

ОПТИЧЕСКИЕ СПЕКТРЫ И МНОГОЧАСТОТНАЯ ГЕНЕРАЦИЯ  
ВЫНУЖДЕННОГО ИЗЛУЧЕНИЯ КРИСТАЛЛОВ  $\text{LiYF}_4\text{-Er}^{3+}$ 

М. В. Петров и А. М. Ткачук

Исследованы оптические спектры кристаллов  $\text{LiYF}_4\text{-Er}^{3+}$ , получена экспериментальная схема штарковского расщепления термов иона  $\text{Er}^{3+}$ . Получена многочастотная и каскадная генерация вынужденного излучения ионов эрбия в области спектра 0.85–2.9 мкм, проведена идентификация линий генерации с переходами между штарковскими компонентами соответствующих термов и исследованы температурные зависимости пороговых энергий накачки для отдельных линий вынужденного излучения.

Кристаллы двойного литий-иттриевого фторида  $\text{LiYF}_4$  (YLF), активированные редкоземельными ионами (РЗИ), хорошо известны не только как интенсивно люминесцирующие кристаллы [1–4], но и как активные лазерные среды, генерирующие вынужденное излучение [5–11]. Известны также изоморфные им стехиометрические редкоземельные кристаллы  $\text{LiLnF}_4$  ( $\text{Ln} = \text{Er}, \dots, \text{Lu}$ ) [12–15], в том числе генерирующие вынужденное излучение в ИК области спектра:  $\text{ErLiF}_4$  (ELF) и  $\text{HoLiF}_4$  (HoLF) [15]. Генерация вынужденного излучения получена на ряде частот в области спектра 0.5–2.9 мкм на кристаллах YLF, активированных ионами  $\text{Nd}^{3+}$  [7],  $\text{Tb}^{3+}$  [8],  $\text{Er}^{3+}$  [9, 10],  $\text{Ho}^{3+}$  [11], и ионах  $\text{Ho}^{3+}$  с соактиваторами  $\text{Er}^{3+}$ ,  $\text{Tm}^{3+}$  [16–21].

Аналогично ионам  $\text{Ho}^{3+}$  в кристаллах YLF [11] ионы  $\text{Er}^{3+}$  имеют большое число излучательных состояний, позволяющих получать вынужденное излучение на ряде переходов в широком спектральном интервале. Кроме того, схема излучательных переходов в ионе  $\text{Er}^{3+}$  позволяет осуществить одновременную многочастотную генерацию на нескольких линиях различных переходов и генерацию с последовательным изменением во времени частоты излучения — «каскадную» генерацию на различных излучательных переходах.

В настоящей работе изучены оптические спектры кристаллов  $\text{YLF-Er}^{3+}$ , измерены времена жизни ( $\tau$ ) нижайших термов, получена многочастотная и каскадная генерация вынужденного излучения этих кристаллов в области спектра 0.85–2.9 мкм, проведена идентификация линий генерации с переходами между штарковскими компонентами соответствующих термов и исследованы температурные зависимости пороговых энергий накачки для отдельных линий вынужденного излучения.

Кристаллы  $\text{YLF-Er}^{3+}$  выращивались по методу Чохральского. Синтез и особенности выращивания кристаллов YLF,  $\text{YLF-Ln}^{3+}$  и  $\text{LiLnF}_4$  описаны в [22–24].

Кристаллы  $\text{YLF-Er}^{3+}$  имеют тетрагональную структуру шеелита; точечная группа симметрии в месте расположения РЗИ —  $S_4$ . Элементарная ячейка содержит 4 молекулы, ее параметры равны  $a = 5.175$  и  $b = 10.740 \text{ \AA}$  [25]. Оптические спектры поглощения и излучения  $\text{YLF-Er}^{3+}$  изучались в [1, 26]. Поскольку в [26] показано, что определение штарковского расщепления терма основного состояния  $^4I_{15/2}$  в работе [1] сделано неверно, нам представлялось необходимым проверить данные работы [1]



и для других термов, между которыми наблюдаются генерационные переходы. Для этой цели были изучены спектры поглощения и излучения кристаллов  $\text{YLF-Er}^{3+}$  (2 ат.%) при 4.2, 77 и 295 К.

Групповой анализ спектров люминесценции и  $\tau$  кристаллов  $\text{YLF-Er}^{3+}$  показал, что из всех термов, расположенных в области энергий  $< 21\ 000\ \text{см}^{-1}$ , только терм  ${}^4I_{9/2}$  практически потушен. Схема нижайших термов и переходов между ними приведена на рис. 1. Справа на рис. 1 приведены значения  $\tau$  уровней при 77 и 300 К.

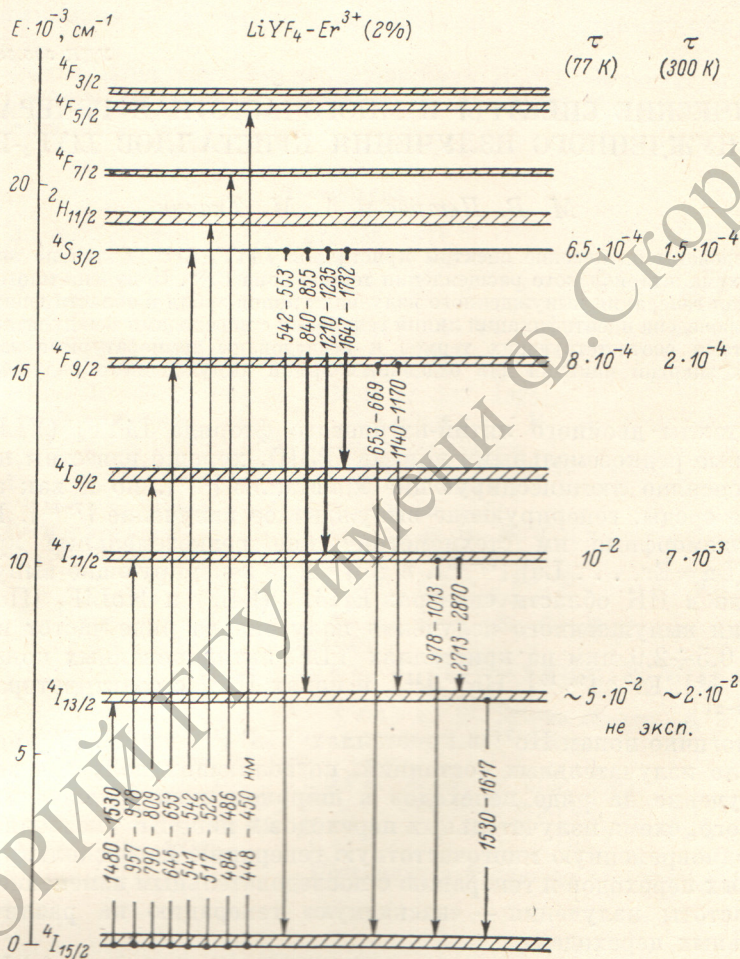


Рис. 1. Схема термов и переходов между ними для иона  $\text{Er}^{3+}$  в кристалле  $\text{LiYF}_4$ .

Цифры на стрелках означают граничные длины волн в нанометрах.  $T=4.2\ \text{K}$ . Жирными стрелками указаны генерационные переходы. Справа на рисунке приведены значения  $\tau$  излучательных термов в секундах при 77 и 300 К.

Анализ штарковского расщепления нижайших термов  $\text{Er}^{3+}$  в  $\text{YLF}$  проводился по спектрам поглощения и излучения, измеренным при температурах 4.2, 77 и 300 К в области спектра 6000—21 000  $\text{см}^{-1}$ .

Для получения спектров поглощения и люминесценции использовались спектрограф СП-25 (дисперсия 6.5  $\text{\AA}/\text{мм}$ ), спектрометр СФ-8, фотоэлектрические установки СДЛ-1 и ДФС-12 с фотоумножителем ФЭУ-62 и фотоспротивлением  $\text{PbS}$ . Значения  $\tau$  термов  ${}^4I_j$  ( $j=11/2; 13/2$ ) измерялись методом импульсного  $\tau$ -метра [27], а термов  ${}^4S_{3/2}$  и  ${}^4F_{3/2}$  — при осциллографическом наблюдении кинетики свечения с этих термов, при селективном возбуждении термина  ${}^4S_{3/2}$  частотным лазером ЛТИПЧ-5. Способ селективного возбуждения позволяет наблюдать затухание исследуемого термина ( ${}^4S_{3/2}$ ) при его непосредственном возбуждении и исклю-



чает погрешности, связанные с заселением этого терма посредством излучательных и безызлучательных переходов с вышележащих термов.

Генерация вынужденного излучения исследовалась на установке, описанной в [28] при возбуждении кристалла ( $\sigma=5$  мм;  $l=50$  мм) импульсной ксеноновой лампой ИФП-600 в эллиптическом осветителе. Резонатор конфокальный, образован сменными внешними диэлектрическими зеркалами с радиусами кривизны  $R_1=R_2=0.5$  м. Пороговые значения энергий накачки для отдельных линий вынужденного излучения получены с зеркалами, имевшими значения коэффициента отражения на длине волны генерации  $r_1 \sim 98 \pm 0.5\%$  и  $r_2 \sim 99.5 \pm 0.5\%$ . Генерируемое излучение регистрировалось интегрально-охлаждаемым приемником InSb и через дифракционный монохроматор фотоспротивлением PbS и наблюдалось на двухлучевом осциллографе С1-8 или фотографировалось на спектрографе ДАС-1 (область спектра 0.4—0.9 мкм). Длительность импульса накачки варьировалась в зависимости от  $\tau$  начального терма генерационного перехода и составляла 100 мкс при накачке терма  $^4I_{9/2}$  и 400 мкс при накачке терма  $^4I_{11/2}$ . По спектрам поглощения и люминесценции при 4.2 К была построена экспериментальная схема штарковского расщепления термов иона  $\text{Er}^{3+}$ :  $^4I_j$  ( $j=9/2; 11/2; 13/2; 15/2$ );  $^4F_{9/2}$ ;  $^4S_{3/2}$ ;  $^2H_{11/2}$  и  $^4F_{7/2}$ . В табл. 1 и 2 приведены значения частот линий поглощения и люминесценции, связанных с переходами между указанными термами, поляризация линий, а также энергетическое положение компонент мультиплетов относительно нижайших уровней данного терма ( $\Delta E$ ) и их обозначение. Для определения штарковской структуры основного терма  $^4I_{15/2}$  использованы излучательные переходы  $^4I_{13/2} \rightarrow ^4I_{15/2}$ ,  $^4I_{11/2} \rightarrow ^4I_{13/2}$ ,  $^4F_{9/2} \rightarrow ^4I_{15/2}$ ,  $^4S_{3/2} \rightarrow ^4I_{13/2}$ . Структура терма  $^4I_{13/2}$  определена из спектра поглощения перехода  $^4I_{15/2} \rightarrow ^4I_{13/2}$  и спектров люминесценции переходов  $^4I_{11/2} \rightarrow ^4I_{13/2}$ ,  $^2H_{9/2} \rightarrow ^4I_{13/2}$  и  $^4S_{3/2} \rightarrow ^4I_{13/2}$ . Для определения структуры терма  $^4I_{9/2}$  использовались два перехода: абсорбционный  $^4I_{13/2} \rightarrow ^4I_{9/2}$  и излучательный  $^4S_{3/2} \rightarrow ^4I_{9/2}$ . Структура остальных термов определялась только по спектрам поглощения. Погрешность определения положения уровней не превышает  $\pm 1.5$  см $^{-1}$  для области спектра 0.4—0.9 мкм и  $\pm 3$  см $^{-1}$  для области спектра 0.9—3.0 мкм. Спектры поглощения, люминесценции и схема штарковского расщепления нижайших термов иона  $\text{Er}^{3+}$  в YLF приведены на рис. 2. Все штарковские компоненты термов иона  $\text{Er}^{3+}$  в YLF представляют собой крамерсовы дублеты. Число наблюдаемых уровней для всех изученных термов не превышает числа  $2J+1$  — максимально возможного для центра симметрии  $S_4$ .

В табл. 3 приведены сравнительные данные штарковского расщепления термов иона  $\text{Er}^{3+}$ , полученные нами и в работах [1, 28]. Из табл. 3 видно, что значения штарковского расщепления термов  $^4I_{15/2}$  и  $^4I_{13/2}$ , полученные нами, с хорошей точностью совпадают с данными [28]. Расщепление термов  $^4I_{11/2}$  и  $^4I_{9/2}$ , полученное в [1], отличается от данных настоящей работы отсутствием уровня С6 ( $\Delta E=133$  см $^{-1}$ , терм  $^4I_{9/2}$ ) и положением уровня D2 ( $\Delta E=180$  см $^{-1}$ , терм  $^4I_{9/2}$ ). Из приведенных данных следует, что значения параметров кристаллического поля, рассчитанные, по данным [1], авторами этой работы, а также значения параметров, полученные в работе [29], по данным [1], следует считать ошибочными. Более правильные значения параметров кристаллического поля для YLF- $\text{Er}^{3+}$  были получены авторами [30], использовавшими экспериментальные данные [26]. Эти значения равны:  $B_2^0=190$ ,  $B_4^0=-80$ ,  $B_6^0=-23$ ,  $B_4^4=-1020$ ,  $B_6^4=-727$  и  $I(B_6^0)=70$  см $^{-1}$ . Получение детальной схемы штарковского расщепления мультиплетов иона  $\text{Er}^{3+}$  в YLF позволило идентифицировать наблюдаемые генерационные переходы с переходами между компонентами мультиплетов. В табл. 2 звездочкой отмечены линии, на которых наблюдалось вынужденное излучение.

Генерация вынужденного излучения на кристаллах YLF- $\text{Er}^{3+}$  наблюдалась ранее на длинах волн 2.8 и 0.85 мкм [8, 9]. Нами получена генерация вынужденного излучения на переходах  $^4S_{3/2} \rightarrow ^4I_{9/2}$  ( $\sim 1.7$  мкм),  $^4S_{3/2} \rightarrow ^4I_{11/2}$  ( $\sim 1.2$  мкм),  $^4S_{3/2} \rightarrow ^4I_{13/2}$  ( $\sim 0.85$  мкм) и  $^4I_{11/2} \rightarrow ^4I_{13/2}$  ( $\sim 2.9$  мкм). На рис. 1 эти переходы указаны жирными стрелками.



Таблица 1  
Спектры поглощения кристалла  $\text{LiYF}_4\text{-Er}^{3+}$  при 4.2 К

Переход	$\nu$ , $\text{см}^{-1}$	$\Delta E = E_0 - E_i$ , $\text{см}^{-1}$	Поляриза- ция	Идентификация перехода
${}^4I_{15/2} \rightarrow {}^4F_{7/2}$	20674	98		A1-H3
	20666	90		A1-H2
	20576	0		A1-H1
${}^4I_{15/2} \rightarrow {}^2H_{11/2}$	19346	189		A1-G6
	19330	173		A1-G5
	19313	156		A1-G4
	19228	71		A1-G3
	19176	19		A1-G2
	19157	0		A1-G1
${}^4I_{15/2} \rightarrow {}^4S_{3/2}$	18497	59		A1-F2
	18438	0		A1-F1
${}^4I_{15/2} \rightarrow {}^4F_{9/2}$	15477	163		A1-E5
	15425	111		A1-E4
	15349	35		A1-E3
	15333	19		A1-E2
	15314	0		A1-E1
${}^4I_{15/2} \rightarrow {}^4I_{9/2}$	12671	302		A1-D4
	12575	206		A1-D3
	12549	180		A1-D2
	12369	0		A1-D1
${}^4I_{15/2} \rightarrow {}^4I_{11/2}$	10455	133		A1-C6
	10320	92		A1-C5
	10303	81		A1-C4
	10285	63		A1-C3
	10239	17		A1-C2
	10222	0		A1-C1
${}^4I_{15/2} \rightarrow {}^4I_{13/2}$	6739	203	$\sigma$	A1-B7
	6725	189	$\pi$	A1-B6
	6696	160	$\sigma$	A1-B5
	6672	136	$\pi$	A1-B4
	6579	43	$\sigma$	A1-B3
	6540	4	$\sigma$	A1-B2
	6536	0	$\pi\pi$	A1-B1

Таблица 2  
Спектры люминесценции кристалла  $\text{LiYF}_4\text{-Er}^{3+}$  при 4.2 К

Переход	$\nu$ , $\text{см}^{-1}$	$\Delta E = E_0 - E_i$ , $\text{см}^{-1}$	Поляриза- ция	Идентификация перехода
${}^4I_{15/2} \rightarrow {}^4I_{15/2}$	6184	352	$\pi$	B1-A8
	6211	325	$\pi\pi$	B1-A7
	6250	286	$\sigma$	B1-A6
	6289	247	$\sigma$	B1-A5
	6483	53	$\sigma$	B1-A4
	6513	23	$\pi$	B1-A3
	6521	15	$\sigma$	B1-A2
	6536	0	—	B1-A1
${}^4I_{11/2} \rightarrow {}^4I_{15/2}$	9872	350	$\pi\sigma$	C1-A8
	9896	326	$\pi\sigma$	C1-A7
	9930	292	$\sigma$	C1-A6
	10168	54	$\sigma$	C1-A4
	10195	27	$\pi$	C1-A3
	10205	17	$\sigma$	C1-A2
10222	0	$\pi\pi$	C1-A1	
${}^4F_{9/2} \rightarrow {}^4I_{15/2}$	14959	355	$\sigma\pi$	E1-A8
	14987	327	$\sigma\pi$	E1-A7
	15286	28	$\sigma\pi$	E1-A3
	15314	0	$\sigma\pi$	E1-A1



Таблица 2 (продолжение)

Переход	$\nu$ , $\text{см}^{-1}$	$\Delta E = E_0 - E_i$ , $\text{см}^{-1}$	Поляризация	Идентификация перехода
${}^4S_{3/2} \rightarrow {}^4I_{13/2}$	18081	357	$\sigma$	F1-A8
	18146	289	$\pi$	F1-A6
	18184	254	$\pi$	F1-A5
	18381	57	$\pi$	F1-A4
	18410	28	$\sigma$	F1-A3
	18421	17	$\pi$	F1-A2
	18438	0	$\sigma$	F1-A1
${}^4S_{3/2} \rightarrow {}^4I_{13/2}$	11701	202	$\sigma$	F1-B7
	11714*	189	$\sigma\pi$	F1-B6
	11766*	137	$\pi$	F1-B4
	11858	45	$\sigma$	F1-B3
	11903	0	$\pi$	F1-B1
${}^4S_{3/2} \rightarrow {}^4I_{9/2}$	5775*	297		F1-D4
	5869*	203		F1-D3
	5896	177		F1-D2
	6072	0		F1-D1
${}^2H_{9/2} \rightarrow {}^4I_{13/2}$	17836	163		K1-B5
	17860	139		K1-B4
	17955	44		K1-B3
	17995	4		K1-B2
	17999	0		K1-B1

77 К

${}^4I_{11/2} \rightarrow {}^4I_{13/2}$	3484*	202		C1-B7
	3505	181		C1-B6
	3547	139		C1-B4
	3566	120		C2-B4
	3610	76		C3-B4
	3640*	46		C1-B3
	3686	0		C1-B1
	3752	-66		C3-B1
${}^4S_{3/2} \rightarrow {}^4I_{11/2}$	8125*	91		F1-C5

Длины волн вынужденного излучения и пороговые значения энергий накачки при соответствующей температуре приведены в табл. 4.

Температурные зависимости пороговой энергии накачки, полученные при использовании селективного резонатора, иллюстрируются рис. 3. Как и следовало ожидать, пороговые энергии накачки в меньшей степени зависят от температуры переходов, оканчивающихся на верхних штарковских компонентах соответствующих термов ( $\lambda_{\text{рез.}} = 1.73$  мкм, переход F1-D4,  $\Delta E = 300$   $\text{см}^{-1}$ ;  $\lambda = 2.87$  мкм, переход C1-B7,  $\Delta E = 202$   $\text{см}^{-1}$ ). Крутая температурная зависимость линии  $\lambda = 1.647$  мкм (переход F1-D1,  $\Delta E = 0$ ) обусловлена, по-видимому, тем обстоятельством, что с повышением температуры возрастают потери на этой длине волны за счет электронно-колебательного перехода  ${}^4I_{13/2} \rightarrow {}^4I_{11/2}$  (переход B1-A8 +  $h\nu_{\text{фонона}} = 109$   $\text{см}^{-1}$ ). Из спектра поглощения YLF-Er<sup>3+</sup> при 300 К следует, что на  $\lambda = 1.647$  мкм имеется заметное поглощение, которое в условиях почти глухого резонатора приводит к значительному росту активных потерь и срыву генерации на этой длине волны. Большое число излучательных переходов между термами в ионе Er<sup>3+</sup> позволило, варьируя селективность резонатора, получить одновременную многочастотную генерацию на переходах  ${}^4S_{3/2} \rightarrow {}^4I_{13/2}$  ( $\lambda = 0.8535$  и  $0.8503$  мкм) и  ${}^4I_{11/2} \rightarrow {}^4I_{13/2}$  ( $\lambda = 2.87$  мкм) и на переходах  ${}^4S_{3/2} \rightarrow {}^4I_{11/2}$  ( $\lambda = 1.2308$  мкм) и  ${}^4I_{11/2} \rightarrow {}^4I_{13/2}$  ( $\lambda = 2.74$  мкм), а также последовательную («каскадную») генерацию на переходах  ${}^4S_{3/2} \rightarrow {}^4I_{11/2}$  и  ${}^4I_{11/2} \rightarrow {}^4I_{13/2}$  ( $\lambda = 1.23$  и  $2.87$  мкм). Каскадная генерация, протекающая по схеме  ${}^4S_{3/2} \xrightarrow{(1.23 \text{ мкм})} {}^4I_{11/2} \xrightarrow{(2.87 \text{ мкм})} {}^4I_{13/2}$ , иллюстрируется



рис. 4. В резонаторе с зеркалами, имеющими коэффициент отражения в области  $\sim 1.2$  мкм  $r \sim 90\%$  и в области длин волн  $\sim 2.4$  мкм  $r \sim 99\%$ , наблюдалась генерация вынужденного излучения одновременно на  $\lambda = 1.2308$

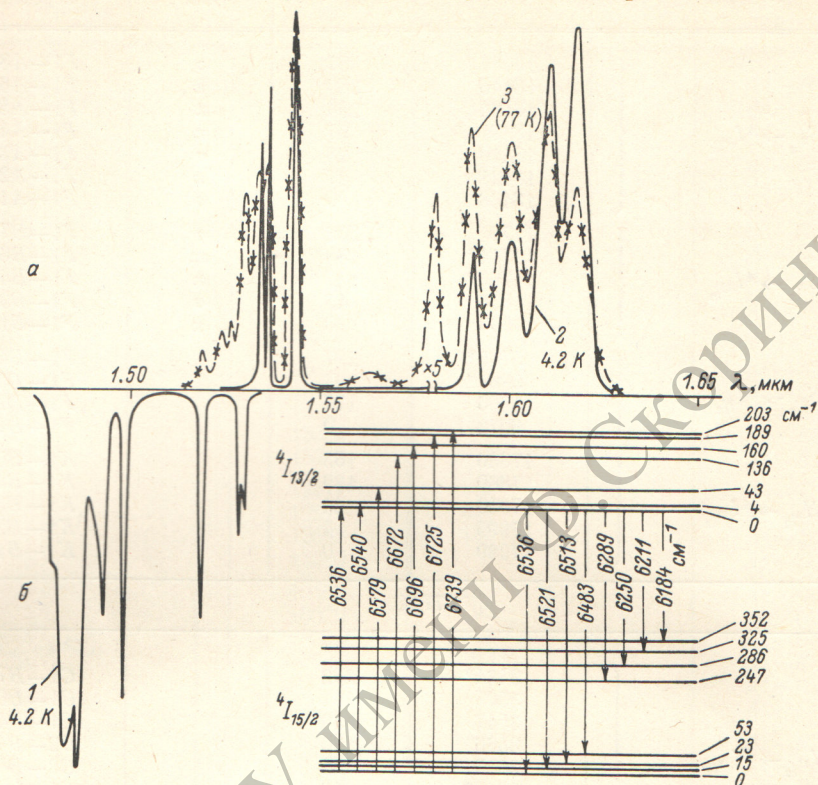


Рис. 2.

а — спектры поглощения (1) и люминесценции (2, 3) кристаллов  $\text{LiYF}_4:\text{Er}^{3+}$  (2%). 1, 2 —  $T=4.2$  К. 3 —  $T=77$  К; б — схема Starkовского расщепления термов  $^4I_{13/2}$  и  $^4I_{15/2}$  и переходов между ними для иона  $\text{Er}^{3+}$  в кристалле  $\text{LiYF}_4$ . Цифрами на стрелках указаны частоты линий поглощения и люминесценции в обратных сантиметрах.

и 2.74 мкм (переходы  $F1-C5$  и  $C1-B3$  соответственно), а затем, после окончания генерации на 1.2308 мкм появлялась генерация на  $\lambda = 2.87$  мкм (переход  $C1-B7$ ). На осциллограммах рис. 4 верхним лучом регистриро-

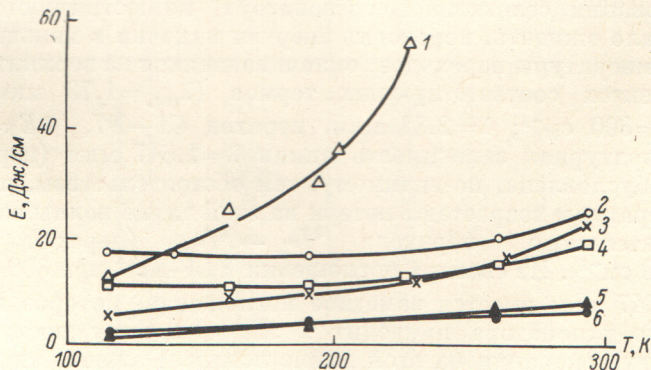


Рис. 3. Температурные зависимости пороговой энергии накачки для различных линий генерации кристалла  $\text{LiYF}_4:\text{Er}^{3+}$  в селективном резонаторе.

1 —  $\lambda=1.6470$ , 2 —  $\lambda=0.8535$ , 3 —  $\lambda=2.87$ , 4 —  $\lambda=1.7320$ , 5 —  $\lambda=1.2308$ , 6 —  $\lambda=0.8503$  мкм.

вался интегральный по спектру сигнал вынужденного излучения, а нижним лучом — отдельные линии генерации: 1.2308 (рис. 4, а), 2.74 (рис. 4, б) и 2.87 мкм (рис. 4, в).



Таблица 3

Переход	Частота O—O-линии, см <sup>-1</sup>	Расщепление конечного термина ΔE, см <sup>-1</sup>
${}^4I_{13/2} \rightarrow {}^4I_{15/2}$	6536	0, 15, 23, 53, 247, 286, 325, 352
${}^4I_{11/2} \rightarrow {}^4I_{15/2}$	10222	0, 17, 27, 54, 292, 326, 350
${}^4F_{9/2} \rightarrow {}^4I_{15/2}$	15314	0, 28, 327, 350
${}^4S_{3/2} \rightarrow {}^4I_{15/2}$	18438	0, 17, 28.57, 254, 289, 357
${}^4S_{3/2} \rightarrow {}^4I_{15/2}$ [1]	18433.2	0, 17, 27.8, 54.9, 206.3, 239.8, 261, 279.8
${}^4I_{13/2} \rightarrow {}^4I_{15/2}$ [26]	6534.65	
${}^4I_{11/2} \rightarrow {}^4I_{15/2}$ [26]	10217.85	0, 17.25, 28.97, 55.70, 252, 291, 320, 347
${}^4I_{15/2} \rightarrow {}^4I_{13/2}$	6536	0, 4, 43, 136, 160, 189, 203
${}^4I_{11/2} \rightarrow {}^4I_{13/2}$	3686	0, 46, 139, 181, 202
${}^4I_{9/2} \rightarrow {}^4I_{13/2}$	11903	0, 45, 137, 189, 202
${}^2H_{9/2} \rightarrow {}^4I_{13/2}$	17999	0, 4, 44, 139, 163
${}^4S_{3/2} \rightarrow {}^4I_{13/2}$ [26]	11897.79	0, 3.93, 44.33, 139.28, 162.59, 188.95, 202.9
${}^4I_{15/2} \rightarrow {}^4I_{13/2}$	6510.7	0, 3.3, 43.4, 137.1, 160.5, 188.5, 203.1
${}^4I_{15/2} \rightarrow {}^4I_{11/2}$	10222	0, 17, 63, 81, 92, 133
${}^4I_{15/2} \rightarrow {}^4I_{11/2}$ [1]	10222	0, 13, 61, 67, 93
${}^4I_{15/2} \rightarrow {}^4I_{9/2}$	12369	0, 180, 206, 302
${}^4S_{3/2} \rightarrow {}^4I_{9/2}$	6072	0, 177, 203, 297
${}^4I_{15/2} \rightarrow {}^4I_{9/2}$ [1]	12360	0, 106, 205, 305
${}^4I_{15/2} \rightarrow {}^4I_{9/2}$	15314	0, 19, 35, 111, 163
${}^4I_{13/2} \rightarrow {}^4I_{9/2}$ [1]	15315.6	0, 17, 33.4, 110, 161.3
${}^4I_{15/2} \rightarrow {}^4S_{3/2}$ [1]	18438	0, 59
${}^4I_{15/2} \rightarrow {}^4S_{3/2}$	18433.5	0, 60.2
${}^4I_{15/2} \rightarrow {}^2H_{11/2}$	19157	0, 19, 71, 156, 173, 189
${}^4I_{15/2} \rightarrow {}^2H_{11/2}$ [1]	19153.7	0, 23.3, 70.1, 153.2, 168.5, 184.8
${}^4I_{15/2} \rightarrow {}^4F_{7/2}$	20576	0, 90, 98
${}^4I_{15/2} \rightarrow {}^4F_{7/2}$	20565.3	0, 91.4, 100

Аналогичным образом при соответствующем подборе областей отражения зеркал резонатора можно осуществить каскадную генерацию по схеме  $({}^4I_{3/2} \xrightarrow{(1.72 \text{ мкм})} {}^4I_{9/2}) \sim ({}^4I_{11/2} \xrightarrow{(2.87 \text{ мкм})} {}^4I_{13/2})$ .

Заметим, что для получения непрерывной генерации и генерации в частотном режиме по приведенным выше схемам желательно обеспечить быструю релаксацию с термина  ${}^4I_{15/2}$ . С этой целью обычно используется

Таблица 4

Переход	$\lambda_{\text{ген.}}, \text{ мкм}$	$E_{\text{пор.}}, \text{ Дж/см}$	T, K	$\tau, \text{ мс}$
${}^4S_{3/2} \rightarrow {}^4I_{9/2}$	{ 1.6470	12	110	0.7
	{ 1.7320	11	110	0.7
	{ 1.7320	19	300	0.2
${}^4S_{3/2} \rightarrow {}^4I_{11/2}$	{ 1.2308	1.5	110	0.7
	{ 1.2308	8.0	300	0.2
${}^4S_{3/2} \rightarrow {}^4I_{13/2}$	{ 0.8503	2.0	110	0.7
	{ 0.8535	5.0	110	0.7
	{ 0.8503	6.5	300	0.2
${}^4I_{11/2} \rightarrow {}^4I_{13/2}$	{ 2.870	18	110	10
	{ 2.870	26	300	10



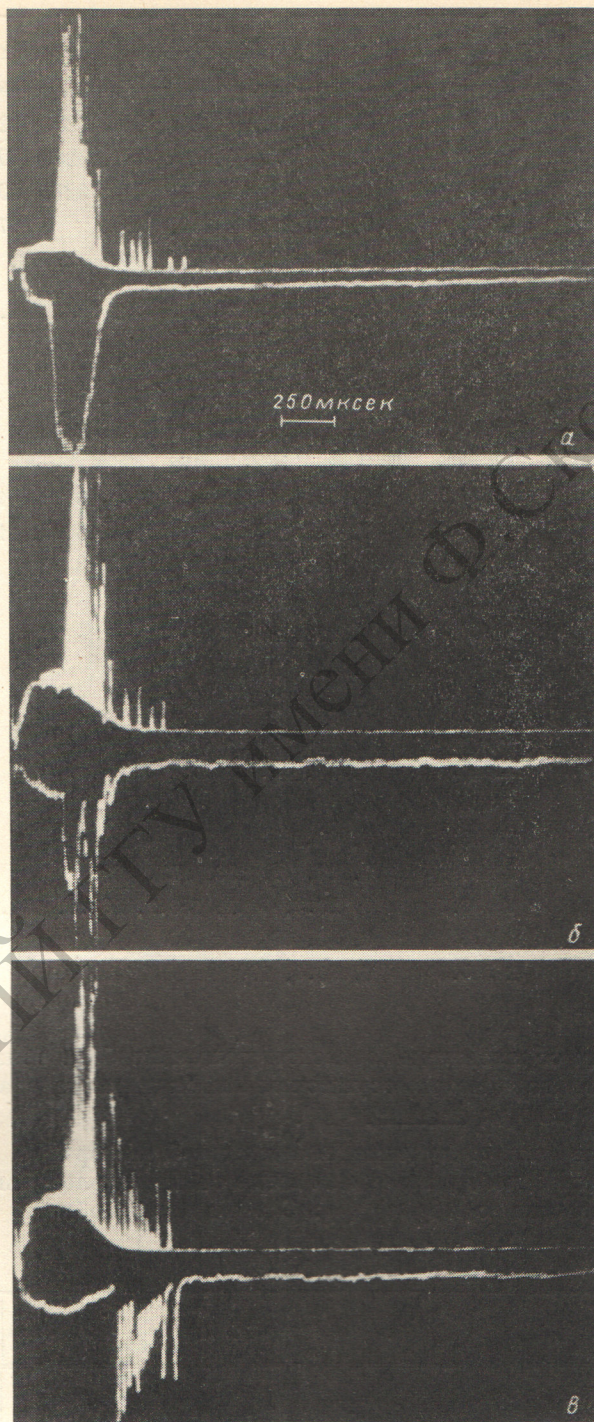


Рис. 4. Осциллограммы импульсов генерации кристалла  $\text{LiYF-Er}^{3+}$  в неселективном резонаторе с  $R_1$  ( $\lambda \sim 1.2$  мкм)  $\approx 90\%$ ;  $R_1$  ( $\lambda > 2.4$  мкм)  $\approx 99\%$ ;  $R_2$  ( $\lambda = 1.2 - 2.4$  мкм)  $\approx 99.5 + 0.5\%$ .  $T = 116$  К.

Верхний луч на всех осциллограммах — импульс генерации без спектрального разложения. Нижний луч осциллограмм: а —  $\lambda = 1.23$ , б —  $2.74$ , в —  $2.87$  мкм. Длительность развертки 250 мкс/дел.



соактивация кристаллов другими РЗИ, например  $\text{Pr}^{3+}$ ,  $\text{Ho}^{3+}$ ,  $\text{Tb}^{3+}$ ,  $\text{Tm}^{3+}$ . Для получения многочастотной и каскадной генерации на  $\text{YLF-Er}^{3+}$  желательно использовать селективное тушение только терма  ${}^4I_{13/2}$ , что можно осуществить лишь с помощью иона  $\text{Tb}^{3+}$ , не имеющего энергетических уровней в рабочем для иона  $\text{Er}^{3+}$  интервале от 7000 до 20 000  $\text{см}^{-1}$  и, следовательно, не тушащего термы  ${}^4S_{3/2}$  и  ${}^4I_{11/2}$  иона  $\text{Er}^{3+}$ .

Генерация в частотном режиме была получена на переходе  ${}^4S_{3/2} \rightarrow {}^4I_{13/2}$  ( $\lambda = 0.8503$  мкм) при комнатной температуре в кварцевом осветителе с водяным охлаждением при накачке лампой ИСП-500 в резонаторе, образованном призмой и стопой на образце  $\text{YLF-Er}^{3+}$   $\phi 5 \times 50$  мм<sup>2</sup>.

Таким образом, система  $\text{YLF-Er}^{3+}$  наряду с  $\text{YLF-Ho}$  [11] представляется весьма перспективной для получения многочастотной и каскадной генерации вынужденного излучения.

#### Литература

- [1] M. R. Brown, K. G. Roots, W. A. Shand. *J. Phys. C.*, 2, 593, 1969.
- [2] D. Singupta, J. O. Artman. *J. Chem. Phys.*, 53, 838, 1970.
- [3] H. Vishwamitter, S. P. Puri. *J. Phys. C.*, 7, 1337, 1974.
- [4] H. P. Jenssen, A. Linz, R. P. Leavitt, C. A. Morrison, D. E. Wortman. *Phys. Rev. B*, 11, 92, 1975.
- [5] N. Karayianis, D. E. Wortman, H. P. Jenssen. *J. Phys. Chem. Solids*, 37, 675, 1976.
- [6] Ш. Н. Гифейсман, А. М. Ткачук, В. В. Призмак. *Опт. и спектр.*, 44, 120, 1978.
- [7] E. J. Sharp, D. J. Horowitz, J. E. Miller. *J. Appl. Phys.*, 44, 5399, 1973.
- [8] H. P. Jenssen, D. Castleberry, D. Gabbe, A. Linz. *IEEE, J. Quant. Electr.*, 9, 665, 1973.
- [9] E. P. Chicklis, C. S. Naiman, A. Linz. *Abstract of technical papers VII Internat. Quant. Electr. Conf.* p. 17, 1972, Montreal.
- [10] E. P. Chicklis. *Laser Focus*, August, p. 30, 1973.
- [11] И. Г. Подколзина, А. М. Ткачук, В. А. Федоров, П. П. Теофилов. *Опт. и спектр.*, 39, 15, 1976.
- [12] R. E. Thoma, G. D. Brunton, R. A. Penneman, T. K. Keenan. *Inorg. Chem.*, 9, 1096, 1970.
- [13] D. E. Wortman, C. A. Morrison, R. T. Farrar. *Phys. Rev.*, 62, 1329, 1972.
- [14] D. E. Wortman, D. Sanders. *J. Chem. Phys.*, 51, 1247, 1970.
- [15] А. М. Морозов, И. Г. Подколзина, А. М. Ткачук, В. А. Федоров, П. П. Теофилов. *Опт. и спектр.*, 39, 605, 1975.
- [16] R. L. Remski, L. T. James Jr., K. H. Gooss, B. DiBartolo, A. Linz. *IEEE, J. Quant. Electr.*, 5, 214, 1969.
- [17] E. P. Chicklis, C. S. Naiman, R. C. Folweiler, D. R. Gabbe, H. P. Jenssen, A. Linz. *Appl. Phys. Lett.*, 19, 119, 1971.
- [18] E. P. Chicklis, C. S. Naiman, R. C. Folweiler, J. C. Doherty. *IEEE, J. Quant. Electr.*, 8, 225, 1972.
- [19] D. A. Jones, B. Cockayne, R. A. Clay, P. A. Forrester. *J. Cryst. Growth*, 30, 21, 1975.
- [20] D. P. Devor. *IEEE, J. Quant. Electr.*, 11, 13D, 1975.
- [21] P. S. Gillespie, R. L. Armstrong, K. O. White. *Appl. Opt.*, 15, 865, 1976.
- [22] D. Gabbe, A. L. Harmer. *J. Cryst. Growth*, 3, 544, 1968.
- [23] W. A. Shand. *J. Cryst. Growth*, 5, 143, 1969.
- [24] И. А. Иванова, А. М. Морозов, М. А. Петрова, И. Г. Подколзина, П. П. Теофилов. *Неорг. матер.*, 11, 2175, 1975.
- [25] R. E. Thoma, C. E. Weaver, H. A. Friedman, H. Inseley, L. A. Harris, H. A. Yakel. *J. Phys. Chem.*, 65, 1906, 1961.
- [26] S. M. Kulra, J. Phys. Chem. Solids, 36, 1317, 1975.
- [27] Н. А. Толстой, А. М. Ткачук. *Опт. и спектр.*, 6, 659, 1959.
- [28] А. О. Иванов, И. В. Мочалов, А. М. Ткачук, В. А. Федоров, П. П. Теофилов. *Квант. электр.*, 2, 186, 1975.
- [29] N. Karayianis. *J. Phys. Chem. Solids*, 32, 2385, 1971.
- [30] М. П. Давыдова, С. Б. Зданович, В. Н. Казаков, С. Л. Кораблева, А. Л. Столов. *Опт. и спектр.*, 42, 577, 1977.

Поступило в Редакцию 10 августа 1977 г.