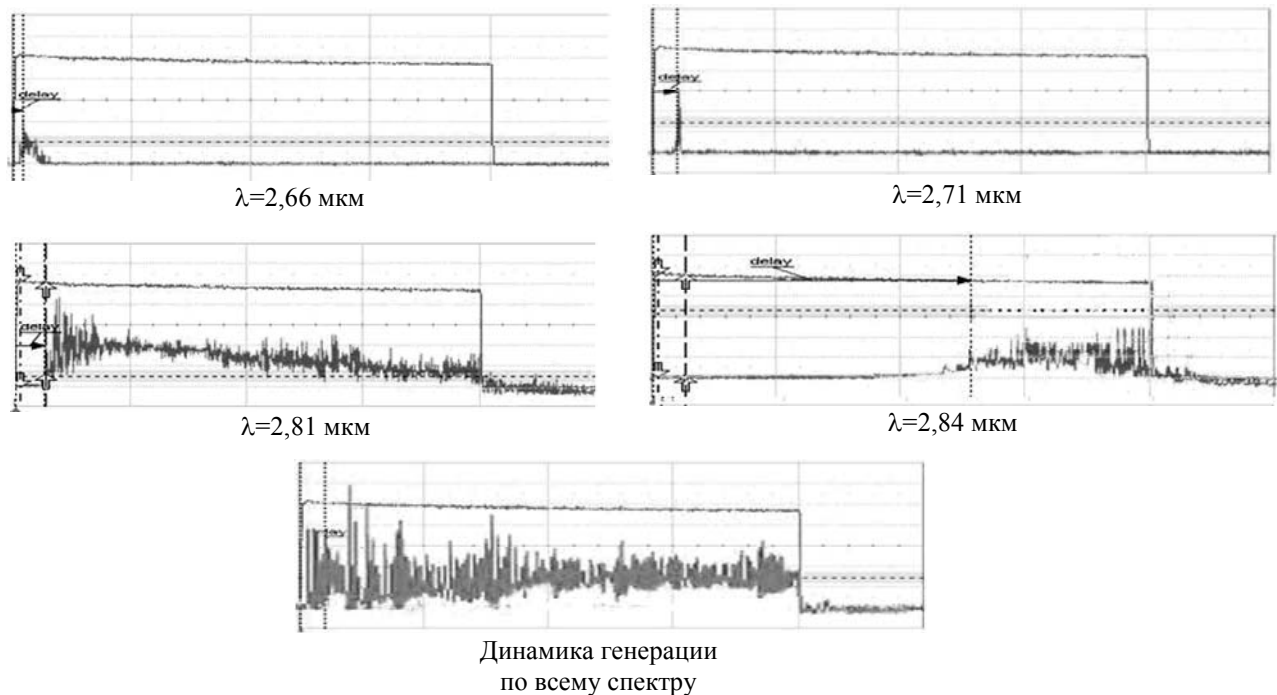


Рис. 3

Предложенная модель Er:YLF-лазера может быть использована для оптимизации спектрально-энергетических параметров генерации излучения эрбиевых лазеров.

Работа выполнена в рамках аналитической ведомственной целевой программы „Развитие научного потенциала высшей школы“, грант № РНП. 2.1.2/4867.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Каминский А. А. Лазерные кристаллы. М.: Наука, 1975. 256 с.
2. Быков В. П., Силичев О. О. Лазерные резонаторы. М.: ФИЗМАТЛИТ, 2004. 320 с.
3. Ханин Я. И. Основы динамики лазеров. М.: Наука, Физматлит, 1999. 368 с.
4. Koechner W., Bass M. Solid State Lasers: A Graduate Text. N. Y.: Springer, 2003. P. 409.
5. Ткачук А. М., Разумова И. К., Мирзаева А. А. и др. Ур-конверсия и заселение возбужденных уровней иона эрбия в кристаллах  $\text{LiY}_{1-x}\text{Er}_x\text{F}_4$  ( $x=0.003-1$ ) при непрерывной накачке излучением InGaAs-лазерных диодов // Оптика и спектроскопия. 2002. Т. 92, № 1. С. 73—88.
6. Absolute excited state absorption cross section measurements in  $\text{Er}^{3+}:\text{LiYF}_4$  for laser applications around  $2.8 \mu\text{m}$  and  $551 \text{ nm}$  / C. Labb'e, J.-L. Doualan, S. Girard, R. Moncorg'e, M. Thuau // J. Phys.: Condens. Matter. 2000. Vol. 12. P. 6943—6957.

**Сведения об авторах**

- Михаил Владимирович Иночкин** — канд. физ.-мат. наук; Санкт-Петербургский национальный исследовательский университет информационных технологий, механики и оптики, кафедра лазерной техники и биомедицинской оптики;  
E-mail: m\_inochkin@mail.ru
- Вячеслав Валериевич Назаров** — канд. техн. наук; Санкт-Петербургский национальный исследовательский университет информационных технологий, механики и оптики, кафедра лазерной техники и биомедицинской оптики;  
E-mail: v\_v\_nazarov@mail.ru
- Дмитрий Юрьевич Сачков** — аспирант; Санкт-Петербургский национальный исследовательский университет информационных технологий, механики и оптики, кафедра лазерной техники и биомедицинской оптики;  
E-mail: dsachkov@gmail.com
- Ольга Петровна Сидорова** — аспирант; Санкт-Петербургский национальный исследовательский университет информационных технологий, механики и оптики, кафедра лазерной техники и биомедицинской оптики;  
E-mail: sidorova\_olga86@rambler.ru
- Леонид Викторович Хлопонин** — канд. техн. наук; Санкт-Петербургский национальный исследовательский университет информационных технологий, механики и оптики, кафедра лазерной техники и биомедицинской оптики;  
E-mail: l\_khloponin@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;  
E-mail: khramov@grv.ifmo.ru

Рекомендована кафедрой  
лазерной техники и биомедицинской оптики

Поступила в редакцию  
07.05.10 г.