

## СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ АДЕКВАТНОСТИ РАЗЛИЧНЫХ МОДЕЛЕЙ ДЛЯ ОПИСАНИЯ СПЕКТРОСКОПИЧЕСКИХ СВОЙСТВ ЛАЗЕРНЫХ МАТЕРИАЛОВ С ПРИМЕСЬЮ ТРЕХВАЛЕНТНЫХ ИОНОВ ЭРБИЯ И ТУЛИЯ

## COMPARATIVE ANALYSIS OF THE ADEQUACY OF DIFFERENT MODELS FOR DESCRIPTION OF THE SPECTROSCOPIC PROPERTIES OF LASER MATERIALS DOPED WITH TRIVALENT ERBIUM AND THULIUM IONS

УДК 539.21:535

А.А. Корниенко\*, Е.Б. Дунина, А.С. Соколова,  
К.О. Масалова

Витебский государственный технологический  
университет

<https://doi.org/10.24412/2079-7958-2023-2-50-58>

A. Kornienko\*, E. Dunina, H. Sokalava,  
K. Masalova

Vitebsk State Technological  
University

### РЕФЕРАТ

*ЛАЗЕРНЫЕ МАТЕРИАЛЫ, ВЕРОЯТНОСТИ СПОНТАННЫХ ПЕРЕХОДОВ, ИЗЛУЧАТЕЛЬНОЕ ВРЕМЯ ЖИЗНИ, СИЛА ЛИНИИ, СИЛЫ ОСЦИЛЛЯТОРОВ ПЕРЕХОДОВ, ЭРБИЙ, ТУЛИЙ*

*В качестве объекта исследования выбраны оксидные кристаллы, активированные трехвалентными ионами эрбия и тулия. Вероятностные характеристики поглощения и излучения таких кристаллов хорошо изучены экспериментально.*

*Цель работы – установить наиболее адекватную модель для описания экспериментальных значений сил осцилляторов абсорбционных переходов.*

*Основные расчетные формулы получены методами квантовой теории углового момента. Электрические дипольные f-f переходы, наблюдаемые в спектрах редкоземельных ионов, частично разрешены при учете влияния возбужденных конфигурация противоположной четности и конфигураций с переносом заряда. Для определения параметров интенсивности в различных схемах расчета используется процедура минимизации функционала ошибки, составленного из суммы квадратов отклонений вычисленных сил линий от соответствующих эксперименталь-*

### ABSTRACT

*LASER MATERIALS, TRANSITION PROBABILITIES, RADIATIVE LIFETIME, LINE STRENGTH, TRANSITION OSCILLATOR STRENGTHS, ERBIUM, THULIUM*

*The purpose of this work is to determine the most adequate model for describing the experimental values of the intensities of the absorption bands of laser materials activated by trivalent erbium and thulium ions. Such materials are used as active media for lasers generating radiation in the infrared range of 1.5–2.8  $\mu\text{m}$ . Calculation formulas are given for the oscillator strengths of absorption transitions in the Judd – Ofelt (J-O) model, the modified Judd – Ofelt (mJ-O) model, and in the approximation of an intermediate configurational interaction (ICI). To compare the adequacy of different models, the results of describing the experimental oscillator strengths of absorption transitions in six crystals activated by erbium ions and five crystals activated by thulium ions are considered. The most accurate description of ten of the eleven samples under consideration was obtained in the ICI model. In the calculations, we used the procedure for minimizing the error functional composed of the sum of the squared deviations of the calculated oscillator strengths from the corresponding experimental values. The criterion for choosing the*

\* E-mail: [a\\_a\\_kornienko@mail.ru](mailto:a_a_kornienko@mail.ru) (A. Kornienko)

ных значений.

В ходе исследований выполнен сравнительный анализ адекватности модели Джадда – Офельта, модифицированной модели Джадда – Офельта и приближения промежуточного конфигурационного взаимодействия спектроскопических свойств активных лазерных сред, применяемых для генерации в инфракрасном диапазоне 1.5–2.8 мкм.

Рассмотрены результаты описания 11 образцов по вышеперечисленным моделям. Критерием выбора наилучшей схемы параметризации служит минимальное значение среднеквадратичного отклонения.

Установлено, что модифицированная модель Джадда – Офельта и приближения промежуточного конфигурационного взаимодействия обеспечивают непротиворечивое описание интенсивностных характеристик как поглощения, так и излучения лазерных материалов, активированных трехвалентными ионами эрбия и тулия.

В последнее время в научных журналах появляется огромное количество работ, информирующих о новых лазерных средах, активированных редкоземельными ионами. Такие материалы используются как активные среды твердотельных лазеров. Твердотельные лазеры находят широкое применение в строительстве, машиностроении, медицине, телекоммуникации, навигации и во многих других сферах. К лазерным устройствам предъявляют самые разнообразные требования: частотный диапазон генерируемого излучения (инфракрасный, видимый, ультрафиолетовый), режим работы (непрерывный, квазинепрерывный, импульсный), диапазон мощности, коэффициент полезного действия, удобство накачки. Характеристики лазерного устройства сложным образом зависят как от оптических, температурных и механических свойств кристалла, так и от спектроскопических характеристик редкоземельных ионов, выполняющих роль оптических центров.

Некоторые важные характеристики лазерных материалов, такие как время жизни возбужденных мультиплетов и коэффициенты ветвления

лучения обычно вычисляют на основе какой-нибудь модели. Поэтому актуально сравнить адекватность различных моделей для описания спектроскопических свойств стекол и кристаллов, активированных редкоземельными ионами.

#### Основные формулы в различных моделях

В качестве основных характеристик излучательных переходов из возбужденного мультиплета  $J$  обычно используют вероятности спонтанных переходов

$$A_{JJ'} = \frac{8\pi^2 e^2 n^2 \sigma^2}{mc} f_{JJ'}$$

излучательное время жизни

$$\tau_J = \frac{1}{\sum_{J'} A_{JJ'}}$$

и коэффициенты ветвления люминесценции

$$\beta_{JJ'} = \tau_J \cdot A_{JJ'} = \frac{A_{JJ'}}{\sum_{J'} A_{JJ'}}.$$

Здесь  $e$  – заряд электрона,  $n$  – показатель преломления среды,  $\sigma$  – волновое число в  $\text{см}^{-1}$ ,  $m$  – масса электрона,  $c$  – скорость света,  $f_{JJ'}$  – силы осцилляторов переходов, вычисляемые по формуле

$$f_{JJ'} = \frac{8\pi^2 m c \sigma}{3(2J+1)\hbar e^2} \left[ \frac{(n^2+2)^2}{9n} S_{JJ'}^{ed} + n S_{JJ'}^{md} \right],$$

где  $\hbar$  – постоянная Планка,  $S_{JJ'}^{ed}$  – сила линии электрических дипольных и  $S_{JJ'}^{md}$  – магнитных дипольных переходов.

Магнитные дипольные  $f$ - $f$  переходы разрешены, поэтому их сила линии слабо зависит от симметрии и свойств электрического поля в кристалле. Методы вычисления  $S_{JJ'}^{md}$  хорошо разработаны [1]:

$$S_{JJ'}^{md} = \frac{e^2 \hbar^2}{16\pi^2 m^2 c^2} \langle \gamma [LS]J \parallel \bar{L} + 2\bar{S} \parallel \gamma' [L'S']J' \rangle^2.$$

Здесь  $\langle \gamma [LS]JM \rangle$  – функция редкоземельного иона,  $\bar{L}$  и  $\bar{S}$  – орбитальный момент и спин редкоземельного иона. Магнитные дипольные переходы разрешены при условии

$$|J - J'| = 0, \pm 1, \Delta L = 0, \Delta S = 0 \text{ и } \Delta I = 0.$$

Сложнее обстоит дело с вычислением силы линии электрических дипольных переходов  $S_{JJ'}^{ed}$ . Электрические дипольные  $f$ - $f$  переходы запрещены, и запрет на них частично снимается только для ионов в не центрально-симметричном электрическом поле кристалла. Поэтому  $S_{JJ'}^{ed}$  очень чувствительны к составу и структуре лазерного материала. Простая расчетная формула для  $S_{JJ'}^{ed}$  была получена в работах Джадда и Офельта [2, 3] при условии, что электронная конфигурация  $4f^N$  вырождена

$$S_{JJ'}^{ed} = e^2 \sum_{k=2,4,6} \Omega_k \langle \gamma J \parallel U^k \parallel \gamma' J' \rangle^2. \quad (1)$$

Здесь  $\langle \gamma J \parallel U^k \parallel \gamma' J' \rangle$  – приведенные матричные элементы единичного тензора  $U^k$ ,  $\Omega_k$  – варьируемые параметры теории, оптимальное значение которых выбирается по методу наименьших квадратов. Часто для этой модели применяют сокращение **J-O**. Она содержит три варьируемых параметра.

На самом деле разные мультиплеты электронной конфигурации  $4f^N$  имеют различную энергию и это учитывается в более сложной модели [4, 5]

$$S_{JJ'}^{ed} = e^2 \sum_{k=2,4,6} \underbrace{\Omega_k [1 + 2R_k (E_J + E_{J'} - 2E_f^0)]}_{\Omega_k} \langle \gamma J \parallel U^k \parallel \gamma' J' \rangle^2. \quad (2)$$

Здесь  $R_k$  – параметры, обусловленные конфигурационным взаимодействием. В этом приближении параметры  $\Omega_k$  зависят от энергии  $E_J$  и  $E_{J'}$  мультиплетов. Общепринятое сокращение для этой модели – **ICI**. Она содержит шесть варьируемых параметров. Дополнительные по сравнению с моделью **J-O** параметры  $R_2, R_4, R_6$  учитывают влияние возбужденных конфигураций противоположной четности и с переносом заряда.

На ряду с моделями (1) и (2) находит применение промежуточная по сложности модель [4, 5]

$$S_{JJ'}^{ed} = e^2 \sum_{k=2,4,6} \Omega_k [1 + 2\alpha (E_J + E_{J'} - 2E_f^0)] \langle \gamma J \parallel U^k \parallel \gamma' J' \rangle^2, \quad (3)$$

в которой  $R_2 = R_4 = R_6 = \alpha \approx 1/2\Delta$ , где  $\Delta$  – энергия возбужденной конфигурации. Общепринятое сокращение для этой модели – **mJ-O**. У этой модели четыре варьируемых параметра. Дополнительный по сравнению с моделью **J-O** параметр  $\alpha$  учитывает влияние только возбужденной конфигурации противоположной четности.

Обычно моделей (1), (2) и (3) достаточно для описания экспериментальных данных по спек-

троскопическим свойствам лазерных материалов с удовлетворительной точностью.

Для сравнения адекватности моделей с различным числом варьируемых параметров обычно применяется среднеквадратичное отклонение вычисленных значений от соответствующих экспериментальных

$$\sigma = \sqrt{\frac{\sum_{J'} (f_{JJ'}^{\text{exp}} - f_{JJ'}^{\text{calc}})^2}{N - N_p}},$$

где  $N$  – количество экспериментальных сил осцилляторов  $f_{JJ'}^{\text{exp}}$ ,  $N_p$  – количество независимых параметров.

Характерной особенностью электронного строения редкоземельных трехвалентных элементов является незаполненная  $4f^N$ -оболочка, экранированная от внешних электрических полей заполненными  $5s^2$ - и  $5p^6$ -оболочками. Поэтому спектральные линии имеют маленькую ширину, что делает редкоземельные ионы перспективными кандидатами для создания активных сред для твердотельных лазеров. Из четырнадцати редкоземельных ионов для создания твердотельных лазеров чаще всего применяют эрбий ( $Er^{3+}$ ), тулий ( $Tm^{3+}$ ), неодим ( $Nd^{3+}$ ), тербий ( $Tb^{3+}$ ), европий ( $Eu^{3+}$ ), гольмий ( $Ho^{3+}$ ), самарий ( $Sm^{3+}$ ). Выполним сравнительный анализ адекватности моделей (1) (**J-O**), (2) (**ICI**) и (3) (**mJ-O**) при описании интенсивностей полос поглощения лазерных материалов, активиро-

ванных некоторыми ионами.

#### Ион $Er^{3+}$

Излучение иона эрбия, обусловленное электронным переходом  $^4I_{13/2} \rightarrow ^4I_{15/2}$  принадлежит диапазону 1,5–2,8  $\mu\text{м}$ . Лазеры с таким диапазоном длин волн широко применяются в дальномерах, для зондирования окружающей среды, в аэронавигации и телекоммуникации. Интенсивный синтез и экспериментальное изучение спектроскопических свойств эрбий содержащих лазерных материалов продолжается с целью получения оптимальных условий для накачки, генерации и повышения КПД. В таблице 1 приведены значения среднеквадратичного отклонения, полученные при описании сил осцилляторов абсорбционных переходов по различным моделям.

Анализ результатов таблицы 1 показывает, что в пяти из шести приведенных примеров учет влияния возбужденных конфигураций по моделям **mJ-O** и **ICI** улучшает точность описания сил осцилляторов абсорбционных переходов. Однако даже для кристаллов одной симметрии степень влияния возбужденных конфигураций сложно предсказать. Возможно, это объясняется тем, что сильное спин-орбитальное взаимодействие объединяет мультиплеты с одинаковым суммарным моментом  $J$  в группы [10]. По этой причине действие возбужденных конфигураций на любой мультиплет передается другим мультиплетам этой группы. У иона эрбия 41 мультиплет. Поэтому даже самый низколежащий мультиплет,

Таблица 1 – Сравнение адекватности моделей **J-O** (формула (1)), **mJ-O** (формула (3)) и **ICI** (формула (2)) для описания сил осцилляторов абсорбционных переходов иона  $Er^{3+}$  в различных кристаллах

Кристалл	Среднеквадратичное отклонение $\sigma \times 10^6$		
	<b>J-O</b>	<b>mJ-O</b>	<b>ICI</b>
$Er^{3+}:MgWO_4$ [6]	1,590	1,681	0,764
$Er^{3+}:(Lu, Sc)_2O_3$ [7]	0,175	0,130	0,133
$Er^{3+}:YSGG$ [8]	0,245	0,161	0,155
$Er^{3+}:Y_2O_3$ [9]	0,138	0,135	0,163
$Er^{3+}:Lu_2O_3$ [9]	0,369	0,168	0,184
$Er^{3+}:Sc_2O_3$ [9]	0,552	0,247	0,265

на который прямое действие возбужденных конфигураций незначительно, будет принадлежать к группе, в которой содержатся мультиплеты, сильно взаимодействующие с возбужденными конфигурациями. Через такие мультиплеты возбужденные конфигурации будут влиять на все мультиплеты группы. Таким образом, все мультиплеты иона эрбия будут испытывать усредненное воздействие возбужденных конфигураций, которое в полной мере не учитывают модели *mJ-O* и *ICI*.

**Ион Tm<sup>3+</sup>**

Интересные с точки зрения практического применения лазеры, излучающие в диапазоне 1,5–2,8 *мкм*, можно конструировать на основе кристаллов с примесью трехвалентных ионов тулия. Основной мультиплет <sup>3</sup>H<sub>6</sub> иона Tm<sup>3+</sup> имеет большое расщепление, что создает широкие полосы поглощения. Широкие полосы поглощения обеспечивают эффективное применение промышленных диодных лазеров AlGaAs для накачки. Именно по этой причине кристаллы с примесью ионов тулия детально исследуются экспериментально и теоретически как перспективные кандидаты для создания твердотельных лазеров. В таблице 2 приведены значения среднеквадратичного отклонения, полученные при описании сил осцилляторов абсорбционных переходов иона тулия по различным моделям.

Результаты таблицы 2 свидетельствуют, что модели *mJ-O* и *ICI* обеспечивают описание экспериментальных данных с более высокой точностью, чем модель *J-O*. Такая ситуация вполне ожидаемая, так как в моделях *mJ-O* и *ICI* более корректно учитывается влияние воз-

бужденных конфигураций. У трехвалентного тулия всего 13 мультиплетов. Спин-орбитальное взаимодействие мультиплеты с одинаковым полным моментом *J* взаимосвязывает в такие группы: <sup>3</sup>H<sub>6</sub>, <sup>1</sup>I<sub>6</sub>; <sup>3</sup>H<sub>4</sub>, <sup>3</sup>F<sub>4</sub>, <sup>1</sup>D<sub>4</sub>; <sup>3</sup>F<sub>2</sub>, <sup>3</sup>P<sub>2</sub>; <sup>3</sup>P<sub>0</sub>, <sup>1</sup>S<sub>0</sub>. Для трех мультиплетов <sup>3</sup>H<sub>5</sub>, <sup>3</sup>F<sub>3</sub> и <sup>3</sup>P<sub>1</sub> партнеров с равными моментами *J* нет. Среди мультиплетов одной группы всегда присутствует мультиплет, сильно взаимодействующий с возбужденными конфигурациями. Через этот мультиплет воздействие возбужденной конфигурации передается остальным мультиплетам группы. Что касается мультиплетов <sup>3</sup>H<sub>5</sub>, <sup>3</sup>F<sub>3</sub> и <sup>3</sup>P<sub>1</sub>, то их взаимодействие с возбужденными конфигурациями зависит от разности энергий между конфигурацией и мультиплетом. У мультиплета <sup>3</sup>P<sub>1</sub> разность энергий меньше, чем у <sup>3</sup>H<sub>5</sub>, <sup>3</sup>F<sub>3</sub> и воздействие возбужденных конфигураций будет более сильным. Более точное описание экспериментальных данных в моделях *mJ-O* и *ICI*, чем в модели *J-O*, как раз и объясняется, тем, что в них более адекватно учитывается конфигурационное взаимодействие.

Следует отметить, что в последнее время появляются публикации о применении технологий искусственного интеллекта для классификации экспериментальных результатов по оптической спектроскопии лазерных материалов. Наиболее успешной была классификация данных по структуре лазерных лучей [16]. Классификация производилась по форме поперечного сечения луча. Распознавание рисунков хорошо изучено в технологиях искусственного интеллекта, поэтому выполненная классификация была успешной.

Таблица 2 – Сравнение адекватности моделей *J-O* (формула (1)), *mJ-O* (формула (3)) и *ICI* (формула (2)) для описания сил осцилляторов абсорбционных переходов иона Tm<sup>3+</sup> в различных кристаллах

Кристалл	Среднеквадратичное отклонение $\sigma \times 10^6$		
	<i>J-O</i>	<i>mJ-O</i>	<i>ICI</i>
Tm <sup>3+</sup> :LuYO <sub>3</sub> [11]	1,202	0,781	0,735
Tm <sup>3+</sup> :CaF <sub>2</sub> [12]	0,258	0,274	0,207
Tm <sup>3+</sup> : CLTGG [13]	1,078	0,689	0,120
Tm <sup>3+</sup> : Lu <sub>3</sub> Al <sub>5</sub> O <sub>12</sub> [14]	0,257	0,119	0,177
Tm <sup>3+</sup> : NaBi(MoO <sub>4</sub> ) <sub>2</sub> [15]	1,309	0,277	0,379

Попытка классифицировать параметры теории Джадда – Офельта с помощью искусственного интеллекта оказались малоуспешными [17]. Это случается, если теория содержит скрытые или не выявленные параметры. Возможной причиной могут быть состояния редкоземельных ионов, расположенные в зоне собственного поглощения кристалла (континууме). Долгое время предполагалось, что в континууме связанные состояния не могут существовать. Однако последние публикации показывают, что такие состояния существуют и их учет важен для корректной интерпретации экспериментальных данных [18].

#### Заключение

Основное внимание в этой работе было уделено теоретическому анализу адекватности различных моделей для описания интенсивностей абсорбционных полос редкоземельных ионов, поэтому все экспериментальные данные взяты

из литературных источников [6–9] и [11–15].

На основе результатов моделирования сил осцилляторов абсорбционных переходов, приведенных в таблицах 1 и 2, можно сделать вывод, что модели *mJ-O* и *ICI*, учитывающее более детально взаимодействие мультиплетов с возбужденными конфигурациями, чем в модели Джадда – Офельта, обеспечивают более высокую точность описания экспериментальных данных. Надо иметь в виду, что кроме адекватности описания интенсивности абсорбционных полос модель должна обеспечивать корректное описание излучательных свойств, таких как время жизни возбужденных мультиплетов и коэффициенты ветвления люминесценции с них. Если учитывать корректность описания всех спектроскопических характеристик, то применение моделей *mJ-O* и *ICI* более предпочтительно, чем модель Джадда – Офельта.

#### СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Carnall, W. T., Fields, P. R., Rajnak, K. (1968), Electronic energy levels in the trivalent lanthanide aquo ions. I.  $\text{Pr}^{3+}$ ,  $\text{Nd}^{3+}$ ,  $\text{Pm}^{3+}$ ,  $\text{Sm}^{3+}$ ,  $\text{Dy}^{3+}$ ,  $\text{Ho}^{3+}$ ,  $\text{Er}^{3+}$ , and  $\text{Tm}^{3+}$ , *J. Chem. Phys.*, 1968, vol. 49, pp. 4424–4442.
2. Judd, B. R. (1962), Optical Absorption Intensities of Rare-Earth Ions, *Phys. Rev.*, 1962, vol. 127, pp. 750–761.
3. Ofelt, G. S. (1962), Intensities of Crystal Spectra of Rare Earth Ions, *J. Chem. Phys.*, 1962, vol. 37, pp. 511–520.
4. Kornienko, A. A., Kaminskii, A. A., Dunina, E. B. (1990), Dependence of the line strength of f-f transitions on the manifold energy. II. Analysis of  $\text{Pr}^{3+}$  in  $\text{KPrP}_4\text{O}_{12}$ , *Phys. Stat. Sol.(b)*, 1990, vol. 157, pp. 267–273.
5. Dunina, E. B., Kornienko, A. A. (2014), Influence of Excited Configurations on the Intensities

#### REFERENCES

1. Carnall, W. T., Fields, P. R., Rajnak, K. (1968), Electronic energy levels in the trivalent lanthanide aquo ions. I.  $\text{Pr}^{3+}$ ,  $\text{Nd}^{3+}$ ,  $\text{Pm}^{3+}$ ,  $\text{Sm}^{3+}$ ,  $\text{Dy}^{3+}$ ,  $\text{Ho}^{3+}$ ,  $\text{Er}^{3+}$ , and  $\text{Tm}^{3+}$ , *J. Chem. Phys.*, 1968, vol. 49, pp. 4424–4442.
2. Judd, B. R. (1962), Optical Absorption Intensities of Rare-Earth Ions, *Phys. Rev.*, 1962, vol. 127, pp. 750–761.
3. Ofelt, G. S. (1962), Intensities of Crystal Spectra of Rare Earth Ions, *J. Chem. Phys.*, 1962, vol. 37, pp. 511–520.
4. Kornienko, A. A., Kaminskii, A. A., Dunina, E. B. (1990), Dependence of the line strength of f-f transitions on the manifold energy. II. Analysis of  $\text{Pr}^{3+}$  in  $\text{KPrP}_4\text{O}_{12}$ , *Phys. Stat. Sol.(b)*, 1990, vol. 157, pp. 267–273.
5. Dunina, E. B., Kornienko, A. A. (2014), Influence of Excited Configurations on the Intensities

- of Electric\_Dipole Transitions of Rare\_Earth Ions, *Optics and Spectroscopy*, 2014, vol. 116, № 5, pp. 706–711.
6. Zhang, L., Basyrova, L., Loiko, P., Camy, P., Lin, Z., Zhang, G., Slimi, S., Sole, R. M., Mateos, X., Aguilo, M., Diaz, F., Dunina, E., Kornienko, A., Griebner, U., Petrov, V., Wang, L., Chen, W. (2020), Growth, structure, and polarized spectroscopy of monoclinic  $\text{Er}^{3+}:\text{MgWO}_4$  crystal, *Optical Materials Express*, 2022, vol. 12, № 5, pp. 2028–2040.
7. Basyrova, L., Loiko, P., Jing, W., Wang, Y., Huang, H., Dunina, E., Kornienko, A., Fomicheva, L., Viana, B., Griebner, U., Petrov, V., Aguiló, M., Díaz, F., Mateos, X., Camy, P. (2021), Spectroscopy and efficient laser operation around 2.8  $\mu\text{m}$  of  $\text{Er}:(\text{Lu}, \text{Sc}) \text{2O}_3$  sesquioxide ceramics, *Journal of Luminescence*, 2021, vol. 240, pp. 118373–118384.
8. Loiko, P. A., Arbabzadah, E. A., Damzen, M. J., Mateos, X., Dunina, E. B., Kornienko, A. A., Yasukevich A. S., Skoptsov, N. A., Yumashev, K.V. (2016), Judd–Ofelt analysis and stimulated-emission cross-sections for highly doped (38 at%)  $\text{Er}:\text{YSGG}$  laser crystal, *Journal of Luminescence*, 2016, vol. 171, pp. 226–233.
9. Uvarova, A., Loiko, P., Kalushiak, S., Dunina, E., Fomicheva, L., Kornienko, A., Balavanov, S., Braud, A., Camy, P., Krankel, C. (2023), Stimulated-emission cross-sections of trivalent erbium ions in the cubic sesquioxides  $\text{Y}_2\text{O}_3$ ,  $\text{Lu}_2\text{O}_3$ , and  $\text{Sc}_2\text{O}_3$ , *Optical Materials Express*, 2023, vol. 13, № 5, pp.1385–1400.
10. Дунина, Е. Б., Фомичева, Л. А., Корниенко, А.А., Григорьева, М.В. (2018), Влияние конфигурационного взаимодействия редкоземельных ионов на интенсивности их межмультиплетных переходов, *Журнал прикладной спектроскопии*, 2018, Т. 85, № 3, С. 398–406.
11. Ereemeev, K., Loiko, P., Braud, A., Camy, P., Zhang, J., Xu, X., Zhao, Y., Liu, P., Balabanov, S., Dunina, E., Kornienko, A., Fomicheva, L., Mateos, X., Griebner, U., Petrov, V., Wang, L., Chen, W. (2022), of Electric\_Dipole Transitions of Rare\_Earth Ions, *Optics and Spectroscopy*, 2014, vol. 116, № 5, pp. 706–711.
6. Zhang, L., Basyrova, L., Loiko, P., Camy, P., Lin, Z., Zhang, G., Slimi, S., Sole, R.M., Mateos, X., Aguilo, M., Diaz, F., Dunina, E., Kornienko, A., Griebner, U., Petrov, V., Wang, L., Chen, W. (2020), Growth, structure, and polarized spectroscopy of monoclinic  $\text{Er}^{3+}:\text{MgWO}_4$  crystal, *Optical Materials Express*, 2022, vol. 12, № 5, pp. 2028–2040.
7. Basyrova, L., Loiko, P., Jing, W., Wang, Y., Huang, H., Dunina, E., Kornienko, A., Fomicheva, L., Viana, B., Griebner, U., Petrov, V., Aguiló, M., Díaz, F., Mateos, X., Camy, P. (2021), Spectroscopy and efficient laser operation around 2.8  $\mu\text{m}$  of  $\text{Er}:(\text{Lu}, \text{Sc}) \text{2O}_3$  sesquioxide ceramics, *Journal of Luminescence*, 2021, vol. 240, pp. 118373–118384.
8. Loiko, P. A., Arbabzadah, E. A., Damzen, M. J., Mateos, X., Dunina, E. B., Kornienko, A. A., Yasukevich A. S., Skoptsov, N. A., Yumashev, K.V. (2016), Judd–Ofelt analysis and stimulated-emission cross-sections for highly doped (38 at%)  $\text{Er}:\text{YSGG}$  laser crystal, *Journal of Luminescence*, 2016, vol. 171, pp. 226–233.
9. Uvarova, A., Loiko, P., Kalushiak, S., Dunina, E., Fomicheva, L., Kornienko, A., Balavanov, S., Braud, A., Camy, P., Krankel, C. (2023), Stimulated-emission cross-sections of trivalent erbium ions in the cubic sesquioxides  $\text{Y}_2\text{O}_3$ ,  $\text{Lu}_2\text{O}_3$ , and  $\text{Sc}_2\text{O}_3$ , *Optical Materials Express*, 2023, vol. 13, № 5, pp.1385–1400.
10. Dunina, E. B., Fomicheva, L. A., Kornienko, A. A., Grigorieva, M. B. (2018), Influence of Configuration Interaction of Rare-Earth Ions on the Intensities of Their Intermultiplet Transitions [Vliyanie konfiguratsionnogo vzaimodejstviya redkozemel'nyh ionov na intensivnosti ih mezhmul'tipletnyh perekhodov], *ZHurnal prikladnoj spektroskopii – Journal of Applied Spectroscopy*, 2018, vol. 85, № 3, pp. 398–406.

- Spectroscopy of solid-solution transparent sesquioxide laser ceramic Tm:LuYO<sub>3</sub>, *Optical Materials Express*, 2022, vol. 12, № 9, pp. 3749–3762.
12. Loiko, P., Brasse, G., Basyrova, L., Benayad, A., Doualan, J.-L., Meroni, C., Braud, A., Dunina, E., Kornienko, A., Baranov, M., Daniil, G., Camy, P. (2021), Spectroscopy of Tm<sup>3+</sup>-doped CaF<sub>2</sub> waveguiding thin films grown by Liquid Phase Epitaxy, *Journal of Luminescence*, 2021, vol. 238, pp. 118109–118122.
  13. Alles, A., Pan, Z., Loiko, P., Serres, J.M., Slimi, S., Yingming, S., Tang, K., Wang, Y., Zhao, Y., Dunina, E., Kornienko, A., Camy, P., Chen, W., Wang, L., Griebner, U., Petrov, V., Solé, R.M., Aguiló, M., Díaz, F., Mateos, X. (2021), Tm<sup>3+</sup>-doped calcium lithium tantalum gallium garnet (Tm:CLTGG): novel laser crystal, *Optical Materials Express*, 2021, vol. 11, № 9, pp. 2938–2951.
  14. Yue, F., Loiko, P., Chen, M., Serres, J.M., Wang, Y., Li, Basyrova, L., Dunina, E., Kornienko, A., Fomicheva, L., Dai, S., Chen, Z., Bae, J., Park, T. J., Rotermond, F., Jambunathan, Y., Lucianetti, A., Mocek, T., Aguilo, M., Diaz, F., Griebner, U., Petrov, V., Mateos, X. (2020), Spectroscopy and diode-pumped laser operation of transparent Tm:Lu<sub>3</sub>Al<sub>5</sub>O<sub>12</sub> ceramics produced by solid-state sintering, *Optics Express*, 2020, vol. 28, № 19, pp. 28399–28413.
  15. Gusakova, N. V., Mudryi, A. V., Demesh, M. P., Yasukevich, A. S., Pavlyuk, A. A., Kornienko, A. A., Dunina, E. B., Khodasevich, I. A., Orlovich, V. A., Kuleshov, N. V. (2018), Growth and spectroscopic properties of Tm<sup>3+</sup>:NaBi(MoO<sub>4</sub>)<sub>2</sub> single crystal, *Optical Materials*, 2018, vol. 80, pp. 169–176.
  16. Avramov-Zamurovic, S., Esposito, J. M., Nelson, C. (2023), Classifying beams carrying orbital angular momentum with machine learning: tutorial, *Journal of the Optical Society of America A*, 2023, vol. 40, № 1, pp. 64–77.
  11. Eremeev, K., Loiko, P., Braud, A., Camy, P., Zhang, J., Xu, X., Zhao, Y., Liu, P., Balabanov, S., Dunina, E., Kornienko, A., Fomicheva, L., Mateos, X., Griebner, U., Petrov, V., Wang, L., Chen, W. (2022), Spectroscopy of solid-solution transparent sesquioxide laser ceramic Tm:LuYO<sub>3</sub>, *Optical Materials Express*, 2022, vol. 12, № 9, pp. 3749–3762.
  12. Loiko, P., Brasse, G., Basyrova, L., Benayad, A., Doualan, J.-L., Meroni, C., Braud, A., Dunina, E., Kornienko, A., Baranov, M., Daniil, G., Camy, P. (2021), Spectroscopy of Tm<sup>3+</sup>-doped CaF<sub>2</sub> waveguiding thin films grown by Liquid Phase Epitaxy, *Journal of Luminescence*, 2021, vol. 238, pp. 118109–118122.
  13. Alles, A., Pan, Z., Loiko, P., Serres, J.M., Slimi, S., Yingming, S., Tang, K., Wang, Y., Zhao, Y., Dunina, E., Kornienko, A., Camy, P., Chen, W., Wang, L., Griebner, U., Petrov, V., Solé, R.M., Aguiló, M., Díaz, F., Mateos, X. (2021), Tm<sup>3+</sup>-doped calcium lithium tantalum gallium garnet (Tm:CLTGG): novel laser crystal, *Optical Materials Express*, 2021, vol. 11, № 9, pp. 2938–2951.
  14. Yue, F., Loiko, P., Chen, M., Serres, J.M., Wang, Y., Li, Basyrova, L., Dunina, E., Kornienko, A., Fomicheva, L., Dai, S., Chen, Z., Bae, J., Park, T.J., Rotermond, F., Jambunathan, Y., Lucianetti, A., Mocek, T., Aguilo, M., Diaz, F., Griebner, U., Petrov, V., Mateos, X. (2020), Spectroscopy and diode-pumped laser operation of transparent Tm:Lu<sub>3</sub>Al<sub>5</sub>O<sub>12</sub> ceramics produced by solid-state sintering, *Optics Express*, 2020, vol. 28, № 19, pp. 28399–28413.
  15. Gusakova, N. V., Mudryi, A. V., Demesh, M. P., Yasukevich, A. S., Pavlyuk, A. A., Kornienko, A. A., Dunina, E. B., Khodasevich, I. A., Orlovich, V. A., Kuleshov, N. V. (2018), Growth and spectroscopic properties of Tm<sup>3+</sup>:NaBi(MoO<sub>4</sub>)<sub>2</sub> single crystal, *Optical Materials*, 2018, vol. 80, pp. 169–176.
  16. Avramov-Zamurovic, S., Esposito, J. M., Nelson, C. (2023), Classifying beams carrying orbital angular momentum with machine learning: tutorial, *Journal of the Optical Society of America A*, 2023, vol. 40, № 1, pp. 64–77.

17. Konstantinidis, M., Lalla, E. A., Lopez-Reyes, G., Rodríguez-Mendoza, U. R., Lymer, E. A., Freemantle, J., Daly, M. G. (2021), Statistical Learning for the estimation of Judd-Ofelt parameters: A case study of  $\text{Er}^{3+}$ : doped tellurite glasses, *Journal of Luminescence*, 2021, vol. 235, pp. 118020.

18. Jia, B., Huang, L., Pilipchuk, A.S., Huang, S., Shen, C., Sadreev, A. F., Li, Y., Miroshnichenko, A. E. (2023), Bound States in the Continuum Protected by Reduced Symmetry of Three-Dimensional Open Acoustic Resonators, *Physical review applied*, 2023, vol. 19, pp. 054001–054012.

*America A*, 2023, vol. 40, № 1, pp. 64–77.

17. Konstantinidis, M., Lalla, E. A., Lopez-Reyes, G., Rodríguez-Mendoza, U. R., Lymer, E. A., Freemantle, J., Daly, M. G. (2021), Statistical Learning for the estimation of Judd-Ofelt parameters: A case study of  $\text{Er}^{3+}$ : doped tellurite glasses, *Journal of Luminescence*, 2021, vol. 235, pp. 118020.

18. Jia, B., Huang, L., Pilipchuk, A. S., Huang, S., Shen, C., Sadreev, A. F., Li, Y., Miroshnichenko, A. E. (2023), Bound States in the Continuum Protected by Reduced Symmetry of Three-Dimensional Open Acoustic Resonators, *Physical review applied*, 2023, vol. 19, pp. 054001–054012.

Статья поступила в редакцию 20.06.2023 г.