

Лазерная генерация на кристаллах Er:LiYF₄ и Er:LiLuF₄ с резонансной накачкой

К.Н.Горбаченя, С.В.Курильчик, В.Э.Кисель, А.С.Ясюкевич,
Н.В.Кулешов, А.С.Низамутдинов, С.Л.Кораблева, В.В.Семашко

Исследованы спектроскопические свойства кристаллов Er:LiLuF₄ и Er:LiYF₄ в спектральной области около 1.5 мкм, а также их генерационные характеристики в условиях резонансной лазерной накачки на длине волны 1522 нм. На кристалле Er:LiLuF₄ достигнута максимальная дифференциальная эффективность генерации по поглощенной мощности накачки 44% с длиной волны излучения 1609 нм. Впервые реализована непрерывная лазерная генерация с резонансной накачкой на кристалле Er:LiYF₄. Достигнута выходная мощность 58 мВт на длине волны 1606 нм с дифференциальной эффективностью 21%.

Ключевые слова: ионы эрбия, кристаллы фторидов, спектроскопия, лазерная генерация, резонансная накачка.

1. Введение

Лазерное излучение с длиной волны 1.5–1.6 мкм находит широкое применение в лазерной дальнометрии, офтальмологии, системах оптической локализации и лазерно-искровой эмиссионной спектрометрии [1, 2]. Для его получения могут использоваться твердотельные лазеры, в которых в качестве активной среды применяются материалы, активированные трехвалентными ионами эрбия (Er³⁺). Излучение указанного спектрального диапазона испускается при переходе ионов Er³⁺ из возбужденного состояния ⁴I_{13/2} в основное состояние ⁴I_{15/2}. Ранее, по причине отсутствия эффективных источников накачки эрбиевых сред, использовалась дополнительная соактивация таких материалов ионами иттербия (Yb³⁺), которые поглощают излучение лазерных диодов на длинах волн 0.9–1.0 мкм и за счет переноса энергии между ионами обеспечивают заселение энергетического уровня ⁴I_{11/2} эрбия с последующей релаксацией на уровень ⁴I_{13/2}. Однако такие среды обладают рядом недостатков. Вследствие большой разности энергий квантов накачки и генерации (около 40%) активный элемент испытывает высокую термическую нагрузку, что ограничивает максимально возможный уровень выходной мощности. Кроме того, в таких средах существует вероятность обратного переноса энергии Er → Yb и ап-конверсионных переходов с уровня ⁴I_{11/2} эрбия. Появление доступных лазерных диодов на основе соединений InGaAsP/InP, излучающих в области 1.5 мкм, с высокими пространственными и спектральными характеристиками пучка [3] вызвало интерес к изучению генерационных характеристик материалов, активи-

рованных только ионами Er³⁺, при резонансной накачке непосредственно на верхний лазерный уровень ⁴I_{13/2} [3, 4]. Такой тип накачки позволяет значительно уменьшить (до менее 10%) стоксов сдвиг, а также снизить потери, связанные с ап-конверсионными переходами и обратным переносом энергии. Кроме того, это открывает возможность исследования материалов с низкой эффективностью переноса энергии Yb → Er, таких как фторидные кристаллы.

Ранее сообщалось о получении лазерной генерации с резонансной накачкой на основе различных эрбийсодержащих оксидных материалов, таких как кристаллы гранатов [3, 5], ванадатов [6–9], полупрозрачных оксидов [10] и вольфраматов [11, 12]. На кристалле Er:LuVO₄ при накачке волоконным лазером максимальная дифференциальная эффективность по поглощенной мощности накачки в режиме непрерывной генерации составила 64% [8]. Альтернативной группой материалов являются фторидные кристаллы с низкой энергией фононов, что обуславливает длительное время жизни ионов на уровне ⁴I_{13/2}, обеспечивающее большое накопление энергии в режиме модуляции добротности. Лазерная генерация с резонансной накачкой на фторидных кристаллах впервые была получена в работе [13], в которой исследовался кристалл Er:LiLuF₄. При накачке излучением волоконного лазера была достигнута выходная мощность лазера 1.24 Вт на длине волны 1620 нм при дифференциальной эффективности генерации по падающей мощности накачки 19%. Полученные результаты продемонстрировали перспективность исследования фторидных кристаллов в качестве матриц для ионов Er³⁺ в условиях резонансной накачки.

Настоящая работа посвящена исследованию спектроскопических и генерационных свойств кристаллов Er:LiLuF₄ (Er:LLF) и Er:LiYF₄ (Er:YLF) в условиях резонансной лазерной накачки на длине волны $\lambda_p = 1522$ нм.

2. Спектроскопия кристаллов

Спектроскопические свойства кристаллов Er:LLF и Er:YLF, выращенных методом Бриджмена–Стокбаргера, с содержанием ионов Er³⁺ 1.0 ат.% исследовались на образцах толщиной 3.5 мм, вырезанных для распростра-

К.Н.Горбаченя, В.Э.Кисель, А.С.Ясюкевич, Н.В.Кулешов. Центр оптических материалов и технологий, Белорусский национальный технический университет, Белоруссия, 220013 Минск, просп. Независимости, 65, к. 17; e-mail: gorby.konstantin@gmail.com
С.В.Курильчик, А.С.Низамутдинов, С.Л.Кораблева, В.В.Семашко. Казанский (Приволжский) федеральный университет, Россия, 420008 Казань, ул. Кремлевская, 18; e-mail: kurilchik.sv@gmail.com

Поступила в редакцию 23 ноября 2015 г., после доработки – 11 января 2016 г.

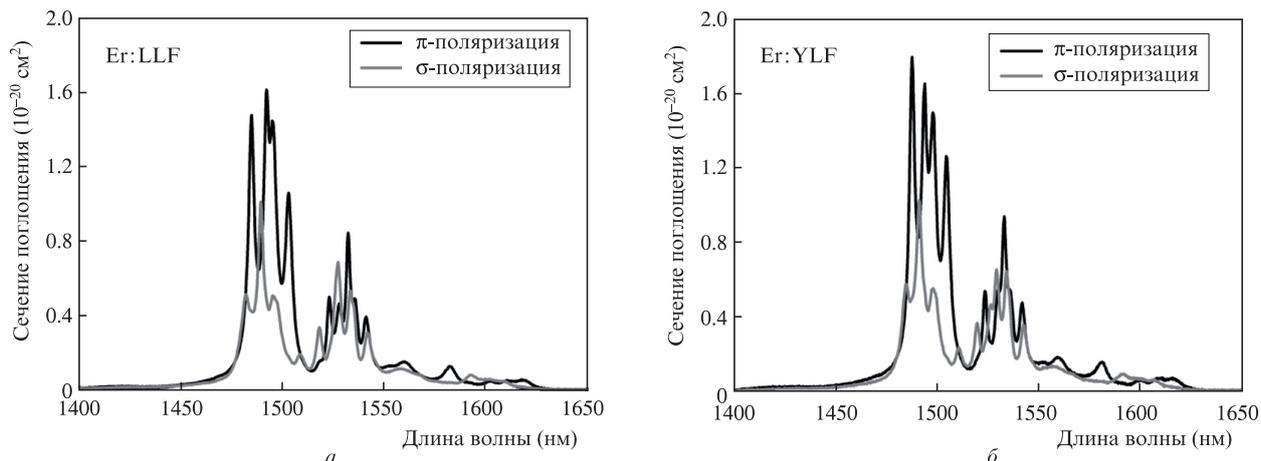


Рис.1. Спектры поперечных сечений поглощения кристаллов Er:LLF (а) и Er:YLF (б).

нения излучения вдоль кристаллографической оси *a*, что позволяло регистрировать спектры поглощения кристаллов при π - и σ -поляризациях излучения. Измерения проводились при комнатной температуре на спектрофотометре Varian CARY-5000 в спектральном диапазоне 1400–1650 нм. Спектры поперечных сечений поглощения кристаллов Er:LLF и Er:YLF представлены на рис.1.

На длине волны $\lambda_p = 1522$ нм, на которой излучает твердотельный лазер, используемый в настоящей работе в качестве источника накачки, сечение поглощения для кристалла Er:LLF составляет 0.35×10^{-20} и 0.175×10^{-20} см² для π - и σ -поляризаций соответственно. Кристалл Er:LLF характеризуется сходной структурой спектров поглощения. На $\lambda_p = 1522$ нм сечение поглощения для кристалла Er:YLF составляет 0.34×10^{-20} и 0.22×10^{-20} см² для π - и σ -поляризаций соответственно.

Время жизни энергетического уровня $^4I_{13/2}$ ионов Er³⁺ в кристаллах Er:LLF и Er:YLF определялось путем измерения времени затухания люминесценции кристаллического порошка в суспензии по методике, описанной в работе [14]. В качестве источника излучения использовался оптический параметрический генератор на кристалле ВВО с длиной волны 1530 нм, который накачивался второй гармоникой Nd:YAG-лазера. Длительность импульсов возбуждения составляла 20 нс. Излучение люминесценции выделялось при помощи монохроматора МДР-12 и регистрировалось фотоприемником на основе InGaAs-фотодиода и цифровым осциллографом Tektronix TDS3052C с полосой пропускания 500 МГц. Предполагая близость к единице квантового выхода люминесценции на переходе $^4I_{13/2} \rightarrow ^4I_{15/2}$ ионов Er³⁺ в кристаллах фторидов, полученное в результате измерений время затухания люминесценции можно использовать как оценку радиационного времени жизни уровня $^4I_{13/2}$, которое составило 10.2 ± 0.5 мс для кристалла Er:LLF и 9.4 ± 0.5 мс для кристалла Er:YLF. Эти результаты хорошо согласуются с литературными данными. Так, в работе [15] радиационное время жизни для кристалла Er:YLF оценивалось на уровне примерно 9.4 мс.

Спектры поперечных сечений стимулированного испускания (СИ) кристаллов Er:LLF и Er:YLF в спектральной области около 1.5 мкм рассчитывались с использованием двух различных методов: метода соответствия (МС) [16] и интегрального метода соответствия (ИМС) [17]. В основу первого метода положен расчет сечений СИ с уче-

том данных по структуре энергетических уровней ионов в кристалле и спектров сечений поглощения по формуле

$$\sigma_{SE}^{\gamma}(\lambda) = \sigma_{abs}^{\gamma}(\lambda) \frac{Z_1}{Z_2} \exp\left(-\frac{hc/\lambda - E_0}{kT}\right), \tag{1}$$

где σ_{SE}^{γ} и σ_{abs}^{γ} – сечения СИ и поглощения для γ -поляризации; E_0 – энергетическое расстояние между нижними подуровнями мультиплетов основного и возбужденного электронных состояний; k – постоянная Больцмана; h – постоянная Планка; T – температура кристалла; c – скорость света в вакууме; λ – длина волны излучения в вакууме; Z_1 и Z_2 – статистические весовые функции нижнего и верхнего мультиплетов соответственно, определяемые как

$$Z_m = \sum_k g_k^m \exp\left(-\frac{E_k^m}{kT}\right). \tag{2}$$

Здесь $m = 1, 2$; g_k^m – вырождение подуровня с номером k и энергией E_k^m , измеряемой от нижнего подуровня соответствующего мультиплета. В расчете использовались литературные данные о структуре энергетических уровней кристаллов Er:LLF [18] и Er:YLF [19].

Расчет спектров СИ по ИМС основан на использовании радиационного времени жизни верхнего лазерного мультиплета и спектров сечений поглощения. Формула для расчета сечения СИ такова:

$$\sigma_{SE}^{\gamma}(\lambda) = 3 \exp\left(-\frac{hc}{kT\lambda}\right) \times \left[8\pi n^2 \tau_{rad} c \left[\sum_{\gamma} \int \lambda^{-4} \sigma_{abs}^{\gamma}(\lambda) \exp\left(-\frac{hc}{kT\lambda}\right) d\lambda \right] \right]^{-1} \sigma_{abs}^{\gamma}(\lambda), \tag{3}$$

где n – показатель преломления среды; τ_{rad} – радиационное время жизни уровня.

Результаты расчетов обоими методами в одной системе координат для σ - и π -поляризаций излучения для кристаллов Er:LLF и Er:YLF показаны на рис.2. Видно, что спектры практически идентичны. Это подтверждает значения радиационных времен жизни уровня $^4I_{13/2}$ эрбия, полученные из кинетических измерений. Для Er:LLF в спектральной области дальше 1600 нм, для которой характерно невысокое поглощение, максимальный пик сечения стимулированного испускания для π -поляризации рас-

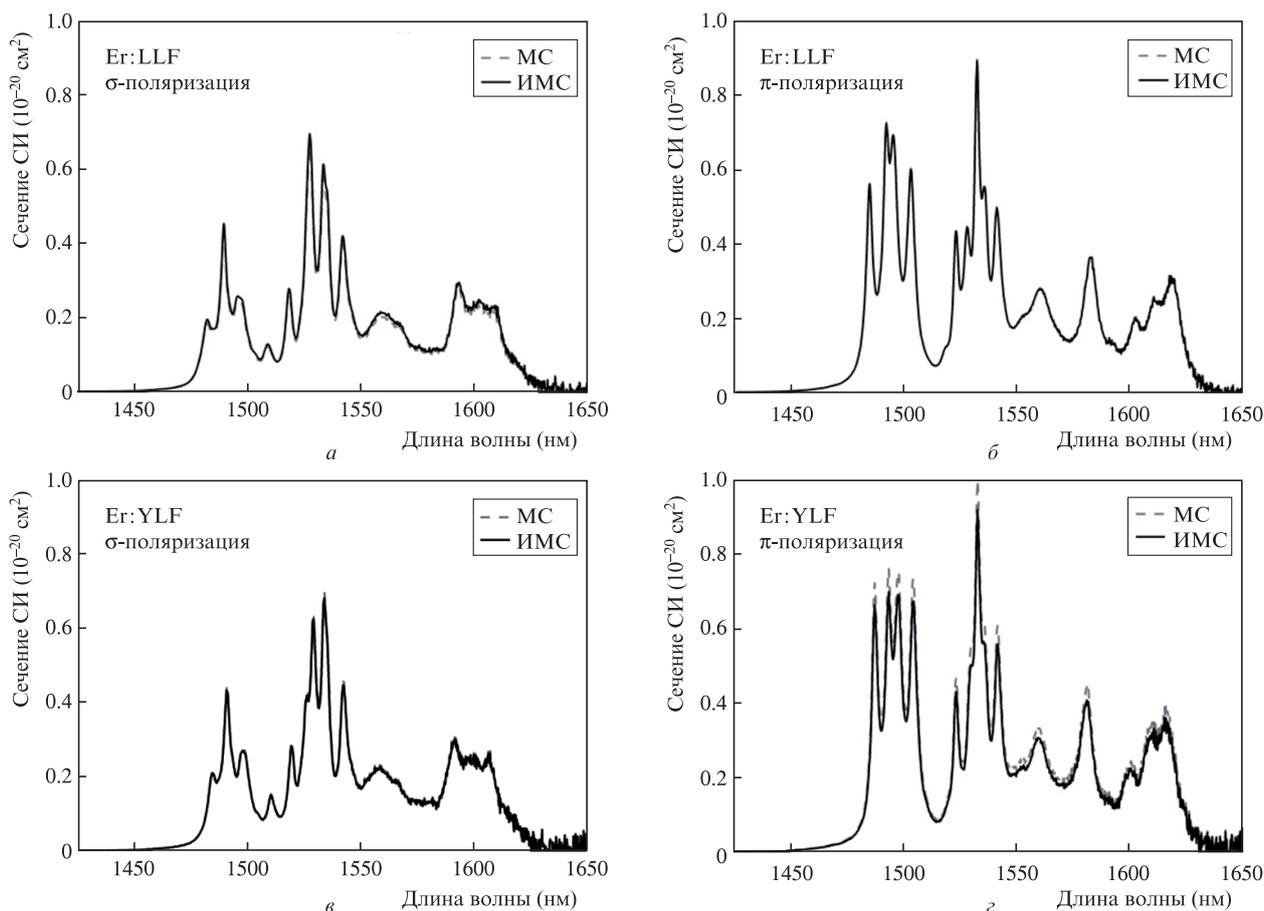


Рис.2. Спектры поперечных сечений стимулированного испускания кристаллов Er:LLF (а, б) и Er:YLF (в, г) для σ - (а, в) и π - (б, г) поляризаций излучения.

положен на длине волны 1619 нм и составляет 0.31×10^{-20} см². Для σ -поляризации наблюдается широкая полоса в области 1593–1609 нм с сечениями в диапазоне $(0.23–0.29) \times 10^{-20}$ см². Для кристалла Er:YLF в случае π -поляризации максимальный пик сечения СИ расположен на длине волны 1616 нм и составляет 0.36×10^{-20} см². Для σ -поляризации полоса стимулированного испускания с сечениями $(0.23–0.30) \times 10^{-20}$ см² немного смещена в область 1590–1605 нм.

Следует отметить, что полученные спектры поперечных сечений СИ по своей структуре находятся в хорошем соответствии с данными, опубликованными в работе [13], в которой расчет сечений проводился по методу Фюхтбауэра–Ладенбурга на основании спектров люминесценции [20]. Полученные в этой работе значения сечений для σ -поляризации весьма близки к нашим результатам, тогда как для π -поляризации они примерно в два раза ниже, что при одинаковых потерях в случае обеих поляризаций должно приводить к генерации излучения с σ -поляризацией. Однако лазерное излучение в работе [13] имело π -поляризацию независимо от пропускания выходного зеркала. Такое несоответствие спектроскопических и генерационных характеристик, по всей вероятности, обусловлено погрешностями в определении спектров СИ, связанными с искажениями спектров люминесценции вследствие перепоглощения излучения в образце. Применение в нашей работе методов MC и ИМС, в которых используются спектры сечений поглощения для обоих кристаллов, обеспечивает большую точность определения сечений СИ.

На основе спектров поглощения и СИ проведен расчет спектров коэффициентов усиления по формуле

$$g(\lambda) = [\beta\sigma_{SE}(\lambda) - (1 - \beta)\sigma_{abs}(\lambda)]N_0, \quad (4)$$

где β – коэффициент относительной инверсной населенности, характеризующий отношение числа ионов, находящихся в возбужденном состоянии, к полному числу ионов N_0 . Полученные спектры коэффициента усиления для кристаллов Er:LLF и Er:YLF представлены на рис.3. Горизонтальные линии – значения коэффициента полных потерь α за двойной обход излучения по резонатору при различном пропускании выходного зеркала, которые рассчитывались по формуле [21]

$$\alpha = \frac{1}{2l_a} \left[\ln\left(\frac{1}{1-L}\right) + \ln\left(\frac{1}{1-T_{out}}\right) \right], \quad (5)$$

где l_a – длина активной среды; L – внутррезонаторные потери; T_{out} – пропускание выходного зеркала. Расчет проводился для выходных зеркал, которые использовались нами в лазерных экспериментах с $T_{out} = 1\%$, 2% и 5% . Внутррезонаторные потери оценивались на уровне 0.05 и 0.02 для кристаллов Er:LLF ($l_a = 5.5$ мм) и Er:YLF ($l_a = 13$ мм) соответственно. Использование большей величины потерь для кристалла Er:YLF обусловлено наличием в нем микродефектов структуры и включений [22]. Значения β подбирались таким образом, чтобы результирующий спектр коэффициента усиления $g(\lambda)$ в максимуме достигал уровня коэффициента потерь α .

В соответствии с представленными на рис.3,а, б спектрами максимумы усиления кристалла Er:LLF находятся на длинах волн 1609 и 1620 нм для σ - и π -поляризаций со-

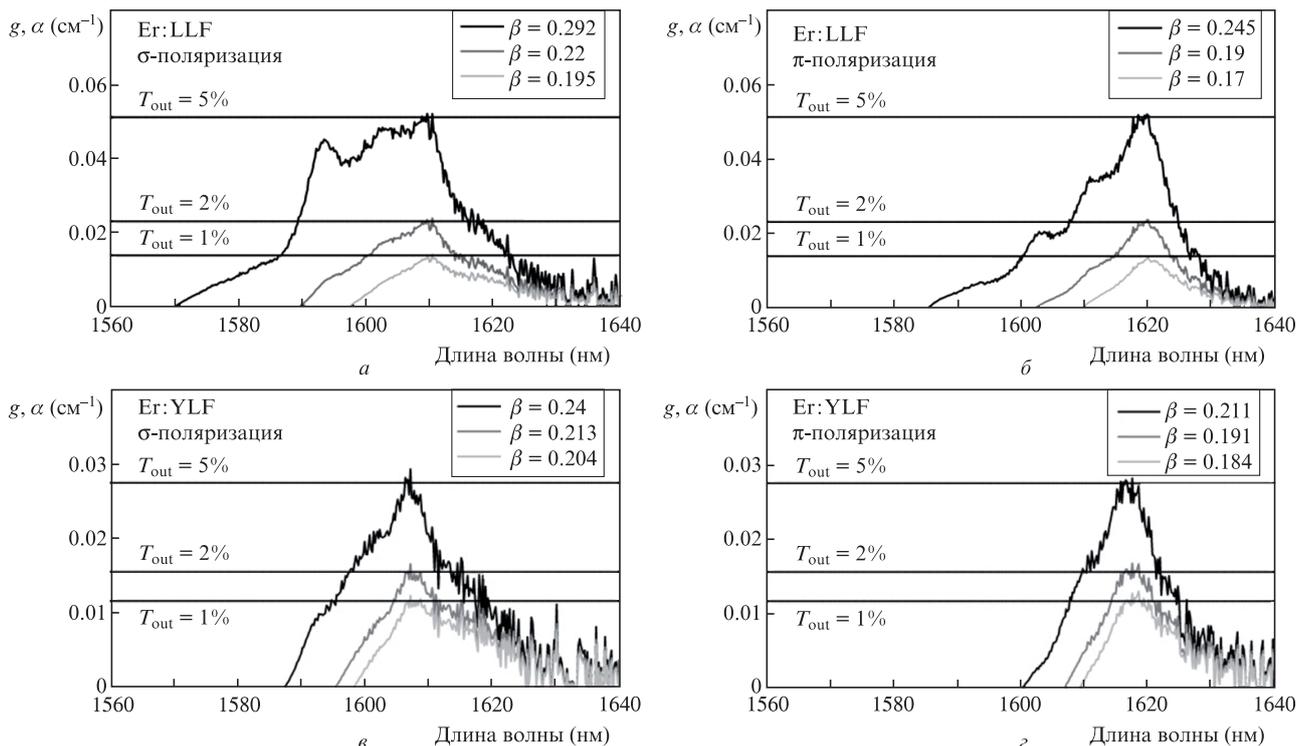


Рис.3. Спектры усиления $g(\lambda)$ кристаллов Er:LLF (а, б) и Er:YLF (в, г) для σ - (а, в) и π - (б, г) поляризаций излучения с указанием уровня полных потерь α (прямые линии) при различных значениях пропускания выходного зеркала T_{out} .

ответственно. Это и определяет положение спектра генерируемого излучения при соответствующем выходном зеркале. Для кристалла Er:YLF наблюдается небольшое коротковолновое смещение максимумов усиления, которые располагаются на длинах волн 1606 и 1616 нм для σ - и π -поляризаций соответственно.

3. Лазерные эксперименты

Генерационные характеристики кристаллов Er:LLF и Er:YLF исследовались на экспериментальной установке, схема которой приведена на рис.4.

Источником излучения накачки служил лазер на кристалле Er, Yb: YAG ($\lambda_p = 1522$ нм) с параметром качества пучка $M^2 < 1.2$. Подробное описание данного лазера приведено в работе [23]. Излучение накачки при помощи двух сферических линз фокусировалось в пятно диаметром 60 мкм (по уровню интенсивности $1/e^2$) внутрь активного элемента – образцов кристаллов Er (1 ат.%): LLF толщиной 5.5 мм и Er (1 ат.%): YLF толщиной 13 мм, вырезанных для распространения излучения вдоль кристаллографической оси c . Такая ориентация кристаллов позволяла исследовать σ -поляризацию излучения (в работе [13] получена π -поляризация генерируемого излучения с помощью кристалла Er³⁺:LiLuF₄). На торцы обоих кристаллов были нанесены просветляющие диэлектрические покрытия для спектрального диапазона 1500–1650 нм. В резонаторе лазера кристаллы располагались на медном теплоотводе без применения активного охлаждения и находились в фокусе сферического зеркала с радиусом кривизны $R = -75$ мм. В качестве выходного зеркала резонатора устанавливались плоские зеркала с пропусканием $T_{out} = 1\%$, 2% и 5% на длинах волн генерации. Высокий коэффициент отражения (HR) выходных зеркал на длине

волны накачки обеспечивал двойной проход излучения накачки через активный элемент.

Полученные выходные характеристики лазера на кристалле Er:LLF представлены на рис.5,а. Максимальные значения выходной мощности P_{out}^{max} и дифференциальной эффективности η по отношению к поглощенной мощности накачки составили 92 мВт и 44% и были получены при пропускании выходного зеркала 2%. Минимальный порог лазерной генерации P_{th} был достигнут с зеркалом с $T_{out} = 1\%$ и составил 19 мВт. Длина волны излучения λ_{gen} не зависела от пропускания выходного зеркала и была равна 1609 нм, что соответствует результатам, представленным на рис.3,а.

Использование в качестве активной среды лазера кристалла Er:YLF позволило впервые получить непрерывную лазерную генерацию при резонансной накачке.

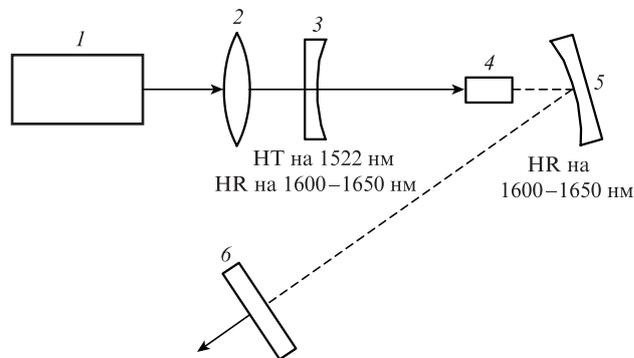


Рис.4. Схема лазера: 1 – твердотельный лазер ($\lambda_p = 1522$ нм); 2 – система фокусировки; 3 – входное сферическое зеркало ($R = -150$ мм); 4 – активный элемент (Er:LLF или Er:YLF); 5 – сферическое зеркало ($R = -75$ мм); 6 – выходное зеркало ($T_{out} = 1\%$, 2% , 5%).

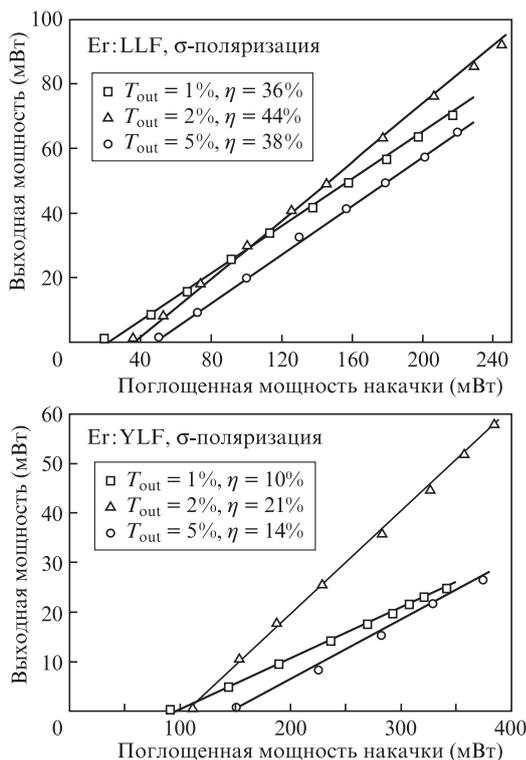


Рис.5. Выходные характеристики лазеров на кристаллах Er:LLF (а) и Er:YLF (б).

Выходные характеристики лазера на кристалле Er:YLF представлены на рис.5,б.

Максимальные выходные параметры, как и в случае кристалла Er:LLF, были достигнуты при $T_{out} = 2\%$. Максимальные выходная мощность и дифференциальная эффективность генерации по поглощенной мощности накачки составили 58 мВт и 21%. Минимальный порог лазерной генерации, полученный при $T_{out} = 1\%$, был равен 88 мВт. Длина волны излучения не зависела от пропускания выходного зеркала и составляла 1606 нм, что соответствует результатам, представленным на рис.3,в. Пространственный профиль лазерного пучка во всех экспериментах был близок к гауссову с $M^2 < 1.2$. Полученные в работе генерационные характеристики кристаллов Er:LLF и Er:YLF сведены в табл.1.

Табл.1. Генерационные характеристики кристаллов Er:LLF и Er:YLF.

Кристалл	T_{out} (%)	P_{th} (мВт)	η (%)	P_{out}^{max}	λ_{gen} (нм)
Er:LLF	1	19	36	70	1609
	2	35	44	92	
	5	52	38	65	
Er:YLF	1	88	10	25	1606
	2	112	21	58	
	5	150	14	27	

4. Заключение

Представлены результаты исследования спектроскопических и генерационных характеристик кристаллов фторидов LLF и YLF, активированных ионами Er³⁺. Рассчитаны спектры поперечных сечений поглощения и сти-

мулированного излучения в спектральном диапазоне 1400–1650 нм, определены времена жизни верхнего энергетического уровня ⁴I_{13/2}, рассчитаны спектры коэффициентов усиления. На обоих кристаллах для σ -поляризации излучения реализована непрерывная лазерная генерация при резонансной лазерной накачке на длине волны 1522 нм. На кристалле Er:LLF достигнуты максимальные значения выходной мощности (92 мВт) и дифференциальной эффективности (44%) по поглощенной мощности накачки, длина волны лазерного излучения составила 1609 нм. С использованием кристалла Er:YLF лазерная генерация при резонансной накачке получена впервые. Достигнута выходная мощность лазера 58 мВт при дифференциальной эффективности 21% на длине волны 1606 нм.

Работа выполнена благодаря финансовой субсидии, выделенной в рамках государственной поддержки Казанского (Приволжского) федерального университета (соглашение № 02.А03.21.0002), а также субсидии, выделенной Казанскому федеральному университету для выполнения проектной части государственного задания в сфере научной деятельности. Рост фторидных кристаллов осуществлен при финансовой поддержке Российского научного фонда (проект №15-12-10026).

1. Wulfmeyer V., Wizemann H.-D., Schiller M., Fechner M., Huber G. *Proc. 24th Int. Laser Radar Conf.* (Boulder, Col., USA, 2008, SOIP-22).
2. Myers M.J., Myers J.D., Sarracino J.T., Hardy C.R., Guo B., Christian S.M., Myers J.A., Roth F., Myers A.G. *Proc. SPIE Int. Soc. Opt. Eng.*, **7578**, 75782G (2010).
3. Garbuzov D., Kudryashov I., Dubinskii M. *Appl. Phys. Lett.*, **86**, 131115 (2005).
4. Tolstik N.A., Troshin A.E., Kurilchik S.V., Kisel V.E., Kuleshov N.V., Matrosov V.N., Matrosova T.A., Kupchenko M.I. *Appl. Phys. B*, **86**, 275 (2007).
5. Young Y.E., Setzler S.D., Snell K.J., Budni P.A., Pollak T.M., Chicklis E.P. *Opt. Lett.*, **29**, 1075 (2004).
6. Ter-Gabrielyan N., Fromzel V., Ryba-Romanowski W., Lukaszewicz T., Dubinskii M. *Opt. Lett.*, **37**, 1151 (2012).
7. Brandt C., Matrosov V., Petermann K., Huber G. *Opt. Lett.*, **36**, 1188 (2011).
8. Ter-Gabrielyan N., Fromzel V., Yan Z., Han X., Zhang H., Wang J., Dubinskii M. *Opt. Mater. Express*, **4**, 1355 (2014).
9. Горбаченя К.Н., Кисель В.Э., Ясюкевич А.С., Матросов В.Н., Толстик Н.А., Кулешов Н.В. *ЖИПС*, **82**, 214 (2015).
10. Brandt C., Tolstik N.A., Kuleshov N.V., Petermann K., Huber G. *ASSP Conf. 2010* (San Diego, Cal.: OSA, 2010, AMB 15).
11. Fromzel V., Ter-Gabrielyan N., Serrano M.D., Lahera D.E., Cascales C., Zaldo C., Dubinskii M. *ASSP Conf. 2012* (San Diego, Cal.: OSA, 2012, IW3D).
12. Gorbachenya K.N., Kisel V.E., Yasukevich A.S., Pavlyuk A.A., Kuleshov N.V. *Laser Phys.*, **23**, 125005 (2013).
13. Moglia F., Brandt C., Huber G. *ASSP Conf. 2012* (San Diego, Cal.: OSA, 2012, AM4A).
14. Sumida D. *Opt. Lett.*, **19**, 1343 (1994).
15. Payne S.A., Chase L.L., Smith L.K., Kway W.L., Krupke W.F. *IEEE J. Quantum Electron.*, **28**, 2619 (1992).
16. McCumber D.E. *Phys. Rev. A*, **136**, 954 (1964).
17. Ясюкевич А.С., Щербинский В.Г., Кисель В.Э., Мандрик А.В., Кулешов Н.В. *ЖИПС*, **44**, 187 (2004).
18. Kaminskii A.A. *Phys. Stat. Sol. (A)*, **97**, K53 (1986).
19. Jayasankar C.K. *Phys. Stat. Sol. (B)*, **155**, 559 (1989).
20. DeLoach L.D., Payne S.A., Chase L.L., Smith L.K., Kway W.L., Krupke W.F. *IEEE J. Quantum Electron.*, **29**, 1179 (1993).
21. Siegman A.E. *Lasers* (Sausalito : Univ. Sci. Books, 1986).
22. Dubinskii M.A., Semashko V.V., et al. *Laser Phys.*, **3**, 480 (1994).
23. Gorbachenya K.N., Kisel V.E., Yasukevich A.S., Maltsev V.V., Leonuk N.I., Kuleshov N.V. *ASSL Conf. 2014* (Shanghai, China: OSA, 2014, AM2A.5).