

## КЕРАМИКА YAG-Yb КАК МАТЕРИАЛ ДЛЯ РАДИАЦИОННО-БАЛАНСИРОВАННОЙ ГЕНЕРАЦИИ

Г. ДЕМИРХАНЫАН<sup>1,2\*</sup>, Б. ПАТРИЗИ<sup>3</sup>, Г. ТОЧИ<sup>3</sup>, М. ВАННИНИ<sup>3</sup>,  
А. ПИРРИ<sup>4</sup>, Ж. ЛИ<sup>5,6</sup>, Я. ФЕНГ<sup>7</sup>, Д. ЗАРГАРЯН<sup>1</sup>, Р. КОСТАНЫАН<sup>1,8</sup>

<sup>1</sup>Институт физических исследований НАН Армении, Аштарак, Армения

<sup>2</sup>Армянский государственный педагогический университет, Ереван, Армения

<sup>3</sup>Национальный институт оптики, Сесто Фиорентино (Фи), Италия

<sup>4</sup>Институт прикладной физики, Сесто Фиорентино (Фи), Италия

<sup>5</sup>Шанхайский институт керамики китайской академии наук, Шанхай, Китай

<sup>6</sup>Центр материаловедения и оптоэлектронных технологий,  
Университет Китайской академии наук, Пекин, Китай

<sup>7</sup>Школа материаловедения и инженерии, Хэнаньский технологический  
университет, Чжэнчжоу, Хэнань, Китай

<sup>8</sup>Национальная Академия наук республики Армения, Ереван, Армения

\*e-mail: gdemirkhanyan@gmail.com

(Поступила в редакцию 17 декабря 2021 г.)

Оценены возможности применения керамики YAG, легированной 10% ионами Yb<sup>3+</sup>, в качестве материала для оптического охлаждения и радиационно-балансируемого лазера. Определены параметры оптимального охлаждения и радиационно-балансируемой генерации. Показано, что по сравнению с ZBLANP-Yb<sup>3+</sup> и Rb<sub>2</sub>NaYF<sub>6</sub>-Yb<sup>3+</sup> керамика YAG-Yb<sup>3+</sup> имеет лучшие характеристики для оптического охлаждения и радиационно-балансируемой генерации.

### 1. Введение

Механизм оптического охлаждения за счет антистоксовой флуоресценции впервые был предложен в 1929 г. [1]. Он заключается в следующем. Поглощая фотон, атом на некоторое время выходит из состояния теплового равновесия с окружающей средой. После восстановления теплового равновесия атом самопроизвольно испускает фотон, длина волны которого смещена по сравнению с длиной волны поглощенного фотона, что приводит к нагреванию или охлаждению материала. Антистоксовое охлаждение для стекла ZBLANP, легированного иттербием, описано в [2,3]. В [4–6] исследованы возможности использования кристаллов LiNbO<sub>3</sub>, легированных ионами Tm<sup>3+</sup>, Er<sup>3+</sup> и Ho<sup>3+</sup> в качестве материалов для оптического охлаждения.

В [7] была предложена идея создания твердотельного лазера, в котором охлаждение антистоксовой флуоресценции компенсировало бы тепло, генерируемое вынужденным излучением (радиационно-балансируемое излучение). В

принципе, при работе таких лазеров внутреннее тепловыделение незначительно или вовсе отсутствует. Подробный обзор механизмов оптического охлаждения и РБ генерации представлен в [3,8–10]. В данной статье на основе анализа спектров примесного поглощения и излучения оцениваются возможности использования YAG керамики, легированной 10% Yb, в качестве материала для радиационно–балансированного (РБ) лазера и оптического охлаждения.

## 2. Параметры оптического охлаждения и радиационно-сбалансированного лазера

Как известно, необходимым условием достижения эффекта оптического охлаждения и РБ генерации является

$$\lambda_F < \lambda_p < \lambda_L, \quad (1)$$

где  $\lambda_p$  и  $\lambda_L$  – длины волн накачки и люминесценции,  $\lambda_F$  – средняя длина волны люминесценции, определяемая как

$$\lambda_F = \int \lambda \sigma_L(\lambda) d\lambda / \int \sigma_L(\lambda) d\lambda, \quad (2)$$

где  $\sigma_L(\lambda)$  – поперечное сечение люминесценции.

Эффективность оптического охлаждения на единицу длины определяется как

$$F_{\text{cool}} \equiv \frac{\eta_c(\lambda_p)}{N_t} = \sigma_{\text{abs}}(\lambda_p) \left[ \frac{\lambda_p}{\lambda_F} - 1 \right], \quad (3)$$

где  $N_t$  – концентрация активных ионов и  $\sigma_{\text{abs}}(\lambda_p)$  – поперечное сечение поглощения на длине волны накачки.

Состояние радиационного баланса достигается, когда плотности поглощенной и излучаемой мощности совпадают в каждой точке объема моды. В этом случае длина волны накачки должна удовлетворять условию (1). В то же время в случае, когда квантовый выход люминесценции близок к единице, состояние РБ является устойчивым, если интенсивности накачки и генерации ( $I_p$  и  $I_L$ ) удовлетворяют условию [8]

$$\frac{I_L}{I_{L_{\text{sat}}}} = \left[ 1 - \frac{\beta(\lambda_L)}{\beta(\lambda_p)} \left( 1 + \frac{I_{p_{\text{sat}}}}{I_p} \right) \right]^{-1}, \quad (4)$$

где  $I_{p_{\text{sat}}}$  и  $I_{L_{\text{sat}}}$  – интенсивности насыщения, определяемые

$$I_{p_{\text{sat}}} = \frac{hc}{\lambda_F \tau \sigma_{\text{abs}}(\lambda_p)} \times \frac{\lambda_L - \lambda_F}{\lambda_L - \lambda_p} \beta(\lambda_p), \quad I_{L_{\text{sat}}} = \frac{hc}{\lambda_F \tau \sigma_{\text{abs}}(\lambda_L)} \times \frac{\lambda_p - \lambda_F}{\lambda_L - \lambda_p} \beta(\lambda_L). \quad (5)$$

Здесь  $\tau$  — спонтанное время жизни активного иона,  $h$  — постоянная Планка,  $c$  — скорость света, коэффициент  $\beta(\lambda)$  определяется выражением

$$\beta(\lambda) = \frac{\sigma_{\text{abs}}(\lambda)}{\sigma_{\text{abs}}(\lambda) + \sigma_{\text{em}}(\lambda)}. \quad (6)$$

При больших интенсивностях накачки ( $I_p \gg I_{p_{sat}}$ ) из (4) получаем минимальное значение интенсивности лазерного излучения

$$I_{L_{min}} = \frac{\beta(\lambda_p)}{\beta(\lambda_p) - \beta(\lambda_L)} I_{L_{sat}} \quad (7)$$

и аналогично при больших интенсивностях генерации ( $I_L \gg I_{L_{sat}}$ )

$$I_{p_{min}} = \frac{\beta(\lambda_L)}{\beta(\lambda_p) - \beta(\lambda_L)} I_{p_{sat}}. \quad (8)$$

Эффективность РБ генерации на единицу длины активной среды определяется как

$$\frac{\eta(\lambda_p, \lambda_L, I_p)}{N_t} \equiv \frac{1}{N_t I_p} \frac{\partial I_L}{\partial z} = \sigma_{abs}(\lambda_p) \eta_o \frac{\beta(\lambda_p) - \beta(\lambda_L)}{\beta(\lambda_p)}, \quad (9)$$

где  $\eta_o = (\lambda_p - \lambda_F) / (\lambda_L - \lambda_F)$  — внутренняя оптическая эффективность для непрерывного РБ лазера.

Максимальный коэффициент усиления, соответствующий работе РБ-лазера при высоких интенсивностях накачки ( $I_p \gg I_{p_{sat}}$ ), выражается в виде [7,8]

$$\frac{g_{max}}{N_t} = \sigma_{abs}(\lambda_L) \frac{\beta(\lambda_p) - \beta(\lambda_L)}{\beta(\lambda_L)}. \quad (10)$$

При этом оптимальные значения коэффициента усиления и КПД находятся путем выбора длин волн накачки  $\lambda_{op}$  и генерации  $\lambda_{OL}$ , которые максимизируют произведение  $g_{max} \times \eta$ . Этими оптимальными длинами волн определяются показатели качества РБ лазера

$$F_{eff} = \sigma_{abs}(\lambda_{op}) \eta_o \frac{\beta(\lambda_{op}) - \beta(\lambda_{OL})}{\beta(\lambda_{op})}, \quad F_{gain} = \sigma_{abs}(\lambda_{OL}) \frac{\beta(\lambda_{op}) - \beta(\lambda_{OL})}{\beta(\lambda_{OL})}. \quad (11)$$

Материалы с более высокими значениями  $F_{eff}$  и  $F_{gain}$  наиболее эффективны для создания РБ лазера.

### 3. Возможности керамики YAG-Yb

Спектры поперечных сечений поглощения и излучения керамики YAG-Yb при комнатной температуре представлены на рис.1 [11]. Средняя длина волны люминесценции, определенная из спектров излучения согласно (2), равна  $\lambda_F = 1017.9$  нм (рис.1). Видно, что эффективные поглощения, удовлетворяющие условию (1), происходят на длинах волн 1025.1 нм и 1030.1 нм (Рис.1). В то же время спектр излучения показывает, что для каждой длины волны накачки имеется несколько пиков, удовлетворяющих условию (1). В Табл.1 приведены, определенные по спектрам поглощения и излучения, значения поперечных сечений, необходимые для расчета параметров РБ лазера.

Табл.1. Поперечные сечения поглощения и испускания

Длина волны, нм	1025.1	1030.1	1038.0	1049.2
Поперечное сечение поглощения, $10^{-20} \text{ cm}^2$	0.084	0.116	0.012	0.005
Поперечное сечение испускания, $10^{-20} \text{ cm}^2$	1.180	2.140	0.427	0.355

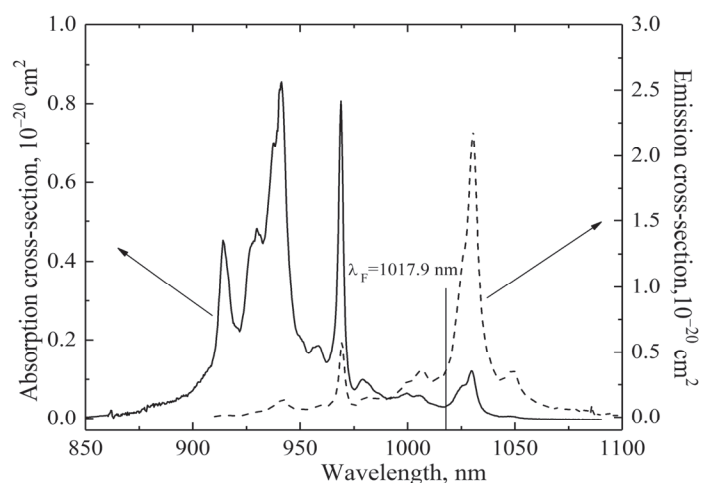


Рис.1. Поперечные сечения поглощения и испускания для 10% Yb:YAG керамики при комнатной температуре.

Результаты расчетов, проведенных согласно (3)–(10), приведены в Табл. 2. Видно, что максимальное значение  $g_{\max} \times \eta$  достигается при  $\lambda_{op} = 1030.1 \text{ нм}$  и  $\lambda_{OL} = 1049.2 \text{ нм}$ . Таким образом, добротность РБ лазера на основе керамики 10% Yb-YAG составляет  $F_{\text{eff}} = 3.29 \times 10^{-22} \text{ см}^2$  и  $F_{\text{gain}} = 1.34 \times 10^{-22} \text{ см}^2$ . Для сравнения

Табл.2. Параметры оптического охлаждения и РБ генерации для YAG-Yb<sup>3+</sup> керамики

$\lambda_F$	$\lambda_{op}$	$\lambda_{OL}$	$\eta_o$	$\tau$	$I_{P_{\min}}$	$I_{L_{\min}}$	$F_{cool}$	$\frac{\eta(\lambda_p, \lambda_L, I_p)}{N_t}$	$\frac{g_{\max}}{N_t}$
nm			%	ms	kW/cm <sup>2</sup>		$10^{-22} \text{ cm}^2$		
1017.9	1025.1	1030.2	58.5	0.9	139.7	59.2	0.059	1.1	3.4
		1038.0	35.8		18.4	46.1		1.8	1.7
		1049.2	23.0		6.0	23.0		1.5	1.9
	1030.1	1038.0	60.7		27.0	158.6	0.139	3.34	1.08
		1049.2	39.0		5.9	53.3		3.29	1.34

в Табл.3 приведены параметры, характеризующие оптимальную РБ генерацию различных материалов, легированных ионами  $\text{Yb}^{3+}$ .

Табл.3. Параметры оптимальной РБ генерации и оптического охлаждения  $\text{Yb}^{3+}$  легированных материалов

матрица	host	$\lambda_F$	$\lambda_{op}$	$\lambda_{OL}$	$\eta_o$	$\tau$	$I_{P_{min}}$	$I_{L_{min}}$	$F_{cool}$	$F_{eff}$	$F_{gain}$
		nm			%	ms	kW/cm <sup>2</sup>		10 <sup>-22</sup> cm <sup>2</sup>		
YAG керамика	YAG ceramics	1018	1030.1	1049.2	39	0.90	5.9	53.3	0.14	3.3	1.3
LuAG [12]	LuAG [12]	1002	1033	1048	67	0.92	26	303	0.49	5.1	0.8
KY(WO <sub>4</sub> ) <sub>2</sub> [13]	KY(WO <sub>4</sub> ) <sub>2</sub> [13]	992	1002	1041	20	0.60	1.6	5.5	1.50	41	36
ZBLANP [3]	ZBLANP [3]	995	1005	1024	36	1.7	38	46	0.07	1.3	2.4
Rb <sub>2</sub> NaYF <sub>6</sub> [14]	Rb <sub>2</sub> NaYF <sub>6</sub> [14]	996	1011	1068	20	10.8	1.8	17	0.02	0.25	0.34

#### 4. Заключение

По спектрам поглощения и излучения определены параметры, характеризующие оптимальную РБ генерацию керамики YAG, легированной  $\text{Yb}^{3+}$ . Из табл. 3 видно, что безусловное лидерство остается за кристаллом KY(WO<sub>4</sub>)<sub>2</sub>- $\text{Yb}^{3+}$ , добротность которого как оптического охлаждения, так и РБ генерации ( $\lambda_{OL} = 1041$  нм) на порядок выше, чем у керамики YAG- $\text{Yb}^{3+}$  ( $\lambda_{OL} = 1049.2$  нм). В то же время керамика YAG- $\text{Yb}^{3+}$  вполне конкурентоспособна для использования в системах оптического охлаждения и РБ генерации по сравнению с ZBLANP и Rb<sub>2</sub>NaYF<sub>6</sub>, легированными  $\text{Yb}^{3+}$  ионами. Действительно, значения параметров как РБ генерации, так и оптического охлаждения для этих материалов существенно меньше соответствующих значений для керамики YAG- $\text{Yb}^{3+}$  (Табл.3).

Работа поддержана совместной программой Министерства образования и науки Республики Армения и Национального исследовательского совета Италии (Проект «Исследование спектроскопических и кинетических свойств прозрачной керамики смешанного состава, легированной редкоземельными ионами, для лазерных приложений», грант 19IT-005).

#### ЛИТЕРАТУРА

1. P. Pringsheim. Z. Phys., **57**, 739 (1929).
2. R.I. Epstein, M.I. Buchwald, B.C. Edwards, T.R. Gosnell, C.E. Mungan. Nature (London), **377**, 500 (1995).
3. C.E. Mungan, T.R. Gosnell. Adv. At. Mol. Opt. Phys., **40**, 161 (1999).
4. N. Kokanyan, N. Mkhitarian, G. Demirkhanyan, A. Kumar, M. Aillerie, D. Sardar,

- E. Kokanyan.** Crystals, **11**, 50 (2021).
5. **V.G. Babajanyan.** Laser Physics, **23**, 126002, (2013).
6. **G.G. Demirkhanyan, E.P. Kokanyan, H.G. Demirkhanyan, D. Sardar, M. Aillerie.** J. Contemp. Phys., **51**, 28 (2016).
7. **S.R. Bowman.** IEEE J. Quantum Electron, **35**, 115 (1999).
8. **S.R. Bowman, C.E. Mungan.** Advanced Solid-State Lasers, ed. by H. Injeyan, U. Keller, C. Marshall, Trends in Optics and Photonics, **34**, 446, Washington: OSA, 2000.
9. **S.R. Bowman, C.E. Mungan.** Appl. Phys. B, **71**, 807 (2000).
10. **G. Nemova, R. Kashyap.** Rep. Prog. Phys., **73**, 086501 (2010).
11. **Y. Feng, G. Toci, A. Pirri, B. Patrizi, X. Chen, J. Wei, H. Pan, X. Zhang, X. Li, M. Vannini, J. Li.** J. Alloys and Compounds, **815**, 152637 (2019).
12. **D.S. Sumida, T.Y. Fan, R. Hutcheson.** OSA Proceedings on Advanced Solid-State Lasers, **24**, 384, Washington D.C., 1995.
13. **N.V. Kuleshov, A.A. Lagatsky, A.V. Podlipensky, V.P. Mikhailov, G. Huber.** Opt. Lett., **22**, 1317 (1997).
14. **L.D. DeLoach, S.A. Payne, L.L. Chase, L.K. Smith, W.L. Kway, W.F. Krupke.** IEEE J. Quantum Electron, **QE-29**, 1179 (1993).

#### YAG-Yb ԿԵՐԱՄԻԿԱՆ ՈՐՊԵՍ ՃԱՌԱՅԳԱՅԹԱԲԱԼԱՆՍԱՎՈՐՎԱԾ ԼԱԶԵՐԻ ՆՅՈՒԹ

Գ. ԴԵՄԻՐԽԱՆՅԱՆ, Բ. ՊԱՏՐԻԶԻ, Գ. ՏՈՉԻ, Մ. ՎԱՆՆԻՆԻ, Ա. ՊԻՐՐԻ,  
Ժ. ԼԻ, Յ. ՖԵՆԳ, Դ. ԶԱՐԳԱՐՅԱՆ, Ռ. ԿՈՍՏԱՆՅԱՆ

Գնահատված են 10% Yb<sup>3+</sup> իոններով լեզիրված YAG կերամիկայի ճառագայթաբալանսավորված լազերային ճառագայթի զենեքացիա ստանալու հնարավորությունները: Որոշված են YAG-Yb<sup>3+</sup> կերամիկայի օպտիկական հովացման և ճառագայթաբալանսավորված լազերի բնութագրական պարամետրերը: Ցույց է տրված, որ YAG-Yb կերամիկայի օպտիկական հովացման և ճառագայթաբալանսավորված զենեքացիայի բնութագրերը առավել նպաստավոր են՝ ZBLANP-Yb<sup>3+</sup> և Rb<sub>2</sub>NaYF<sub>6</sub>-Yb<sup>3+</sup> նյութերի հետ համեմատած:

#### YAG-Yb CERAMICS AS A MATERIAL FOR RADIATION BALANCED LASING

G. DEMIRKHANYAN, B. PATRIZI, G. TOCI, M. VANNINI,  
A. PIRRI, J. LI, Y. FENG, D. ZARGARYAN, R. KOSTANYAN

Capabilities of YAG ceramics doped with 10% Yb<sup>3+</sup> ions for operation as a radiation balanced laser are evaluated. Parameters of the optimal cooling and radiation balanced lasing for YAG-Yb<sup>3+</sup> ceramics are determined. It is shown, that YAG-Yb ceramics have better characteristics for optical cooling and lasing generation compared to ZBLANP-Yb<sup>3+</sup> and Rb<sub>2</sub>NaYF<sub>6</sub>-Yb<sup>3+</sup>.