

УДК 548.0+535.35

ФИЗИКА

А. А. Каминский, К. Курбанов, А. Г. Петросян

Спектральный состав и кинетика двухмикронного стимулированного излучения ионов  $\text{Ho}^{3+}$  в сенсibilизированных кристаллах  $\text{Y}_3\text{Al}_5\text{O}_{12}$  и  $\text{Lu}_3\text{Al}_5\text{O}_{12}$  при 300 К

(Представлено академиком АН Армянской ССР М. Л. Тер-Микаеляном 1/IX 1986)

Стимулированное излучение (СИ) основного канала  $^5I_7 \rightarrow ^5I_8$  ионов  $\text{Ho}^{3+}$  в кристаллах (особенно сенсibilизированных) представляет собой интересное физическое явление как последний акт в сложной цепи процессов преобразования энергии накачки в генерацию<sup>(1)</sup>. Если этот эффект возбуждается излучением ламп накачки и при 300 К, то он становится привлекательным и с прикладной точки зрения, например, СИ двухмикронного диапазона менее опасно для глаз человека, соответствует окну прозрачности земной атмосферы и т. д.<sup>(2,3)</sup>.

Для возбуждения СИ ионов  $\text{Ho}^{3+}$  на волнах канала  $^5I_7 \rightarrow ^5I_8$  при 300К и ламповой накачке используется несколько фторидных и оксидных кристаллов ( $\text{Li}(\text{Y}, \text{Er})\text{F}_4 : \text{Tm}^{3+}$ ;  $\text{CaF}_2 - \text{ErF}_3 - \text{TmF}_3 - \text{YbF}_3$ ;  $\text{BaEr}_2\text{F}_8 : \text{Tm}^{3+}$ ;  $\text{Y}_2\text{SiO}_5 : \text{Er}^{3+}, \text{Tm}^{3+}$ ;  $(\text{Y}, \text{Er})\text{AlO}_3 : \text{Tm}^{3+}$ ;  $(\text{Y}, \text{Er})\text{Al}_5\text{O}_{12} : \text{Tm}^{3+}$ )<sup>(4-10)</sup>. Недавно в<sup>(11)</sup> представлены результаты по энергетике двухмикронной генерации кристаллов  $\text{Y}_3\text{Al}_5\text{O}_{12} : \text{Cr}^{3+}, \text{Tm}^{3+} - \text{Ho}^{3+}$ .

Настоящая работа, продолжая исследования<sup>(12-15)</sup>, описывает параметры двухмикронного СИ ионов  $\text{Ho}^{3+}$  в  $\text{Lu}_3\text{Al}_5\text{O}_{12} : \text{Cr}^{3+}, \text{Tm}^{3+}$  и дополняет<sup>(11)</sup> новыми спектроскопическими данными.

Полученные экспериментальные данные сведены в таблице и поясняются рис. 1 и 2. Эти результаты демонстрируют несовпадение длины волны линий СИ изученных кристаллов с длиной волны максимальных по интенсивности пиков в их спектрах люминесценции. Этот факт в физике и спектроскопии лазерных кристаллов хорошо известен—он обусловлен спецификой четырехуровневых систем с низкорасположенными конечными рабочими уровнями ( $E_{\text{кон}}$ )<sup>(16)</sup>. Осциллограммы кинетики двухмикронного СИ ионов  $\text{Ho}^{3+}$  в  $\text{Y}_3\text{Al}_5\text{O}_{12} : \text{Cr}^{3+}, \text{Tm}^{3+}$ , а также данные<sup>(11)</sup> по энергетике генерации при 300К показывают, что в сложной системе трех коактиваторов (при указанных концентрациях) процессы преобразования энергии возбуждения в СИ более эффективны при низких температурах<sup>(16)</sup>. Подбор матрицы-основы со структурой граната (пространственная группа  $O_h^{10} - Ia3d$ ), которая обеспечит большое расщепление мультиплета  $^5I_8$ , и типов ионов-сенсibilизаторов и их концентрации, даст возможность

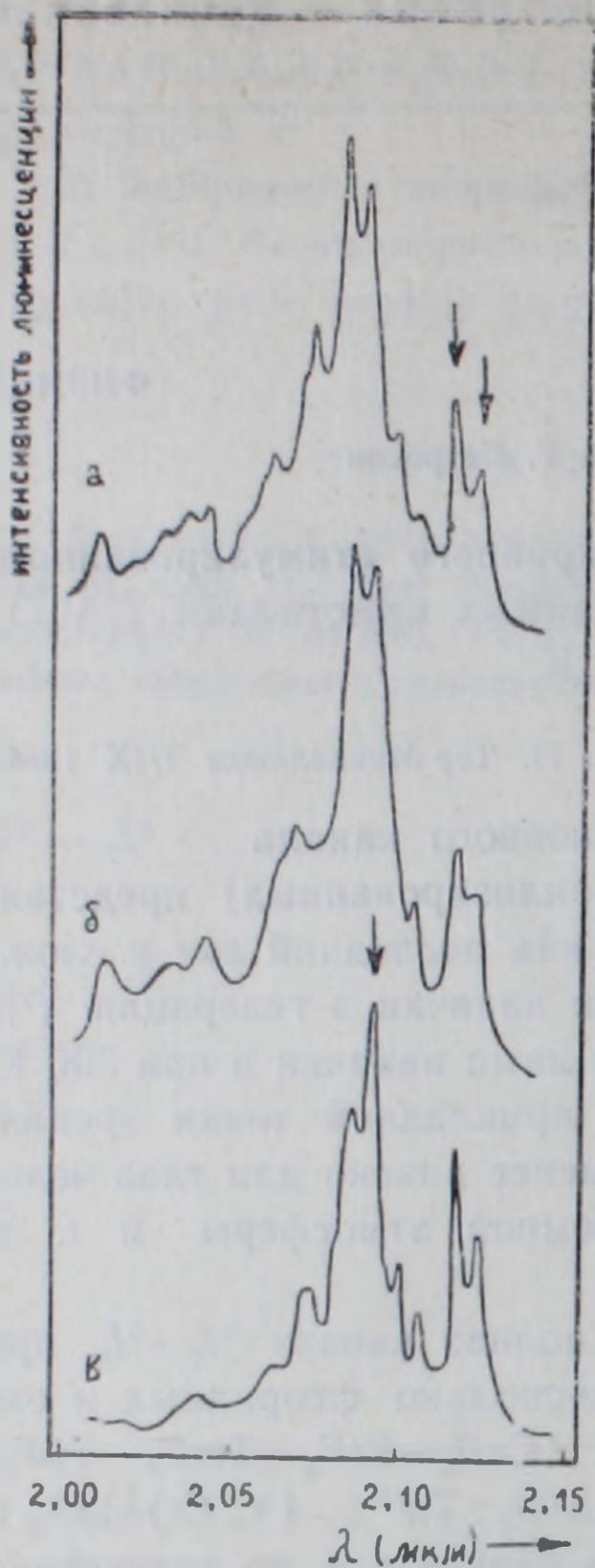


Рис. 1. Длинноволновые фрагменты спектров люминесценции ионов  $\text{Ho}^{3+}$  (канал  ${}^5I_7 \rightarrow {}^5I_8$ ) в кристаллах: а —  $\text{Y}_3\text{Al}_5\text{O}_{12}:\text{Tm}^{3+}, \text{Cr}^{3+}$  при 300 К; б —  $\text{Lu}_3\text{Al}_5\text{O}_{12}:\text{Tm}^{3+}, \text{Cr}^{3+}$  при 300 К; в —  $\text{Y}_3\text{Al}_5\text{O}_{12}:\text{Tm}^{3+}, \text{Cr}^{3+}$  при 77 К. Стрелками указаны линии, на волнах которых возбуждено СИ

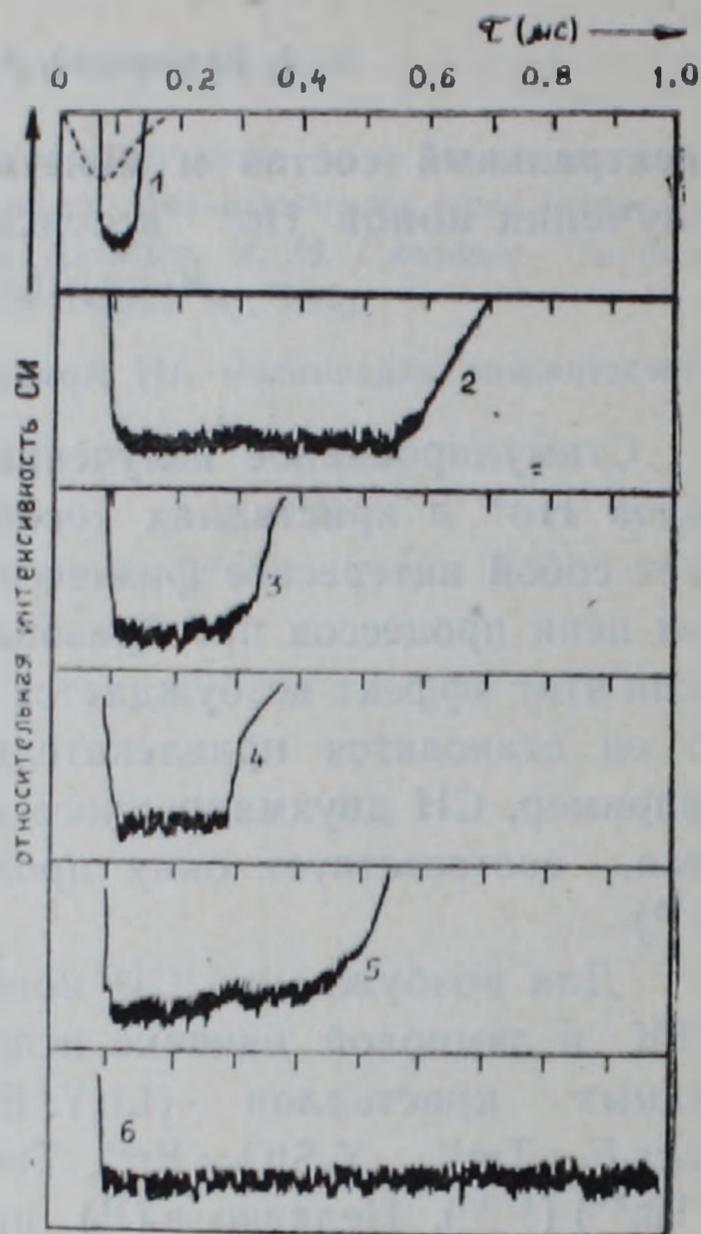


Рис. 2. Осциллограммы кинетики двухмикронного СИ ионов  $\text{Ho}^{3+}$  при  $E_{\text{возб}}/E_{\text{п}} \approx 5$  кристаллов: 1 —  $\text{Y}_3\text{Al}_5\text{O}_{12}:\text{Tm}^{3+}, \text{Cr}^{3+}$  при 300 К; 2 —  $\text{Y}_3\text{Al}_5\text{O}_{12}:\text{Tm}^{3+}, \text{Cr}^{3+}$  при 110 К; 3 —  $\text{Y}_3\text{Al}_5\text{O}_{12}:\text{Er}^{3+}, \text{Tm}^{3+}$  при 110 К; 4 —  $\text{Lu}_3\text{Al}_5\text{O}_{12}:\text{Er}^{3+}, \text{Tm}^{3+}, \text{Yb}^{3+}$  при 110 К; 5 —  $\text{Yb}_3\text{Al}_5\text{O}_{12}:\text{Er}^{3+}, \text{Tm}^{3+}$  при 110 К; 6 —  $\text{Y}_3\text{Al}_5\text{O}_{12}:\text{Tm}^{3+}, \text{Yb}^{3+}$  при 110 К. Импульс возбуждения показан штриховой кривой

получать СИ при 300 К с лучшими энергетическими характеристиками.

Условие возникновения (порога возбуждения  $E_{\text{п}}$ ) СИ для нашего случая можно пояснить при помощи феноменологической формулы для коэффициента усиления

$$\sigma_{ji} = (N_2 b_j - N_1 b_i) \sigma(\nu_{ji}) - \rho, \quad (1)$$

где  $N_1$  и  $N_2$  — населенность верхнего ( ${}^5I_7$ ) и нижнего ( ${}^5I_8$ ) состояний резонансного канала  ${}^5I_7 \rightarrow {}^5I_8$ ;  $b_j$  и  $b_i$  — больцмановские факторы, учитывающие термическую заселенность начального ( $j$ ) и конечного ( $i$ )

лазерных уровней мультиплетов  $^5I_7$  и  $^5I_8$  относительно нижайших ( $j, i=1$ ) штарковских компонент;  $\sigma(\nu_{ji})$ —пиковое (или эффективное) поперечное сечение перехода  $j \leftrightarrow i$ , характеризующее интенсивность линии люминесценции на частоте  $\nu_{ji}$  и  $\rho$ —полные потери, обусловленные оптическим качеством кристалла и параметрами зеркал резонатора.

Спектроскопические характеристики СИ ионов  $\text{Ho}^{3+}$  (канал  $^5I_7 \rightarrow ^5I_8$ ,  $C_{\text{Ho}}=1$  ат.%) в кристаллах  $\text{Y}_3\text{Al}_5\text{O}_{12}$  и  $\text{Lu}_3\text{Al}_5\text{O}_{12}$ , „сенсibilизированных“ ионами  $\text{Tm}^{3+}$  ( $C_{\text{Tm}}=10$  ат.%) и  $\text{Cr}^{3+}$

Кристалл ( $C_{\text{Cr}}$ , ат.%)*	$\lambda_{\text{СИ}}$ , мкм**	$T$ , К	$E_{\text{п}}$ Дж***	$\Delta\nu_{\text{люм}}$ , см $^{-1}$	$E_{\text{кон}}$ , см $^{-1}$	$\tau_{\text{СИ}}^{\times 5}$ , мс****	Литература
$\text{Y}_3\text{Al}_5\text{O}_{12}$ $C_{\text{Cr}} \approx 1,0$ $C_{\text{Cr}} \approx 0,4$	2,12	300	45	—	—	—	(11)
	2,0982	110	6	5	462	0,6	Настоящая работа
	2,1223	300	70*****	10	518	—	
	2,1295	300	60*****	10	535	0,1	
$\text{Lu}_3\text{Al}_5\text{O}_{12}$ $C_{\text{Cr}} \approx 0,45$	2,1008	110	2,5	6	465	0,55	Настоящая работа
	2,1241	300	50	11	520	—	
	2,1303	300	43	11	540	0,1	

\* Концентрация хрома в исходной шихте.

\*\* Точность измерения  $\pm 0,0005$  мкм обеспечивалась дифракционным монохроматором МДР—3 с охлаждаемым фотосопротивлением  $\text{InSb}$  с эмитерным повторителем и осциллографом С1—93.

\*\*\* Порог возбуждения для импульсной Хе лампы ( $\tau_{\text{возб}}=40-70$  мкс) и кристаллов длиной  $\sim 40$  и диаметром до 6 мм с плоскопараллельными торцами ( $\sim 5''$ ) в конфокальном ( $R=600$  мм) резонаторе.

\*\*\*\* Длительность импульса СИ при пятикратном превышении энергии накачки над пороговой.

\*\*\*\*\* Пропускание выходного зеркала резонатора около 30%.

\*\*\*\*\* Пропускание зеркал резонатора 0,5%.

Из (1) следует, что СИ с наименьшим порогом возбуждётся на волне самой интенсивной линии люминесценции только в двух случаях—при предельно низких температурах ( $T \approx 0$ ), когда  $b_i = \exp(-\Delta E_{i1}/kT)$ , определяющий реабсорбцию на частоте  $\nu_{ji}$ , пренебрежимо мал (здесь  $\Delta E_{i1}$ —энергетический зазор между  $i$ -м и первым нижним уровнем мультиплета  $^5I_8$ ,  $k$ —постоянная Больцмана), либо при низкой добротности резонатора (больших значениях  $\rho$ ). В том и другом случаях это приводит к неравенству  $N_2 b_j \gg N_1 b_i$ , а это означает, что  $\alpha_{ji} \sim \sigma(\nu_{ji})$ . В обычных условиях эксперимента, т. е. в интервале температур от 77 до 300 К, где  $b_i \neq 0$  ( $i > 10$ ,  $\Delta E_{i1}$  от типа кристалла может изменяться от 250 до 550 см $^{-1}$  (16)) и при малых  $\rho$  (обычно 10 $^{-2}$  см $^{-1}$ ), населенности  $N_2 b_j$  и  $N_1 b_i$  по величине будут одного порядка. Для переходов с малоразняющимися  $\sigma(\nu_{ji})$  максимальная инверсная заселенность между их  $j$ - и  $i$ -м уровнями будет реализовываться для тех из них, которые заканчиваются на самых верхних штарковских компонентах мультиплета  $^5I_8$ . Этим длинноволновым переходам в спектрах люминесценции чаще всего соответствуют не самые интенсивные пики, и, тем не менее, на их волнах (рис. 1) возбуждается генерация с меньшим порогом. Это одно из проявлений

„красного смещения“ длины волны СИ активированных кристаллов, которое обуславливается потерей „четырёхуровневости“ их лазерной схемы при повышении как рабочей температуры, так и концентрации генерирующих ионов (<sup>12-16</sup>). Общий характер этого явления, разумеется, распространяется и на область температур  $> 300$  К. Все эти выводы подтверждают проведенные эксперименты по спектроскопии СИ ионов  $\text{Ho}^{3+}$  на линиях основного канала  $^5I_7 \rightarrow ^5I_8$  в двух кристаллах-гранатах  $\text{Y}_3\text{Al}_5\text{O}_{12}$  и  $\text{Lu}_3\text{Al}_5\text{O}_{12}$ , коактивированных ионами-сенситизаторами  $\text{Tm}^{3+}$  и  $\text{Cr}^{3+}$ .

Таким образом, впервые проведены измерения спектрального состава и кинетики импульсной генерации СИ ионов  $\text{Ho}^{3+}$  в  $\text{Lu}_3\text{Al}_5\text{O}_{12} : \text{Cr}^{3+}, \text{Tm}^{3+}$  и  $\text{Y}_3\text{Al}_5\text{O}_{12} : \text{Cr}^{3+}, \text{Tm}^{3+}$  при 300 К в условиях применения обычной техники ламповой накачки. Показано, что изменение добротности резонатора является одним из путей перестройки длины волны СИ сред, генерирующих по четырёхуровневой схеме с низкорасположенными конечными рабочими уровнями. Излучение кинетики СИ свидетельствует, что при 300 К в изученных кристаллах имеются каналы потерь возбуждения, которые могут быть уменьшены путем более точного подбора гранатовой матрицы, концентрации генерирующих и сенситизирующих ионов, а также комбинации последних.

В продолжение последнего заключения здесь добавим некоторую информацию по спектроскопии и кинетике двухмикронного СИ при 110 К ионов  $\text{Ho}^{3+}$  в алюминиевых гранатах:  $\text{Y}_3\text{Al}_5\text{O}_{12} : \text{Er}^{3+}$  (33 ат. %),  $\text{Tm}^{3+}, \text{Ho}^{3+}$  (3 ат. %) —  $\lambda_{\text{СИ}} = 2,0983$  мкм,  $E_{\text{п}} = 6,5$  Дж и  $\tau_{\text{СИ}}^{x5} \approx 0,32$  мс;  $\text{Lu}_3\text{Al}_5\text{O}_{12} : \text{Er}^{3+}$  (33 ат. %),  $\text{Tm}^{3+}$  (3 ат. %),  $\text{Yb}^{3+}$  (3 ат. %) —  $\text{Ho}^{3+}$  (3 ат. %) —  $\lambda_{\text{СИ}} = 2,1005$  мкм,  $E_{\text{п}} = 6,5$  Дж и  $\tau_{\text{СИ}}^{x5} \approx 0,3$  мс;  $\text{Yb}_3\text{Al}_5\text{O}_{12} : \text{Er}^{3+}$  (5 ат. %)  $\text{Tm}^{3+}$  (5 ат. %) —  $\text{Ho}^{3+}$  (1 ат. %) —  $\lambda_{\text{СИ}} = 2,0998$  мкм,  $E_{\text{п}} = 7$  Дж и  $\tau_{\text{СИ}}^{x5} \approx 0,45$  мс;  $\text{Y}_3\text{Al}_5\text{O}_{12} : \text{Tm}^{3+}$  (5 ат. %),  $\text{Yb}^{3+}$  (40 ат. %) —  $\text{Ho}^{3+}$  (0,25 ат. %) —  $\lambda_{\text{СИ}} = 2,0983$  мкм,  $E_{\text{п}} = 15$  Дж и  $\tau_{\text{СИ}}^{x5} \approx 2$  мс (<sup>12-16</sup>).

Авторы благодарят К. Л. Ованесян и А. С. Кузанына за помощь в экспериментах.

Институт физических исследований  
Академии наук Армянской ССР

Ա. Ա. ԿՈՄԻՆՍԿԻ, Կ. ԿՈՒՐԲԱՆՈՎ, Ա. Գ. ՊԵՏՐՈՍՅԱՆ

$\text{Y}_3\text{Al}_5\text{O}_{12}$  և  $\text{Lu}_3\text{Al}_5\text{O}_{12}$  սենսիթիվիզացված բյուրեղներում  $\text{Ho}^{3+}$  իոնների երկմիկրոնային ստիպողական ճառագայթման կինետիկան և սպեկտրալ կազմը 300 К ջերմաստիճանում

Տվյալ աշխատանքում չափված է  $\text{Lu}_3\text{Al}_5\text{O}_{12} : \text{Cr}^{3+}, \text{Tm}^{3+}$  բյուրեղում  $\text{Ho}^{3+}$  իոնների երկմիկրոնային ստիպողական ճառագայթման պարամետրերը: Ուսումնասիրված բարդ համակարգում գրգռման էներգիայի փոխակերպումը ստիպողական ճառագայթման ավելի էֆեկտիվ է ցածր ջերմաստիճանների դեպքում: Ճառագայթման կորուստների ուղիները կարող են փոքրացվել նոնաբարային հիմքի և խառնուրդների կոնցենտրացիայի ճշգրիտ ընտրության միջոցով:

ЛИТЕРАТУРА — ԳՐԱԿԱՆՈՒԹՅՈՒՆ

- <sup>1</sup> A. A. Kaminski, Phys. stat. sol. (a), 87, 11 (1985). <sup>2</sup> Справочник по лазерам. Т. 1. Ред. А. М. Прохоров, Сов. радио, М., 1978. <sup>3</sup> Handbook of laser science and technology, v. 1. Ed. M. J. Weber, CRC Press, Boca Raton, 1983. <sup>4</sup> M. Robinson, D. P. Devor, Appl. Phys. Lett., v. 10, 167 (1967). <sup>5</sup> E. P. Chiklits, S. C. Natman, R. C. Folweiler e. a., IEEE J. Quantum Electron., v. 8, 225 (1972). <sup>6</sup> M. Weber, M. Bass, T. Varimotos e. a., IEEE J. Quantum Electron, v. 9, 1079 (1973). <sup>7</sup> R. L. Remski, D. J. Smith, IEEE J. Quantum Electron., v. 6, 750 (1970). <sup>8</sup> А. М. Морозов, М. В. Петров, В. Р. Старцев и др., Оптика и спектроскопия, т. 41, 1056 (1976). <sup>9</sup> A. Erbil, H. P. Jenssen, Appl. Optics, v. 19, 1729 (1980). <sup>10</sup> Б. М. Антипенко, А. А. Мак, Л. К. Сухарева, Письма в ЖТФ, т. 10, 513 (1984). <sup>11</sup> Б. М. Антипенко, А. С. Глебов, Т. И. Киселева и др. Письма в ЖТФ, т. 11, 682 (1985). <sup>12</sup> А. А. Каминский, А. Г. Петросян, В. А. Федоров и др., ДАН СССР, т. 260, 64 (1981). <sup>13</sup> А. А. Каминский, А. Г. Петросян, В. А. Федоров и др., Изв. АН СССР. Неорганические материалы, т. 17, 1920 (1981). <sup>14</sup> А. А. Каминский, А. Г. Петросян, К. Л. Ованесян, Изв. АН СССР. Неорганические материалы, т. 19, 1217 (1983). <sup>15</sup> A. A. Kaminski, Kh. S. Bagdasarov, A. G. Petrosyan e. a., Phys. stat. sol. (a), v. 18, K31 (1973). <sup>16</sup> A. A. Kaminski, Laser crystals, their physics and properties, Springer-Verlag, Berlin-Heidelberg-New York, 1981.