

ПОПЕРЕЧНЫЕ СЕЧЕНИЯ, ИНТЕНСИВНОСТИ ПЕРЕХОДОВ И ЛАЗЕРНАЯ ГЕНЕРАЦИЯ НА ПЕРЕХОДЕ ${}^3P_1 \rightarrow {}^3H_5$ В КРИСТАЛЛЕ $\text{LiY}_{0.3}\text{Lu}_{0.7}\text{F}_4:\text{Pr}^{3+}$

А. С. Низамутдинов¹, О. С. Морозов¹, С. Л. Кораблева¹, В. В. Семашко¹,
Е. Б. Дунина², А. А. Корниенко², М. П. Демеш^{3*}, Н. В. Гусакова³,
А. С. Ясюкевич³, В. Э. Кисель³, Н. В. Кулешов³

УДК 535.34;535.37

¹ Институт физики, Казанский федеральный университет, Казань, Россия

² Витебский государственный технологический университет, Витебск, Беларусь

³ НИЦ оптических материалов и технологий БНТУ,

220013, Минск, ул. Я. Коласа, 22, Беларусь; e-mail: maxim.demesh@bntu.by

(Поступила 20 декабря 2018)

Детально исследованы лазерно-спектроскопические свойства кристалла $\text{LiY}_{0.3}\text{Lu}_{0.7}\text{F}_4:\text{Pr}^{3+}$, выращенного методом Бриджмена—Стокбаргера. Зарегистрированы спектры поглощения и люминесценции в поляризованном свете, определено время жизни возбужденных состояний 3P_J . Интенсивности переходов в поглощении и испускании рассчитаны в соответствии с теорией интенсивностей f - f -переходов с учетом межконфигурационного взаимодействия. Поперечные сечения стимулированного испускания определены по методу Фюхтбауэра—Ладенбурга. При накачке излучением лазерного InGaN-диода получена непрерывная генерация на $\lambda = 522.6$ нм (${}^3P_1 \rightarrow {}^3H_5$) для кристаллов смешанных фторидов, активированных празеодимом, с максимальной выходной мощностью 0.38 Вт и дифференциальной эффективностью 19%.

Ключевые слова: празеодим, смешанные фториды, поглощение, люминесценция, лазер видимого диапазона.

A crystal of $\text{LiY}_{0.3}\text{Lu}_{0.7}\text{F}_4$ doped with Pr^{3+} ions was grown by the Bridgman-Stockbarger method and its spectroscopic properties were investigated in detail. The absorption and luminescence spectra of the polarized light were measured, and the lifetime of excited states of 3P_J is determined. Transition intensities in the absorption and emission were calculated in accordance with the theory of the f - f -transition intensity taking into account the interconfigurational interaction. Cross sections of stimulated emission were found by Füchtbauer-Ladenburg method. Under InGaN laser diode pumping the continuous wave laser generation at 522.6 nm (${}^3P_1 \rightarrow {}^3H_5$) was demonstrated for a Pr-doped mixed fluoride crystals. A maximum output power of 0.38 W and a slope efficiency of 19% were achieved.

Keywords: praseodymium, mixed fluoride, absorption, fluorescence, visible laser.

Введение. В последнее время наблюдается устойчивый интерес к твердотельным лазерам видимого диапазона. Это обусловлено значительным прогрессом в технологии InGaN (GaN) лазерных диодов (ЛД), излучающих в сине-фиолетовой области спектра, в которой находятся полосы поглощения ионов, используемых для получения видимой генерации (Pr^{3+} , Tb^{3+} , Sm^{3+} , Eu^{3+} и др.) [1]. На данный момент наиболее перспективным из них представляется ион празеодима (Pr^{3+}) в кристаллах фторидов, поскольку в данных материалах получена эффективная генерация в видимом диапазоне [2—4]. Схема энергетических уровней иона Pr^{3+} представлена на рис. 1.

CROSS SECTIONS, TRANSITION INTENSITY, AND LASER GENERATION AT THE ${}^3P_1 \rightarrow {}^3H_5$ TRANSITION OF $\text{Pr}^{3+}:\text{LiY}_{0.3}\text{Lu}_{0.7}\text{F}_4$ CRYSTAL

A. S. Nizamutdinov¹, O. S. Morozov¹, S. L. Korableva¹, V. V. Semashko¹, E. B. Dunina²,
A. A. Kornienko², M. P. Demesh^{3*}, N. V. Gusakova³, A. S. Yasukevich³, V. E. Kisel³, N. V. Kuleshov³
(¹ Institute of Physics, Kazan Federal University, Kazan, Russia; ² Vitebsk State Technological University, Vitebsk, Belarus; ³ Center for Optical Materials and Technologies, Belarusian National Technical University, 22 Ya. Kolasa Str., Minsk, 220013, Belarus; e-mail: maxim.demesh@bntu.by)

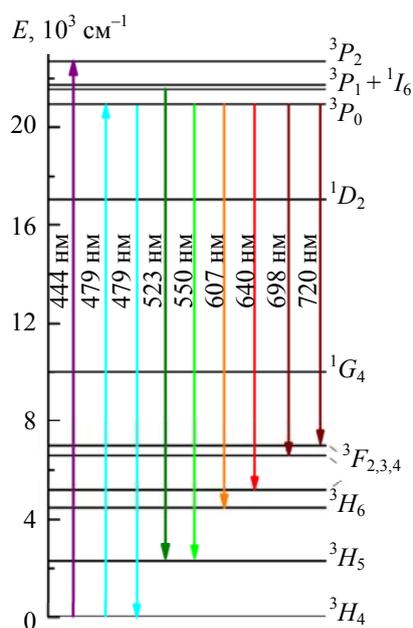


Рис. 1. Схема энергетических уровней иона Pr^{3+}

Интерес к кристаллам смешанных фторидов со структурой шеелита вида $\text{LiY}_x\text{Lu}_{1-x}\text{F}_4$ обусловлен особенностями распределения ионов активатора в матрице в зависимости от взаимного соотношения содержания катионов иттрия (Y^{3+}) и лютеция (Lu^{3+}). Показано, что для ионов Ce^{3+} коэффициент распределения увеличивается от 3 до 5 раз в смешанных кристаллах $\text{LiY}_x\text{Lu}_{1-x}\text{F}_4$ для $x = 0.6\text{--}0.8$ [5], а для ионов неодима Nd^{3+} — практически в два раза для кристалла $\text{LiY}_{0.35}\text{Lu}_{0.65}\text{F}_4$ [6, 7] по сравнению с кристаллами LiYF_4 (YLF) и LiLuF_4 (LLF). С учетом [5—7] ожидается аналогичная зависимость и для ионов празеодима Pr^{3+} ввиду близости ионных радиусов ряда $\text{Ce}^{3+}\text{--Nd}^{3+}$. Ранее [8] получена генерация на переходе ${}^3P_0 \rightarrow {}^3H_6$ (~640 нм) в кристалле $\text{LiY}_{0.3}\text{Lu}_{0.7}\text{F}_4:\text{Pr}^{3+}$.

В настоящей работе исследуются лазерно-спектроскопические свойства кристалла $\text{LiY}_{0.3}\text{Lu}_{0.7}\text{F}_4:\text{Pr}^{3+}$. Впервые реализована генерация на переходе ${}^3P_1 \rightarrow {}^3H_5$, который соответствует $\lambda_{\text{изл}} = 522.6$ нм. Выбор данного перехода обусловлен особым значением его второй гармоники для применений в биологии.

Эксперимент. Кристалл $\text{LiY}_{0.3}\text{Lu}_{0.7}\text{F}_4:\text{Pr}^{3+}$ выращен методом Бриджмена—Стокбаргера в графитовом тигле в условиях избыточного давления газа аргона высокой чистоты с использованием затравочного кристалла для ориентированной кристаллизации. Исходные компоненты чистотой не хуже 99.995 % предварительно кристаллизованы и взяты в нестехиометрическом соотношении с небольшим избытком компонента LiF в силу инконгруэнтного плавления кристалла $\text{LiY}_{0.3}\text{Lu}_{0.7}\text{F}_4$, характерного для кристаллов гомологов LiYF_4 [9]. Количество компонента PrF_3 C_0 в расплаве, определяемое по отношению к системе $\text{YF}_3\text{--LuF}_3$, составляло 1 ат.% (образец 1) и 2 ат.% (образец 2). Первый из кристаллов использован для лазерных экспериментов, второй — для спектроскопических исследований. Плотность выращенных кристаллов 5.6 г/см³.

Спектры поглощения и люминесценции зарегистрированы в поляризованном свете при ориентации вектора напряженности электрического поля \mathbf{E} параллельно (π) и перпендикулярно (σ) оптической оси кристалла на спектрофотометре Cary 5000 со спектральной шириной щели 0.09 и 0.30 нм для диапазонов 425—620 и 970—2600 нм. Для стационарных люминесцентных измерений в видимом диапазоне с разрешением 0.07 нм использована установка на основе монохроматора МДР-23, фотоприемника Hamamatsu C5460 и синхронного усилителя SR830 Stanford. Люминесценция возбуждалась GaN-ЛД с $\lambda = 444$ нм. Для получения истинной формы спектра осуществлена калибровка спектральной чувствительности люминесцентной установки с помощью галогенной лампы [10].

Для исследования распада возбужденных состояний 3P_J иона празеодима использовано возбуждающее излучение оптического параметрического генератора LT-2214 (LOTIS T II) с $\lambda_{\text{изл}} = 444$ нм и длительностью импульса ~20 нс. Излучение люминесценции, прошедшее через монохроматор МДР-12, регистрировалось на $\lambda \approx 640$ нм фотоприемником Hamamatsu C5460-01 и цифровым осциллографом с полосой пропускания 500 МГц.

Широко используемый подход Джадда—Офельта [11] для расчета интенсивностей в спектрах ионов лантаноидов не дает удовлетворительных результатов для иона Pr^{3+} , поскольку низколежащие возбужденные $f-d$ -конфигурации влияют на интенсивности внутриконфигурационных $f-f$ -переходов. В связи с этим применена теория интенсивностей $f-f$ -переходов в приближении среднего межконфигурационного взаимодействия (ICI) [12], которая учитывает конечную энергию начального и конечного мультиплетов перехода E_J и $E_{J'}$, а также энергию E_f^0 возбужденной конфигурации $4f^{N-1}5d$. Сила линии электродипольного (ЭД) перехода

$$S_{\text{ЭД}}(JJ') = \sum_{k=2,4,6} \Omega_k \left[1 + 2R_k (E_J + E_{J'} - 2E_f^0) \right] \left\langle 4f^n [SL] J \left\| U^{(k)} \right\| 4f^n [S'L'] J' \right\rangle, \quad (1)$$

где Ω_k — параметры интенсивности; R_k — параметры, обусловленные конфигурационным взаимодействием. Значения дважды приведенных матричных элементов $\|U^{(k)}\|$ определены в приближении промежуточной связи для свободного иона. Вклад магнитодипольного (МД) механизма в общую вероятность переходов учтен при определении сил осцилляторов в поглощении и испускании. Переход от силы линии S к силе осциллятора f осуществляется по хорошо известной формуле и может быть найден, например, в [11]. Силы осцилляторов абсорбционных переходов определялись на основе полученных спектров поглощения по формуле

$$f_{\text{экс}}(JJ') = \frac{mc^2}{\pi e^2 N_{\text{Pr}} \bar{\lambda}^2} \int \frac{\alpha_{JJ'}^{\pi}(\lambda) + 2\alpha_{JJ'}^{\sigma}}{3} d\lambda, \quad (2)$$

где $\bar{\lambda}$ — средневзвешенное значение длины волны перехода; $\alpha_{JJ'}^{\pi, \sigma}$ — интегральный коэффициент поглощения для соответствующего состояния поляризации. Искомые параметры Ω_k и R_k как варьируемые величины определены по методу наименьших квадратов при подгонке теоретических сил осцилляторов к экспериментальным. С использованием полученных значений Ω_k и R_k по формуле вероятности переходов [11] вычислено радиационное время жизни уровня 3P_0 .

Результаты и их обсуждение. Содержание ионов празеодима в образце 2 уточнено методом атомно-эмиссионной спектроскопии. Эффективный коэффициент распределения $k_{\text{эф}}$ найден из уравнения Галливера—Пфанна [13] исходя из экспериментальных данных о концентрации ионов празеодима C_{Pr} в кристалле в зависимости от относительной координаты кристаллизовавшегося участка g були (рис. 2). Величина g определена как отношение координаты участка кристалла, для которого проводились концентрационные измерения, ко всей длине выращенного кристалла (були).

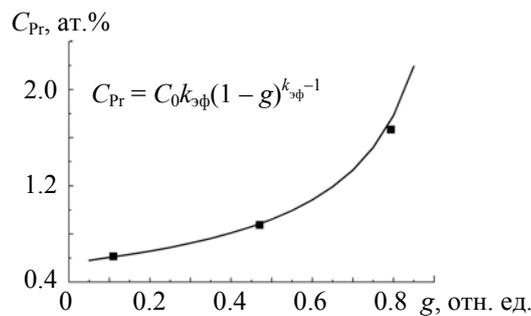


Рис. 2. Содержание ионов Pr^{3+} в кристалле $\text{LiY}_{0.3}\text{Lu}_{0.7}\text{F}_4$ в зависимости от относительной координаты кристаллизовавшегося участка g були, точки — эксперимент

Для кристаллов YLF:Pr и LLF:Pr коэффициенты распределения ионов Pr^{3+} $k = 0.15$ и 0.22 [14]. В результате аппроксимации получено $k_{\text{эф}} = 0.28$, что свидетельствует об увеличении коэффициента распределения ионов Pr^{3+} в кристалле исследуемого состава.

Сечения поглощения $\sigma_{\text{полг}}$ кристалла $\text{LiY}_{0.3}\text{Lu}_{0.7}\text{F}_4:\text{Pr}^{3+}$ в видимой и ИК областях для σ - и π -состояний поляризации показаны на рис. 3. Полученные зависимости аналогичны зависимостям для кристаллов YLF:Pr и LLF:Pr [15], причем исследуемый кристалл обладает промежуточными значениями сечения поглощения (табл. 1). Наибольший интерес вызывают переходы ${}^3H_4 \rightarrow {}^3P_0$ и ${}^3H_4 \rightarrow {}^3P_2$, используемые при накачке празеодимовых лазеров. Максимальные сечения поглощения равны $22.8 \cdot 10^{-20}$ и $9.7 \cdot 10^{-20} \text{ см}^2$ для π -поляризации на $\lambda = 479.2$ и 444.0 нм .

Т а б л и ц а 1. Абсорбционные свойства кристаллов фторидов со структурой шеелита с ионами Pr^{3+}

Переход	λ , нм			$\Delta\lambda$, нм			$\sigma_{\text{полг.}} \times 10^{-20} \text{ см}^2$			
	YLF	LLF	$\text{LiY}_{0.3}\text{Lu}_{0.7}\text{F}_4$	YLF	LLF	$\text{LiY}_{0.3}\text{Lu}_{0.7}\text{F}_4$	YLF	LLF	$\text{LiY}_{0.3}\text{Lu}_{0.7}\text{F}_4$	
${}^3H_4 \rightarrow {}^3P_2$	σ	441	440.9	440.9	1.74	1.94	1.87	3.9	4.3	4
	π	443.9	444.0	444.0	1.76	1.83	1.8	8.9	10	9.7
${}^3H_4 \rightarrow {}^3P_1$	π	468.7	468.7	468.7	0.95	1.0	1.0	6.3	6.8	6.1
${}^3H_4 \rightarrow {}^3P_0$	π	479.2	479.3	479.2	0.53	0.46	0.48	19.5	25	22.8
${}^3H_4 \rightarrow {}^1D_2$	π	594.6	594.9	594.8	1.78	1.8	1.8	3.0	3.5	3.3

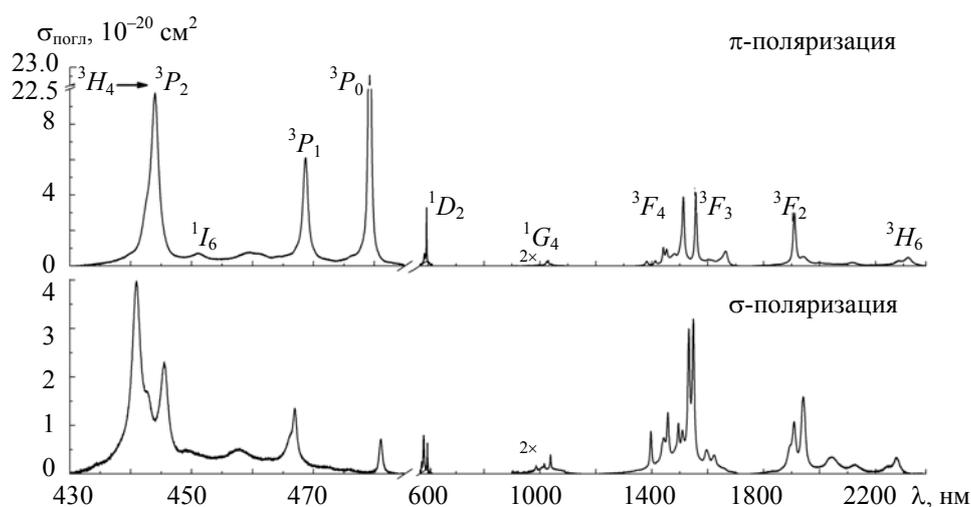


Рис. 3. Спектральные зависимости сечения поглощения кристалла $\text{LiY}_{0.3}\text{Lu}_{0.7}\text{F}_4:\text{Pr}^{3+}$

Т а б л и ц а 2. Теоретические и экспериментальные силы осцилляторов кристалла $\text{LiY}_{0.3}\text{Lu}_{0.7}\text{F}_4:\text{Pr}^{3+}$

Переход ${}^3H_4 \rightarrow$	$\bar{\lambda}$, нм	$f_{\text{экс.}} \times 10^{-6}$	$f_{\text{СИ}} \times 10^{-6}$
3H_6	2194	0.5	0.385
3F_2	1928	1.38	1.378
${}^3F_3 + {}^3F_4$	1530	8.09	8.13
1G_4	1031	0.146	0.393
1D_2	589	3.24	3.247
${}^3P_0 + {}^3P_1 + {}^1I_6$	472	5.23	5.228
3P_2	443	10.73	10.881

Силы осцилляторов $f_{\text{экс.}}$, определенные с помощью формулы (2), и теоретические значения $f_{\text{СИ}}$ приведены в табл. 2. Следует отметить, что в $f_{\text{СИ}}$ входят силы осцилляторов как ЭД, так и МД переходов при их наличии. В результате подгонки получены $\Omega_2 = 0.082 \cdot 10^{-20} \text{ см}^2$, $\Omega_4 = 2.782 \cdot 10^{-20} \text{ см}^2$, $\Omega_6 = 17.20 \cdot 10^{-20} \text{ см}^2$, $R_2 = 0.135 \cdot 10^{-4} \text{ см}^{-1}$, $R_4 = -0.039 \cdot 10^{-4} \text{ см}^{-1}$, $R_6 = 0.313 \cdot 10^{-4} \text{ см}^{-1}$ и среднеквадратичное отклонение СКО = $0.646 \cdot 10^{-20} \text{ см}^2$.

На основе скорректированных спектров определены сечения стимулированного испускания (СИ) $\sigma_{\text{СИ}}$ по формуле Фюхтбауэра—Ладенбурга [16], которые показаны на рис. 4. В спектрах люминесценции иона Pr^{3+} наблюдается ряд полос как с метастабильного уровня 3P_0 , так и с термически связанных с ним уровней 3P_1 и 1I_6 [17]. Максимальные сечения для каждого перехода сравниваются со значениями для кристаллов YLF:Pr и LLF:Pr [15]. Из табл. 3 видно, что существенных отличий сечений между кристаллами не наблюдается.

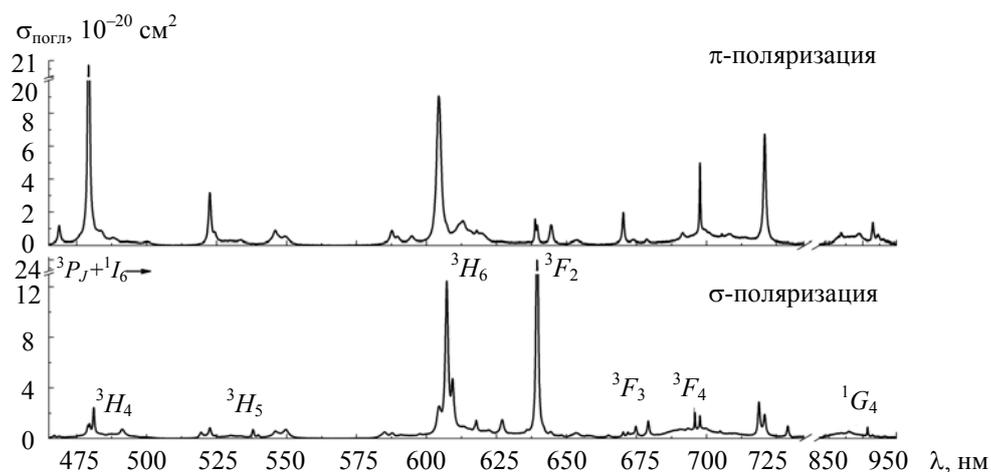


Рис. 4. Спектральные зависимости сечений стимулированного испускания кристалла $\text{LiY}_{0.3}\text{Lu}_{0.7}\text{F}_4:\text{Pr}^{3+}$

Т а б л и ц а 3. Люминесцентные характеристики фторидов со структурой шеелита с ионами Pr^{3+}

Переход		λ , нм			$\Delta\lambda$, нм			$\sigma_{\text{СИ}}$, 10^{-20} см ²		
		YLF	LLF	$\text{LiY}_{0.3}\text{Lu}_{0.7}\text{F}_4$	YLF	LLF	$\text{LiY}_{0.3}\text{Lu}_{0.7}\text{F}_4$	YLF	LLF	$\text{LiY}_{0.3}\text{Lu}_{0.7}\text{F}_4$
$^3P_J \rightarrow ^3H_4$	π	479.2	479.3	479.3	0.75	0.85	0.85	19.4	19.7	20.5
	σ	481.1	481.1	481.1	0.77	0.9	0.86	—	2.1	2.4
$^3P_J \rightarrow ^3H_5$	π	522.6	522.6	522.6	1.11	1.15	1.13	2.6	2.4	2.9
		545.9	546.2	546	5.6	5.6	5.6	0.8	0.8	0.9
$^3P_J \rightarrow ^3H_6$	π	604.3	604.1	604.2	1.9	1.91	1.92	9.8	9.3	9.0
	σ	607.2	607.1	607.1	1.25	1.46	1.4	11.3	11.8	12.3
$^3P_J \rightarrow ^3F_2$	σ	639.5	640.1	640	0.78	0.8	0.8	21.8	21	23.6
$^3P_J \rightarrow ^3F_3$	π	670.3	670	670	0.75	0.98	0.55	—	1.4	1.9
		697.6	697.8	697.8	0.44	0.6	0.6	5.2	4.3	4.9
$^3P_J \rightarrow ^3F_4$	π	720.8	721.4	721.2	0.97	1.1	1	8.8	7.2	6.7
	σ	718.7	719	719	0.86	0.9	0.88	—	2.8	2.9
$^3P_J \rightarrow ^1G_4$	π	915	—	915	—	—	4	—	—	1.4

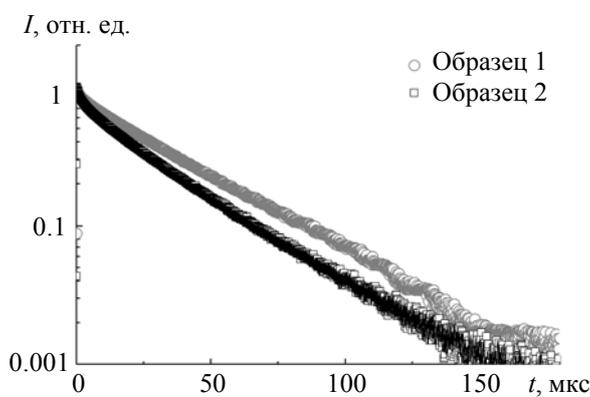


Рис. 5. Кинетика затухания люминесценции уровня 3P_J в кристалле $\text{LiY}_{0.3}\text{Lu}_{0.7}\text{F}_4:\text{Pr}^{3+}$

Кинетика затухания люминесценции с совокупности верхних уровней 3P_J представлена на рис. 5. Для образца 1 измеренное время жизни 43 мкс (моноэкспоненциальный характер кинетики затухания), для образца 2 — 30 мкс. В то же время кинетика затухания для образца 2 носит немоноэкспоненциальный характер ввиду кросс-релаксации (${}^3P_0 + {}^1D_2 = {}^3H_4 + {}^3H_5$ и ${}^3P_0 + {}^1G_4 = {}^3H_4 + {}^1G_4$), приводящей к тушению люминесценции [15]. Радиационное время жизни, полученное из теории интенсивностей f - f -переходов, составляет 39 мкс, что несколько ниже аналогичного времени для кристаллов YLF:Pr и LLF:Pr ≈ 50 мкс [15].

В лазерных экспериментах в качестве источника накачки использован термостабилизированный InGaN-ЛД с выходной мощностью до 4 Вт и $\lambda_{\text{изл}} = 444$ нм. Излучение накачки фокусировалось на активный элемент в пятно квадратного сечения $\approx 80 \times 80$ мкм. В качестве активного элемента служил 10-мм кристалл $\text{LiY}_{0.3}\text{Lu}_{0.7}\text{F}_4:\text{Pr}^{3+}$ (образец 1) с антиотражающими покрытиями на торцевых гранях. Активный элемент помещен в трехзеркальный резонатор, образованный плоскими входным и выходным зеркалами, а также внутррезонаторным сферическим зеркалом с радиусом кривизны -100 мм. Пропускание выходного зеркала 6 %, максимальная выходная мощность 0.38 Вт с дифференциальной эффективностью 19 % (рис. 6). Поглощенная мощность накачки 3.9 Вт соответствует оптической эффективности ≈ 10 %. Параметр качества пучка $M^2 \leq 1.2$, при этом пучок имеет эллиптическую форму (рис. 6, вставка), что обусловлено наличием отрицательной термической линзы в плоскости, параллельной оптической оси кристалла.

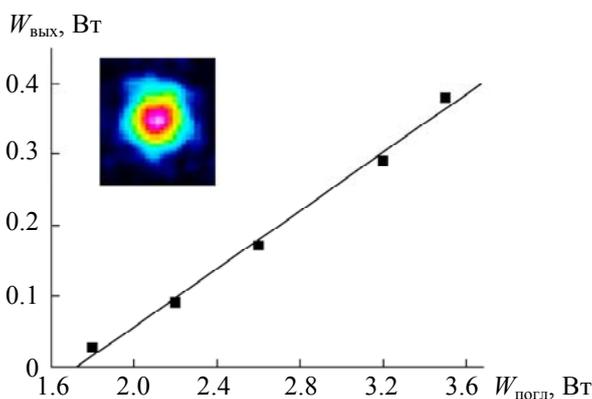


Рис. 6. Выходные характеристики лазера на кристалле $\text{LiY}_{0.3}\text{Lu}_{0.7}\text{F}_4:\text{Pr}^{3+}$ на $\lambda = 522.6$ нм

Необходимо отметить, что достаточно низкая эффективность обусловлена неоптимальностью согласования мод накачки и генерации ввиду прямоугольного сечения профиля пучка накачки, что приводит к увеличению в 2.5 раза размера пучка накачки на краях активного элемента в меридиональной плоскости. Дальнейшая работа будет направлена на оптимизацию системы накачки, конфигурации резонатора и активного элемента.

Заключение. Кристалл $\text{LiY}_{0.3}\text{Lu}_{0.7}\text{F}_4:\text{Pr}^{3+}$, выращенный методом Бриджмена—Стокбаргера, характеризуется эффективным коэффициентом распределения ионов празеодима 0.28. Для абсорбционных переходов, используемых для накачки Pr-лазеров, максимальные сечения поглощения $22.8 \cdot 10^{-20}$ и $9.7 \cdot 10^{-20}$ см² для π -поляризации на $\lambda = 479.2$ и 444.0 нм. Экспериментально определены силы осцилляторов абсорбционных переходов, на основе которых с использованием теории интенсивностей f - f -переходов найдены параметры интенсивности. На основе скорректированных спектров люминесценции с помощью формулы Фюхтбауэра—Ладенбурга рассчитаны спектральные зависимости сечений стимулированного испускания. Время жизни возбужденного состояния 3P_J зависит от содержания ионов Pr^{3+} и для образца с коэффициентом распределения 0.28 составляет 43 мкс. При накачке лазерным GaN-диодом реализована генерация на $\lambda = 522.6$ нм (переход ${}^3P_1 \rightarrow {}^3H_5$) в непрерывном режиме с максимальной выходной мощностью 0.38 Вт и дифференциальной эффективностью 19 % при пропускании выходного зеркала 6 %.

Работа поддержана средствами субсидии, выделенной Казанскому федеральному университету для выполнения государственного задания в сфере научной деятельности (проект № 3.1156.2017/4.6).

-
- [1] C. Kränkel, D.-T. Marzahl, F. Moglia, G. Huber, P. Metz. *Laser Photon. Rev.*, **10** (2016) 548—564
- [2] P. Metz, F. Reichert, F. Moglia, S. Müller, D.-T. Marzahl, C. Kränkel, G. Huber. *Opt. Lett.*, **39** (2014) 3193—3196
- [3] T. Gün, P. Metz, G. Huber. *Opt. Lett.*, **36** (2011) 1002—1005
- [4] S. Luo, X. Yan, Q. Cui, B. Xu, H. Xu, Z. Cai. *Opt. Commun.*, **380** (2016) 357—360
- [5] А. С. Низамутдинов, В. В. Семашко, А. К. Наумов, В. Н. Ефимов, С. Л. Кorableва, М. А. Марисов. *Письма ЖЭТФ*, **91** (2010) 23—26
- [6] M. P. Demesh S. V. Kurilchik, N. V. Gusakova, A. S. Yasukevich, V. E. Kisel, A. S. Nizamutdinov, M. M. Marisov, R. D. Aglyamov, S. L. Korableva, A. K. Naumov, V. V. Semashko, N. V. Kuleshov. *Las. Phys.*, **28** (2018) 045802
- [7] M. A. Marisov, E. Yu. Koryakina, A. K. Naumov, V. V. Semashko, S. L. Korableva, N. G. Ivoilov. *Proc. SPIE*, **7994** (2010) 79940F
- [8] A. A. Lyapin, V. G. Gorieva, S. L. Korableva, S. A. Artemov, P. A. Ryabochkina, V. V. Semashko. *Las. Phys. Lett.*, **13** (2016) 125801
- [9] V. V. Semashko, S. L. Korableva, A. S. Nizamutdinov, S. V. Kuznetsov, A. A. Pynenkov, P. A. Popov, A. E. Baranchikov, K. N. Nishchev, V. K. Ivanov, P. P. Fedorov. *Rus. J. Inorg. Chem.*, **63**, N 4 (2018) 433—438
- [10] М. П. Демеш, Н. В. Гусакова, А. С. Ясюкевич, Н. В. Кулешов, С. В. Григорьев, Ю. А. Крот, М. Б. Космына, А. Н. Шеховцов. *Приборы и методы измерений*, **6** (2015) 211—219
- [11] J. D. Axe. *J. Chem. Phys.*, **39** (1963) 1154—1160
- [12] A. A. Kornienko, A. A. Kaminskii, E. B. Dunina. *Phys. Status Solidi (b)*, **157** (1990) 267
- [13] W. G. Pfann. *JOM*, **4** (1952) 747—753
- [14] F. Cornacchia, A. DiLieto, M. Tonelli, A. Richter, E. Neumann, G. Huber. *Opt. Express*, **16** (2008) 15932—15941
- [15] A. Richter. *Laser Parameters and Performance of Pr³⁺-doped Fluorides Operating in the Visible Spectral Region*, Diss. zur Erlangung des Doktorgrades, Hamburg (2008)
- [16] S. A. Payne, L. L. Chase, L. K. Smith, W. L. Kway, W. F. Krupke. *IEEE J. Quantum Electron.*, **28** (1992) 2619—2630
- [17] J. L. Adam, W. A. Sibley, D. R. Gabbe. *J. Lumin.*, **33** (1985) 391—407