

полностью подавляется поглощение из возбужденного состояния для длин волн более 600 нм [2].

На рис. 4 показана кинетика затухания люминесценции кристалла Tb:YAF на переходе  $^5D_4 \rightarrow ^7F_5$ . Возбуждение кристалла осуществлялось световыми импульсами наносекундной длительности на длине волны 488 нм, люминесценция регистрировалась на длине волны 545 нм. Кинетика затухания люминесценции хорошо аппроксимируется экспоненциальной функцией с постоянной времени затухания 1,7 мс. Учитывая излучательное время жизни метастабильного уровня  $^5D_4$ , равное 1,83 мс [4], квантовый выход люминесценции составил около 93%. Достаточно высокое значение квантового выхода для кристалла с содержанием ионов тербия 35 ат.% обусловлено в первую очередь большим энергетическим зазором (около  $14500 \text{ см}^{-1}$ ) между уровнем  $^5D_4$  и верхним

уровнем мультиплета  $^7F_1$ , а также отсутствием кросс-релаксационных процессов. Это указывает на то, что для лазерных применений можно использовать высококонцентрированные образцы (вплоть до 100 ат.%) без существенного сокращения жизни верхнего лазерного уровня.

#### Литература

1. Out of blue: semiconductor laser pumped visible rare-earth doped lasers / C. Kraenkel [et al.] // *Las. Photon. Rev.* – 2016. – Vol. 10, № 2. – P. 548–564.
2. Efficient continuous wave laser operation of Tb<sup>3+</sup>-doped fluoride crystals in the green and yellow spectral regions / P. W. Metz [et al.] // *Las. Photon. Rev.* – 2016. – Vol. 10, № 2. – P. 335–344.
3. Dorenbos, P. The 5d level positions of the trivalent lanthanides in inorganic compounds / P. Dorenbos // *J. Lumin.* – 2000. – Vol. 91. – P. 155–176.
4. Transitions intensities and cross-sections of Tb<sup>3+</sup> ions in YAl<sub>3</sub>(BO<sub>3</sub>)<sub>4</sub> crystal / M. Demesh [et al.] // *OSA Continuum.* – 2018. – Vol. 57, № 21. – P. 5923–5928.

УДК 621.3.038.825.2

#### ЛАЗЕР НА КРИСТАЛЛЕ Pr:YLF ПРИ НАКАЧКЕ InGaN ЛАЗЕРНЫМ ДИОДОМ

Демеш М.П.<sup>1</sup>, Кисель В.Э.<sup>1</sup>, Кулешов Н.В.<sup>1</sup>,  
Низамутдинов А.С.<sup>2</sup>, Морозов О.С.<sup>2</sup>, Кораблева С.Л.<sup>2</sup>, Семашко В.В.<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Научно-исследовательский центр оптических материалов и технологий БНТУ  
Минск, Республика Беларусь

<sup>2</sup>Институт физики, Казанский федеральный университет  
Казань, Российская Федерация

**Аннотация.** На основе абсорбционно-люминесцентных свойств кристалла литий-иттриевого фторида, активированного ионами празеодима, определены требования к InGaN лазерным диодам, рассчитаны система фокусировки и резонатор Pr:YLF лазера, генерирующего на переходе  $^3P_1 \rightarrow ^3H_5$ . Выходная мощность лазерного излучения составила 0,5 Вт.

**Ключевые слова:** празеодим, фторид, InGaN лазерный диод, лазер видимого диапазона.

#### Pr:YLF LASER PUMPED BY InGaN LASER DIODE

Demesh M.<sup>1</sup>, Kisel V.<sup>1</sup>, Kuleshov N.<sup>1</sup>  
Nizamutdinov A.<sup>2</sup>, Morozov O.<sup>2</sup>, Korableva S.<sup>2</sup>, Semashko V.<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Center for Optical Materials and Technologies of BNTU  
Minsk, Belarus

<sup>2</sup>Institute of Physics, Kazan Federal University  
Kazan, Russia

**Abstract.** Based on the absorption-luminescence properties of praseodymium doped lithium-yttrium fluoride crystal the requirements for InGaN laser diodes are determined. The focusing system and resonator of a Pr:YLF laser generating at the  $^3P_1 \rightarrow ^3H_5$  transition are designed. An output power of 0.5 W was achieved.

**Key words:** praseodymium, fluoride, InGaN laser diode, visible laser.

Адрес для переписки: Демеш М.П., пр. Независимости, 65, г. Минск 220113, Республика Беларусь  
e-mail: maxim.demesh@bntu.by

В последнее время наблюдается значительный интерес к лазерам, генерирующим в видимом спектральном диапазоне при непосредственной накачке источниками в видимой области спектра. Это стало возможным благодаря развитию InGaN лазерных диодов, а также оптически накачиваемых полупроводниковых лазеров, излучение которых лежит в фиолетово-

синей области спектра. В данной области лежат полосы поглощения ионов редкоземельных элементов ( $\text{Pr}^{3+}$ ,  $\text{Tb}^{3+}$ ,  $\text{Sm}^{3+}$ ,  $\text{Dy}^{3+}$ ,  $\text{Eu}^{3+}$ ), используемых для получения видимой генерации [1]. Наиболее перспективным из перечисленных ионов представляется ион празеодима ( $\text{Pr}^{3+}$ ) в кристаллах фторидов (в частности  $\text{LiYF}_4$  (далее YLF)), как обладающих малой силой кристалли-

ческого поля и большим значением ширины запрещенной зоны. Энергетическая схема уровней данного иона показана на рис. 1 В данных материалах получена эффективная генерация в видимом диапазоне [2–4]. На определенном этапе развития лазеров видимой области спектра повышение выходной мощности излучения обеспечивалось мультиплексацией маломощных (до 1,5 Вт) лазерных диодов и (или) использованием двусторонней накачки активного элемента [4]. Появление на рынке одноэмиттерных лазерных диодов с выходной мощностью 5 Вт дало новый виток повышения выходной мощности данных лазеров.

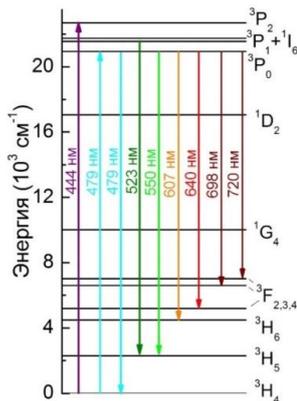


Рисунок 1 – Энергетическая схема уровней Pr<sup>3+</sup>

Среди излучательных переходов (рис. 1) иона празеодима примечателен переход  $^3P_1 \rightarrow ^3H_5$ , который соответствует длине волны излучения 522,6 нм. Выбор данного перехода обусловлен особым значением его второй гармоники для применений в медицине и биологии.

Требования к спектральному составу излучения диода накачки определялись на основе абсорбционных свойств кристалла Pr:YLF (рис. 2).

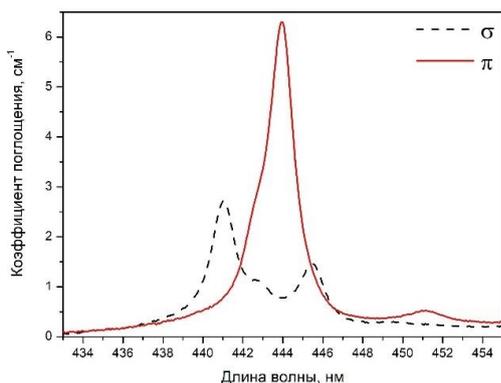


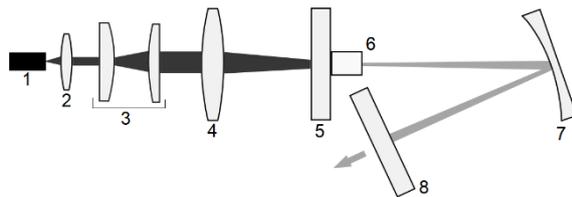
Рисунок 2 – Спектр поглощения кристалла Pr:YLF

Для лазерных экспериментов был изготовлен активный элемент из кристалла Pr(0,3 ат. %):YLF, вырезанный перпендикулярно кристаллографической оси *a*, с размерами 5×3×3 мм, обеспечивающий поглощение излучения накачки около 90 %. Также при данной концентрации ионов-активаторов не сказываются эффекты концен-

трационного тушения люминесценции верхнего лазерного уровня. Активный элемент, обернутый в индиевую фольгу, закреплялся в пассивном медном теплоотводе.

Учитывая температурную (токовую) зависимость длины волны излучения лазерного диода, для ее оптимального спектрального перекрытия с полосой поглощения активного элемента необходима температурная стабилизация лазерного диода, реализуемая с помощью элемента Пельтье. Диод устанавливался таким образом, чтобы согласовать плоскость поляризации его излучения с оптической осью активного элемента.

Пространственные характеристики излучения лазерного диода измерялись CCD камерой для дальнейшего расчета системы фокусировки, схема которой представлена на рис. 3. Так как эмиттер лазерного диода 1 имеет прямоугольную форму с размером 1×50 мкм, то параметр качества пучка  $M^2$  различается для двух взаимно перпендикулярных направлений и составляет 1,4×15, соответственно. Для улучшения пространственного перекрытия мод накачки и генерации между коллимирующей 2 и фокусирующей 4 линзами помещался цилиндрический телескоп 3 с увеличением 13<sup>x</sup> (рис. 3).



1 – лазерный диод, 2 – коллимирующая линза, 3 – цилиндрический телескоп, 4 – фокусирующая линза, 5 – входной зеркало, 6 – активный элемент, 7 – поворотное зеркало, 8 – выходное зеркало

Рисунок 3 – Схема экспериментальной установки

Резонатор лазера имел полусферическую конфигурацию (рис. 3) и состоял из плоского зеркала 5, пропускающего около 98 % излучения накачки и отражающего более 99,9 % излучения генерации на длине волны около 523 нм, поворотного сферического зеркала 7 (радиус кривизны 100 мм) и плоского выходного зеркала. Излучение накачки фокусировалось в пятно диаметром 80 мкм.

При поглощенной мощности накачки 3,5 Вт мощность выходного излучения на длине волны 522,6 нм составила 0,5 Вт при пропускании выходного зеркала 3,2 %. Пространственное распределение излучения генерации показано на рис. 4. Эллиптичность пятна обусловлена наличием положительной термической линзы для  $\pi$ -поляризации излучения, что характерно для кристаллов YLF, активированных ионами редкоземельных элементов [5]. Параметр качества пучка  $M^2 < 1,1$ .

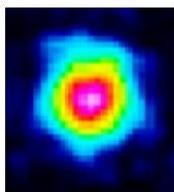


Рисунок 4 – Пространственное распределение интенсивности в лазерном пучке

#### Литература

1. Out of blue: semiconductor laser pumped visible rare-earth doped lasers / C. Kraenkel [et al.] // *Las. Photon. Rev.* – 2016. – Vol. 10, № 2. – P. 548–564.

2. High-power red, orange, and green Pr<sup>3+</sup>:YLiF<sub>4</sub> lasers / P. W. Metz [et al.] // *Opt. Lett.* – 2014. – Vol. 39. – P. 3193–3196.

3. Power scaling of blue-diode-pumped Pr:YLF lasers at 523.0, 604.1, 606.9, 639.4, 697.8 and 720.9 nm / S. Luo [et al.] // *Opt. Commun.* – 2016. – Vol. 380. – P. 357–360.

4. Tanaka, H. High-power visibly emitting Pr<sup>3+</sup>:YLF laser end pumped by single-emitter or fiber-coupled GaN blue laser diodes / H. Tanaka, S. Fujita, F. Kannari // *App. Opt.* – 2018. – Vol. 57, № 21. – P. 5923–5928.

5. Energy-Transfer Upconversion and Thermal Lensing in High-Power End-Pumped Nd:YLF Laser Crystals / P. J. Hardman [et al.] // *IEEE J. Quantum. Electron.* – 1999. – Vol. 35, № 4. – P. 647–652.

УДК 53.082.53

### ИЗМЕРЕНИЕ МОЩНОСТИ ЛАЗЕРНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ, ОТРАЖЕННОГО ОТ ЛАМБЕРТОВА КРУГЛОГО ОТРАЖАТЕЛЯ Дерменжи И.А.<sup>1</sup>, Барышникова С.Ю.<sup>1</sup>, Кочурова Д.Н.<sup>2</sup>, Калугин А.И.<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Ижевский государственный технический университет имени М.Т. Калашникова

<sup>2</sup>Удмуртский федеральный исследовательский центр Уральского отделения Российской академии наук  
Ижевск, Российская Федерация

**Аннотация.** Представлена теоретическая модель для расчета мощности лазерного излучения, принятой после отражения гауссова пучка от круглого ламбертова отражателя. Экспериментально получены мощности лазерного излучения, отраженного от пластиковых (поливинилхлорид) дисков различного радиуса, в зависимости от дистанции от фотоприемника до объекта. Установлено соответствие теоретической модели экспериментальным зависимостям.

**Ключевые слова:** гауссов пучок, лазерное излучение, ламбертов отражатель, лазерный дальномер, ЭПО.

### MEASURING OF LASER RADIATION POWER REFLECTED FROM LAMBERT CIRCULAR REFLECTOR Dermenzhi I.<sup>1</sup>, Baryshnikova S.<sup>1</sup>, Kochurova D.<sup>2</sup>, Kalugin A.<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Kalashnikov Izhevsk State Technical University

<sup>2</sup>Udmurt Federal Research Center of the Ural Branch of the Russian Academy of Sciences  
Izhevsk, Russia

**Abstract.** A theoretical model for calculating the power of laser radiation received after reflection of a Gaussian beam from a circular Lambert reflector is presented. The power of laser radiation reflected from plastic (polyvinyl chloride) disks of various radii, depending on the distance from the photodetector to the object, was experimentally obtained. The correspondence of the theoretical model to the experimental dependences has been established.

**Key words:** Gaussian beam, laser radiation, Lambert reflector, laser rangefinder, LRCS.

e-mail: ackad1976@yandex.ru

В лидарных и дальнометрических системах важной задачей является определение величины мощности лазерного излучения, принятой после отражения или рассеяния от исследуемого объекта [1, 2]. Принятый фотоприемником лазерный сигнал зависит от многих параметров: характеристик объекта, конструктивных параметров зондирующей установки. В общем случае регистрируемый фотоприемником сигнал определяется пространственным и временным распределением плотности мощности излучаемого лазерного импульса, геометрической формой зондируемого объекта, его отражательными свойствами и характеристиками среды распространения излучения [3]. В условиях однопозиционной локации и нормального падения лазерного излучения на круглый объект радиусом

$r_t$ , расположенного на расстоянии  $l$  от входного окна фотоприемника, и который отражает согласно закону Ламберта, легко получить следующее выражение для принятой мощности  $P$ :

$$P = P_l \cdot \frac{\sigma_d \eta \rho_t}{2\pi l^2} \left( 1 - \exp\left(-\frac{r_t^2}{w^2}\right) \right), \quad (1)$$

где  $P_l$  – мощность испускаемого лазером излучения,  $\sigma_d$  – площадь входного зрачка приемной оптической системы,  $\eta$  – эффективность преобразования фотоприемником оптической энергии в электрический сигнал,  $\rho_t$  – коэффициент отражения материала объекта,  $w$  – ширина лазерного пучка в плоскости объекта. Ширина испускаемого гауссова пучка изменяется с расстоянием по закону: