

СПЕКТРАЛЬНО-ЛЮМИНЕСЦЕНТНЫЕ СВОЙСТВА КРИСТАЛЛОВ ИТТРИЙ-МАГНИЕВОГО ПЕНТАБОРАТА, ЛЕГИРОВАННЫХ ИОНАМИ Er^{3+} и Yb^{3+}

К. Н. Горбаченя^{1*}, Е. В. Вилейшикова¹, В. Э. Кисель¹, В. В. Мальцев²,
Д. Д. Митина², Е. В. Копорулина^{2,3}, Е. А. Волкова², Н. В. Кулешов¹

УДК 621.3.038.825.2

¹ Научно-исследовательский центр оптических материалов и технологий
Белорусского национального технического университета,
220013, Минск, Беларусь; e-mail: gorby@bntu.by

² Московский государственный университет имени М. В. Ломоносова, 119234, Москва, Россия

³ Институт проблем комплексного освоения недр им. академика Н. В. Мельникова Российской АН,
111020, Москва, Россия

(Поступила 1 октября 2020)

Исследованы спектрально-люминесцентные свойства кристаллов иттрий-магниевого пентабората, легированных ионами Er^{3+} и Yb^{3+} . Определены спектры поперечных сечений поглощения и стимулированного испускания в поляризованном свете. Измерены времена жизни энергетических уровней $^4I_{13/2}$ иона эрбия и $^2F_{5/2}$ иона иттербия. Проведена оценка эффективности переноса энергии от ионов иттербия к ионам эрбия. В рамках стандартной теории Джудда-Офельта рассчитаны силы линий абсорбционных и излучательных переходов, что позволило определить радиационное время жизни возбужденных уровней иона Er^{3+} , а также коэффициенты ветвления люминесценции.

Ключевые слова: эрбий, иттербий, иттрий-магниевого пентаборат, спектрально-люминесцентные свойства.

The spectral-luminescent properties of $Er^{3+}, Yb^{3+}:YMGb_5O_{10}$ were investigated. The spectra of the cross-section of absorption and stimulated emission in polarized light were determined. The lifetimes of the erbium $^4I_{13/2}$ and ytterbium $^2F_{5/2}$ energy levels were measured. The $Yb^{3+} \rightarrow Er^{3+}$ energy transfer efficiency was estimated. Within the framework of the conventional Judd-Ofelt theory the strengths of absorption and emission transitions were calculated, which gave an opportunity to determine the lifetime of the Er^{3+} excited energy levels as well as the luminescence branching ratios.

Keywords: erbium, ytterbium, yttrium-magnesium pentaborate crystals, spectral-luminescent properties.

Введение. Лазерное излучение с длиной волны 1.5—1.6 мкм имеет ряд достоинств, интересных для широкого практического применения в лазерной дальнометрии, медицине, системах оптической локации и лазерно-искровой эмиссионной спектрометрии [1]. Основное преимущество указанного излучения — условная безопасность для органов зрения из-за того, что малая часть излучения попадает на сетчатку, поглощаясь до нее тканями глаза (роговицей, хрусталиком и стекловидным телом). Вследствие прозрачности атмосферы, а также высокого пропускания излучения с $\lambda = 1.5—1.6$ мкм в условиях тумана, дыма и пара лазерные источники указанного диапазона используются также в системах оптической локации и дистанционного зондирования Земли.

Существует большое количество источников лазерного излучения с $\lambda = 1.5—1.6$ мкм: волоконные лазеры, полупроводниковые лазеры, параметрические генераторы света и лазеры на основе вы-

SPECTRAL-LUMINESCENT PROPERTIES OF YTTRIUM-MAGNESIUM PENTABORATE CRYSTALS CO-DOPED WITH Er^{3+} and Yb^{3+}

K. N. Gorbachenya^{1*}, E. V. Vilejshikova¹, V. E. Kisel¹, V. V. Maltsev², D. D. Mitina², E. V. Koporulina^{2,3}, E. A. Volkova², N. V. Kuleshov¹ (¹ Center for Optical Materials and Technologies of Belarusian National Technical University, Minsk, 220013, Belarus; e-mail: gorby@bntu.by; ² M. V. Lomonosov Moscow State University, Moscow, 119234, Russia; ³ Melnikov Research Institute of Comprehensive Exploitation of Mineral Resources of the Russian Academy of Sciences, Moscow, 111020, Russia)

нужденного комбинационного рассеяния. Однако благодаря простоте и компактности конструкции наибольший интерес разработчиков лазерных систем привлекают твердотельные лазеры на основе материалов, соактивированных ионами эрбия и иттербия. Основные требования, которые предъявляются к эрбий-иттербиевым материалам для получения эффективной лазерной генерации в области 1.5 мкм [2]: эффективное поглощение излучения накачки ионами иттербия и последующий эффективный перенос энергии от ионов иттербия к ионам эрбия; быстрая безызлучательная релаксация с уровня $^4I_{11/2}$ ионов эрбия на верхний лазерный уровень $^4I_{13/2}$ для минимизации потерь, связанных с обратным переносом энергии от ионов эрбия к ионам иттербия и ап-конверсионными переходами на вышележащие уровни; высокий квантовый выход люминесценции с уровня $^4I_{13/2}$ для сохранения невысокого порога лазерной генерации.

Наиболее полно указанным требованиям соответствуют фосфатные стекла, легированные ионами эрбия и иттербия, которые характеризуются высоким поперечным сечением поглощения в области ~ 1 мкм, относительно коротким временем жизни уровня $^4I_{11/2}$ и близким к единице квантовым выходом люминесценции с уровня $^4I_{13/2}$. Благодаря наличию таких свойств указанные среды долгое время занимали лидирующие позиции в вопросе выбора материала для эрбиевых лазеров. Однако основными недостатками использования фосфатных стекол с ионами эрбия и иттербия в качестве лазерных сред являются их низкая теплопроводность (0.85 Вт/м \cdot К) и низкий порог теплового разрушения в лазерах с непрерывной накачкой [3]. Поэтому актуален поиск кристаллической матрицы с ионами эрбия и иттербия, удовлетворяющей приведенным спектроскопическим требованиям для получения эффективной лазерной генерации в области ~ 1.5 мкм и имеющей высокую теплопроводность.

В настоящей работе исследованы спектрально-люминесцентные свойства кристаллов иттрий-магниевого пентабората, легированных ионами эрбия и иттербия $\text{Er}^{3+}, \text{Yb}^{3+}:\text{YMGb}_5\text{O}_{10}$ (YМВО).

Выращивание монокристаллов. Монокристаллы $(\text{Er}, \text{Yb}):\text{YМВО}$ ($\text{Er} = 1.5$ ат.%, $\text{Yb} = 12$ ат.%) выращены методом SGDS (solution growth on dipped seeds) из высокотемпературного раствора-расплава на основе тримolibдата калия $\text{K}_2\text{Mo}_3\text{O}_{10}$ (ТМК) [4]. Соотношение кристаллообразующих оксидов соответствовало их стехиометрическому отношению в формуле. В качестве компонентов исходной шихты использованы R_2O_3 ($\text{R} = \text{Y}, \text{Yb}, \text{Er}$), MgO , V_2O_5 , K_2MoO_4 и MoO_3 (квалификация не ниже х.ч.), $\text{K}_2\text{Mo}_3\text{O}_{10}$ предварительно синтезирован при 650°C согласно реакции $\text{K}_2\text{MoO}_4 + 2\text{H}_2\text{MoO}_3 = \text{K}_2\text{Mo}_3\text{O}_{10} + 2\text{H}_2\text{O}\uparrow$. В температурном интервале $800\text{--}1000^\circ\text{C}$ предварительно определялась растворимость $(\text{Er}, \text{Yb}):\text{YМВО}$ в расплаве ТМК. Проведенные с этой целью эксперименты с разными соотношениями ТМК:YМВО при прочих равных условиях показали оптимальное отношение в области 83/17 мас. % (учитывались масса, размер и качество полученных кристаллов).

При выращивании методом SGDS исходная композиция помещалась в платиновый тигель объемом 250 мл и нагревалась до 1000°C . После гомогенизации раствора-расплава в течение 20 ч в расплав вводился пробный кристалл и по изменению его веса и характера поверхности определялась температура насыщения 805°C . Для затравки использовался спонтанный монокристалл YМВО с размерами ребра 2 мм, закрепленный на отожженной платиновой проволоке диаметром 0.15 мм. Затравка фиксировалась на кристаллодержателе и погружалась в расплав, температура в реакционном объеме кристаллизационной установки в процессе роста понижалась с переменной скоростью от 1 до $0.5^\circ\text{C}/\text{сут}$. Общая длительность такого охлаждения 780 ч. Далее кристалл приподнимался над расплавом и охлаждался до комнатной температуры в течение 2 сут. Остатки растворителя с кристалла удалялись путем его отмывания в концентрированной соляной кислоте. В результате получен монокристалл $\text{Er}, \text{Yb}:\text{YМВО}$ оптического качества размерами $23 \times 21 \times 12$ мм.

Абсорбционные свойства. Для исследований спектров поглощения в поляризованном свете из кристаллов $\text{Er}, \text{Yb}:\text{YМВО}$ изготовлены полированные плоскопараллельные пластинки толщиной 2 мм, ориентированные вдоль главных осей оптической индикатрисы кристалла N_m, N_p, N_g . Измерение проводилось при комнатной температуре на двухлучевом спектрофотометре Varian CARY 5000 в области $850\text{--}1050$ нм, соответствующей энергетическим переходам $^2F_{7/2} \rightarrow ^2F_{5/2}$ ионов иттербия и $^4I_{15/2} \rightarrow ^4I_{11/2}$ ионов эрбия, и $1400\text{--}1600$ нм, соответствующей энергетическому переходу $^4I_{15/2} \rightarrow ^4I_{13/2}$ ионов эрбия. Для записи спектров в поляризованном свете в оба канала спектрофотометра помещались поляризационные призмы Глана—Тейлора. Спектральное разрешение прибора 0.5 нм. При определении коэффициентов поглощения учтено френелевское отражение от полированных поверхностей образцов. По спектральным зависимостям коэффициентов поглощения и содержанию ионов-активаторов определены спектры поперечных сечений поглощения.

На рис. 1 приведены спектры поперечных сечений поглощения кристалла Er,Yb:YМВО. В области 850—1050 нм (переходы ${}^2F_{7/2} \rightarrow {}^2F_{5/2}$ ионов иттербия и ${}^4I_{15/2} \rightarrow {}^4I_{11/2}$ ионов эрбия), наблюдаются две интенсивные полосы поглощения с пиками на $\lambda = 935$ и 975 нм (рис. 1, а). Максимальное поперечное сечение поглощения $1.55 \cdot 10^{-20} \text{ см}^2$ на $\lambda = 975$ нм для поляризации $E//N_g$. Спектральная ширина полосы поглощения 2.5 нм (рис. 1, а). В области 1400—1600 нм (рис. 1, б) наблюдаются также интенсивные полосы поглощения с пиками на различных длинах волн в области 1475—1575 нм с максимальным поперечным сечением поглощения до $1.55 \cdot 10^{-20} \text{ см}^2$ на $\lambda = 1482$ нм для поляризации излучения $E//N_m$.

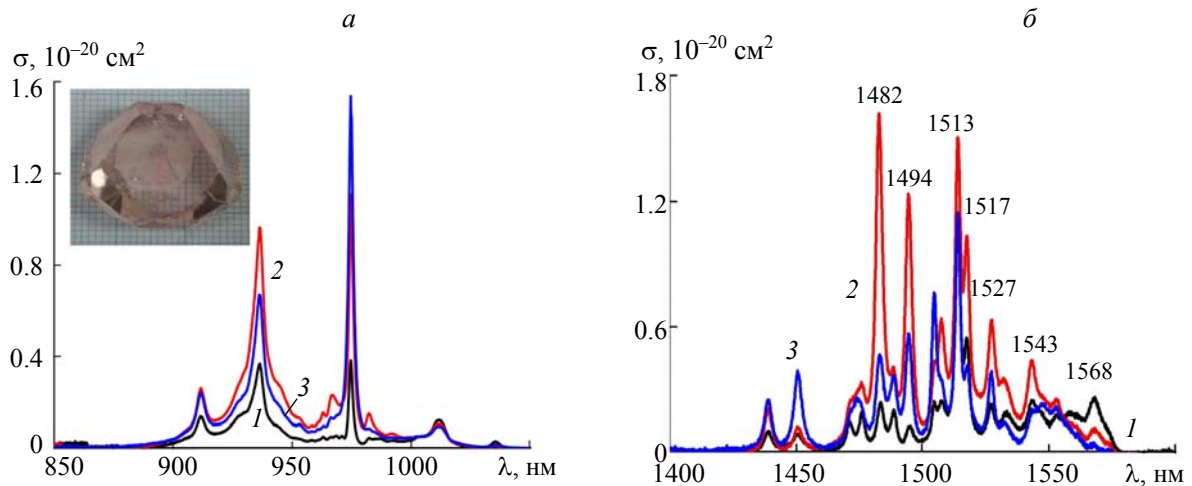


Рис. 1. Спектры поперечных сечений поглощения в областях ~ 1 мкм (а) и ~ 1.5 мкм (б), $E//N_p$ (1), $E//N_m$ (2), $E//N_g$ (3); на вставке — монокристалл Er^{3+} , Yb^{3+} : $\text{YМgB}_5\text{O}_{10}$ (шкала 1 мм)

Кинетические характеристики. Эффективность переноса энергии от ионов иттербия к ионам эрбия. Цель проведения измерений кинетик люминесценции — определение времени жизни возбужденного состояния ${}^4I_{13/2}$ ионов эрбия в кристалле YМВО, легированном только ионами эрбия, и ${}^2F_{5/2}$ ионов иттербия в кристаллах YМВО, как легированных только ионами иттербия, так и соактивированных ионами эрбия и иттербия. Исследование кинетики люминесценции в области 1.6 мкм (переход ${}^4I_{13/2} \rightarrow {}^4I_{15/2}$ ионов эрбия) и определение времени жизни уровня ${}^4I_{13/2}$ проводились для кристалла YМВО, легированного только ионами эрбия. Для возбуждения люминесценции использована $\lambda \sim 1530$ нм (переход ${}^4I_{15/2} \rightarrow {}^4I_{13/2}$ ионов эрбия). Для всей серии измерений затухание люминесценции хорошо описывалось одноэкспоненциальной функцией, время жизни уровня ${}^4I_{13/2}$ ионов эрбия 390 ± 20 мкс (рис. 2).

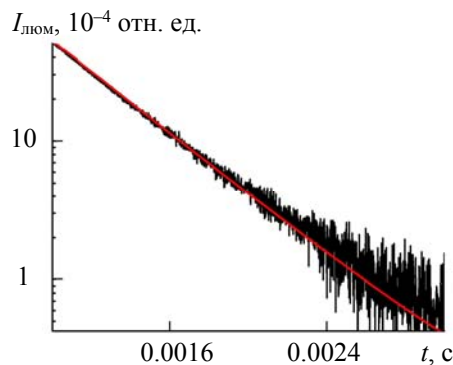


Рис. 2. Кинетика затухания люминесценции с постоянной времени 390 ± 20 мкс

Эффективность переноса энергии от ионов иттербия к ионам эрбия оценивалась по сокращению времени жизни уровня ${}^2F_{5/2}$ ионов иттербия в кристалле YМВО, легированном ионами Er и Yb, отно-

сительно соответствующего времени жизни в кристалле, легированном только ионами Yb, по соотношению [5]:

$$\eta_{Yb \rightarrow Er} = 1 - \frac{\tau_{Yb,Er}(^2F_{5/2})}{\tau_{Yb}(^2F_{5/2})}, \quad (1)$$

где $\eta_{Yb \rightarrow Er}$ — эффективность переноса энергии от ионов иттербия к ионам эрбия; $\tau_{Yb,Er}(^2F_{5/2})$ и $\tau_{Yb}(^2F_{5/2})$ — времена жизни уровня $^2F_{5/2}$ ионов иттербия в кристалле, легированном ионами Er^{3+} и Yb^{3+} , и в кристалле, легированном только ионами Yb^{3+} .

Возбуждение люминесценции осуществлялось на $\lambda \sim 976$ нм, кинетика затухания с уровня $^2F_{5/2}$ зарегистрирована в области 1040 нм. С учетом сильного влияния эффекта перепоглощения на измеряемое время жизни уровня $^2F_{5/2}$ ионов иттербия вследствие перекрытия полос поглощения и люминесценции в области 1 мкм измерения выполнялись в суспензии кристаллического порошка в глицерине [6]. Профиль затухания кинетики люминесценции с уровня $^2F_{5/2}$ в кристалле Yb(1 ат.%):YbVO описывался одноэкспоненциальной функцией. При разбавлении суспензии глицерином время затухания люминесценции уменьшалось с 635 до 580 мкс. Начиная с относительного содержания кристаллического порошка в суспензии $\sim 40\%$, измеряемое время жизни уровня $^2F_{5/2}$ ионов иттербия 580 ± 30 мкс не изменялось, несмотря на дальнейшее увеличение содержания глицерина в суспензии.

Профиль затухания кинетики люминесценции с уровня $^2F_{5/2}$ ионов иттербия в кристаллах Er, Yb:YbVO, не аппроксимировался моноэкспоненциальной функцией, что объясняется появлением еще одного канала опустошения указанного уровня — резонансного переноса энергии на уровень $^4I_{11/2}$ ионов эрбия. Время жизни уровня, характеризующегося неэкспоненциальным затуханием, оценивалось по соотношению [7]:

$$\tau_{Yb,Er}(^2F_{5/2}) = \int_0^{\infty} tI(t)dt / \int_0^{\infty} I(t)dt, \quad (2)$$

где $\tau_{Yb,Er}(^2F_{5/2})$ — время жизни уровня $^2F_{5/2}$ ионов иттербия в кристалле, соактивированном ионами Er^{3+} и Yb^{3+} ; t — время; $I(t)$ — интенсивность люминесценции.

В соответствии с (2) время жизни уровня $^2F_{5/2}$ ионов иттербия в кристалле Er, Yb:YbVO 95 ± 5 мкс. Эффективность переноса энергии от ионов иттербия к ионам эрбия в кристалле YbVO, легированном ионами Er и Yb, достигает 84 %.

Расчет интенсивностей f - f -переходов в рамках модели Джадда-Офельта. Вероятности излучательных переходов в спектрах испускания иона Er^{3+} в Er, Yb:YbMgB₅O₁₀ рассчитаны на основе модели Джадда-Офельта (Д-О) [8, 9]. Модель Д-О описывает интенсивности электродипольных (ЭД) переходов в спектрах испускания и поглощения трехвалентных ионов лантаноидов. В условиях слабых конфигурационных взаимодействий и влияния кристаллического поля в приближении Д-О сила линии ЭД-перехода $S_{расч}(JJ')$:

$$S_{расч}(JJ') = \sum_{k=2,4,6} U^{(k)} \Omega_k, \quad (3)$$

где $U^{(k)} = \langle (4f^n)SLJ || U^k || (4f^n)S'L'J' \rangle^2$ — квадрат дважды редуцированного матричного элемента перехода $J \rightarrow J'$ иона Er^{3+} ; Ω_k — параметры интенсивности Д-О.

Для иона Er^{3+} в кристаллических средах матричные элементы $U^{(k)}$ переходов слабо зависят от характера координации иона-активатора и природы матрицы [10, 11]. На основе зарегистрированного спектра оптического поглощения кристалла Er, Yb:YbMgB₅O₁₀ определены экспериментальные силы осциллятора $f_{эксп}$ для каждого перехода Er^{3+} :

$$f_{эксп}(JJ') = \frac{m_e c^2}{\pi e^2 N_{Er} \langle \lambda \rangle^2} \Gamma(JJ'), \quad (4)$$

где m_e и e — масса и заряд электрона; c — скорость света; $\Gamma(JJ')$ — интегральный коэффициент поглощения для полосы в спектре поглощения; $\langle \lambda \rangle$ — “центр тяжести” полосы поглощения; значения $f_{эксп}(JJ')$ усреднены по трем направлениям поляризации $f = 1/3(f_x + f_y + f_z)$.

Поскольку модель Д-О описывает переходы ЭД-природы, вклад магнитных дипольных (МД) переходов вычтен из экспериментальных сил осцилляторов $f_{эксп}$, определенных из спектров поглощения: $f_{экспЭД} = f_{эксп} - f_{МД}$, где $f_{экспЭД}$ — экспериментальные силы осцилляторов ЭД-переходов, $f_{МД}$ — силы осцилляторов МД-переходов, рассчитанные на основе данных [12]. Для определения па-

параметров интенсивности Ω_λ , где $\lambda = 2, 4, 6$, рассчитаны силы линии ЭД-вкладов переходов в поглощении $S_{\text{экспЭД}}$:

$$S_{\text{экспЭД}}(JJ') = \frac{3h(2J'+1)\langle\lambda\rangle}{8} \frac{9n}{(n^2+2)^2} f_{\text{экспЭД}}(JJ'), \quad (5)$$

где h — постоянная Планка; n — показатель преломления кристалла Er,Yb:YMgB₅O₁₀.

Значения $S_{\text{экспЭД}}$ использованы для определения параметров интенсивности Ω_2 , Ω_4 и Ω_6 через аппроксимацию методом наименьших квадратов. В моделировании задействованы восемь наиболее интенсивных полос поглощения. В результате получены следующие параметры Д-О: $\Omega_2 = 3.485 \cdot 10^{-20}$, $\Omega_4 = 1.303 \cdot 10^{-20}$, $\Omega_6 = 1.508 \cdot 10^{-20}$ [см²] со среднеквадратичным отклонением $\text{RMS } f = 0.339 \cdot 10^{-7}$. Следует отметить, что кристалл Er³⁺, Yb³⁺:YMgB₅O₁₀ характеризуется существенным коэффициентом поглощения на $\lambda \sim 960$ нм, обусловленным переходом ${}^2F_{7/2} \rightarrow {}^2F_{5/2}$ иона Yb³⁺, спектрально перекрывающимся с переходом ${}^4I_{15/2} \rightarrow {}^4I_{11/2}$ иона Er³⁺. По этой причине переход в состояние ${}^4I_{11/2}$ (Er³⁺) не задействован в аппроксимации. Определенные параметры Д-О хорошо согласуются с интенсивностями для изоструктурных кристаллов, активированных Er³⁺ [13, 14]. На основе рассчитанных параметров получены силы осцилляторов для переходов Er³⁺ в спектрах поглощения:

$$f_{\text{расч}}(JJ') = \frac{8}{3h(2J'+1)\langle\lambda\rangle} \frac{(n^2+2)^2}{9n} S_{\text{расч}}(JJ') + f_{\text{МД}}(JJ'). \quad (6)$$

Результаты моделирования представлены в табл. 1.

Вероятности спонтанных излучательных переходов $A_{\text{расч}}$ рассчитаны на основе соответствующих сил линий $S_{\text{расчЭД}}$, вычисленных на основе полученных параметров Д-О Ω_k и квадратов матричных элементов $U^{(k)}$ (3):

$$A_{\text{расч}}(JJ') = \frac{64\pi^4 e^2}{3h(2J'+1)\langle\lambda\rangle^3} n \left(\frac{n^2+2}{3} \right)^2 S_{\text{ЭД}}^{\text{расч}}(JJ') + A_{\text{МД}}(JJ'). \quad (7)$$

Вклад МД-переходов $A_{\text{МД}}$ в (7) рассчитан на основе вероятностей МД-переходов иона Er³⁺ [12]. Суммированием вероятностей спонтанных переходов для отдельных каналов излучения $J \rightarrow J'$ вычислены полные вероятности излучения $A_{\text{общ}}$ и соответствующие радиационные времена жизни возбужденных состояний $\tau_{\text{рад}}$:

$$A_{\text{общ}} = \sum_{J'} A_{\text{расч}}(JJ'), \quad \tau_{\text{рад}} = 1/A_{\text{общ}}. \quad (8)$$

В табл. 2 приведены рассчитанные вероятностные характеристики спонтанных излучательных переходов из состояний ${}^4I_{13/2}$, ${}^4I_{11/2}$, ${}^4I_{9/2}$, ${}^4F_{9/2}$ и ${}^4S_{3/2}$. Радиационное время жизни нижнего возбужденного состояния $\tau_{\text{рад}}({}^4I_{13/2}) = 8.054$ мс несколько меньше полученного для изоструктурных кристаллов Er,Yb:GdMgB₅O₁₀ и Er,Yb:LaMgB₅O₁₀ [13, 14].

Т а б л и ц а 1. Экспериментальные и рассчитанные в результате аппроксимации методом Джадда-Офельта силы осцилляторов переходов Er³⁺ в спектрах поглощения кристалла Er³⁺, Yb³⁺:YMgB₅O₁₀

${}^4I_{15/2} \rightarrow$	U^2	U^4	U^6	$\langle\lambda\rangle$, нм	$F_{\text{эксп}}, \times 10^7$	$F_{\text{расч}}, \times 10^7$
${}^4I_{13/2}$	0.0195	0.1173	1.4299	1514.67	18.602	14.024 ^{ЭД} +4.502 ^{МД}
${}^4I_{9/2}$	0	0.1856	0.0122	801.96	2.717	2.77 ^{ЭД}
${}^4F_{9/2}$	0	0.5275	0.4612	653.92	18.528	18.455 ^{ЭД}
${}^2H_{11/2}$	0.7326	0.4222	0.3157	523.83	58.253	58.481 ^{ЭД}
${}^4F_{7/2}$	0	0.1467	0.6280	487.36	20.343	20.722 ^{ЭД}
${}^4F_{5/2} + {}^4F_{3/2}$	0	0	0.3493	447.70	10.443	10.528 ^{ЭД}
${}^2H_{9/2} + {}^4G_{9/2}$	0	0.0157	0.2278	406.90	7.658	7.982 ^{ЭД}
${}^4G_{11/2}$	0.8970	0.5123	0.1172	378.23	89.676	89.424 ^{ЭД}
RMS						0.339

Т а б л и ц а 2. Вероятностные характеристики радиационных переходов Er^{3+} в кристалле $\text{Er}^{3+}, \text{Yb}^{3+}:\text{YMGb}_5\text{O}_{10}$

Переход $J \rightarrow J'$		$A_{JJ'}$, c^{-1}	$A_{\text{общ}}$, c^{-1}	$\tau_{\text{рад}}$, мс
J	J'			
${}^4I_{13/2}$	${}^4I_{15/2}$	$95.349^{\text{ЭД}} + 28.805^{\text{МД}}$	124.15	8.054
${}^4I_{11/2}$	${}^4I_{13/2}$	$8.161^{\text{ЭД}} + 7.836^{\text{МД}}$	78.42	12.752
	${}^4I_{15/2}$	$62.422^{\text{ЭД}}$		
${}^4I_{9/2}$	${}^4I_{13/2}$	$23.258^{\text{ЭД}} + 0.533^{\text{МД}}$	69.99	14.286
	${}^4I_{15/2}$	$45.832^{\text{ЭД}}$		
${}^4F_{9/2}$	${}^4I_{11/2}$	$28.421^{\text{ЭД}} + 7.529^{\text{МД}}$	551.3	1.814
	${}^4I_{13/2}$	$21.803^{\text{ЭД}}$		
	${}^4I_{15/2}$	$490.544^{\text{ЭД}}$		
${}^4S_{3/2}$	${}^4I_{9/2}$	$25.106^{\text{ЭД}}$	826.5	1.209
	${}^4I_{11/2}$	$16.547^{\text{ЭД}}$		
	${}^4I_{13/2}$	$226.789^{\text{ЭД}}$		
	${}^4I_{15/2}$	$558.1^{\text{ЭД}}$		

Расчет спектров поперечных сечений стимулированного испускания и усиления. Расчет спектров поперечных сечений стимулированного испускания (СИ) ионов Er^{3+} в области ~ 1.5 мкм (переход ${}^4I_{13/2} \rightarrow {}^4I_{15/2}$) выполнен по модифицированному методу соответствия [15] с использованием рассчитанных ранее спектров поперечных сечений поглощения для трех поляризаций и радиационного времени жизни уровня ${}^4I_{13/2}$ ионов эрбия, определенного из теории Джадда-Оффельта:

$$\sigma_{\text{исп}}^{\alpha}(\lambda) = \frac{3 \exp(-hc/(kT\lambda))}{8\pi n^2 \tau_{\text{рад}} c \sum_{\beta} \int \lambda^{-4} \sigma_{\text{погл}}^{\beta}(\lambda) \exp(-hc/(kT\lambda)) d\lambda} \sigma_{\text{погл}}^{\alpha}(\lambda), \quad (9)$$

где $\sigma_{\text{исп}}(\lambda)$ — поперечное сечение СИ; α — поляризация света; h — постоянная Планка; c — скорость света в вакууме; k — постоянная Больцмана; T — температура среды; n — показатель преломления кристалла; $\tau_{\text{рад}}$ — радиационное время жизни уровня ${}^4I_{13/2}$ ионов эрбия; β — поляризация света; $\sigma_{\text{погл}}(\lambda)$ — поперечное сечение поглощения.

На рис. 3 представлены спектры поперечных сечений СИ кристалла $\text{Er}, \text{Yb}:\text{YMGbO}$ в области 1425—1650 нм. Интенсивные структурированные полосы испускания на различных длинах волн могут быть использованы для получения лазерной генерации. Для полосы испускания, соответствующей поляризации излучения $E//N_m$, наиболее интенсивный максимум с поперечным сечением СИ $1.85 \cdot 10^{-20} \text{ см}^2$ наблюдается на $\lambda = 1514$ нм. На вставке рис. 3 приведены спектры поперечных сечений

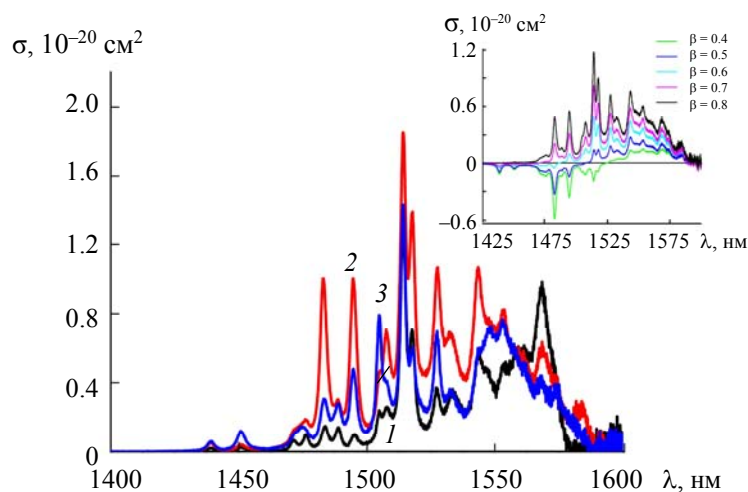


Рис. 3. Спектры поперечных сечений стимулированного испускания кристалла $\text{Er}, \text{Yb}:\text{YMGbO}$ в диапазоне 1425—1600 нм: $E//N_p$ (1), $E//N_m$ (2), $E//N_g$ (3); на вставке — спектры поперечных сечений усиления кристалла $\text{Er}, \text{Yb}:\text{YMGbO}$ в диапазоне 1425—1600 нм

усиления для различных коэффициентов относительной инверсной населенности β для поляризации $E//N_m$, рассчитанные по соотношению [16]:

$$g(\lambda) = \beta\sigma_{\text{СИ}}(\lambda) - (1 - \beta)\sigma_{\text{полг}}(\lambda), \quad (10)$$

где $g(\lambda)$ — коэффициент усиления на длине волны λ ; $\sigma_{\text{СИ}}(\lambda)$ — поперечное сечение СИ на длине волны λ ; $\sigma_{\text{полг}}(\lambda)$ — поперечное сечение поглощения на длине волны λ .

Заключение. Показано, что кристалл иттрий-магниевого пентабората, легированный ионами Er^{3+} и Yb^{3+} , характеризуется большими поперечными сечениями поглощения и стимулированного испускания, высокой эффективностью переноса энергии от ионов эрбия к ионам иттербия. Указанные характеристики свидетельствуют о перспективности использования кристаллов Er, Yb:YMBO в качестве активной среды лазеров диапазона 1.5—1.6 мкм, работающих в непрерывном режиме генерации и режиме пассивной модуляции добротности.

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского научного фонда (грант № 19-12-00235).

- [1] К. Н. Горбаченя, В. Э. Кисель, А. С. Ясюкевич, В. Н. Матросов, Н. А. Толстик, Н. В. Кулешов. Журн. прикл. спектр., **82**, № 2 (2015) 214—218 [K. N. Gorbachenya, V. E. Kisel, A. S. Yasukevich, V. N. Matrosov, N. A. Tolstik, N. V. Kuleshov. J. Appl. Spectr., **82** (2015) 208—212]
- [2] K. N. Gorbachenya, V. E. Kisel, A. S. Yasukevich, V. V. Maltsev, N. I. Leonyuk, N. V. Kuleshov. Opt. Lett., **38** (2013) 2446—2448
- [3] S. Taccheo, G. Sorbello, P. Laporta, G. Karlsson, F. Laurell. IEEE Phot. Tech. Lett., **13** (2001) 19—21
- [4] Д. Д. Митина, В. В. Мальцев, Н. И. Леонюк, К. Н. Горбаченя, Р. В. Дейнека, В. Э. Кисель, А. С. Ясюкевич, Н. В. Кулешов. Неорг. матер., **56** (2020) 221—232
- [5] P. A. Burns, J. M. Dawes, P. Dekker, J. Piper, H. Jiang, J. Wang. IEEE J. Quantum Electron., **40** (2004) 1575—1582
- [6] D. S. Sumida. Opt. Lett., **19** (1994) 1343—1345
- [7] Б. И. Степанов. Введение в теорию люминесценции, Минск, АН БССР (1963)
- [8] B. R. Judd. Phys. Rev., **172** (1962) 750—761
- [9] G. S. Ofelt. J. Chem. Phys., **37** (1962) 511—519
- [10] A. A. Kaminskii, V. S. Mironov, A. Kornienko, S. N. Bagaev, G. Boulon, A. Brenier, B. Di Bartolo. Phys. Status Solidi (a), **151** (1995) 231—255
- [11] W. T. Carnall, P. R. Fields, K. Rajnak. J. Chem. Phys., **49** (1968) 4424—4442
- [12] C. M. Dodson. Phys. Rev. B, **86** (2012) 125102
- [13] Y. Huang, F. Yuan, S. Sun, Z. Lin, L. Zhang. Materials, **11** (2018) 25
- [14] Y. Huang, S. Sun, F. Yuan, L. Zhang, Z. Lin. J. Alloys Compd., **695** (2017) 215—220
- [15] А. С. Ясюкевич, В. Г. Щербицкий, В. Э. Кисель, А. В. Мандрик, Н. В. Кулешов. Журн. прикл. спектр., **71** (2004) 187—192 [A. S. Yasukevich, V. G. Shcherbitskii, V. É. Kisel', A. V. Mandrik, N. V. Kuleshov. J. Appl. Spectr., **71** (2004) 202—208]
- [16] M. Eichhorn. Appl. Phys. B, **93** (2008) 269—316