




УДК 535.33

EDN: UUVBP DOI: 10.31429/vestnik-20-2-56-62

## Исследование спектроскопических характеристик кристаллов молибдата стронция, активированных ионами неодима

А. И. Зиненко , В. А. Клименко , А. В. Скачедуб 

Кубанский государственный университет, ул. Ставропольская, 149, Краснодар, 350040, Россия

✉ Зиненко Ангелина Ивановна; ORCID 0009-0008-8796-9549; e-mail: [aphelionyellow@gmail.com](mailto:aphelionyellow@gmail.com)

*Аннотация.* Рассчитаны параметры интенсивности электронных переходов  $\Omega_t$  в ионах  $\text{Nd}^{3+}$ , находящихся в кристаллических матрицах молибдата стронция различного состава. Сделан вывод, что использование в качестве компенсатора заряда ионов  $\text{Ta}^{5+}$  вместо  $\text{Nb}^{5+}$  приводит к увеличению параметра спектроскопического качества  $X$  и вероятности перехода  ${}^4\text{F}_{3/2} \rightarrow {}^4\text{I}_{9/2}$ , а также уменьшению вероятностей переходов  ${}^4\text{F}_{3/2} \rightarrow {}^4\text{I}_{11/2}$ ,  ${}^4\text{F}_{3/2} \rightarrow {}^4\text{I}_{13/2}$  и  ${}^4\text{F}_{3/2} \rightarrow {}^4\text{I}_{15/2}$ .

*Ключевые слова:* молибдат стронция, неодим, параметры интенсивности, сечение испускания, параметры спектроскопического качества.

*Финансирование.* Исследование не имело спонсорской поддержки.

*Цитирование:* Зиненко А. И., Клименко В. А., Скачедуб А. В. Исследование спектроскопических характеристик кристаллов молибдата стронция, активированных ионами неодима // Экологический вестник научных центров Черноморского экономического сотрудничества. 2023. Т. 20, № 2. С. 56–62. EDN: UUVBP. DOI: 10.31429/vestnik-20-2-56-62

Поступила 10 марта 2023 г. После доработки 16 июня 2023 г. Принято 18 июня 2023 г. Публикация 30 июня 2023 г.

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов. Авторы внесли одинаковый вклад в подготовку рукописи.

© Автор(ы), 2023. Статья открытого доступа, распространяется по лицензии [Creative Commons Attribution 4.0 \(CC BY\)](https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/).

## Intensity Parameters of Neodymium Ions in Strontium Molybdate Crystals

A. I. Zinenko , V. A. Klimenko, A. V. Skachedub

Kuban State University, Stavropolskaya str., 149, Krasnodar, 350040, Russia

✉ Angelina I. Zinenko; ORCID 0009-0008-8796-9549; e-mail: [aphelionyellow@gmail.com](mailto:aphelionyellow@gmail.com)

*Abstract.* Intensity parameters of the neodymium ions in doped  $\text{SrMoO}_4$  monocrystals with different composition, grown by modified Czochralski method, are calculated. It's concluded that the use of  $\text{Ta}^{5+}$  ions as charge compensator instead of  $\text{Nb}^{5+}$  ions lead to an increase of the spectroscopic quality parameters, probability of the  ${}^4\text{F}_{3/2} \rightarrow {}^4\text{I}_{9/2}$  transition and a decrease of the  ${}^4\text{F}_{3/2} \rightarrow {}^4\text{I}_{11/2}$ ,  ${}^4\text{F}_{3/2} \rightarrow {}^4\text{I}_{13/2}$  and  ${}^4\text{F}_{3/2} \rightarrow {}^4\text{I}_{15/2}$  transition probabilities.

*Keywords:* strontium molybdate, neodymium, intensity parameters, stimulated emission cross-section, spectroscopic quality parameters.

*Funding.* The study did not have sponsorship.

*Cite as:* Zinenko, A. I., Klimenko, V. A., Skachedub, A. V., Intensity parameters of neodymium ions in strontium molybdate crystals. *Ecological Bulletin of Research Centers of the Black Sea Economic Cooperation*, 2023, vol. 20, no. 2, pp. 56–62. DOI: 10.31429/vestnik-20-2-56-62

Received 10 March 2023. Revised 16 June 2023. Accepted 18 June 2023. Published 30 June 2023.

The authors declare no competing interests. The authors contributed equally.

© The Author(s), 2023. The article is open access, distributed under [Creative Commons Attribution 4.0 \(CC BY\)](https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/) license.

## Введение

Соединения, активированные редкоземельными ионами, имеют обширное применение в медицинском материаловедении, в квантовой электронике, в качестве кристаллофосфоров и сцинтилляторов. В квантовой электронике они используются в качестве активных сред твердотельных лазеров. Твердотельные лазеры созданы на основе кристаллов, лазерной керамики,

которая активирована редкоземельными ионами, стекол. Они генерируют излучение на различных частотах и широко применяются на практике.

На сегодняшний день лазерная генерация существует на огромном количестве активированных кристаллических сред. Тем не менее, необходимо искать новые лазерные кристаллические матрицы, которые активированы примесными ионами в определённой концентрации для получения наиболее высокоэффективной генерации излучения. Это является одной из самых актуальных задач лазерной физики. Необходимо в совокупности исследовать и учитывать как физические характеристики самих кристаллических матриц, так и их оптические характеристики при активации примесными ионами. Оптические характеристики же зависят от спектрально-люминесцентных параметров, что относятся к оптическим переходам между энергетическими уровнями примесных ионов, а также от ближайшего окружения ионов. Решение поставленных задач открывает новые возможности исследований и предсказания характеристик оптических сред как потенциально годных для применения в качестве активных сред без непосредственного осуществления лазерной генерации.

Известно [1], что эффективность излучения иона-активатора и термическая устойчивость излучения зависят от положения редкоземельного иона в кристаллической решётке, электрическое поле которой обуславливает штарковское расщепление энергетических уровней примесных атомов.

Поскольку спектроскопические свойства редкоземельных ионов зависят от типа кристаллической решётки, необходимо определить влияние таких величин как силы кристаллического поля и симметрия окружения оптических центров на оптические свойства и частоту лазерных переходов. Для определения наиболее высокоэффективных лазерных сред необходимо оценить спектрально-люминесцентные параметры, непосредственно влияющие на характеристики лазерного излучения, такие как пиковое сечение испускания, коэффициент ветвления люминесценции, скорости спонтанных переходов, излучательные времена жизни энергетических уровней. Подобные исследования проводились уже неоднократно [1–3]. Поэтому на основе разработанных методов определения указанных параметров можно выделить матрицы, удовлетворяющие требованиям эффективных лазерных сред.

Монокристаллы  $BaWO_4$ ,  $SrWO_4$ ,  $SrMoO_4$ , относящиеся к группе шеелита, имеют большой потенциал для создания источников и преобразователей лазерного излучения. Эти кристаллы обладают высокими акустооптическими характеристиками, высокими показателями механической прочности и лучевой стойкости, не являются гигроскопичными. Структура шеелита позволяет введение ионов-активаторов редкоземельных элементов и кристаллы с этой структурой решётки являются перспективным материалом, на котором возможно осуществление вынужденного комбинационного рассеяния света [4].

## 1. Методы исследований

Для изучения схем уровней большинства редкоземельных ионов в 1962 г. Джаддом и Офельтом была разработана теория, получившая название «Джадда-Офельта» [5, 6]. Она объяснила возникающее в уровнях расщепление, когда ион находится в кристаллической решетке.

Структурой окружения редкоземельных ионов определяются следующие спектроскопические характеристики: сила осциллятора, параметры интенсивности, радиационное или люминесцентное время жизни, вероятность спонтанных переходов. Также они определяются тем, в какой степени редкоземельный ион взаимодействует с окружающим его полем.

На основе теории Джадда-Офельта возможен анализ связи между спектроскопическими параметрами редкоземельных ионов и составом оптической матрицы [7, 8]. Существование данной связи экспериментально обнаружено давно. Также на основе данной теории можно рассчитать спектроскопические параметры активированных оптических матриц абсолютно различного состава.

Очень много оригинальных научных публикаций посвящено определению интенсивностей оптических  $f-f$  переходов в редкоземельных ионах активаторах лазерных кристаллов. Главной целью является то, что необходимо выявить физические механизмы, обеспечивающие наиболее высокие параметры интенсивностей в сверхчувствительных переходах. Это всё отно-

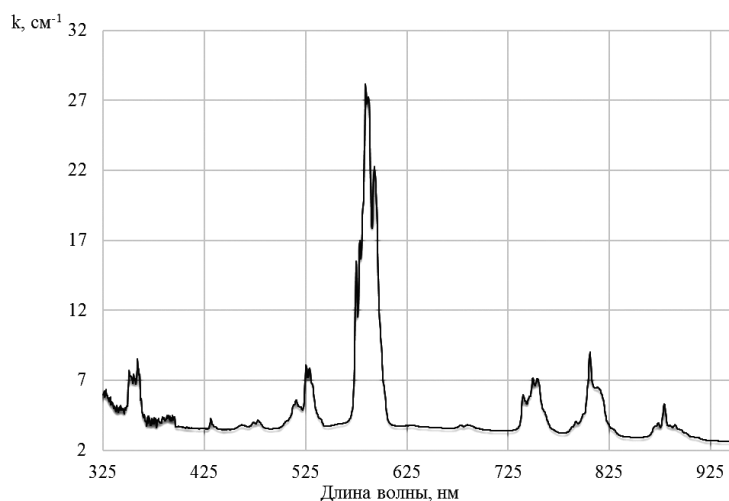


Рис. 1. Спектр поглощения монокристалла  $\text{SrMoO}_4 + 1\% \text{NdTaO}_4 + 1\% \text{MoO}_3$ , вес. %

*Fig. 1. Mono-crystal  $\text{SrMoO}_4 + 1\% \text{NdTaO}_4 + 1\% \text{MoO}_3$  absorption spectrum, weight %*

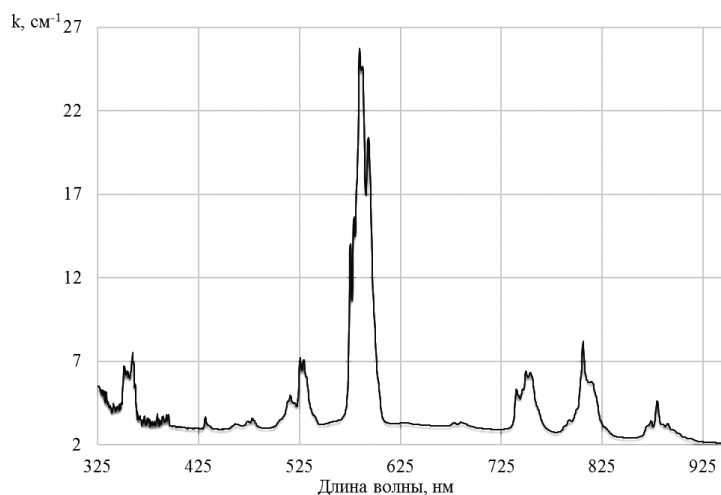


Рис. 2. Спектр поглощения кристалла  $\text{SrMoO}_4 + 2\% \text{NdNbO}_4$ , вес. %

*Fig. 2. Crystal  $\text{SrMoO}_4 + 2\% \text{NdNbO}_4$  absorption spectrum, weight %*

сится к переходам в редкоземельных ионах разнообразных видов лазерных кристаллических сред. Несмотря на всё это, такой анализ актуален и вполне имеет место быть. Например, результаты данных анализов интересны с точки зрения фундаментальной физики и химии. Необходимо понимать механизм, который обеспечивает  $f-f$  переходам редкоземельных ионов в активированных кристаллических средах высокие интенсивности, что важно для создания эффективных твердотельных лазеров.

В данной работе исследовались кристаллы молибдата стронция, активированные неодимом, выращенные в лаборатории роста оптических сред на физико-техническом факультете Кубанского государственного университета. Спектры поглощения исследуемых кристаллов молибдатов стронция регистрировались при температуре 300 К со спектральным разрешением 1 нм в области 400–950 нм на спектрофотометре ЛОМО СФ–256 УВИ, они приведены на рис. 1, 2. Данный прибор предназначен для измерения спектральных коэффициентов направленного пропускания жидких и твердых прозрачных веществ.

Спектры поглощения кристаллов молибдата стронция состоят из шести групп линий переходов ионов  $\text{Nd}^{3+}$  с основного состояния  $^4\text{I}_{9/2}$  на возбуждённые энергетические уровни иона неодима:  $^2\text{K}_{13/2}$ ,  $^4\text{G}_{7/2}$ ,  $^4\text{G}_{9/2}$ ,  $^4\text{G}_{5/2}$ ,  $^2\text{G}_{7/2}$ ,  $^4\text{F}_{7/2}$ ,  $^4\text{S}_{3/2}$ ,  $^4\text{F}_{5/2}$ ,  $^2\text{H}_{9/2}$ ,  $^4\text{F}_{3/2}$ , — с максимумами поглощения вблизи длин волн 359, 525, 583, 748, 805 и 878 нм соответственно. Максимальное значение сечения поглощения  $\text{Nd}^{3+}$  в исследуемых кристаллах приходится на переход  $^4\text{I}_{9/2} \rightarrow ^4\text{G}_{5/2}$ ,  $^2\text{G}_{7/2}$  на длине волны 583 нм.

## 2. Обсуждение результатов

Измеренные силы линии могут быть получены из следующего выражения:

$$S_{meas}(J \rightarrow J') = \frac{3ch(2J+1)}{8\pi^3\lambda e^2 N_0} \frac{9n}{(n^2+2)^2} \int D(\lambda) d\lambda, \quad (2.1)$$

где  $J$  и  $J'$  — суммарный угловой момент верхнего и нижнего уровней,  $N_0$  — концентрация ионов  $\text{Nd}^{3+}$ ,  $\lambda$  — длина волны полосы поглощения, соответствующей переходу  $J \rightarrow J'$ , множитель  $\frac{9n}{(n^2+2)^2}$  учитывает внутрикристаллическое поле, в котором расположены ионы активатора,  $c$  — скорость света в вакууме,  $e$  — заряд электрона,  $h$  — постоянная Планка,  $\int D(\lambda) d\lambda$  — интегральный коэффициент поглощения, который определяется непосредственно из спектра поглощения для каждого перехода. Значения показателя преломления  $n$  кристалла  $\text{SrMoO}_4$ , необходимые для вычисления вычисления измеренных сил линий, были получены из уравнения Зельмеера [8]

$$n_o^2 = 4,1366 + \frac{76882}{\lambda^2 - 36374}.$$

Согласно теории Джадда–Офельта [5, 6], силы линий электродипольного перехода определяются следующей формулой:

$$S_{calc}(J \rightarrow J') = \sum_{t=2,4,6} \Omega_t \left| \langle (S, L)J \| U^{(t)} \| (S', L')J' \rangle \right|^2, \quad (2.2)$$

где  $\Omega_t$  — параметры Джадда–Офельта,  $\langle \| U^{(t)} \| \rangle$  — дважды редуцированные матричные элементы ранга  $t$  между состояниями, характеризуемыми квантовыми числами  $(S, L, J)$  и  $(S', L', J')$  [7].

Приравняв друг другу правые части выражений (2.1) и (2.2) и решая полученную переопределённую систему уравнений (методом наименьших квадратов), находим значения параметров интенсивности  $\Omega_t$ . Значения параметров  $\Omega_t$  для исследованных кристаллов, а также величины сил линий для электронных переходов в ионах  $\text{Nd}^{3+}$ , полученные в результате описанных выше вычислений, приведены в табл. 1–2.

Так как электронные переходы в свободных атомах неодима с возбуждённого уровня  $^4\text{F}_{3/2}$  на основной  $^4\text{I}_{9/2}$  описываются редуцированными матричными элементами  $U^{(4)}$  и  $U^{(6)}$ , в работе [11] был введён параметр спектроскопического качества  $X$ , который равен отношению соответствующих этим матричным элементам параметров интенсивности  $\Omega_4/\Omega_6$  в кристаллической матрице. Параметр  $X$  определяет специфику применения данной кристаллической среды, увеличение параметра соответствует монотонному увеличению мощности люминесценции на переходе  $^4\text{F}_{3/2} \rightarrow ^4\text{I}_{9/2}$ , в то время как для переходов на уровни  $^4\text{I}_{11/2}$ ,  $^4\text{I}_{13/2}$  и  $^4\text{I}_{15/2}$  — монотонно уменьшается и наоборот.

Изменения параметров интенсивности  $\Omega_t$  редкоземельного иона объясняется тем, что причинами чувствительности его отдельных переходов являются особенности локального окружения и, соответственно, тип точечной симметрии окружения примесного иона в кристаллической матрице. В работе [12–15] отмечается, что параметр  $\Omega_2$  наиболее чувствителен к степени асимметрии кристаллического поля, в то время как параметр  $\Omega_6$  наиболее чувствителен к изменению электронной плотности  $4f$  и  $5d$  оболочек. Параметр  $\Omega_4$  изменяется в результате одновременного влияния указанных факторов, что часто затрудняет установление причины его изменения. Анализируя полученные значения параметров интенсивности можно заключить следующее: соактивация кристаллов вольфраматов и молибдатов стронция танталом

Таблица 1. Значения измеренных и рассчитанных сил линий электронных переходов в ионах неодима, находящихся в кристаллах молибдата стронция

Table 1. Values of measured and calculated strengths of electronic transition lines in neodymium ions located in strontium molybdate crystals

Возбужденное состояние	$\lambda$ , нм	SrMoO <sub>4</sub> + 1% NdTaO <sub>4</sub> + 1% MoO <sub>3</sub> , вес. %		SrMoO <sub>4</sub> + 2% NdNbO <sub>4</sub> , вес. %	
		$S_{meas} \times 10^{-20}$ , см <sup>2</sup>	$S_{calc} \times 10^{-20}$ , см <sup>2</sup>	$S_{meas} \times 10^{-20}$ , см <sup>2</sup>	$S_{calc} \times 10^{-20}$ , см <sup>2</sup>
<sup>4</sup> F <sub>3/2</sub>	878	0,50	1,11	0,36	0,38
<sup>4</sup> F <sub>5/2</sub> + <sup>2</sup> H <sub>9/2</sub>	805	2,09	2,24	0,99	1,00
<sup>4</sup> F <sub>7/2</sub> + <sup>4</sup> S <sub>3/2</sub>	747	1,69	1,59	0,82	0,85
<sup>4</sup> F <sub>9/2</sub>	682	0,12	0,14	0,06	0,07
<sup>2</sup> H <sub>11/2</sub>	633	0,02	0,03	0,01	0,02
<sup>4</sup> G <sub>5/2</sub> + <sup>2</sup> G <sub>7/2</sub>	584	12,61	12,60	6,04	6,06
<sup>4</sup> G <sub>9/2</sub> + <sup>4</sup> G <sub>7/2</sub> + <sup>2</sup> K <sub>13/2</sub>	525	2,22	1,89	1,06	0,80
<sup>4</sup> G <sub>11/2</sub> + <sup>2</sup> D <sub>3/2</sub> + <sup>2</sup> G <sub>9/2</sub> + <sup>2</sup> K <sub>15/2</sub>	478	0,17	0,28	0,15	0,11
<sup>2</sup> P <sub>1/2</sub>	431	0,08	0,16	0,05	0,05
<sup>4</sup> D <sub>5/2</sub> + <sup>4</sup> D <sub>3/2</sub> + <sup>2</sup> I <sub>11/2</sub> + <sup>4</sup> D <sub>1/2</sub> + <sup>2</sup> L <sub>15/2</sub>	359	2,78	2,56	0,80	0,86

Таблица 2. Значения параметров интенсивности электронных переходов в ионах неодима, находящихся в кристаллах шеелитов различного состава

Table 2. Values of the parameters of the intensity of electronic transitions in ions neodymium found in scheelite crystals of various compositions

Соединение	$\Omega_2 \times 10^{-20}$ , см <sup>2</sup>	$\Omega_4 \times 10^{-20}$ , см <sup>2</sup>	$\Omega_6 \times 10^{-20}$ , см <sup>2</sup>	X	Источник
SrMoO <sub>4</sub> + 1% NdTaO <sub>4</sub> + 1% MoO <sub>3</sub> , вес. %	10,1 ± 2,0	4,3 ± 0,7	2,1 ± 0,4	2,05	–
SrMoO <sub>4</sub> + 1,1% NdNbO <sub>4</sub> , вес. %	12,6 ± 2,3	3,2 ± 0,5	4,2 ± 0,6	0,76	[9]
SrWO <sub>4</sub> + 1% NdNbO <sub>4</sub> , вес. %	13,7 ± 2,6	4,9 ± 0,7	4,7 ± 0,7	1,04	[10]
SrMoO <sub>4</sub> + 2% NdNbO <sub>4</sub> , вес. %	10,6 ± 1,0	2,8 ± 0,2	2,4 ± 0,2	1,17	–
SrWO <sub>4</sub> + 2% NdNbO <sub>4</sub> , вес. %	12,6 ± 2,4	5,2 ± 0,8	4,4 ± 0,7	1,18	[10]

вместо ниобия не приводит к значительным локальным изменениям структуры ближайшего окружения примесных ионов, так как относительные значения параметра  $\Omega_2$  практически не изменяются. Однако параметры X и  $\Omega_4$  изменяются в сторону увеличения, что свидетельствует об изменении электронной плотности 4f и 5d и изменении энергетического зазора между соответствующими уровнями.

Вероятность спонтанного излучения для переходов между любой парой мультиплетов ионов Nd<sup>3+</sup> вычисляется по следующей формуле:

$$A(J \rightarrow J') = \frac{64\pi^4 e^2}{3h(2J+1)\lambda^3} \frac{n(n^2+2)^2}{9} \sum_{t=2,4,6} \Omega_t \left| \langle (S, L)J \| U^{(t)} \| (S', L')J' \rangle \right|^2. \quad (2.3)$$

С вероятностью спонтанного перехода связан один из самых важных спектроскопических параметров — время жизни возбужденного состояния, которое характеризует скорость затухания люминесценции после прекращения процесса возбуждения. По величине этого параметра судят

Таблица 3. Значения скоростей переходов, коэффициентов ветвления люминесценции, времён жизни возбуждённых ионов неодима в кристаллах молибдата стронция

Table 3. Values of transition rates, luminescence branching coefficients, lifetimes of excited neodymium ions in strontium molybdate crystals

Переход	$\lambda$ , нм	SrMoO <sub>4</sub> + 1% NdTaO <sub>4</sub> + 1% MoO <sub>3</sub> , вес. %			SrMoO <sub>4</sub> + 2% NdNbO <sub>4</sub> , вес. %		
		A, с <sup>-1</sup>	$\beta$ , %	$\tau_{\text{люм}}$ , $\times 10^{-4}$ с	A, с <sup>-1</sup>	$\beta$ , %	$\tau_{\text{люм}}$ , $\times 10^{-4}$ с
${}^4F_{3/2} \rightarrow {}^4I_{9/2}$	881	2605,6	54,82	2,10	902,68	46,27	5,13
${}^4F_{3/2} \rightarrow {}^4I_{11/2}$	1052	1843,2	38,78		876,77	44,94	
${}^4F_{3/2} \rightarrow {}^4I_{13/2}$	1333	289,4	6,09		163,2	8,36	
${}^4F_{3/2} \rightarrow {}^4I_{15/2}$	1851	14,79	0,31		8,34	0,43	

о перспективности данной люминесцирующей среды в качестве использования оптического квантового генератора.

Вероятность спонтанного излучения и люминесцентное время жизни  $\tau_{\text{люм}}$  зависят друг от друга следующим образом:

$$\tau_{\text{люм}} = \frac{1}{\sum A(J \rightarrow J')} \quad (2.4)$$

Здесь суммирование проводится по всем нижележащим уровням  $J'$ . Чем больше вероятность спонтанных переходов, тем меньше среднее время жизни атома в возбужденном состоянии.

Вероятность спонтанного излучения связана с коэффициентом ветвления люминесценции, который определяет количественное распределение переходов между каналами излучения и имеет вид

$$\beta(J \rightarrow J') = \frac{A(J \rightarrow J')}{\sum A(J \rightarrow J')} = A(J \rightarrow J') \tau_{\text{люм}} \quad (2.5)$$

Значения вероятности спонтанного излучения, люминесцентного времени жизни и коэффициентов ветвления люминесценции, вычисленных по формулам (2.3)–(2.5) соответственно, приведены в табл. 3.

Сравнивая полученные значения скоростей переходов и люминесцентные времена жизни возбужденного состояния ионов неодима в кристаллах составов SrMoO<sub>4</sub> + 1% NdTaO<sub>4</sub> + 1% MoO<sub>3</sub>, вес. % и SrMoO<sub>4</sub> + 2% NdNbO<sub>4</sub>, вес. %, видно, что значения скоростей переходов в кристалле, где в качестве компенсатора заряда используются ионы Ta<sup>5+</sup>, более чем в два раза превышают скорость переходов в кристалле соактивированного ионами Nb<sup>5+</sup>. В связи с этим времена жизни люминесценции также отличаются более, чем в два раза, что сказывается на сложности получения стабильной лазерной генерации и перспективности использования в качестве оптических квантовых генераторов кристаллов молибдата стронция с компенсатором зарядового дефекта танталом.

### Заключение

Таким образом, в настоящей работе исследовано влияние состава кристаллов молибдатов стронция со структурой шеелита на люминесцентные свойства ионов неодима. Увеличение параметра спектроскопического качества  $X$  от кристалла состава SrMoO<sub>4</sub>: 1,1% NdNbO<sub>4</sub> к кристаллу состава SrMoO<sub>4</sub>: 2% NdTaO<sub>4</sub> приводит к увеличению вероятности перехода  ${}^4F_{3/2} \rightarrow {}^4I_{9/2}$  и уменьшению вероятностей переходов  ${}^4F_{3/2} \rightarrow {}^4I_{11/2}$ ,  ${}^4F_{3/2} \rightarrow {}^4I_{13/2}$  и  ${}^4F_{3/2} \rightarrow {}^4I_{15/2}$ . Полученные в ходе выполнения работы результаты позволяют сделать вывод о том, что, изменяя состав кристаллической матрицы, можно в некоторых пределах изменять люминесцентные параметры ионов неодима. Подобные исследования необходимы для определения специфики применения оптических квантовых генераторов, для прогнозирования их лазерных свойств, а также оптимизации временных и финансовых затрат при поиске наиболее высокоэффективных лазерных сред.

## Литература [References]

1. Kaminskii, A.A., *Laser crystals: their physics and properties*. Springer, 1990.
2. Исаев, В.А., Игнатъев, Б.В., Лебедев, А.В., Плаутский, П.Г., Аванесов, С.А., Теплофизические особенности роста крупных монокристаллов вольфрамата бария для ВКР-преобразования лазерного излучения. *Экологический вестник научных центров Черноморского экономического сотрудничества*, 2012, № 2, с. 27–33. [Isaev, V.A., Ignatiev, B.V., Lebedev, A.V., Plautsky, P.G., Avanesov, S.A., Thermophysical features of the growth of large barium tungstate single crystals for SRS-conversion of laser radiation. *Ekologicheskiy vestnik nauchnykh tsentrov Chernomorskogo ekonomicheskogo sotrudnichestva = Ecological Bulletin of Research Centers of the Black Sea Economic Cooperation*, 2012, no. 2, pp. 27–33. (in Russian)] EDN: OZCFVR
3. Исаев, В.А., Игнатъев, Б.А., Лебедев, А.В., Аванесов, С.А., Плаутский, П.Г., Особенности выращивания номинально чистых и легированных неодимом монокристаллов вольфрамата стронция. *Научный журнал КубГАУ*, 2012, т. 5, № 79, с. 1–12. [Isaev, V.A., Ignatiev, B.A., Lebedev, A.V., Avanesov, S.A., Plautsky, P.G., Features of growing nominally pure and neodymium-doped strontium tungstate single crystals. *Nauchnyy zhurnal KubGAU = Scientific journal of the Kuban State Agrarian University*, 2012, vol. 5, no. 79, pp. 1–12. (in Russian)]
4. Лебедев, А.В., *Синтез, структурные и спектроскопические исследования вольфраматов и молибдатов стронция и бария как активных ВКР-сред*: дис. канд. физ.-мат. наук. Краснодар, 2013. [Lebedev, A.V., *Sintez, strukturnye i spektroskopicheskie issledovaniya vol'framatov i molibdatov strontsiya i bariya kak aktivnykh VKR-sred = Synthesis, structural and spectroscopic studies of strontium and barium tungstates and molybdates as active Raman media*: Cand. cand. fiz.-mat. sciences. (in Russian)]
5. Judd, B.R., Optical absorption intensities of rare-earth ions. *Phys. Rev.*, 1961, vol. 127, p. 750. DOI: [10.1103/PhysRev.127.750](https://doi.org/10.1103/PhysRev.127.750)
6. Ofelt, G. S., Intensities of crystal spectra of rare-earth ions. *J. Chem. Phys.*, 1962, vol. 37, p. 511. DOI: [10.1063/1.1701366](https://doi.org/10.1063/1.1701366)
7. Kaminski, A.A., Boulon, G., Buoncristian, M., Di Bartolo, B., Kornienko, A., Mironov V., Spectroscopy of a new laser garnet  $\text{Lu}_3\text{Sc}_2\text{Ga}_3\text{O}_{12}:\text{Nd}^{3+}$ . *Phys. Stat. Sol.*, 1994, vol. 141, iss. 2, pp. 471–494. DOI: [10.1002/pssa.2211410228](https://doi.org/10.1002/pssa.2211410228)
8. Ma, X., Li, J., Zhu Z., Wang Y., Tu C. Optical properties of  $\text{Er}^{3+}:\text{SrMoO}_4$  single crystal. *Journal of Physics and Chemistry of Solids*, 2008, vol. 69, iss. 10, pp. 2411–2415. DOI: [10.1016/j.jpcs.2008.04.030](https://doi.org/10.1016/j.jpcs.2008.04.030)
9. Исаев, В.А., Скачедуб, А.В., Клименко, В.А., Плаутский, П.Г., Лебедев, А.В., Параметры интенсивности ионов неодима в кристаллах молибдата стронция. *Научный журнал КубГАУ*, 2013, т. 7, № 91, с. 1–18. [Isaev, V.A., Skachedub, A.V., Klimenko, V.A., Plautsky, P.G., Lebedev, A.V., Intensity parameters of neodymium ions in strontium molybdate crystals. *Nauchnyy zhurnal KubGAU = Scientific journal of the Kuban State Agrarian University*, 2013, vol. 7, no. 91, pp. 1–18. (in Russian)]
10. Исаев, В.А., Скачедуб, А.В., Клименко, В.А., Плаутский, П.Г., Лебедев, А.В. Параметры интенсивности ионов неодима в кристаллах вольфраматов стронция. *Экологический вестник научных центров Черноморского экономического сотрудничества*, 2013, т. 10, № 1, с. 32–41. [Isaev, V.A., Skachedub, A.V., Klimenko, V.A., Plautsky, P.G., Lebedev, A.V. Neodymium ion intensity parameters in strontium tungstate crystals. *Ekologicheskiy vestnik nauchnykh tsentrov Chernomorskogo ekonomicheskogo sotrudnichestva = Ecological Bulletin of Research Centers of the Black Sea Economic Cooperation*, 2013, vol. 10, no. 1, pp. 32–41. (in Russian)]
11. Каминский, А.А., Антипенко, Б.М., *Многоуровневые функциональные схемы кристаллических лазеров*. Наука, Москва, 1989. [Kaminsky, A.A., Antipenko, B.M., *Mnogourovnevye funktsional'nye skhemy kristallicheskiykh lazerov = Multilevel functional schemes of crystalline lasers*. Nauka, Moscow, 1989. (in Russian)]
12. Tanabe, S., Hanada, T., Ohyagi, T., Soga, N., Correlation between  $^{151}\text{Eu}$  Mössbauer isomer shift and Judd–Ofelt  $\Omega_{2,6}$  parameters of  $\text{Nd}^{3+}$  ions in phosphate and silicate laser glasses. *Phys. Rev. B.*, 1993, vol. 48, iss. 14, pp. 10591–10594. DOI: [10.1103/PhysRevB.48.10591](https://doi.org/10.1103/PhysRevB.48.10591)
13. Kaminskii, A.A., *Crystalline lasers: Physical processes and operating schemes*. CRC-Press, 1996.
14. Krupke, W.F., Shinn, M.D., Marion, J.E., Caird, J.A., Stokowski, S.E. Spectroscopic, optical, and thermomechanical properties of neodymium- and chromium-doped gadolinium scandium gallium garnet. *J. Opt. Soc. Am. B.*, 1986, vol. 3, iss. 1, pp. 102–114. DOI: [10.1364/JOSAB.3.000102](https://doi.org/10.1364/JOSAB.3.000102)
15. Krupke, W.F., Transition probabilities in  $\text{Nd}:\text{GGG}$ . *Optic Communication*, 1974, vol. 12, iss. 2, pp. 210–212. DOI: [10.1016/0030-4018\(74\)90393-9](https://doi.org/10.1016/0030-4018(74)90393-9)