

СПЕКТРОСКОПИЧЕСКИЕ ВОЗМОЖНОСТИ КРИСТАЛЛОВ $\text{LaF}_3:\text{Er}^{3+}$ ДЛЯ КАСКАДНЫХ MIR ЛАЗЕРОВ

Г.Г. ДЕМИРХАНЫАН^{1,2*}, Р.Б. КОСТАНЫАН²

¹Армянский государственный педагогический университет
им. Абовяна, Ереван, Армения

²Институт физических исследований НАН Армении, Аштарак, Армения

*e-mail: gdemirkhanyan@gmail.com

(Поступила в редакцию 3 июля 2020 г.)

Проведено теоретическое исследование спектроскопических свойств низкофононного кристалла $\text{LaF}_3:\text{Er}^{3+}$, определяющее их лазерные возможности в средней инфракрасной области длин волн (2.62–4.97 мкм). Построены волновые функции штарковских подуровней мультиплетов $^4\text{S}_{3/2}$, $^4\text{F}_{9/2}$, $^4\text{I}_{9/2}$, $^4\text{I}_{11/2}$, и $^4\text{I}_{13/2}$ иона Er^{3+} в LSJM-представлении. Вычислены силы линий косвенных электродипольных и магнитодипольных межштарковских переходов, рассчитаны основные спектроскопические и кинетические характеристики оптического спектра примесного иона.

1. Введение

Кристаллы фторида лантана, легированные ионами группы редких земель ($\text{LaF}_3:\text{Er}^{3+}$), имея низкочастотный фононный спектр ($\omega_m \cong 300 \div 350 \text{ cm}^{-1}$), являются одним из перспективных кандидатов лазерных материалов для получения генерации в средней инфракрасной (MIR) области длин волн [1]. Целенаправленный поиск материалов для MIR – лазеров имеет особое практическое значение, поскольку они являются составной частью оптической лидарной системы. Последний может быть использован для сбора важных данных о химическом составе атмосферы: выявления концентраций, содержащихся в атмосфере токсичных соединений CO_2 , CH_4 , CO , NO_2 , SO_2 и т.д. [2]. Оптические спектры примесного поглощения и излучения кристалла $\text{LaF}_3:\text{Er}^{3+}$ исследованы в [3–6]. В частности, в [4] определены энергетические уровни примесного иона (Рис.1), проведен стандартный анализ Джадда–Офельта спектров поглощения, определены параметры интенсивности ($\Omega_2 = 1.07 \times 10^{-20} \text{ cm}^2$, $\Omega_4 = 0.28 \times 10^{-20} \text{ cm}^2$, $\Omega_6 = 0.63 \times 10^{-20} \text{ cm}^2$). В [3] вычислены вероятности косвенных электродипольных (КЭД) и магнитодипольных (МД) межмультиплетных переходов, определены времена жизни возбужденных мультиплетов.

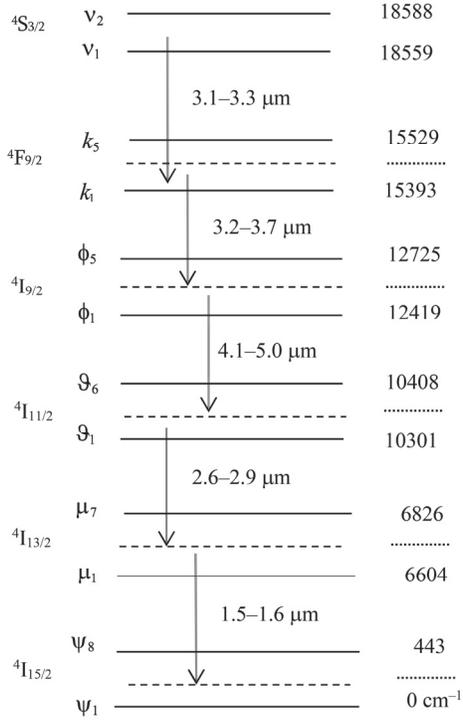


Рис.1. Схема энергетических уровней LaF₃ –Er³⁺.

В настоящей работе приведены результаты количественных вычислений основных спектроскопических характеристик кристалла LaF₃:Er³⁺, определяющие их лазерный потенциал в диапазоне длин волн 2.62–4.97 мкм. Расчеты проведены с учетом штарковской структуры оптического спектра примесного иона.

2. Волновые функции штарковских подуровней

Как известно, в кристаллическом поле (КП) вырожденные мультиплетные состояния свободного иона Er³⁺ расщепляются на крамерсовские дублеты, при этом волновая функция v -ого штарковского состояния, в приближении слабого КП (LSJM представление), строится в виде линейной комбинации

$$|v\rangle = \sum_M a_{JM}^{(v)} |LSJM\rangle, \quad (1)$$

где L и S – угловой и спиновый моменты, M – проекция полного углового момента J , $a_{JM}^{(v)}$ – численные коэффициенты. Полагая, что в матрице кристалла LaF₃:Er³⁺ точечная симметрия ближайшего окружения примесного иона D_{3h} [6], гамильтониан КП, в рамках приближения точечных зарядов, можно записать в виде:

$$\hat{H}_{CF} = \alpha_J B_{20} \hat{O}_{20} + \beta_J B_{40} \hat{O}_{40} + \gamma_J B_{60} \hat{O}_{60} + \gamma_J B_{60} \hat{O}_{60}, \quad (2)$$

где α_J , β_J и γ_J – постоянные Стивенса, значения которых для иона Er^{3+} приведены в приложении [8], B_{kq} – параметры КП, численные значения которых, определенные из условия наилучшего согласия расчетных и экспериментальных значений штарковских расщеплений мультиплетных состояний, приведены в [6]: $B_{20} = 141$, $B_{40} = 145$, $B_{60} = 48.3$, $B_{66} = 430$ (в см^{-1}), \widehat{O}_{kq} – эквивалентные операторы, матричные элементы которых табулированы в [9]. Волновые функции штарковских состояний, построенные путем внутримultipлетной диагонализации потенциала КП (2) на основе базисных функций неприводимых представлений точечной группы D_{3h} [7], приведены в приложении.

3. Спектроскопические характеристики кристалла $\text{LaF}_3:\text{Er}^{3+}$

При теоретическом исследовании спектроскопических свойств примесных кристаллов наиболее удобной величиной является сила линии межштарковского перехода $i \rightarrow f$ [10]:

$$S_{i \rightarrow f} = \chi_{ed} S_{i \rightarrow f}^{ed} + \chi_{md} S_{i \rightarrow f}^{md}, \quad (3)$$

где первое слагаемое соответствует КЭД

$$S_{i \rightarrow f}^{(ied)} = \sum_{t=2,4,6} \Omega_t A_t^{(ied)}(i \rightarrow f) \left| \langle f \| U_t \| i \rangle \right|^2, \quad (4)$$

а второе – МД переходам

$$S_{i \rightarrow f}^{(md)} = A_{i \rightarrow f}^{(md)} \cdot S_{md}. \quad (5)$$

В (3)–(5) введены следующие обозначения: $\chi_{ed} = n(n^2 + 2)^2/9$ и $\chi_{md} = n^3$ – поправки локального КП (n – коэффициент преломления на длине перехода), Ω_t ($t = 2, 4, 6$) – параметры интенсивности, $\langle i \| u_t \| f \rangle$ – приведенный матричный элемент неприводимого единичного оператора u_t ранга t , явное выражение которого приведено в работах [10, 11], $A_t^{(ied)}(i \rightarrow f)$ и $A_{i \rightarrow f}^{(md)}$ – коэффициенты межштарковского КЭД и МД переходов [11–13]:

$$A_t^{(ied)}(i \rightarrow f) = \sum_{m=-t}^t \left| \sum_{M_i, M_f} (-1)^{J_f - M_f} a_{J_f, M_f}^{*(f)} a_{J_i, M_i}^{(i)} \begin{pmatrix} J_f & t & J_i \\ -M_f & m & M_i \end{pmatrix} \right|^2, \quad (6)$$

$$A_{i \rightarrow f}^{(md)} = \frac{1}{2J_f + 1} \cdot \sum_m \left| \sum_{M_i, M_f} (-1)^{J_f - M_f} a_{J_f, M_f}^{*(f)} a_{J_i, M_i}^{(i)} \cdot \begin{pmatrix} J_f & 1 & J_i \\ -M_f & m & M_i \end{pmatrix} \right|^2, \quad (7)$$

S_{md} – сила линии межmultipлетного МД перехода [3, 11], $\begin{pmatrix} \cdot & \cdot & \cdot \\ \cdot & \cdot & \cdot \end{pmatrix}$ – $3j$ символ.

Приведенные матричные элементы рассчитаны, используя вычисленные в [8] значения генеалогических коэффициентов иона Er^{3+} ($4f^{11}$):

$$\begin{aligned} \left| \langle {}^4I_{11/2} \| u_2 \| {}^4I_{13/2} \rangle \right|^2 &= 0.0332, & \left| \langle {}^4I_{11/2} \| u_4 \| {}^4I_{13/2} \rangle \right|^2 &= 0.1706, \\ \left| \langle {}^4I_{11/2} \| u_6 \| {}^4I_{13/2} \rangle \right|^2 &= 1.0915, \end{aligned} \quad (8a)$$

$$\begin{aligned} \left| \langle {}^4I_{9/2} \| u_2 \| {}^4I_{11/2} \rangle \right|^2 &= 0.0021, & \left| \langle {}^4I_{9/2} \| u_4 \| {}^4I_{11/2} \rangle \right|^2 &= 0.0690, \\ \left| \langle {}^4I_{9/2} \| u_6 \| {}^4I_{11/2} \rangle \right|^2 &= 0.1520, \end{aligned} \quad (8b)$$

$$\begin{aligned} \left| \langle {}^4F_{9/2} \| u_2 \| {}^4I_{9/2} \rangle \right|^2 &= 0.122, & \left| \langle {}^4F_{9/2} \| u_4 \| {}^4I_{9/2} \rangle \right|^2 &= 0.0061, \\ \left| \langle {}^4F_{9/2} \| u_6 \| {}^4I_{9/2} \rangle \right|^2 &= 0.0203, \end{aligned} \quad (8c)$$

$$\begin{aligned} \left| \langle {}^4S_{3/2} \| u_2 \| {}^4F_{9/2} \rangle \right|^2 &= 0, & \left| \langle {}^4S_{3/2} \| u_4 \| {}^4F_{9/2} \rangle \right|^2 &= 0.0001, \\ \left| \langle {}^4S_{3/2} \| u_6 \| {}^4F_{9/2} \rangle \right|^2 &= 0.0228. \end{aligned} \quad (8d)$$

Значения сил линий, поперечных сечений и вероятностей спонтанных межштарковских переходов $\nu_i ({}^4S_{3/2}) \rightarrow k_f ({}^4F_{9/2})$, $k_i ({}^4F_{9/2}) \rightarrow \phi_f ({}^4I_{9/2})$, $\phi_i ({}^4I_{9/2}) \rightarrow \vartheta_f ({}^4I_{11/2})$ и $\vartheta_i ({}^4I_{11/2}) \rightarrow \mu_f ({}^4I_{13/2})$, рассчитанные при $n = 1.6$, приведены в табл. 1–4.

Из Табл.1 видно, что сила межмультиплетного перехода ${}^4S_{3/2} \rightarrow {}^4F_{9/2}$ мала ($5.34 \times 10^{-22} \text{ cm}^2$), чем и обусловлен пренебрежимо малый вклад этого перехода в процесс распада уровня ${}^4S_{3/2}$ [3]. Сила КЭД межмультиплетного

Табл.1. Спектроскопические характеристики спектральных линий межштарковских переходов $\nu ({}^4S_{3/2}) \rightarrow k ({}^4F_{9/2})$

переход	λ , мкм	$S_{i \rightarrow f}$, 10^{-23} cm^2	* $\sigma \Gamma_{cm^{-1}}$, 10^{-20} cm^2	$A_{i \rightarrow f}$, s^{-1}
$\nu_1 \rightarrow k_1$	3.159	3.6238	0.2809	0.083
$\rightarrow k_2$	3.205	3.2645	0.2437	0.072
$\rightarrow k_3$	3.213	1.3330	0.1015	0.029
$\rightarrow k_4$	3.244	2.5503	0.1928	0.054
$\rightarrow k_5$	3.300	2.5743	0.1921	0.052
$\nu_2 \rightarrow k_1$	3.130	1.6964	0.1329	0.040
$\rightarrow k_2$	3.176	2.0557	0.1574	0.046
$\rightarrow k_3$	3.184	3.9857	0.3060	0.089
$\rightarrow k_4$	3.213	2.7695	0.2063	0.060
$\rightarrow k_5$	3.269	2.8571	0.2139	0.059

* Γ – ширина соответствующей спектральной линии в cm^{-1}

Табл.2. Спектроскопические характеристики спектральных линий межштарковских переходов $k(^4F_{9/2}) \rightarrow \phi(^4I_{9/2})$

переход	λ , мкм	$S_{i \rightarrow f}$, 10^{-23} cm^2	* $\sigma \Gamma_{\text{cm}^{-1}}$, 10^{-20} cm^2	$A_{i \rightarrow f}$ s^{-1}
$k_1 \rightarrow \phi_1$	3.362	11.8418	0.7963	0.2256
$\rightarrow \phi_2$	3.499	19.7870	1.2779	0.3335
$\rightarrow \phi_3$	3.587	12.1305	0.7259	0.1894
$\rightarrow \phi_4$	3.720	4.5166	0.2974	0.0688
$\rightarrow \phi_5$	3.748	4.9003	0.2988	0.0679
$k_2 \rightarrow \phi_1$	3.311	9.6590	0.6594	0.1925
$\rightarrow \phi_2$	3.444	3.8915	0.2558	0.0691
$\rightarrow \phi_3$	3.529	21.2723	1.2935	0.3494
$\rightarrow \phi_4$	3.658	13.1575	1.4646	0.1939
$\rightarrow \phi_5$	3.685	5.6359	0.3461	0.0817
$k_3 \rightarrow \phi_1$	3.303	10.3476	0.7062	0.2062
$\rightarrow \phi_2$	3.434	7.1027	0.4679	0.1272
$\rightarrow \phi_3$	3.519	34.6767	2.2264	0.5745
$\rightarrow \phi_4$	3.647	12.7538	0.7900	0.1895
$\rightarrow \phi_5$	3.674	19.9460	1.2285	0.2916
$k_4 \rightarrow \phi_1$	3.271	15.7104	1.0853	0.3247
$\rightarrow \phi_2$	3.400	8.9743	0.5966	0.1650
$\rightarrow \phi_3$	3.483	8.6124	0.5593	0.1477
$\rightarrow \phi_4$	3.609	20.6727	1.2947	0.3175
$\rightarrow \phi_5$	3.635	13.7814	0.8558	0.2065
$k_5 \rightarrow \phi_1$	3.215	15.9011	1.1155	0.3442
$\rightarrow \phi_2$	3.340	8.7884	0.5946	0.1704
$\rightarrow \phi_3$	3.420	8.1437	0.5381	0.1471
$\rightarrow \phi_4$	3.541	20.7252	1.3207	0.3376
$\rightarrow \phi_5$	3.566	14.2210	0.9006	0.2258

* Γ – ширина соответствующей спектральной линии в cm^{-1}

перехода $^4F_{9/2} \rightarrow ^4I_{9/2}$ составляет $6.54 \times 10^{-21} \text{ cm}^2$, что для вероятности спонтанного радиационного перехода приводит к значению 1.1 s^{-1} (Табл.2), согласующемуся с значением, полученным в [3]: $A_{ed} = 1.2 \text{ s}^{-1}$.

Табл.3. Спектроскопические характеристики спектральных линий межштарковских переходов $\phi(^4I_{9/2}) \rightarrow \mathfrak{G}(^4I_{11/2})$

переход	λ , мкм	$S_{i \rightarrow f}$, 10^{-23} cm^2	* $\sigma \Gamma_{\text{cm}^{-1}}$, 10^{-20} cm^2	$A_{i \rightarrow f}$, s^{-1}
$\phi_1 \rightarrow \mathfrak{G}_1$	4.721	66.2793	3.4488	0.4555
$\rightarrow \mathfrak{G}_2$	4.744	166.4830	8.6254	1.1296
$\rightarrow \mathfrak{G}_3$	4.787	4.3895	0.2254	0.0289
$\rightarrow \mathfrak{G}_4$	4.819	42.0707	2.1483	0.2732
$\rightarrow \mathfrak{G}_5$	4.852	9.4657	0.4797	0.0600
$\rightarrow \mathfrak{G}_6$	4.973	4.2481	0.2099	0.0250
$\phi_2 \rightarrow \mathfrak{G}_1$	4.476	26.0803	1.4294	0.2096
$\rightarrow \mathfrak{G}_2$	4.596	24.0186	1.3135	0.1909
$\rightarrow \mathfrak{G}_3$	4.535	44.4508	2.4091	0.3455
$\rightarrow \mathfrak{G}_4$	4.564	82.3669	4.4352	0.6277
$\rightarrow \mathfrak{G}_5$	4.593	90.2827	4.8296	0.6746
$\rightarrow \mathfrak{G}_6$	4.701	26.9390	1.4076	0.1875
$\phi_3 \rightarrow \mathfrak{G}_1$	4.340	7.8409	0.4434	0.0693
$\rightarrow \mathfrak{G}_2$	4.359	5.0287	0.2829	0.0438
$\rightarrow \mathfrak{G}_3$	4.396	185.8530	10.3694	1.5765
$\rightarrow \mathfrak{G}_4$	4.423	3.1428	0.1746	0.0263
$\rightarrow \mathfrak{G}_5$	4.450	83.7593	4.6209	0.6868
$\rightarrow \mathfrak{G}_6$	4.552	8.4148	0.4544	0.0646
$\phi_4 \rightarrow \mathfrak{G}_1$	4.160	120.5810	7.1160	1.2103
$\rightarrow \mathfrak{G}_2$	4.177	37.1515	2.1817	0.3676
$\rightarrow \mathfrak{G}_3$	4.211	3.5114	0.2047	0.0340
$\rightarrow \mathfrak{G}_4$	4.235	63.8633	3.6971	0.6054
$\rightarrow \mathfrak{G}_5$	4.261	22.2426	1.2817	0.2079
$\rightarrow \mathfrak{G}_6$	4.354	2.4183	0.1363	0.0212
$\phi_5 \rightarrow \mathfrak{G}_1$	4.125	27.6117	1.6407	0.2832
$\rightarrow \mathfrak{G}_2$	4.143	4.5983	0.2724	0.0468
$\rightarrow \mathfrak{G}_3$	4.175	5.9414	0.3497	0.0592
$\rightarrow \mathfrak{G}_4$	4.200	22.0277	1.2871	0.2148
$\rightarrow \mathfrak{G}_5$	4.225	31.3596	1.8238	0.3015
$\rightarrow \mathfrak{G}_6$	4.316	202.6050	11.5128	1.8159

* Γ – ширина соответствующей спектральной линии в cm^{-1}

Табл.4. Спектроскопические характеристики спектральных линий межштарковских переходов $\vartheta(^4I_{11/2}) \rightarrow \mu(^4I_{13/2})$

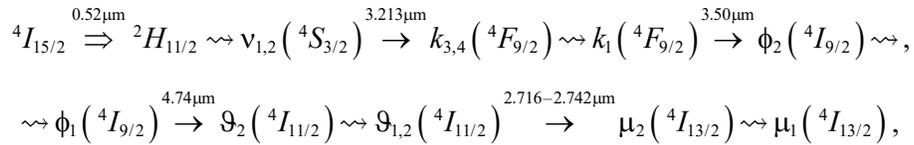
переход	λ , мкм	$S_{i \rightarrow f}$, 10^{-23} cm^2	* $\sigma \Gamma_{\text{cm}^{-1}}$, 10^{-20} cm^2	$A_{i \rightarrow f}$, s^{-1}
$\vartheta_1 \rightarrow \mu_1$	2.705	243.1820	20.4526	8.9275
$\rightarrow \mu_2$	2.724	104.0750	8.6588	3.7371
$\rightarrow \mu_3$	2.754	50.3983	4.1065	1.7511
$\rightarrow \mu_4$	2.777	22.7269	1.8401	0.7644
$\rightarrow \mu_5$	2.795	21.3236	1.7108	0.7095
$\rightarrow \mu_6$	2.819	3.8441	0.3027	0.1239
$\rightarrow \mu_7$	2.878	21.9667	1.6920	0.6645
$\vartheta_2 \rightarrow \mu_1$	2.698	19.2238	1.5785	0.7057
$\rightarrow \mu_2$	2.717	162.9140	13.5351	5.8498
$\rightarrow \mu_3$	2.747	12.9032	1.0395	0.4483
$\rightarrow \mu_4$	2.769	178.6010	14.5659	6.0720
$\rightarrow \mu_5$	2.787	38.4929	3.0897	1.2807
$\rightarrow \mu_6$	2.811	27.0332	2.1520	0.8804
$\rightarrow \mu_7$	2.869	28.3668	2.1938	0.8671
$\vartheta_3 \rightarrow \mu_1$	2.684	75.0195	6.2943	2.8162
$\rightarrow \mu_2$	2.703	40.3716	3.3758	1.4821
$\rightarrow \mu_3$	2.732	212.8830	17.6765	7.5604
$\rightarrow \mu_4$	2.755	26.2279	2.1255	0.9113
$\rightarrow \mu_5$	2.772	84.4569	6.9061	2.8713
$\rightarrow \mu_6$	2.796	18.5120	1.4647	0.6094
$\rightarrow \mu_7$	2.854	10.0976	0.7931	0.3152
$\vartheta_4 \rightarrow \mu_1$	2.674	4.4131	0.3682	0.1675
$\rightarrow \mu_2$	2.693	12.8300	1.0699	0.4763
$\rightarrow \mu_3$	2.722	24.0152	1.9632	0.8623
$\rightarrow \mu_4$	2.744	89.8604	7.4216	3.1565
$\rightarrow \mu_5$	2.762	72.3305	5.9300	2.4859
$\rightarrow \mu_6$	2.786	229.2190	18.5289	7.6265
$\rightarrow \mu_7$	2.843	34.8710	2.7329	1.0002
$\vartheta_5 \rightarrow \mu_1$	2.664	7.6162	0.6385	0.2924
$\rightarrow \mu_2$	2.682	54.2900	4.5359	2.0380
$\rightarrow \mu_3$	2.712	77.5617	6.4740	2.8160
$\rightarrow \mu_4$	2.734	57.1257	4.7432	2.0288
$\rightarrow \mu_5$	2.751	160.1360	13.1543	5.5639
$\rightarrow \mu_6$	2.775	89.4245	7.3273	3.0402
$\rightarrow \mu_7$	2.831	21.3726	1.6796	0.6814
$\vartheta_6 \rightarrow \mu_1$	2.629	51.4941	4.2540	1.9770
$\rightarrow \mu_2$	2.647	26.2572	2.1238	0.9857
$\rightarrow \mu_3$	2.675	23.0353	1.8611	0.8363
$\rightarrow \mu_4$	2.697	26.2061	2.0799	0.9307
$\rightarrow \mu_5$	2.714	23.9994	1.8930	0.8339
$\rightarrow \mu_6$	2.737	32.7152	2.5604	1.1122
$\rightarrow \mu_7$	2.792	284.0730	22.1554	9.0565

* Γ – ширина соответствующей спектральной линии в cm^{-1}

Отметим, что в [3] рассмотрены перемешанные по орбитальным и спиновым моментам мультиплетные состояния с фиксированным значением полного углового момента. В результате снимается запрет на магнитодипольный переход ${}^4F_{9/2} \rightarrow {}^4I_{9/2}$, что приводит к увеличению вероятности суммарного радиационного перехода до $A_{\text{tot}} = 3.6 \text{ с}^{-1}$. Заметим, что аналогичное расхождение возможна во всех случаях, когда межмультиплетные магнитодипольные переходы запрещены. При отсутствии же запрета на магнитодипольные переходы, как в случае ${}^4I_{11/2} \rightarrow {}^4I_{13/2}$ перехода, налицо хорошее совпадение рассчитанного значения вероятности радиационного перехода, 16.2 с^{-1} (Табл.4), с значением, полученным в [3]— 16.1 с^{-1} .

4. Заключение

Полученные значения поперечных сечений и вероятностей спонтанных межштарковских переходов дают возможность выявить лазерные возможности (в том числе, условия эффективной каскадной генерации) кристалла $\text{LaF}_3:\text{Er}^{3+}$. Так при возбуждении на длине волны 0.52 мкм возможна квазитрехуровневая генерация по нижеприведенной схеме



или ее отдельного фрагмента.

Приложение

Табл.5. Коэффициенты Стивенса нижних мультиплетов иона Er^{3+}

${}^{2S+1}L_J$	J	α_J	β_J	γ_J
4I_J	$\frac{15}{2}$	$\frac{2^2}{3^2 \cdot 5^2 \cdot 7}$	$\frac{2}{3^2 \cdot 5 \cdot 7 \cdot 11 \cdot 13}$	$\frac{2^3}{3^3 \cdot 7 \cdot 11^2 \cdot 13^2}$
	$\frac{13}{2}$	$\frac{1}{5^2 \cdot 13}$	$\frac{2^2}{3^2 \cdot 5 \cdot 11^2 \cdot 13}$	$\frac{1}{3^3 \cdot 11^2 \cdot 13^2}$
	$\frac{11}{2}$	$\frac{2^3 \cdot 17}{3 \cdot 7 \cdot 11^2 \cdot 13}$	$\frac{2 \cdot 17 \cdot 47}{3^3 \cdot 5 \cdot 7 \cdot 11^3 \cdot 13}$	$\frac{2^5 \cdot 5 \cdot 19}{3^4 \cdot 7 \cdot 11^3 \cdot 13^2}$
	$\frac{9}{2}$	$\frac{7}{3^2 \cdot 11^2}$	$\frac{2^3 \cdot 17}{3^3 \cdot 11^3 \cdot 13}$	$\frac{5 \cdot 17 \cdot 19}{3^3 \cdot 7 \cdot 11^3 \cdot 13^2}$
4F_J	$\frac{9}{2}$	$\frac{157}{2^5 \cdot 3^4 \cdot 7}$	$-\frac{1}{2^2 \cdot 3 \cdot 7^2 \cdot 11}$	$\frac{163}{2^4 \cdot 3^5 \cdot 7^2 \cdot 11 \cdot 13}$

Табл.6. Волновые функции штарковских состояний иона Er^{3+} в LaF_3

${}^4\text{S}_{3/2} :$	$v_2 = \left \frac{3}{2} \pm \frac{3}{2} \right\rangle$
	$v_1 = \pm \left \frac{3}{2} \pm \frac{1}{2} \right\rangle$
${}^4\text{F}_{9/2} :$	$k_5 = 0.7178 \left \frac{9}{2} \mp \frac{7}{2} \right\rangle + 0.6962 \left \frac{9}{2} \pm \frac{5}{2} \right\rangle$
	$k_4 = -0.6962 \left \frac{9}{2} \mp \frac{7}{2} \right\rangle + 0.7178 \left \frac{9}{2} \pm \frac{5}{2} \right\rangle$
	$k_3 = \pm 0.9723 \left \frac{9}{2} \mp \frac{9}{2} \right\rangle \pm 0.2338 \left \frac{9}{2} \pm \frac{3}{2} \right\rangle$
	$k_2 = \mp 0.2338 \left \frac{9}{2} \mp \frac{9}{2} \right\rangle \pm 0.9723 \left \frac{9}{2} \pm \frac{3}{2} \right\rangle$
	$k_1 = \left \frac{9}{2} \pm \frac{1}{2} \right\rangle$
${}^4\text{I}_{9/2} :$	$\phi_5 = \pm 0.9332 \left \frac{9}{2} \mp \frac{9}{2} \right\rangle \pm 0.3595 \left \frac{9}{2} \pm \frac{3}{2} \right\rangle$
	$\phi_4 = 0.8487 \left \frac{9}{2} \mp \frac{7}{2} \right\rangle + 0.5288 \left \frac{9}{2} \pm \frac{5}{2} \right\rangle$
	$\phi_3 = \left \frac{9}{2} \pm \frac{1}{2} \right\rangle$
	$\phi_2 = \mp 0.3595 \left \frac{9}{2} \mp \frac{9}{2} \right\rangle \pm 0.9332 \left \frac{9}{2} \pm \frac{3}{2} \right\rangle$
	$\phi_1 = -0.5288 \left \frac{9}{2} \mp \frac{7}{2} \right\rangle + 0.8487 \left \frac{9}{2} \pm \frac{5}{2} \right\rangle$
${}^4\text{I}_{11/2} :$	$\vartheta_6 = \pm 0.9947 \left \frac{11}{2} \mp \frac{11}{2} \right\rangle \pm 0.1032 \left \frac{11}{2} \pm \frac{1}{2} \right\rangle$
	$\vartheta_5 = 0.2235 \left \frac{11}{2} \mp \frac{9}{2} \right\rangle + 0.9747 \left \frac{11}{2} \pm \frac{3}{2} \right\rangle$
	$\vartheta_4 = \pm 0.4153 \left \frac{11}{2} \mp \frac{7}{2} \right\rangle \pm 0.9097 \left \frac{11}{2} \pm \frac{5}{2} \right\rangle$
	$\vartheta_3 = \mp 0.1032 \left \frac{11}{2} \mp \frac{11}{2} \right\rangle \pm 0.9947 \left \frac{11}{2} \pm \frac{1}{2} \right\rangle$
	$\vartheta_2 = \pm 0.9097 \left \frac{11}{2} \mp \frac{7}{2} \right\rangle \mp 0.4153 \left \frac{11}{2} \pm \frac{5}{2} \right\rangle$
	$\vartheta_1 = 0.9747 \left \frac{11}{2} \mp \frac{9}{2} \right\rangle - 0.2235 \left \frac{11}{2} \pm \frac{3}{2} \right\rangle$

Табл.6. (продолжение)

${}^4I_{13/2}$	$\mu_7 = 0.0146 \left \frac{13}{2} \mp \frac{11}{2} \right\rangle + 0.1063 \left \frac{13}{2} \pm \frac{1}{2} \right\rangle + 0.9942 \left \frac{13}{2} \pm \frac{13}{2} \right\rangle$
	$\mu_6 = 0.6695 \left \frac{13}{2} \mp \frac{7}{2} \right\rangle + 0.7428 \left \frac{13}{2} \pm \frac{5}{2} \right\rangle$
	$\mu_5 = \pm 0.5067 \left \frac{13}{2} \mp \frac{9}{2} \right\rangle \pm 0.8621 \left \frac{13}{2} \pm \frac{3}{2} \right\rangle$
	$\mu_4 = 0.7428 \left \frac{13}{2} \mp \frac{7}{2} \right\rangle - 0.6695 \left \frac{13}{2} \pm \frac{5}{2} \right\rangle$
	$\mu_3 = -0.3538 \left \frac{13}{2} \mp \frac{11}{2} \right\rangle - 0.9295 \left \frac{13}{2} \pm \frac{1}{2} \right\rangle + 0.1046 \left \frac{13}{2} \pm \frac{13}{2} \right\rangle$
	$\mu_2 = \pm 0.8621 \left \frac{13}{2} \mp \frac{9}{2} \right\rangle \mp 0.5067 \left \frac{13}{2} \pm \frac{3}{2} \right\rangle$
	$\mu_1 = -0.9352 \left \frac{13}{2} \mp \frac{11}{2} \right\rangle + 0.3532 \left \frac{13}{2} \pm \frac{1}{2} \right\rangle - 0.0240 \left \frac{13}{2} \pm \frac{13}{2} \right\rangle$

ЛИТЕРАТУРА

1. **B.M. Walsh, H.R. Lee, N.P. Barnes.** J. Luminescence, **169**, 400, (2016).
2. **F.K. Tittel, D. Richter, A. Fried.** Mid-infrared laser applications in spectroscopy, Solid-State Mid-Infrared Laser Sources, Springer-Verlag, 2003.
3. **M.J. Weber.** Phys. Rev., **157**(2), 262 (1967).
4. **W.T. Carnal.** Energy Level Structure and Transition Probabilities in the Spectra of the Trivalent Lanthanides in LaF₃, H. Crosswhite and H. M. Crosswhite Department of Physics. The Johns Hopkins University, 1995.
5. **W.T. Carnall, G.L. Goodman, K. Rajnak, R.S. Rana.** J. Chem. Phys., **90**(7), 3443 (1989).
6. **D.E. Онопко.** Optics and Spectroscopy, **24**, 301 (1968).
7. **А.М. Леушин.** Таблицы функций, преобразующихся по неприводимым представлениям кристаллографических точечных групп, М., Наука, 1968.
8. **А.Г. Демирханян, А.Р. Мкртчян, А.Г. Бадалян.** Ученые записи АГПУ, **2**, 38 (2015).
9. **А. Абрагам, Б. Блини.** Электронный парамагнитный резонанс переходных ионов, т. 2, М., Мир, 1972.
10. **G.G. Demirkhanyan.** Laser Physics, **16**, 1054 (2005).
11. **G.G. Demirkhanyan, R.V. Kostanyan.** Proceedings SPIE, **7998**, 799805 (2011).
12. **Г.Г. Демирханян, Э.П. Коканян, А.Г. Демирханян.** Изв. НАН Армении, Физика, **50**, 338 (2015).
13. **Э.П. Коканян, Г.Г. Демирханян, А.Г. Демирханян.** Изв. НАН Армении, Физика, **53**, 301 (2018).

LaF₃:Er³⁺ ԲՅՈՒՐԵՂԻ ՍՊԵԿՏՐԱԴԻՏԱԿԱՆ ՀՆԱՐԱՎՈՐՈՒԹՅՈՒՆՆԵՐԻ
ՈՒՍՈՒՄՆԱՍԻՐՈՒՄԸ ԿԱՍԿԱԴԱՅԻՆ MIR ԼԱԶԵՐՆԵՐԻ ՍՏԱՑՄԱՆ ՀԱՄԱՐ

Գ.Գ. ԴԵՄԻՐԽԱՆՅԱՆ, Ռ.Բ. ԿՈՍՏԱՆՅԱՆ

Միջին ինֆրակարմիր տիրույթում (2.62–4.97 մկմ) ցածր ֆոնոնային LaF₃:Er³⁺ բյուրեղների լազերային հնարավորությունները բացահայտելու նպատակով ուսումնասիրված են նրանց սպեկտրադիտական հատկությունները: Կառուցված են ⁴S_{3/2}, ⁴F_{9/2}, ⁴I_{9/2}, ⁴I_{11/2}, և ⁴I_{13/2} մուլտիպլետների Շտարկյան ենթամակարդակների ալիքային ֆունկցիաները՝ LSJM-պատկերմամբ: Հաշվարկված են անուղղակի էլեկտրեդիպոլային և մագնիսադիպոլային միջշտարկյան անցումների ուժերը, որոշված են խառնուրդային իոնի օպտիկական սպեկտրի հիմնական սպեկտրադիտական և կինետիկական բնութագրերը:

SPECTROSCOPIC CAPABILITIES OF LaF₃:Er³⁺ CRYSTALS
FOR MIR LASERS CASCADE OPERATION

G.G. DEMIRKHANYAN, R.B. KOSTANYAN

A theoretical study of the spectroscopic properties of low-phonon LaF₃:Er³⁺ crystals, determining their laser capabilities in the mid-infrared wavelength range (2.62–4.97 μm), was carried out. The wave functions of the Stark sublevels of ⁴S_{3/2}, ⁴F_{9/2}, ⁴I_{9/2}, ⁴I_{11/2}, and ⁴I_{13/2} of Er³⁺ ion by LSJM-representation are constructed. The line strengths of the indirect electric dipole and magnetic dipole inter-Stark transitions are calculated and the main spectroscopic and kinetic characteristics of the optical spectrum of the impurity ion are determined.