

ВЛИЯНИЕ ТЕМПЕРАТУРЫ НА ОПТИЧЕСКИЕ ПАРАМЕТРЫ Yb,Er-ЛАЗЕРА С ПОПЕРЕЧНОЙ ДИОДНОЙ НАКАЧКОЙ И ПАССИВНОЙ МОДУЛЯЦИЕЙ ДОБРОТНОСТИ

М. В. Богданович¹, А. А. Изынеев², К. И. Ланцов¹, К. В. Лепченков¹, А. Г. Рябцев^{1*},
В. Н. Павловский¹, П. И. Садовский², И. Е. Свитенков¹, М. А. Щемелев¹

УДК 535.37+621.371.378

¹ Институт физики НАН Беларуси,

220072, Минск, просп. Независимости, 68-2, Беларусь; e-mail: ryabtsev@dragon.bas-net.by

² Институт радиотехники и электроники им. В. А. Котельникова Российской АН,

Фрязино Московской обл., Россия; e-mail: spavi@rambler.ru

(Поступила 19 сентября 2017)

Изучено влияние температуры на спектры фотолюминесценции и поглощения активной среды (эрбиевое фосфатное стекло ЛГС-ДЕ) и пассивного затвора (кристалл $\text{MgAl}_2\text{O}_4:\text{Co}^{2+}$) Yb,Er-лазера с поперечной диодной накачкой. Полученные данные использованы при анализе спектральных и энергетических характеристик компактных эрбиевых излучателей. Установлено, что в интервале температур 233—328 К доминирующим каналом генерации является оптический переход между нижними штарковскими подуровнями состояний ионов эрбия $^4I_{13/2}$ и $^4I_{15/2}$ ($\lambda = 1532.0\text{—}1533.9$ нм). Для описания экспериментальной температурной зависимости поглощенной пороговой импульсной мощности излучения накачки предложена система скоростных уравнений, учитывающая тепловое заселение штарковских подуровней состояний $^4I_{13/2}$ и $^4I_{15/2}$. Данная система наряду с порогом генерации позволяет моделировать выходные энергетические и временные показатели Yb,Er-излучателей.

Ключевые слова: эрбиевый лазер; фосфатное стекло; поперечная диодная накачка; спектры генерации, фотолюминесценции и поглощения; порог генерации; температура.

We have studied the temperature effect on the photoluminescence and absorption of the active medium (erbium phosphate glass of the LGS-DE type) and the passive Q-switch ($\text{Co}^{2+}:\text{MgAl}_2\text{O}_4$ crystal) of a diode-side pumped Yb,Er-laser. The obtained data are applied to the analysis of the spectral and energetic characteristics of compact erbium emitters. It is established that within the temperature range 233—328 K the dominating lasing channel is the optical transition between the lower Stark sublevels of the erbium ion states $^4I_{13/2}$ and $^4I_{15/2}$ ($\lambda = 1532.0\text{—}1533.9$ nm). The rate equations system taking into account the thermal population of the Stark sublevels of the states $^4I_{13/2}$ and $^4I_{15/2}$ has been proposed for the description of the experimental temperature dependence of the threshold absorbed power of the pumping radiation. This system can be also applied for modeling the energetic and temporal characteristics of Yb,Er-emitters.

Keywords: erbium laser; phosphate glass; diode side pump; spectra of lasing, photoluminescence, and absorption; lasing threshold; temperature.

Введение. Компактные лазеры с активным элементом (АЭ) на основе иттербий-эрбиевого стекла, излучающие в условно безопасном для органов зрения диапазоне длин волн $\lambda = 1.5\text{—}1.6$ мкм, занимают ключевую позицию в составе дальномеров различного назначения, работоспособность которых необходимо поддерживать в условиях воздействия неблагоприятных внешних факторов [1—7].

TEMPERATURE EFFECT ON THE OPTICAL PARAMETERS OF A PASSIVELY Q-SWITCHED DIODE-SIDE PUMPED Yb,Er-LASER

М. В. Богданович¹, А. А. Изынеев², К. И. Ланцов¹, К. В. Лепченков¹, А. Г. Рябцев^{1*},
В. Н. Павловский¹, П. И. Садовский², И. Е. Свитенков¹, М. А. Щемелев¹ (¹ В. И. Степанов Institute of Physics of the National Academy of Sciences of Belarus, 68-2 Nezavisimosti Prospekt, Minsk, 220072, Belarus; e-mail: ryabtsev@dragon.bas-net.by; ² V. A. Kotelnikov Institute of Radio Engineering and Electronics of Russian Academy of Sciences (branch in Fryazino); e-mail: spavi@rambler.ru)

В последние годы заметные успехи достигнуты в направлении улучшения энергетических показателей, повышения эффективности и надежности иттербий-эрбиевых излучателей [3—5, 8—10]. Тем не менее проблема обеспечения устойчивой работы Yb,Er-лазеров при изменении температуры окружающей среды T от -40 до $+50$ — 60 °C (большинство потребителей лазерной техники выделяют данный температурный интервал) изучена недостаточно [11—13].

Влияние температуры на генерационные свойства Yb,Er-лазеров, возбуждаемых по поперечной схеме лазерными диодными линейками (ЛДЛ), может проявляться в виде разъюстировки резонатора, а также изменения оптических параметров ЛДЛ [14, 15] и активной среды [11—13]. При анализе результатов климатических испытаний важно знать вклады в падение энергии выходного излучения процессов, связанных с изменениями параметров ЛДЛ, АЭ и ряда других оптических компонентов.

В настоящей работе изучены спектральные характеристики излучения ЛДЛ и иттербий-эрбиевого стекла в составе полностью твердотельного Yb,Er-лазера с пассивной модуляцией добротности. Основное внимание уделено анализу выходных оптических параметров при различных температурах окружающей среды с целью оценки степени влияния температурных вариаций главным образом в интервале $T = 233$ — 328 К на спектральные, энергетические и временные показатели эрбиевых лазеров с поперечной диодной накачкой.

Экспериментальные образцы, методы измерений. В качестве экспериментальных образцов использованы типичные компактные лазеры с АЭ на основе иттербий-эрбиевого стекла, разработанные и изготовленные в Институте физики НАН Беларуси [4, 7, 9, 16]. В состав лазера входят АЭ, пассивный затвор и два зеркала — полностью отражающее генерируемое излучение “глухое” зеркало и полупрозрачное выходное зеркало. АЭ размером $2 \times 6 \times 32$ мм изготовлен из фосфатного стекла марки ЛГС-ДЕ (Институт радиотехники и электроники им. В. А. Котельникова РАН, Фрязино Московской обл.). Концентрации ионов иттербия и эрбия $1.8 \cdot 10^{21}$ и $3.0 \cdot 10^{19}$ см $^{-3}$ соответственно. Возбуждение АЭ осуществлялось шестью ЛДЛ типа МДН-70-940 (НПП “Инжект”, Саратов) по схеме поперечной накачки (по три ЛДЛ с каждой боковой стороны АЭ). ЛДЛ соединялись последовательно и возбуждались импульсами тока длительностью $\tau_{pm} = 4$ мс при частоте следования $f = 1$ — 5 Гц. Так как время задержки начала генерации для ЛДЛ МДН-70-940 не превышает нескольких наносекунд, длительность импульса излучения накачки полагалась равной τ_{pm} . Ток накачки ЛДЛ ограничивался $I \leq 70$ А. Длина резонатора лазера $L_{cav} = 110$ мм. Модуляция добротности осуществлялась с помощью пассивного фильтра (кристалл $MgAl_2O_4:Co^{2+}$). Номинальная энергия импульсов генерируемого излучения при $T = 293$ К $E_{las} = 8$ — 10 мДж при длительности выходных импульсов ≤ 15 — 16 нс.

В интервале 1455 — 1660 нм, в который попадают линии генерации Yb,Er-лазера, исследованы спектры фотолюминесценции (ФЛ) фосфатного стекла ЛГС-ДЕ при температурах окружающей среды 20 — 338 К и спектры поглощения при $T = 80$ — 338 К. В интервале 890 — 1030 нм, относящемся к области генерации ЛДЛ блока накачки Yb,Er-лазера, регистрировались только спектры поглощения стекла ЛГС-ДЕ при 213 — 328 К. Энергетические/пороговые, спектральные и временные характеристики выходного излучения Yb,Er-лазеров изучены в более узком температурном интервале 233 — 328 К, в пределах которого, как правило, проводятся испытания большинства практически важных лазерных систем.

Измерения в диапазоне 800 — 1700 нм проведены с помощью однолучевого дифракционного монохроматора МДР-23У с фокусным расстоянием зеркального объектива ~ 0.6 м, оснащенного дифракционной решеткой 600 штр/мм. ФЛ возбуждалась излучением твердотельного лазера с диодной накачкой серии KLM-532/h-500 мощностью до 500 мВт на $\lambda = 532$ нм (“Оптроник”, Россия) или излучением в области 940 — 980 нм, генерируемым лазерной диодной сборкой с волоконным выходом.

При изучении температурной зависимости начального пропускания пассивного затвора в качестве источника излучения использован Yb,Er-лазер, генерирующий в режиме свободной генерации на $\lambda = 1.54$ мкм световые импульсы длительностью 2 мс и энергией < 20 мДж.

При измерении коэффициента поглощения $k(\lambda)$ материала АЭ в абсолютных единицах в интервале $\lambda = 890$ — 1030 нм использован сканирующий спектрофотометр Photon RT (Essent Optics, Беларусь). Толщина изученных образцов фосфатного стекла $d = 1.2$ мм.

Пороговые характеристики Yb,Er-лазера. В ходе исследований учтены особенности работы лазера с пассивной модуляцией добротности. В частности, если заданы параметры резонатора и фиксирована длительность импульса излучения накачки, то порог генерации, определяемый пороговым значением тока I_{th} , является для исследуемого излучателя одновременно и рабочим уровнем возбуж-

дения. В наших экспериментах порог I_{th} находится следующим образом: длительность $\tau_{pm} = 4$ мс, измеряется минимальный ток накачки блока ЛДЛ, при котором эрбиевый излучатель переходит в режим генерации лазерного излучения. Полученные значения I_{th} используются для определения пороговой импульсной мощности излучения накачки $P_{th} = \sum_{i=1}^{n_{LD}} P_i(I_{th})$, где n_{LD} — общее число ЛДЛ в блоке

накачки излучателя, $P_i(I_{th})$ — импульсная мощность излучения одиночной ЛДЛ при токе I_{th} . Значения $P_i(I_{th})$ находятся по ватт-амперным характеристикам ЛДЛ, измеренным в интервале 233—328 К. Одновременно с ватт-амперными характеристиками регистрируются спектры генерации ЛДЛ. Как установлено, при фиксированных T и I разброс значений P_i для образцов ЛДЛ не превышает нескольких процентов; ширина спектра генерации ЛДЛ ~ 3.5 нм; длина волны максимума полосы генерации ЛДЛ λ_{LD} изменяется с температурой со скоростью $d\lambda_{LD}/dT = 0.325$ нм/К.

При нахождении поглощенной внутри объема АЭ пороговой импульсной мощности излучения накачки P_{th}^* использованы спектры поглощения образца АЭ ($\lambda = 890$ — 1030 нм), измеренные при температурах 213—328 К ($-60 \div +55$ °С). В пределы интервала 890—1030 нм во всем рабочем диапазоне температур эрбиевого лазера попадают полосы генерации ЛДЛ, входящих в состав блока накачки. По экспоненциальному закону поглощения Бугера спектры коэффициента пропускания АЭ, измеренные при разных температурах, преобразовывались в спектры коэффициента поглощения $k(\lambda, T)$ с учетом отражения на гранях АЭ. На рис. 1 представлены кривые $k(\lambda, T)$, измеренные при двух крайних температурах 213 и 328 К, и обозначен рабочий интервал длин волн MN для ЛДЛ типа МДН-70-940. В рамках нашего подхода зависимость $k(\lambda, T)$ от мощности излучения накачки в диапазоне $\lambda = 890$ — 1030 нм не учитывалась, поскольку, согласно расчетам, изменение населенности основного состояния ионов Yb^{3+} относительно населенности исходного (невозбужденного) состояния не превышает 0.2 % при максимальных уровнях возбуждения исследуемой лазерной системы.

Поглощенная пороговая импульсная мощность излучения накачки при разных температурах окружающей среды P_{th}^* определена в приближении одного прохода излучения по толщине АЭ лазера с использованием в качестве исходных параметров $P_{th}(T)$ и $k(\lambda_{LD}^T, T)$: $P_{th}^*(T) = P_{th}(T) \exp[-k(\lambda_{LD}^T, T)d]$, где λ_{LD}^T — средняя длина волны максимума полосы генерации для ЛДЛ в блоке накачки Yb,Er-излучателя при температуре T . Полученные таким способом экспериментальные значения поглощенной пороговой импульсной мощности излучения накачки Yb,Er-лазера в зависимости от температуры окружающей среды показаны на рис. 2. Видно, что регистрируемая зависимость $P_{th}^*(T)$ достаточно хорошо аппроксимируется прямой, характеризуемой начальным значением 115 Вт и тангенсом угла наклона 0.20 Вт/К. Длительность импульсов генерации для образцов Yb,Er-лазеров во всем рабочем интервале температур 233—328 К не превышает 16 нс.

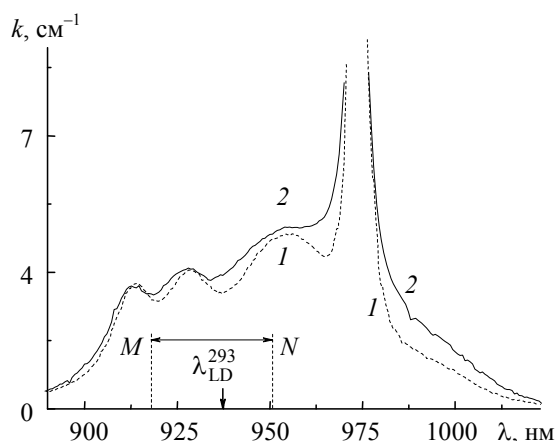


Рис. 1. Спектры поглощения Yb,Er-фосфатного стекла ЛГС-ДЕ в интервале 890—1030 нм при $T = 213$ (1) и 328 К (2); M и N — границы интервала, в который попадают полосы излучения лазерных диодных линеек МДН-70-940 в рабочем интервале температур 233—328 К; λ_{LD}^{293} — среднее значение длины волны максимума полосы генерации лазерных диодных линеек в блоке накачки эрбиевого лазера при комнатной (293 К) температуре окружающей среды

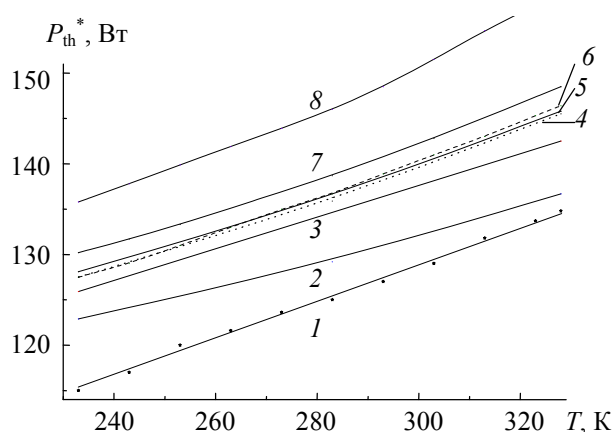


Рис. 2. Экспериментальная (1) и расчетные (2—8) температурные зависимости поглощенной пороговой импульсной мощности излучения накачки $P_{th}^*(T)$ для Yb,Er-лазера с пассивной модуляцией добротности; расчетные данные получены при $\Delta_{15/2}$ и $\Delta_{13/2}$: 210 и 450 (2); 210 и 420 (3); 210 и 407 (4); 220 и 410 (5); 220 и 407 (6); 240 и 407 (7); 240 и 370 см^{-1} (8)

Спектры генерации Yb,Er-лазера, спектры ФЛ и поглощения АЭ в диапазоне 1455—1660 нм.

В результате климатических испытаний образцов Yb,Er-лазеров, а также ряда аналогичных излучателей (см., например, [6, 7]), установлено, что в спектре генерируемого излучения наблюдается, как правило, одиночный пик шириной $\sim 0.3\text{--}0.5$ нм. При $T = 233$ К длина волны генерации Yb,Er-лазера λ_{las} , приходящаяся на максимум излучения, в зависимости от типа образца попадает в достаточно узкий интервал 1532.0—1533.5 нм. С увеличением температуры окружающей среды максимум λ_{las} смещается в длинноволновую сторону и в области $T \approx 328\text{--}333$ К значение λ_{las} не выходит за пределы 1533.9 нм. В отдельных случаях на зависимости $\lambda_{las}(T)$ наблюдаются скачки λ_{las} на 0.2—0.5 нм. При комнатной и более высоких температурах окружающей среды, особенно при $f \geq 5$ Гц, в спектрах генерации исследуемых эрбиевых лазеров могут проявляться дополнительные, как правило, меньшей интенсивности пики вблизи 1534.0—1534.3 нм.

Спектры ФЛ стекла ЛГС-ДЕ в области 1455—1660 нм при различных температурах окружающей среды представлены на рис. 3, а. Математический анализ спектров ФЛ, регистрируемых при низких температурах (20—78 К), позволяет выделить ряд частично перекрывающихся полос с максимумами $\lambda(E_{1e}) = 1531.1$ нм, $\lambda(E_{2e}) = 1541.5$ нм, $\lambda(E_{3e}) = 1550.8$ нм и $\lambda(F) = 1594.9$ нм. При $T > 150$ К на коротковолновом крыле спектра ФЛ проявляется полоса D с максимумом $\lambda(D)$, попадающим в интервал 1495.0—1509.0 нм. С увеличением $T > 150\text{--}200$ К максимумы полос E_{1e} , E_{2e} , E_{3e} смещаются в длинноволновую сторону на 2—4 нм, а максимум полосы F на 7—8 нм в коротковолновую область. На рис. 3, б представлена спектральная зависимость коэффициента поглощения АЭ в диапазоне 1455—1660 нм, измеренная при температуре 293 К. Видно, что положения максимумов полос $\lambda(E_{1e})$, $\lambda(E_{2e})$, $\lambda(E_{3e})$ и $\lambda(D)$ в спектрах ФЛ коррелируют с положениями соответствующих максимумов полос в спектре поглощения фосфатного эрбиевого стекла.

Теоретическая модель, обсуждение результатов. Анализ спектров ФЛ и поглощения АЭ, а также спектров генерации Yb,Er-лазера выполнен, исходя из того факта, что в каждом из состояний $^4I_{13/2}$ и $^4I_{15/2}$ ионов эрбия выделяются две группы близкорасположенных штатковских подуровней $i_1\text{--}i_2$ (восемь подуровней) и $i_3\text{--}i_4$ (семь подуровней) (см. рис. 3, вставка) [11—13, 17, 18]. Вариации энергий штатковских подуровней в стеклянной матрице приводят к формированию четырех зон i_1 , i_2 , i_3 и i_4 . Это подтверждается отсутствием в спектрах ФЛ образцов стекла ЛГС-ДЕ обособленных максимумов, характерных для кристаллических сред, даже при 20 К.

В области температур $< 100\text{--}150$ К в спектрах ФЛ регистрируются только полосы E_e и F, связанные с переходами между подуровнями зоны i_3 и подуровнями зон i_1 и i_2 . При $T > 150$ К происходит заселение подуровней зоны i_4 . Как следствие, возрастает вклад в интенсивность ФЛ переходов между подуровнями зоны i_4 (состояние $^4I_{13/2}$) и подуровнями зон i_1 , i_2 (состояние $^4I_{15/2}$), что приводит к появлению полосы D. Контур спектра ФЛ аппроксимируется пятью лоренцевыми контурами с $\lambda_{\text{max}} = 1499, 1533, 1542, 1552$ и 1603 нм. На рис. 3, а показан лоренцев контур A с максимумом при

$\lambda = 1499$ нм. Максимумы полос лоренцевых контуров хорошо согласуются со значениями $\lambda(D)$, $\lambda(E_{1e})$, $\lambda(E_{2e})$, $\lambda(E_{3e})$ и $\lambda(F)$.

Спектр поглощения фосфатного стекла ЛГС-ДЕ представляет собой широкую полосу, в которой выделяются два максимума G_1 и G_2 на $\lambda = 1496$ и 1533 нм (рис. 3, б). Спектр поглощения стекла ЛГС-ДЕ согласуется со схемой переходов с подуровней зоны i_1 основного состояния $^4I_{15/2}$ на подуровни зон i_3 , i_4 возбужденного состояния $^4I_{13/2}$.

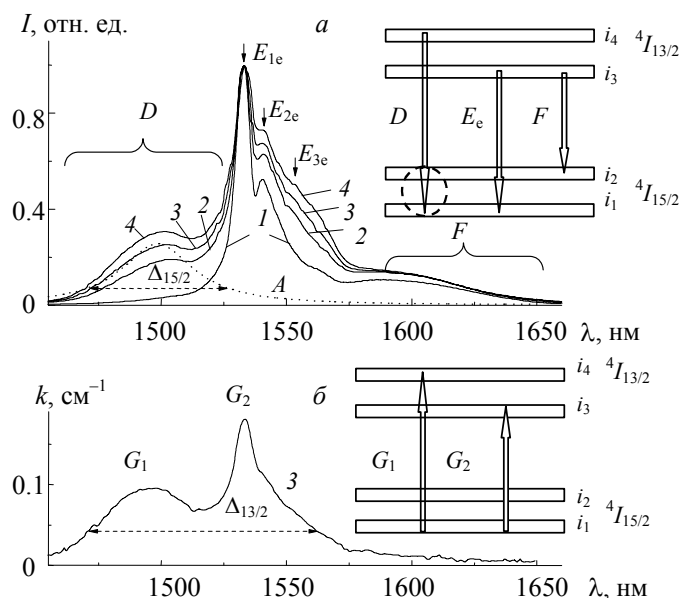


Рис. 3. Спектры фотолюминесценции (а) и поглощения (б) Yb,Er-фосфатного стекла ЛГС-ДЕ в интервале 1455—1660 нм при $T = 20$ (1), 213 (2), 293 (3) и 328 К (4); пунктир A — аппроксимация коротковолнового крыла спектра ФЛ лоренцевым контуром; штриховые линии $\Delta_{15/2}$ и $\Delta_{13/2}$ — спектральные ширины зазоров между группами штарковских подуровней i_1 – i_2 и i_3 – i_4 , при которых достигается наилучшее согласие результатов моделирования зависимости $P_{th}(T)/P_{th}(233)$ с экспериментом; на вставках — переходы, ответственные за формирование полос D , E_e и F в спектре ФЛ, а также переходы G_1 и G_2 , ответственные за формирование спектра поглощения стекла ЛГС-ДЕ

Сопоставление измеренных спектров ФЛ и поглощения фосфатного стекла ЛГС-ДЕ со спектральными характеристиками Yb,Er-лазеров, полученными в процессе климатических испытаний, позволяет заключить, что в интервале рабочих температур 233—328 К ($-40 \div +55$ °С) доминирующий канал генерации — оптический переход E_{1e} ($\lambda_{las} = 1532.0$ — 1533.9 нм) между подуровнями зон i_3 и i_1 . Отличие этого результата от выводов [12, 13, 19—21] о том, что в спектрах генерации эрбиевых лазеров, как правило, проявляются две и более линий, вероятнее всего объясняется относительно высокой степенью однородности стекла ЛГС-ДЕ.

Полученные экспериментальные данные использованы при численном моделировании температурных режимов работы компактных Yb,Er-излучателей. За основу модели взята система скоростных дифференциальных уравнений, предложенная для Yb,Er-лазера с диодной накачкой и пассивной модуляцией добротности [22]. Данная система уравнений модифицирована следующим образом. Во-первых, учтено расщепление состояний $^4I_{15/2}$ и $^4I_{13/2}$ ионов эрбия на две группы штарковских подуровней, разделенных энергетическими зазорами $\Delta_{15/2}$ и $\Delta_{13/2}$ [17, 18, 23]. Во-вторых, принято во внимание влияние температуры на населенности подуровней состояний $^4I_{13/2}$ и $^4I_{15/2}$ ионов эрбия. С этой целью введены коэффициенты $\delta_{15/2}(T) = (1 + \exp[-\Delta_{15/2}/k_B T])^{-1}$ и $\delta_{13/2}(T) = (1 + \exp[-\Delta_{13/2}/k_B T])^{-1}$, k_B — постоянная Больцмана, определяющие отношение населенностей нижних подуровней к суммарным населенностям состояний $^4I_{15/2}$ и $^4I_{13/2}$. Применимость такого подхода к теоретическому анализу тепловых процессов в эрбиевом лазере с ламповой накачкой высказывалась ранее [11]. Модифицированная система скоростных дифференциальных уравнений имеет вид:

$$\begin{aligned}
\frac{dN_{Yb}^2}{dt} &= W_p (N_{Yb} - N_{Yb}^2) - k_1 N_{Yb}^2 (N_{Er} - N_{Er}^2 - N_{Er}^3) - A_{Yb}^{21} N_{Yb}^2 - k_2 N_{Yb}^2 N_{Er}^2, \\
\frac{dN_{Er}^2}{dt} &= Q_{las} \frac{c_0}{S_{Er} L_0} \left[\delta_{15/2}(T) \sigma_{Er}^{abs} (N_{Er} - N_{Er}^2 - N_{Er}^3) - \delta_{13/2}(T) \sigma_{Er}^{em} N_{Er}^2 \right] - A_{Er}^{21} N_{Er}^2 + A_{Er}^{32} N_{Er}^3 - 2C N_{Er}^2 N_{Er}^2 - k_2 N_{Yb}^2 N_{Er}^2, \\
\frac{dN_{Er}^3}{dt} &= k_1 N_{Yb}^2 (N_{Er} - N_{Er}^2 - N_{Er}^3) - A_{Er}^{32} N_{Er}^3 + k_2 N_{Yb}^2 N_{Er}^2 + C N_{Er}^2 N_{Er}^2, \\
\frac{dN_{Er-u}^2}{dt} &= Q_{las} \frac{c_0}{S_{Er-u} L_0} \left[\delta_{15/2}(T) \sigma_{Er}^{abs} (N_{Er} - N_{Er-u}^2) - \delta_{13/2}(T) \sigma_{Er}^{em} N_{Er-u}^2 \right] - A_{Er}^{21} N_{Er-u}^2, \\
\frac{dN_{Co}^2}{dt} &= \frac{\sigma_{Co}^{gsa} c_0}{S_{Co} L_0} Q_{las} (N_{Co} - N_{Co}^2) - A_{Co}^{21} N_{Co}^2, \\
\frac{dQ_{las}}{dt} &= Q_{las} \left[\frac{L_{Er} c_0}{L_0} \left[\delta_{13/2}(T) \sigma_{Er}^{em} N_{Er}^2 - \delta_{15/2}(T) \sigma_{Er}^{abs} (N_{Er} - N_{Er}^2 - N_{Er}^3) \right] + \right. \\
&\quad \left. + \frac{L_{Er-u} c_0}{L_0} \left[\delta_{13/2}(T) \sigma_{Er}^{em} N_{Er-u}^2 - \delta_{15/2}(T) \sigma_{Er}^{abs} (N_{Er} - N_{Er-u}^2) \right] - \right. \\
&\quad \left. - \frac{L_{Co} c_0}{L_0} \left[\sigma_{Co}^{gsa} (N_{Co} - N_{Co}^2) - \sigma_{Co}^{esa} N_{Co}^2 \right] - \frac{1}{\tau} \right] + \delta_{las} V_{Er} A_{Er}^{21} N_{Er}^2 + \delta_{las} V_{Er-u} A_{Er}^{21} N_{Er-u}^2.
\end{aligned}$$

Здесь N_{Yb}^2 , N_{Er}^2 и N_{Er}^3 — плотности населенности для уровней $^2F_{5/2}$ (Yb^{+3}), $^4I_{13/2}$ (Er^{+3}) и $^4I_{11/2}$ (Er^{+3}) в накачиваемой области АЭ соответственно; N_{Er-u}^2 — плотность населенности для уровня $^4I_{13/2}$ (Er^{+3}) в ненакачиваемой области АЭ; Q_{las} — число фотонов, генерируемых в объеме лазерной моды; N_{Yb} , N_{Er} и N_{Co} — концентрации ионов Yb^{3+} , Er^{3+} и Co^{2+} соответственно (типичные значения $1.8 \cdot 10^{27}$, $3.0 \cdot 10^{25}$ и $1.73 \cdot 10^{24}$ м $^{-3}$); N_{Co}^2 — плотность населенности для уровня S_2 (кристалл $MgAl_2O_4:Co^{2+}$); k_1 , k_2 — коэффициенты процесса кумулятивного апконверсионного переноса энергии (переходы 3 и 4 на рис. 3) ($5 \cdot 10^{-22}$ м 3 /с); A_{Yb}^{21} , A_{Er}^{21} и A_{Er}^{32} — коэффициенты Эйнштейна для спонтанных оптических переходов $^4F_{5/2} \rightarrow ^4F_{7/2}$ (Yb^{3+}), $^4I_{13/2} \rightarrow ^4I_{15/2}$ (Er^{3+}) и $^4I_{11/2} \rightarrow ^4I_{13/2}$ (Er^{3+}) соответственно (10^3 , 125 и 10^5 с $^{-1}$); A_{Co}^{21} — коэффициент Эйнштейна для спонтанных оптических переходов $S_2 \rightarrow S_1$ (Co^{2+}) ($2.85 \cdot 10^6$ с $^{-1}$); S_{Er} — площадь поперечного сечения моды генерации внутри накачиваемой области АЭ ($5.89 \cdot 10^{-7}$ м 2); S_p — площадь поперечного сечения накачиваемой области АЭ ($8.52 \cdot 10^{-7}$ м 2); S_{Er-u} — площадь поперечного сечения моды генерации внутри ненакачиваемой области АЭ ($5.89 \cdot 10^{-7}$ м 2); S_{Co} — площадь поперечного сечения моды генерации внутри объема пассивного затвора ($3.85 \cdot 10^{-7}$ м 2); σ_{Er}^{abs} и σ_{Er}^{em} — сечения поглощения и испускания на длине волны генерации (Er^{3+}) ($7.5 \cdot 10^{-25}$ м 2); σ_{Co}^{gsa} и σ_{Co}^{esa} — сечения поглощения из основного состояния S_1 и из возбужденного состояния S_2 иона Co^{2+} ($3.5 \cdot 10^{-23}$ и $1.0 \cdot 10^{-24}$ м 2); c_0 — групповая скорость света ($3.0 \cdot 10^8$ м/с); τ — время жизни фотонов в лазерном резонаторе; δ_{las} — вклад спонтанного излучения в моду генерации (10^{-6}).

Оптические переходы в рамках данного приближения показаны на рис. 4. При выполнении расчетов в качестве фиксированных величин взяты рабочие параметры экспериментальных образцов ($E_{las} = 10$ мДж, $f = 1$ Гц, $\tau_{pm} = 4$ мс): длина лазерного резонатора $L_{cav} = 110$ мм; длина активного элемента $L_{AЭ} = 32$ мм, в том числе $L_{Er} = 30.4$ мм — длина накачиваемой области АЭ, $L_{Er-u} = 1.6$ мм — длина ненакачиваемой области АЭ; толщина пассивного затвора $L_{Co} = 2.6$ мм и коэффициент отражения выходного зеркала $R = 70$ %. При $L_{Co} = 2.6$ мм начальное пропускание кристалла $MgAl_2O_4:Co^{2+}$ с двумя просветленными гранями на длине волны λ_{las} составляет 86 %. (Как установлено экспериментально, в интервале 233—328 К температурные вариации начального пропускания пассивного затвора не выходят за пределы 1.0 %. Поэтому в модельных исследованиях величина начального пропускания полагалась не зависящей от температуры.) По значениям L_{cav} , L_{Co} и R найдены: оптическая длина резонатора $L_0 = L_{cav} + L_{AЭ}(n_{AЭ} - 1) + L_{Co}(n_{Co} - 1)$, где показатели преломления АЭ и пассивного затвора на длине волны генерации $n_{AЭ} = 1.53$ и $n_{Co} = 1.69$; отношение $1/\tau = (c_0/L_0) \ln[1/(1 - \rho)] + (c_0/2L_0) \ln(1/R)$, где $\rho = 0.05$ — оптические потери для генерируемого излучения за один проход резонатора.

Входящая в модельную систему уравнений вероятность поглощения излучения накачки W_p в пределах накачиваемого объема АЭ связана с поглощенной импульсной мощностью накачки P^* соотношением: $W_p = P^*/[N_{Yb}V_p(hc_0/\lambda_{LD})]$, где $V_p = S_pL_{Er}$ — объем накачиваемой области АЭ. Расчетное значение $P^*(T)$ определялось величиной P^* , при которой генерация начинается через 4 мс после подачи импульса накачки. В расчетах длительность импульса излучения накачки, как и в случае экспериментальных исследований, задана 4 мс.

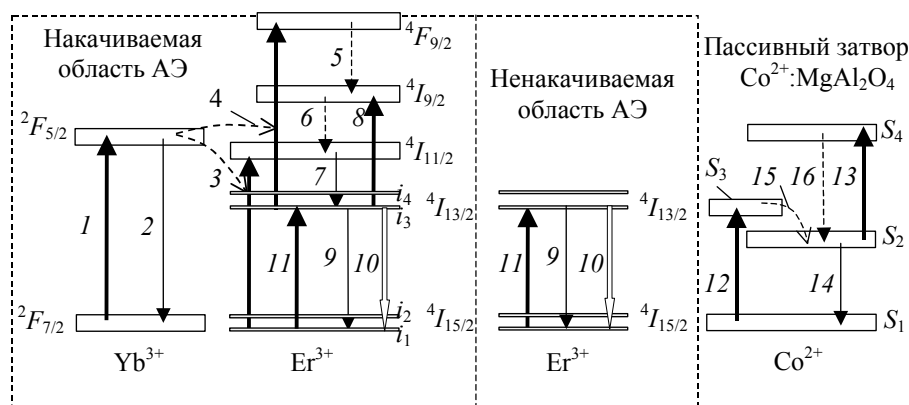


Рис. 4. Схема оптических переходов в активной среде и пассивном затворе модельного образца лазера на основе Yb,Er-фосфатного стекла

В процессе моделирования коэффициенты $\Delta_{15/2}$ и $\Delta_{13/2}$ подбирались таким образом, чтобы расчетные значения поглощенной пороговой импульсной мощности излучения накачки в интервале 233—328 К укладывались на прямую с тангенсом угла наклона, близким к 0.20 Вт/К. Последняя величина определяет наклон прямой, аппроксимирующей экспериментальную зависимость $P^*(T)$ (рис. 2, прямая 1). Удовлетворяющие указанному критерию расчетные кривые $P^*(T)$ характеризуются параметрами $\Delta_{15/2}$ и $\Delta_{13/2}$, варьируемыми в пределах 210—240 и 407—410 см^{-1} . Примерами таких зависимостей могут служить кривые 4—6 на рис. 2. Тангенсы угла наклона прямых 4—6, аппроксимирующих данные кривые в интервале 233—328 К, составляют 0.19, 0.19 и 0.20 Вт/К соответственно. Различия между расчетными и экспериментальными абсолютными величинами поглощенной пороговой импульсной мощности излучения накачки, вероятно, являются следствием применения в теоретической модели при нахождении W_p приближения равномерного распределения излучения накачки внутри объема АЭ [10].

Представленные значения $\Delta_{15/2}$ и $\Delta_{13/2}$ обеспечивают не только достаточно высокую степень согласования результатов моделирования и эксперимента, но и коррелируют с параметрами спектров ФЛ и поглощения АЭ (рис. 3), а также со спектроскопическими данными для состояний $^4I_{15/2}$ и $^4I_{13/2}$ ионов эрбия в ряде кристаллических сред [17, 18, 23]. В шкале энергий значения $\Delta_{15/2} \approx 26.0\text{—}29.7$ мэВ, $\Delta_{13/2} \approx 50.4\text{—}50.8$ мэВ по порядку величины согласуются с энергиями квантов тепловой энергии при температурах 233 и 328 К (~20 и 28 мэВ). Следует отметить, что применительно к Yb,Er-излучателям с АЭ на фосфатном стекле типа ЛГС-ДЕ предложенная модельная система уравнений наряду с порогом генерации позволяет моделировать мощностные и временные показатели излучателей.

Заключение. Изучены спектральные и пороговые характеристики компактных Yb,Er-лазеров на фосфатном стекле ЛГС-ДЕ с пассивной модуляцией добротности при температурах 233—328 К. Установлено, что доминирующий канал генерации соответствует переходам между нижними штатковскими подуровнями состояний $^4I_{13/2}$ и $^4I_{15/2}$ (1532.0—1533.9 нм) ионов эрбия. В рассматриваемом интервале температур поглощенная пороговая импульсная мощность излучения накачки линейно возрастает на 17 %.

Для описания регистрируемых экспериментальных данных предложена система скоростных уравнений, учитывающая тепловое заселение штатковских подуровней состояний $^4I_{13/2}$ и $^4I_{15/2}$. Путем численного моделирования определены энергетические зазоры $\Delta_{15/2} = 240 \text{ см}^{-1}$ и $\Delta_{13/2} = 370 \text{ см}^{-1}$ между группами штатковских подуровней состояний ионов эрбия $^4I_{15/2}$ и $^4I_{13/2}$, при которых достигается максимальное согласование углов наклона расчетных и экспериментальных зависимостей $P_{th}^*(T)$. По-

лученные значения $\Delta_{15/2}$ и $\Delta_{13/2}$ коррелируют с параметрами спектров фотолюминесценции и поглощения активного элемента.

Авторы выражают благодарность Г. П. Яблонскому и А. В. Мудрому за помощь в проведении спектральных исследований и обсуждение полученных результатов, а также Г. И. Рябцеву за помощь в выполнении расчетов с использованием программного пакета Mathematica 10.4.1.0.

- [1] П. С. Авдеев, Ю. Д. Березин, Ю. П. Гудаковский, В. Р. Муратов, А. Г. Мурзин, В. А. Фромзель. Квант. электрон., **5** (1978) 220—223
- [2] A. Levoshkin, A. Petrov, J. E. Montagne. Opt. Commun., **185** (2000) 399—405
- [3] А. Ю. Абазадзе, В. Н. Быков, Г. М. Зверев, А. А. Плешков, В. А. Симаков. Квант. электрон., **32** (2002) 210—212
- [4] М. В. Богданович, А. В. Григорьев, К. И. Ланцов, К. В. Лепченков, А. Г. Рябцев, Г. И. Рябцев, В. С. Титовец, М. А. Щемелев. Фотоника, **55** (2016) 58—63
- [5] G. Karlsson, F. Laurell, J. Tellefsen, B. Denker, B. Galagan, V. Osiko, S. Sverchkov. Appl. Phys. B, **75** (2002) 41—46
- [6] М. В. Богданович, А. В. Григорьев, А. И. Енжиевский, К. И. Ланцов, К. В. Лепченков, В. Н. Павловский, А. Г. Рябцев, Г. И. Рябцев, И. Е. Свитенков, В. С. Титовец, М. А. Щемелев, Г. П. Яблонский. Материалы 10-го Белорусско-Российского семинара "Полупроводниковые лазеры и системы на их основе", 26—29 мая 2015 г., Минск (2015) 73—75
- [7] M. V. Bogdanovich, A. V. Grigor'ev, V. A. Dlugunovich, A. V. Isaevich, A. V. Holenkov, K. V. Lepchenkov, K. I. Lantsov, A. G. Ryabtsev, G. I. Ryabtsev, M. A. Shchemelev, U. S. Tsitovets. Журн. прикл. спектр., **83**, № 6-16 (спец. вып.) (2016) 467—468
- [8] А. А. Изынеев, П. И. Садовский, С. П. Садовский. Квант. электрон., **40** (2010) 389—392
- [9] G. I. Ryabtsev, T. V. Bezyazychnaya, M. V. Bogdanovich, A. V. Grigor'ev, V. V. Kabanov, Y. V. Lebiadok, A. G. Ryabtsev, M. A. Shchemelev. Appl. Phys. B, **108** (2012) 283—288
- [10] Г. И. Рябцев, М. В. Богданович, А. В. Григорьев, В. В. Кабанов, Е. В. Лебедок, К. В. Лепченков, А. Г. Рябцев, М. А. Щемелев. Опт. журн., **82** (2015) 3—10
- [11] Н. Е. Алексеев, В. П. Гапонцев, М. Е. Жаботинский, В. Б. Кравченко, Ю. П. Рудницкий. Лазерные фосфатные стекла, Москва, Наука (1980)
- [12] И. Г. Кучма, А. А. Петров, В. А. Фромзель. Опт. и спектр., **71** (1991) 180—187
- [13] N. V. Nikonov, A. K. Przhevuskii, S. G. Lunter. Proc. SPIE, **3622** (1999) 144—152
- [14] В. В. Безотосный, Х. Х. Кумыков, Н. В. Маркова. Квант. электрон., **24** (1997) 495—498
- [15] Г. Т. Микаелян. Квант. электрон., **24** (2006) 222—227
- [16] www.dple.by
- [17] А. А. Каминский. Лазерные кристаллы, Москва, Наука (1975)
- [18] S. D. Setzler, M. P. Francis, Y. E. Young, J. R. Konves, E. P. Chicklis. IEEE J. Select. Top. Quantum Electron., **11** (2005) 645—657
- [19] R. E. Bruce, K. O. White, J. B. Mason, R. G. Buser. IEEE J. Quantum Electron., **QE-5** (1969) 479
- [20] G. R. Osche. IEEE J. Quantum Electron., **QE-7** (1971) 252—253
- [21] Е. И. Галант, В. Н. Калинин, С. Г. Лунтер, А. А. Мак, А. К. Пржеvusкий, Д. С. Прилежаев, М. Н. Толстой, В. А. Фромзель. Квант. электрон., **3** (1976) 2187—2196
- [22] М. В. Богданович. Пространственные, поляризационные и энергетические характеристики твердотельных лазеров с диодной накачкой для спектрального диапазона 1.53—1.58 мкм, дисс. ... канд. физ.-мат. наук, Ин-т физики НАН Беларуси, Минск (2014)
- [23] А. А. Kaminskii. Crystalline Lasers: Physical Processes and Operating Schemes, New York, CRC (1996)