

2. Ortega, S. Use of Hyperspectral/Multispectral Imaging in Gastroenterology. Shedding Some-Different-Light into the Dark / S. Ortega, H. Fabelo, D.K. Iakovidis, A. Koulaouzidis, G.M. Callico // J. Clin. Med. – 2019. – Vol. 8, no. 1. – P. 36–56.

3. Strauch, M. Wide-angle spectral imaging using a Fabry-Pérot interferometer / M. Strauch, I.L. Livshits, F. Bociort, H.P. Urbach // J. Eur. Opt. Soc.-Rapid. – 2015. – Vol. 10. – P. 15037-1–15037-7.

4. Гулис, И.М. Многоцелевой спектрометр с дифракционной решеткой и зеркальными объективами для спектроскопии с пространственным разрешением / И.М. Гулис, А.Г. Купреев, И.Д. Демидов // Журн. Белорус. гос. ун-та. Физика. – 2018. – № 2. – С. 4–10.

5. Гулис, И.М. Оптическая схема полихроматора изображения для спектроскопии с пространственным разрешением / И.М. Гулис, А.Г. Купреев // Журн. прикл. спектр. – 2019. – Т. 86, № 5. – С. 813–816.

УДК 621.3.038.825.2

## ПАРАМЕТР СПЕКТРОСКОПИЧЕСКОГО КАЧЕСТВА НЕОДИМСОДЕРЖАЩИХ КРИСТАЛЛОВ ДВОЙНЫХ КАЛЬЦИЕВЫХ ВАНАДАТОВ

Демеш М.П.<sup>1</sup>, Ясюкевич А.С.<sup>1</sup>, Кулешов Н.В.<sup>1</sup>  
Шеховцов А.Н.<sup>2</sup>, Космына М.Б.<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Белорусский национальный технический университет

Минск, Республика Беларусь

<sup>2</sup>Институт монокристаллов НАН Украины

Харьков, Украина

Свойства локального окружения редкоземельного иона (РЗИ) в твердотельной матрице существенным образом влияют на его спектроскопические характеристики. Параметры Джадда-Офельта (Д-О),  $\Omega_2$ ,  $\Omega_4$  и  $\Omega_6$ , могут дать информацию о симметрии ближайшего окружения РЗИ и ковалентности связей РЗИ – лиганды [1]. В некоторых случаях, например, для неодимсодержащих сред, параметры Д-О позволяют предложить спектроскопические критерии качества исследуемых материалов как активных лазерных сред [2].

Спектроскопические и структурные характеристики группы кристаллов двойных кальциевых ортованадатов RE:Ca<sub>9</sub>Ln(VO<sub>4</sub>)<sub>7</sub> и RE:Ca<sub>10</sub>A(VO<sub>4</sub>)<sub>7</sub> (Ln = Y, La-Lu, A – катион щелочного металла, RE – РЗИ) исследовались в работах [3–6]. Разупорядоченность структуры этих материалов приводит к уширению линий в спектрах поглощения и люминесценции, что представляет интерес для определенных лазерных применений этих кристаллов.

В данной работе был рассмотрен спектроскопический критерий лазерного качества иона неодима в ряду кристаллов Nd:Ca<sub>9</sub>Ln(VO<sub>4</sub>)<sub>7</sub> (CLaV), Nd:Ca<sub>9</sub>La(VO<sub>4</sub>)<sub>7</sub> (NLaV), Ca<sub>9</sub>Nd(VO<sub>4</sub>)<sub>7</sub> (CNdV), Nd:Ca<sub>10</sub>Li(VO<sub>4</sub>)<sub>7</sub> (CLV) и Nd:Ca<sub>10</sub>K(VO<sub>4</sub>)<sub>7</sub> (CKV) на основе параметров  $\Omega_4$  и  $\Omega_6$ .

Ввиду того, что вероятность излучательных переходов с уровня  $^4F_{3/2}$  определяется преимущественно величинами  $\Omega_4$  и  $\Omega_6$ , вводится параметр спектроскопического качества  $\chi$  [2], численно равный их отношению. Из теории Д-О можно получить аналитическое выражение для коэффициентов ветвления люминесценции  $\beta_{JJ'}$ :

$$\beta_{JJ'} = \frac{(a_J \chi + b_J) \lambda_{JJ'}^{-3}}{\sum_J (a_J \chi + b_J) \lambda_{JJ'}^{-3}} \quad (1)$$

где  $a_J = |\langle ^4F_{3/2} || U^{(4)} || ^4I_{J'} \rangle|^2$ ;  $b_J = |\langle ^4F_{3/2} || U^{(6)} || ^4I_{J'} \rangle|^2$ .

Здесь  $a_J$  и  $b_J$  – квадраты матричных элементов тензора  $U^{(l)}$  [7].

На рисунке 1 представлены зависимости коэффициентов ветвления люминесценции  $\beta_{JJ'}$  кристаллов кальциевых ванадатов от параметра  $\chi$  для излучательных переходов с уровня  $^4F_{3/2}$ . Для сравнения также приведены данные для наиболее популярных неодимсодержащих кристаллов: иттрий-алюминиевого граната (YAG) и иттриевого ортованадата (YVO<sub>4</sub>). Мощность люминесценции на переходе  $^4F_{3/2} \rightarrow ^4I_{9/2}$  монотонно возрастает с увеличением параметра  $\chi$ , в то время как для переходов на уровни  $^4I_{11/2}$ ,  $^4I_{13/2}$  и  $^4I_{15/2}$  – монотонно уменьшается. При этом коэффициенты ветвления люминесценции  $\beta_{JJ'}$  на уровнях  $^4I_{9/2}$  и  $^4I_{11/2}$  имеют одинаковые значения при величине параметра  $\chi$  около 1,16 (см. рисунок 1).

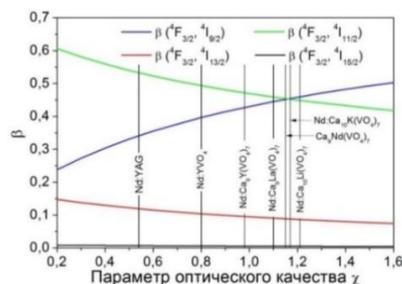


Рисунок 1 – Зависимость коэффициента ветвления люминесценции  $\beta_{JJ'}$  иона неодима от параметра спектроскопического качества  $\chi$

Также из рисунка 1 следует, что согласно спектроскопическому критерию, кристаллы типа Ca<sub>10</sub>A(VO<sub>4</sub>)<sub>7</sub> наиболее предпочтительны для получения генерации в области 900 нм.

Примечательно, что параметры  $\Omega_4$  и  $\Omega_6$  для ионов неодима могут быть определены без выполнения полного расчёта Д-О [2], и, соответственно, получен параметр  $\chi$ . Для этого

необходимо найти изолированные переходы в поглощении, которые зависят главным образом от матричных элементов  $\langle U^{(4)} \rangle$  и  $\langle U^{(6)} \rangle$ . Такими являются переходы с основного уровня  ${}^4I_{9/2}$  на уровни  ${}^2P_{1/2}$  и  ${}^4I_{15/2}$ , сила линии  $S$  которых вычисляется по формулам:

$$S({}^4I_{9/2} \rightarrow {}^2P_{1/2}) = 0,0367 \cdot \Omega_4, \quad (2, a)$$

$$S({}^4I_{9/2} \rightarrow {}^4I_{15/2}) = 0,0001 \cdot \Omega_4 + 0,0452 \cdot \Omega_6, \quad (2, б)$$

соответственно. Если пренебречь первым слагаемым во втором уравнении, то параметр оптического качества  $\chi$  может быть найден из следующего соотношения:

$$\chi = 1,23 \cdot S({}^4I_{9/2} \rightarrow {}^2P_{1/2}) / S({}^4I_{9/2} \rightarrow {}^4I_{15/2}) \quad (2, в)$$

Здесь нет необходимости в определении концентрации ионов неодима в кристалле, что существенно упрощает эксперимент и вычисления. В качестве примера на рисунке 2 показан спектр коэффициентов поглощения кристалла CNdV.

В данном случае необходимо знание только относительных величин сил линий  $S$ , которые пропорциональны интегральным коэффициентам поглощения  $\int \bar{k}(\lambda) d\lambda$  соответствующих переходов усредненным по поляризациям, что приводит к следующему соотношению:

$$\chi = \frac{n_{vis}}{(n_{vis}^2 + 2)^2} \left( \frac{n_{ir}^2 + 2}{n_{ir}} \right)^2 \frac{\bar{\lambda}_{ir}}{\bar{\lambda}_{vis}} \frac{\int \bar{k}_{vis}(\lambda) d\lambda}{\int \bar{k}_{ir}(\lambda) d\lambda} \quad (3)$$

Здесь  $n$  – показатель преломления,  $\bar{\lambda}$  – средневзвешенная длина волны перехода, а индексы  $vis$  и  $ir$  обозначают входящие в формулу величины на длинах волн, соответствующих переходам  ${}^4I_{9/2} \rightarrow {}^2P_{1/2}$  и  ${}^4I_{9/2} \rightarrow {}^4I_{15/2}$ .

Значения параметра спектроскопического качества  $\chi$  для кристаллов кальциевых ванадатов сведены в таблицу. Как видно, значения параметра  $\chi$  полученные по двум методам находятся в хорошем согласии друг с другом.

Таблица – Значения параметра спектроскопического качества, вычисленного по теории Д-О и формуле (2)

| Кристалл          | CYV  | CNdV | CLaV | CKV  | CLV  |
|-------------------|------|------|------|------|------|
| $\chi$ (Д-О)      | 1,11 | 1,27 | 1,14 | 1,17 | 1,25 |
| $\chi$ (Ф-ла (3)) | 1,10 | 1,15 | 1,11 | 1,15 | 1,21 |

УДК 629.7

## СИСТЕМА СТАБИЛИЗАЦИИ ОПТИЧЕСКОЙ ОСИ

Матвеев В.В.

ФГБОУ ВО «Тульский государственный университет»  
Тула, Российская Федерация

**Введение.** Системы стабилизации (СС) обеспечивают требуемую ориентацию оптической оси в пространстве [1–3]. СС наряду со стабилизацией используются и для управления угловым

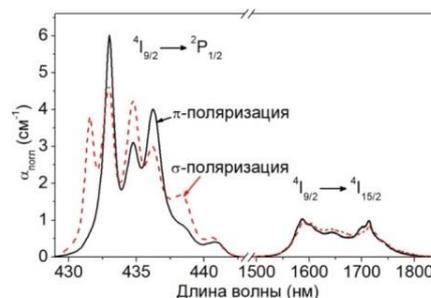


Рисунок 2 – Спектры коэффициентов поглощения  $\alpha_{\lambda}$  на переходах  ${}^4I_{9/2} \rightarrow {}^2P_{1/2}$ ,  ${}^4I_{9/2} \rightarrow {}^4I_{15/2}$  кристалла  $C_9Nd(VO_4)_7$

Таким образом, в настоящей работе исследовано влияние состава кристаллов кальциевых ванадатов на люминесцентные свойства иона неодима. Увеличение параметра  $\chi$  от кристалла  $Nd:Ca_9Y(VO_4)_7$  к кристаллу  $Nd:Ca_{10}Li(VO_4)_7$  указывает на увеличение вероятности перехода  ${}^4F_{3/2} \rightarrow {}^4I_{9/2}$  и уменьшение вероятностей переходов  ${}^4F_{3/2} \rightarrow {}^4I_{11/2}$  и  ${}^4F_{3/2} \rightarrow {}^4I_{13/2}$ . Это позволяет сделать вывод, что, изменяя состав кристалла, можно в некоторых пределах варьировать люминесцентные характеристики иона неодима.

### Литература

- Görrler-Walrand C. Spectral intensities of f-f transitions / C. Görrler-Walrand and K. Binnemans // Handbook on the Physics and Chemistry of Rare Earths. – 1998. – Vol. 25. – P. 101–264.
- Многоуровневые функциональные схемы кристаллических лазеров / А.А. Каминский, Б.М. Антипенко. – М.: Наука, 1989. – 270 с.
- Growth, spectroscopic and thermal properties of Nd-doped disordered  $Ca_9(La/Y)(VO_4)_7$  and  $Ca_{10}(Li/K)(VO_4)_7$  crystals / P.A. Loiko, [et al.] // J. Lumin. – 2013. – Vol. 137. – P. 252–258.
- Crystal structures of double vanadates  $Ca_9R(VO_4)_7$ . III. R = Nd, Sm, Gd or Ce / A.A. Belik [et al.] // Crystallogr. Rep. – 2000. – Vol. 45. – P. 798–803.
- Growth and spectroscopy of new laser crystals  $Ca_{10}Yb_{0,3}K_{0,1}(VO_4)_7$  / М.В. Kosmyna, [et al.] // Functional Materials. – 2012. – Vol. 19, N 4. – P. 552–554.
- Photoluminescence properties of  $Ca_9Y(VO_4)_7$  and  $Ca_9Y_{0,95}Ln_{0,05}(VO_4)_7$  ( $Ln^{3+} = Eu^{3+}, Sm^{3+}, Pr^{3+}$ ) / S. Chao [et al.] // J. Alloy Compd. – 2009. – Vol. 487. – P. 346–350.
- Spectroscopy of a New Laser Garnet  $Lu_3Sc_2Ga_3O_{12}:Nd^{3+}$  / A.A. Kaminskii [et al.] // Phys. Stat. Sol. A. – 1994. – Vol. 141. – P. 471–494.

положением стабилизированной оптико-электронной аппаратуры, а также для измерения угловых отклонений подвижного объекта. В наиболее распространенных СС в качестве измеритель-