

НЕПРЕРЫВНЫЙ YVO₄:Er-ЛАЗЕР С РЕЗОНАНСНОЙ НАКАЧКОЙ

К. Н. Горбаченя^{1*}, В. Э. Кисель¹, А. С. Ясюкевич¹,
В. Н. Матросов², Н. А. Толстик³, Н. В. Кулешов¹

УДК 621.3.038.825.2

¹ НИЦ оптических материалов и технологий,
Белорусский национальный технический университет,
220013, Минск, просп. Независимости, 65, Беларусь; e-mail: gorby@bntu.by

² НПК ООО "СОЛИКС", Минск, Беларусь

³ Норвежский университет науки и технологий, Трондхейм, Норвегия

(Поступила 5 декабря 2014)

Проведено исследование генерационных характеристик YVO₄:Er-лазера при резонансной накачке в области 1.5—1.6 мкм. Получена лазерная генерация на $\lambda = 1603$ нм с дифференциальной эффективностью до 61 %. Показана перспективность создания эффективных лазеров с резонансной накачкой на основе кристалла YVO₄:Er.

Ключевые слова: сечение поглощения, сечение стимулированного испускания, лазер с резонансной накачкой, кристаллы ванадатов, ион эрбия.

Lasing characteristics of YVO₄:Er-laser with resonant pumping at the 1.5—1.6 μ m were studied. Lasing at $\lambda = 1603$ nm with a slope efficiency of up to 61 % was obtained. It was shown that YVO₄:Er crystals are perspective for the development of highly efficient in-band pumped lasers.

Keywords: absorption cross-section, stimulated emission cross-sections, in-band pumped laser, vanadate crystals, erbium ion.

Введение. Лазеры, излучающие в спектральной области ~1.6 мкм, являются условно безопасными для зрения. Они находят широкое применение в медицине, системах средств связи и мониторинга окружающей среды. В частности, источники излучения с $\lambda = 1603$ нм используются в системах детектирования следов CO₂ в атмосфере [1]. Среди существующих лазерных источников, излучающих в области ~1.6 мкм, наибольшее практическое распространение получили твердотельные лазеры на трехвалентных ионах эрбия, отличающиеся относительной простотой, компактностью и возможностью работы в различных режимах генерации.

В последние годы для Er-содержащих лазерных кристаллов, излучающих в области ~1.6 мкм (переход $^4I_{13/2} \rightarrow ^4I_{15/2}$), все активнее используется накачка вблизи ~1.5 мкм, т. е. прямое возбуждение ионов Er³⁺ непосредственно на верхний лазерный уровень $^4I_{13/2}$. В этом случае по сравнению с использованием схем с соактивацией активных сред ионами Er³⁺ и Yb³⁺ тепловыделение из-за малой разности энергий квантов накачки и генерации сводится к минимуму, исключаются потери на перенос энергии и ап-конверсию с промежуточного уровня $^4I_{11/2}$, вследствие чего эффективность генерации значительно возрастает.

В работе [2] сообщается о получении лазерной генерации на основе кристаллов YVO₄:Er при резонансной накачке волоконным лазером на $\lambda = 1534$ нм. При охлаждении активного элемента до температуры жидкого азота в квазинепрерывном режиме генерации получено лазерное излучение с максимальной пиковой мощностью до 13 Вт на $\lambda = 1593$ нм и дифференциальной эффективностью по отношению к поглощенной мощности накачки 85 %. Показана реализация непрерывного режима генерации на кристалле YVO₄:Er при комнатной температуре с резонансной накачкой на $\lambda = 1536$ нм [3]. В данном случае на $\lambda = 1603$ нм максимальная выходная мощность 2.3 Вт, однако дифференциальная эффективность по отно-

CONTINUOUS-WAVE IN-BAND PUMPED YVO₄:Er LASER

K. N. Gorbachenya^{1*}, V. E. Kisel¹, A. S. Yasukevich¹, V. N. Matrosov², N. A. Tolstik³, and N. V. Kuleshov¹
(¹ Center for Optical Materials and Technologies, Belarusian National Technical University, 65 Nezavisimosty Prospekt, Minsk, 220013, Belarus; e-mail: gorby@bntu.by; ² SOLIX Ltd., Belarus, Minsk; ³ Norwegian University of Science and Technology, Høgskoleringen, Norway)

шению к поглощенной мощности накачки не превышает 48 %. Таким образом, дифференциальных эффективностей, близких к предельному теоретическому значению, определяемому разницей энергий квантов накачки и генерации (квантовый дефект) в непрерывном режиме генерации на кристалле YVO₄:Er при комнатной температуре, до сих пор не получено, поэтому исследование возможностей повышения дифференциальных эффективностей остается актуальной задачей.

В настоящей работе представлены результаты исследований генерационных характеристик лазера на основе кристалла YVO₄, активированного ионами Er³⁺, с резонансной накачкой излучением твердотельного YAl₃(BO₃)₄:Er,Yb-лазера.

Выращивание кристаллов YVO₄:Er³⁺. Кристаллы иттриевого ванадата, легированные ионами эрбия, выращены методом Чохральского в НПК ООО “Соликс” (г. Минск) в иридиевом тигле в условиях аргоновой атмосферы, содержащей небольшое количество кислорода. Скорость вытягивания кристаллов 2—3 мм/ч, скорость вращения 10—15 об./мин. Получены монокристаллы YVO₄:Er³⁺ высокого оптического качества размерами до 30×35×15 мм с содержанием ионов эрбия 1 ат. %.

Кристалл YVO₄ принадлежит к пространственной группе D_{4h}^{19} ($I4_1/amd$), параметры его кристаллической решетки: $a = b = 7.1183 \text{ \AA}$, $c = 6.2893 \text{ \AA}$, $Z = 4$ [4]. Ионы эрбия замещают в кристаллической структуре кристалла ионы иттрия, находящиеся в позиции с локальной симметрией D_{2d} и окруженные восемью атомами кислорода. Кристалл является оптически одноосным, что обуславливает анизотропию его оптических свойств. Теплопроводность кристалла 5.23 Вт/м·К в направлении вдоль оптической оси и 5.1 Вт/м·К в перпендикулярном направлении, плотность 4.23 г/см³, твердость пять единиц по шкале Мооса, показатели преломления на $\lambda = 632.8 \text{ нм}$ $n_o = 1.9915$ и $n_e = 2.2148$ [5].

Спектроскопические свойства кристаллов YVO₄:Er. Исследования проведены для определения сечений поглощения и стимулированного испускания на длинах волн накачки (1522 нм) и генерации (1603 нм). Для исследований спектров поглощения в поляризованном свете из кристаллов YVO₄:Er изготовлены полированные плоскопараллельные пластины толщиной 2 мм, вырезанные таким образом, чтобы оптическая ось кристалла была параллельна полированным плоскостям. Спектры поглощения регистрировались на двухлучевом спектрофотометре Cary 5000 в области 1450—1650 нм, соответствующей $^4I_{15/2} \rightarrow ^4I_{13/2}$ -переходу ионов эрбия. Для записи поляризованных спектров в оба канала спектрофотометра помещались поляризационные призмы Глана—Тейлора. Спектральная ширина щели прибора варьировалась в пределах 0.1—2.0 нм. При определении коэффициентов поглощения учтено френелевское отражение от полированных поверхностей образцов [5]. По спектрам коэффициентов поглощения и концентрации ионов эрбия определены спектры сечений поглощения (рис. 1). В кристалле наблюдается сильная анизотропия поглощения, причем более интенсивная полоса π -поляризации ($E||c$). Максимальное сечение поглощения $\sim 8 \cdot 10^{-20} \text{ см}^2$ на $\lambda = 1501 \text{ нм}$.

В материалах, для которых имеет место значительное перекрытие полос поглощения и люминесценции, наблюдается эффект, называемый перепоглощением. Этот эффект заключается в том, что фотоны, излученные возбужденными ионами, поглощаются соседними активными ионами, находящимися в основном состоянии. Перепоглощение приводит к увеличению измеряемого времени жизни люминесценции по отношению к времени жизни возбужденного состояния изолированного иона. Для минимизации эф-

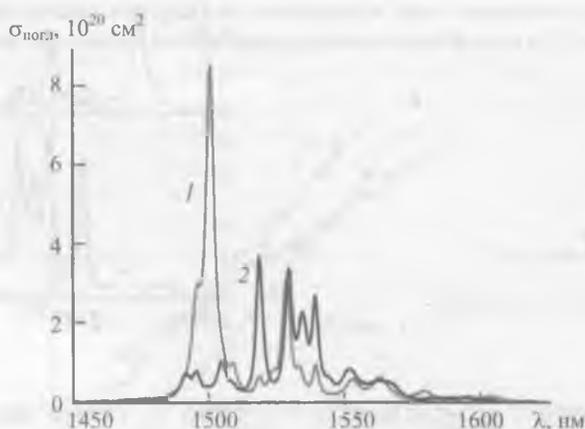


Рис. 1. Спектры сечений поглощения кристалла YVO₄:Er³⁺:
1 — π -поляризация, 2 — σ -поляризация

факта перепоглощения в процессе кинетических люминесцентных измерений изготовлена суспензия из мелкодисперсного порошка активного кристалла и жидкости с близким показателем преломления. Малый размер частиц кристалла и их равномерное распределение в большом объеме суспензии позволяют снизить влияние перепоглощения, а близость показателей преломления кристалла и жидкости уменьшает эффект полного внутреннего отражения, особенно существенный для кристаллов с высоким показателем преломления. Оба эффекта практически полностью устраняются для суспензий с малыми эффективными концентрациями частиц активного кристалла, измеряемое время затухания люминесценции в этом случае равно времени жизни возбужденного состояния изолированного иона [6].

Возбуждение люминесценции осуществлялось на $\lambda \approx 1.5$ мкм излучением параметрического преобразователя частоты, построенного на основе кристалла $\beta\text{-Ba}_2\text{B}_2\text{O}_4$ и накачиваемого третьей гармоникой YAG:Nd-лазера. Кинетика затухания люминесценции регистрировалась с помощью быстродействующего германиевого фотодиода и запоминающего цифрового осциллографа TDS 3052B с шириной полосы пропускания 500 МГц. Выделение изучаемой области из спектра люминесценции осуществлялось с использованием монохроматора МДР-12. Кинетика люминесценции с хорошей точностью описывалась экспоненциальным законом затухания.

На рис. 2 приведена зависимость измеряемого времени затухания люминесценции в области 1.5 мкм от концентрации мелкодисперсных частиц кристалла $\text{YVO}_4:\text{Er}$, взвешенных в глицерине. Видно, что при разбавлении суспензии глицерином измеряемое время жизни уменьшается. Начиная с содержания порошка в глицерине ~ 10 мас.%, дальнейшее разбавление не приводит к существенному изменению времени жизни, что свидетельствует о пренебрежимо малом влиянии перепоглощения. Измеренное время жизни уровня ${}^4I_{13/2}$ ионов эрбия 2.32 ± 0.05 мс.

С использованием известной шариковой структуры уровней ${}^4I_{13/2}$ и ${}^4I_{15/2}$ [4] по методу соответствия [7] рассчитаны спектры сечений стимулированного испускания кристалла $\text{YVO}_4:\text{Er}$ (рис. 3):

$$\sigma_{\text{СИ}}^{\alpha}(\nu) = \sigma_{\text{ПОГЛ}}^{\alpha}(\nu) \frac{Z_1}{Z_2} \exp\left(-\frac{h\nu - E_0}{kT}\right), \quad (1)$$

где α — состояние поляризации; h — постоянная Планка; k — постоянная Больцмана; Z_1 и Z_2 — статистические весовые функции нижнего и верхнего мультиплетов; $\sigma_{\text{ПОГЛ}}^{\alpha}$ — сечение поглощения ионов Er^{3+} в кристалле $\text{YVO}_4:\text{Er}$; E_0 — энергетическое расстояние между нижними подуровнями мультиплетов основного и возбужденного электронных состояний; T — температура кристалла. В спектре сечений стимулированного испускания ионов Er^{3+} в кристалле YVO_4 в области 1.5 мкм наиболее интенсивный максимум с сечением вынужденного излучения $8.5 \cdot 10^{20} \text{ см}^2$ проявляется для π -поляризации на $\lambda = 1501$ нм. Из рис. 3 также видно, что полоса вынужденного излучения перекрывает область ~ 1.6 мкм, которая может быть использована для получения лазерной генерации. Сечение вынужденного излучения на $\lambda = 1603$ нм достигает $0.7 \cdot 10^{20} \text{ см}^2$.

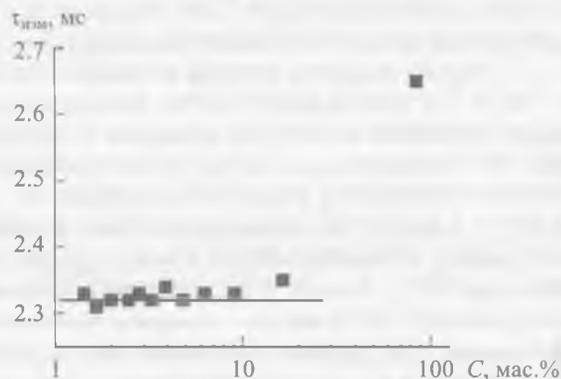


Рис. 2. Зависимость измеряемого времени жизни люминесценции кристалла $\text{YVO}_4:\text{Er}(0.7\%)$ в области 1.5 мкм от концентрации C активных ионов в суспензии с глицерином

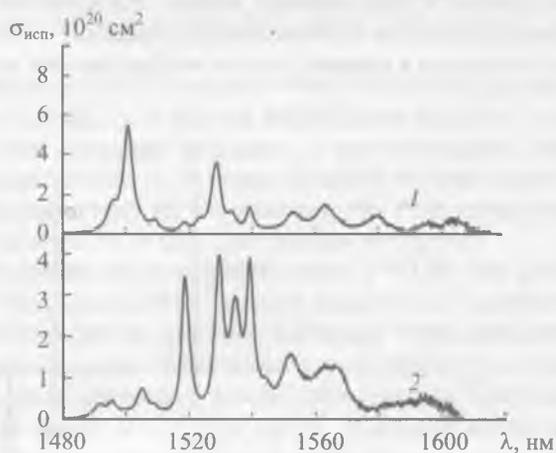


Рис. 3. Спектр сечений стимулированного испускания ионов Er^{3+} в кристалле YVO_4 в области 1.5—1.6 мкм: 1 — π -поляризация, 2 — σ -поляризация

Генерационные характеристики кристаллов YVO₄:Er³⁺. Лазерные эксперименты в непрерывном режиме генерации проведены в трехзеркальном резонаторе, схема которого представлена на рис. 4. Резонатор лазера сформирован сферическим зеркалом 3 с радиусом кривизны 50 мм и высоким коэффициентом отражения $R > 99.6\%$ на длине волны генерации и коэффициентом пропускания $T > 80\%$ на длине волны накачки, глухого зеркала 6 с радиусом кривизны 50 мм и высоким коэффициентом отражения на длинах волн накачки и генерации и плоским выходным зеркалом 7. В качестве активного элемента 4 использован кристалл YVO₄:Er(1 ат.%) толщиной 3 мм, вырезанный вдоль оси a и закрепленный на медном теплоотводе 5 без активного охлаждения. На обе рабочие поверхности активного элемента 4 нанесены антиотражающие покрытия в спектральном диапазоне накачки и лазерной генерации. Возбуждение осуществлялось диодно-накачиваемым лазером на кристалле YAl₃(BO₃)₄:Er,Yb, излучающим на $\lambda = 1522$ нм, с максимальной выходной мощностью 500 мВт, имеющим параметр качества пучка генерации $M^2 \approx 1.5$, соответствующий TEM₀₀-моду резонатора. Излучение накачки фокусировалось внутрь активного элемента 4 с помощью линзы 2 с диаметром перетяжки ~ 50 мкм.

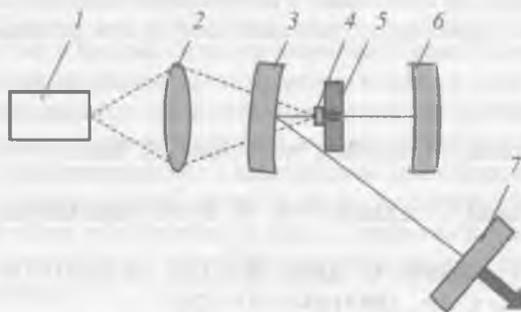


Рис. 4. Непрерывный YVO₄:Er-лазер с резонансной накачкой: 1 — лазер на кристалле YAl₃(BO₃)₄:Er,Yb с диодной накачкой; 2 — фокусирующая линза; 3, 6 — сферические зеркала с радиусом кривизны 50 мм; 4 — активный элемент YVO₄:Er(1 ат.%) ; 5 — медный теплоотвод; 7 — плоское выходное зеркало

Зависимость выходной мощности лазерной генерации от поглощенной мощности накачки для выходных зеркал с коэффициентами пропускания 1, 2 и 5 % на длине волны генерации приведена на рис. 5. Наибольшая выходная мощность 55 мВт получена при использовании выходного зеркала с коэффициентом пропускания 2 % на $\lambda = 1603$ нм. Дифференциальная эффективность генерации по отношению к поглощенной мощности накачки 56 %, порог генерации ~ 15 мВт. Поглощенная мощность накачки оценивалась как разность падающей и прошедшей мощностей накачки, измеренных в режиме генерации. При увеличении коэффициента пропускания выходного зеркала до 5 % максимальная выходная мощность лазера уменьшилась до 49 мВт, а дифференциальная эффективность по отношению к поглощенной мощности накачки возросла до 61 %. Вследствие увеличения активных потерь в резонаторе порог генерации повысился до 39 мВт. Увеличение дифференциальной эффективности лазера соответствует росту эффективности выхода излучения из резонатора, которая рассчитывалась как отношение активных потерь к полным потерям в резонаторе. Оценка пассивных потерь проведена в соответствии с [8] и составила 1.6 %.

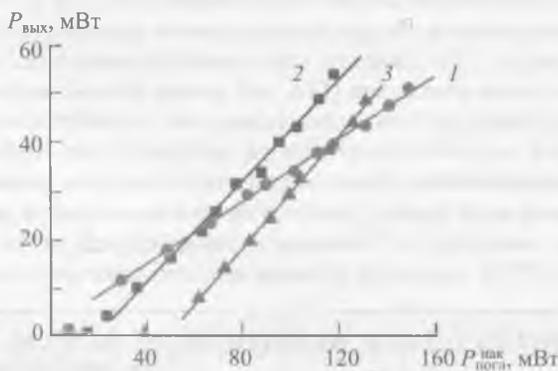


Рис. 5. Выходные характеристики непрерывного YVO₄:Er-лазера с резонансной накачкой: 1 — $T_{oc} = 1\%$, $\eta_s = 33\%$; 2 — $T_{oc} = 2\%$, $\eta_s = 56\%$; 3 — $T_{oc} = 5\%$, $\eta_s = 61\%$

Т а б л и ц а 1. Генерационные характеристики кристалла $\text{YVO}_4:\text{Er}$ с резонансной накачкой в области 1.5—1.6 мкм

$T_{\text{вых}}, \%$	$\lambda_{\text{ген}}, \text{нм}$	$P_{\text{пор}}, \text{мВт}$	$\eta_{\text{диф}}, \%$	$P_{\text{вых}}, \text{мВт}$
1	1603	8	33	51
2		15	56	55
5		39	61	49

Основные генерационные характеристики кристалла $\text{YVO}_4:\text{Er}$ при резонансной накачке приведены в табл. 1. Выходное излучение линейно поляризовано ($E||c$, π -поляризация).

Заключение. Исследованы генерационные характеристики кристаллов $\text{YVO}_4:\text{Er}$ при резонансной накачке в области 1.5—1.6 мкм. При использовании выходного зеркала с коэффициентом пропускания 5 % получен стабильный режим непрерывной генерации. Максимальная выходная мощность лазера 49 мВт, дифференциальная эффективность по отношению к поглощенной мощности накачки достигла 61 %. Показана перспективность создания эффективных эрбиевых лазеров при резонансной накачке в спектральной области 1.5—1.6 мкм.

- [1] V. Wulfmeyer, H.-D. Witzmann, M. Schiller, M. Fechner, G. Huber. Proc. 24th Int. Laser Radar Conference (2008) SO1P-22
- [2] N. Ter-Gabrielyan, V. Fromzel, T. Lukasiewicz, W. Ryba-Romanowski, M. Dubinskii. Opt. Lett., 36 (2011) 1218—1220
- [3] C. Brandt, V. Matrosov, K. Petermann, G. Huber. Opt. Lett., 36 (2011) 1188—1190
- [4] B. Chakoumakos. J. Solid State Chem., 109 (1994) 197—202
- [5] W. Ryba-Romanowski. Cryst. Res. Technol., 38 (2003) 225—236
- [6] D. S. Sumida, T. Y. Fan. Opt. Lett., 19 (1994) 1343—1345
- [7] D. McCumber. Phys. Rev., 136 (1964) A954—A957
- [8] J. A. Caird, S. A. Payne, P. R. Staber, A. J. Ramponi, L. L. Chase, W. F. Krupke. IEEE J. Quantum Electron., 24 (1988) 1077—1099