

УДК 535.37

Применение методов Фюхтбауэра–Ладенбурга и соответствия для определения спектров сечений стимулированного испускания неодимовых лазерных сред

Демеш М.П.¹, Гусакова Н.В.¹, Ясюкевич А.С.¹, Кулешов Н.В.¹, Григорьев С.В.¹, Крот Ю.А.², Космына М.Б.³, Шеховцов А.Н.³

¹Белорусский национальный технический университет,
пр. Независимости, 65, 220013, г. Минск, Беларусь

²Институт прикладных физических проблем им. А.Н. Севченко Белорусского государственного университета,
ул. Курчатова, 7, 220045, г. Минск, Беларусь

³Институт монокристаллов НАН Украины,
пр. Ленина, 60, 61001, г. Харьков, Украина

Поступила 09.06.2015

Принята к печати 23.10.2015

Для создания лазеров, генерирующих импульсы ультракороткой длительности, представляют большой интерес лазерные материалы с широкими полосами усиления. В этой связи значительный интерес представляют структурно разупорядоченные материалы, в частности новые кристаллические среды, принадлежащие тригональной сингонии $\text{Nd}^{3+}:\text{Ca}_{10}\text{K}(\text{VO}_4)_7$ (Nd:CKV), $\text{Nd}^{3+}:\text{Ca}_9\text{La}(\text{VO}_4)_7$ (Nd:CLaV) и $\text{Nd}^{3+}:\text{Ca}_{10}\text{Li}(\text{VO}_4)_7$ (Nd:CLiV). В данной работе формула Фюхтбауэра–Ладенбурга и интегральный метод соответствия применены для определения спектров сечений стимулированного испускания указанных выше кристаллов на переходах ${}^4F_{3/2} \rightarrow {}^4I_{9/2}$, ${}^4F_{3/2} \rightarrow {}^4I_{11/2}$ и ${}^4F_{3/2} \rightarrow {}^4I_{13/2}$ иона неодима. Максимальные пиковые значения сечений стимулированного испускания и наибольшие спектральные ширины полос в области 1,07 мкм составляют $9,33 \cdot 10^{-20} \text{ см}^2$ (σ -поляризация, Nd:CKV) и 30 нм (π -поляризация, Nd:CKV), в области 1,35 мкм – $1,55 \cdot 10^{-20} \text{ см}^2$ и 50 нм (π -поляризация, Nd:CKV). Полосы стимулированного испускания, а следовательно, и усиления в областях спектра 1,07 и 1,35 мкм являются гладкими и бесструктурными с ширинами, позволяющими получать ультракороткие импульсы света с длительностью $\approx 60 \text{ фс}$ (1,07 мкм), $\approx 45 \text{ фс}$ (1,35 мкм) в лазерах на исследованных лазерных средах, работающих в режиме синхронизации мод.

Ключевые слова: двойной ортованадат, коэффициент ветвления люминесценции, сечение стимулированного испускания, формула Фюхтбауэра–Ладенбурга, интегральный метод соответствия.

Адрес для переписки:

Ясюкевич А.С.

Белорусский национальный технический университет,
пр. Независимости, 65, 220013, г. Минск, Беларусь
e-mail: anamol@bntu.by

Address for correspondence:

Yasukevich A.S.

Belarusian National Technical University,
Nezavisimosty Ave., 65, 220013, Minsk, Belarus
e-mail: anamol@bntu.by

Для цитирования:

Демеш М.П., Гусакова Н.В., Ясюкевич А.С., Кулешов Н.В., Григорьев С.В., Крот Ю.А., Космына М.Б., Шеховцов А.Н. Применение методов Фюхтбауэра–Ладенбурга и соответствия для определения спектров сечений стимулированного испускания неодимовых лазерных сред // Приборы и методы измерений. 2015. – Т. 6, № 2. – С. 211–219

For citation:

Demesh M.P., Gusakova N.V., Yasukevich A.S., Kuleshov N.V., Grigor'ev S.V., Krot Y.A., Kosmyna M. B., Shekhotsov A.N. Application of Füchtbauer–Ladenburg equation and reciprocity method for determination of emission cross sections of Nd-doped laser media // Devices and Methods of Measurements. 2015, vol. 6, No. 2, pp. 211–219

Введение

Кристаллы ванадатов, относящиеся к тетрагональной сингонии с общей формулой $REVO_4$ (где $RE = Y, Gd, Lu$), активированные ионами редкоземельных элементов ($Nd^{3+}, Yb^{3+}, Tm^{3+}$ и др.), широко используются как активные материалы в лазерах с диодной накачкой [1–3]. Кристаллы твердых растворов ванадатов состава $Gd Y_{1-x} VO_4$ и $Ca_9 X (VO_4)_7$ ($X = La^{3+}, Y^{3+}, Gd^{3+}, Lu^{3+}, Bi^{3+}$) [4, 5] с ионами РЗЭ привлекательны как активные среды для получения импульсов ультракороткой длительности, что связано с уширением их полос усиления.

В работе [6] представлены результаты исследований спектрально-люминесцентных характеристик новых соединений $Nd^{3+}:Ca_{10}K(VO_4)_7$, $Nd^{3+}:Ca_9La(VO_4)_7$ и $Nd^{3+}:Ca_{10}Li(VO_4)_7$ с кристаллической структурой, принадлежащей тригональной сингонии.

Целью данной работы являлось экспериментальное определение коэффициентов ветвления и расчет спектров сечений стимулированного испускания на переходах ${}^4F_{3/2} \rightarrow {}^4I_{9/2}$, ${}^4F_{3/2} \rightarrow {}^4I_{11/2}$ и ${}^4F_{3/2} \rightarrow {}^4I_{13/2}$ ионов неодима в кристаллах $Nd:CKV$, $Nd:CLaV$ и $Nd:CLiV$ по формуле Фюхтбауэра–Ладенбурга (ФЛ). Для расчетов спектров сечений на переходе ${}^4F_{3/2} \rightarrow {}^4I_{9/2}$ был дополнительно применен интегральный метод соответствия.

Определение спектральной чувствительности люминесцентной установки

Спектральная чувствительность регистрирующей части люминесцентной установки может быть найдена несколькими методами [7]: метод флуоресцирующего раствора, метод отражения света источника возбуждения, метод эталонной лампы. Последний метод наиболее часто применяется на практике. В качестве эталонной лампы могут быть использованы светоизмерительные лампы типа СИРШ, СИП и другие, с ленточным телом накала. Такие лампы являются источником света с известным распределением яркости излучения по спектру в абсолютных единицах. Для целей люминесцентных измерений более удобными являются калибровочные галогеновые источники света, позволяющие получить относительное распределение яркости в видимой и ближней инфракрасной областях спектра.

Калибровка регистрирующей части люминесцентной установки на спектральную чувствительность разбивается на два этапа: определение

относительной спектральной плотности энергетической яркости (СПЭЯ) эталонной галогеновой лампы, которая пропорциональна спектральной плотности мощности излучения лампы $P_{ил}(\lambda)$, и непосредственно определение спектральной чувствительности люминесцентной установки с использованием откалиброванной галогеновой лампы. Отметим, что говоря о спектральной мощности излучения лампы или люминесценции, мы будем иметь в виду только ее относительное распределение в спектре.

Калибровка спектра галогеновой лампы проводилась методом компарирования со спектром рабочего эталона (РЭ), который представляет собой ленточную лампу накаливания с сертификатом калибровки по СПЭЯ. Метод компарирования заключается в том, что в исследуемом спектральном диапазоне непосредственным образом измеряются величины сигналов от фотоприемников для РЭ и галогеновой лампы, и по известному спектру РЭ определяется СПЭЯ галогеновой лампы. Для сравнения сигналов от двух источников света использовался монохроматор МДР-23 с охлаждаемыми приемниками излучения *Hamamatsu S 7031-1006S* и *G9208-256W* на области спектра 350–1000 нм и 1000–2500 нм соответственно. Для работы в спектральном диапазоне 350–2500 нм используются три дифракционные решетки с числом штрихов на миллиметр 1200, 600 и 300. Для устранения переналожения порядков дифракции применялась предварительная спектральная селекция при помощи полосовых фильтров, установленных перед входной щелью монохроматора.

При проведении измерений соблюдалась идентичность геометрических условий ввода излучения в монохроматор от обоих источников света. Излучение РЭ и галогеновой лампы подавалось на входную щель монохроматора с помощью зеркального коллиматора. Изображение тела накала источника света переносилось на щель монохроматора в масштабе 1:1. При измерениях контролировалась величина и однородность заполнения излучением дифракционной решетки монохроматора. Полученная относительная СПЭЯ галогеновой лампы показана на рисунке 1.

Калибровка люминесцентной установки на спектральную чувствительность по галогеновой лампе с известной СПЭЯ проводилась в трех спектральных диапазонах 400–900 нм, 850–1800 нм, 1700–2500 нм для поляризации света, параллельной входной спектральной щели монохроматора МДР 23, перпендикулярно ей и для неполяризо-

ванного света. Для устранения переналожения порядков дифракции применялась предварительная спектральная селекция при помощи полосовых фильтров, установленных перед входной щелью монохроматора. Схема люминесцентной установки представлена на рисунке 2.

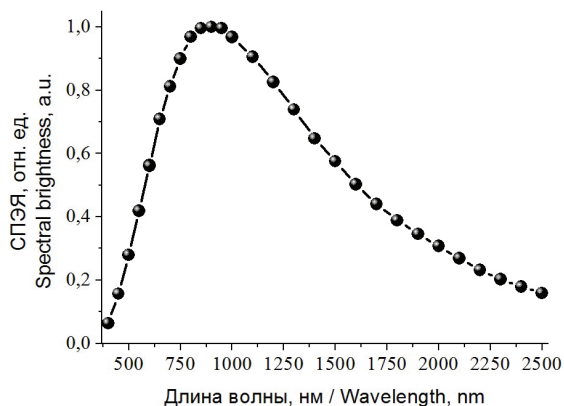


Рисунок 1 – Спектральная плотность энергетической яркости галогеновой лампы

Figure 1 – Spectral brightness of the halogen lamp

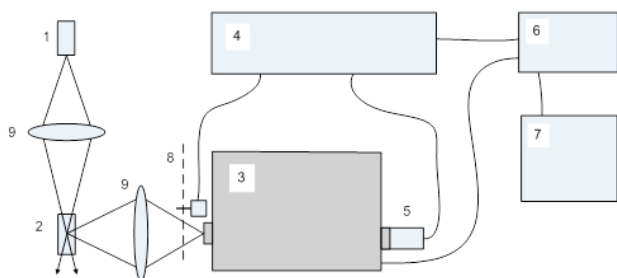


Рисунок 2 – Схема люминесцентной установки: 1 – источник излучения возбуждения (лазерный диод, длина волны излучения – 802 нм); 2 – исследуемый образец; 3 – монохроматор МДР-23; 4 – фазовый синхронный усилитель SR830; 5 – фотоприемник; 6 – блок управления монохроматором; 7 – компьютер; 8 – механический модулятор; 9 – фокусирующие объективы

Figure 2 – Setup for luminescence measurements: 1 – excitation source (laser diode, $\lambda = 802$ nm); 2 – sample; 3 – monochromator MDR-23; 4 – lock-in amplifier SR830; 5 – photodetector, 6 – control unit of the monochromator; 7 – PC; 8 – chopper; 9 – lenses

В процессе калибровки регистрировался спектр излучения галогеновой лампы $U(\lambda)$ в соответствующем спектральном диапазоне в относительных единицах как функция длины волны света. Связь между зарегистрированным спектром $U(\lambda)$ и $P_{HL}(\lambda)$ определяется как

$$U(\lambda) = S(\lambda) P_{HL}(\lambda), \quad (1)$$

где $S(\lambda)$ есть спектральная чувствительность регистрирующей части люминесцентной установки в относительных единицах. При регистрации спектра $U(\lambda)$ наблюдались провалы в областях 1345–1485 нм и 1800–1975 нм, обусловленные поглощением паров воды, присутствующих в воздухе [8]. Кривые $S(\lambda)$ в этих областях исправлялись на спектр поглощения паров воды при помощи сплайн функций 3-го порядка. На рисунке 3 приведен вид $S(\lambda)$ для спектрального диапазона 850–1800 нм, в котором расположены интересные линии в спектре люминесценции ионов Nd^{3+} .

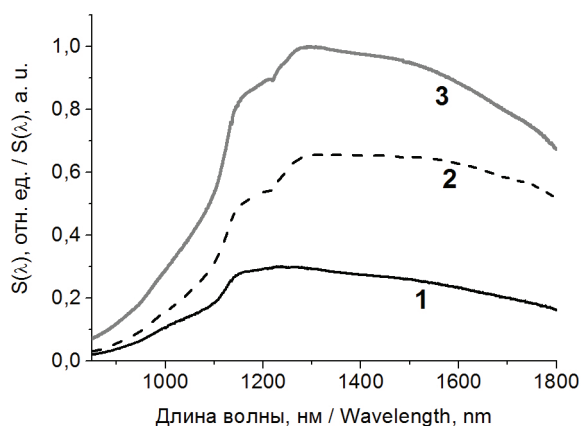


Рисунок 3 – Калибровочные кривые в спектральном диапазоне 850–1800 нм для поляризации света параллельно (1) и перпендикулярно (2) входной щели монохроматора и для неполяризованного света (3)

Figure 3 – Calibration curves in the spectral range of 850–1800 nm for light polarization parallel to (1) and perpendicular to (2) the entrance slit of the monochromator and for unpolarized light (3)

В качестве примера для кристалла $Nd^{3+}:Ca_9La(VO_4)_7$ на рисунке 4 представлены спектры люминесценции для π - и σ -поляризации до и после корректировки на спектральную чувствительность установки.

Определение спектров стимулированного испускания

Спектры люминесценции в поляризованном свете зарегистрированы для переходов ионов неодима ${}^4F_{3/2} \rightarrow {}^4I_{9/2}$, ${}^4F_{3/2} \rightarrow {}^4I_{11/2}$ и ${}^4F_{3/2} \rightarrow {}^4I_{13/2}$ при возбуждении уровня ${}^4F_{5/2}$. Люминесценция в области 1860 нм, соответствующая переходу ${}^4F_{3/2} \rightarrow {}^4I_{15/2}$ [9], в наших экспериментах не наблюдалась. Измеренные спектры люминесценции U_{lum} корректировались на спектральную чувствительность установки и были получены спектры мощ-

ности люминесценции $P_{lum}(\lambda)$ в относительных единицах:

$$P_{lum}(\lambda) = U_{lum}(\lambda) / S(\lambda), \quad (2)$$

По этим спектрам определены коэффициенты ветвления люминесценции β_{ji} при переходах с уровня ${}^4F_{3/2}$ по формуле:

$$\beta_{ji}^\alpha = \frac{\int \lambda P_{ji}^\alpha(\lambda) d\lambda}{\sum_k \int \lambda P_{jk}^\alpha(\lambda) d\lambda}, \quad (3)$$

где $P_{ji}^\alpha(\lambda)$ – спектральная плотность мощности люминесценции, соответствующая одной из линий в спектре люминесценции $P_{lum}(\lambda)$ при переходе с уровня ${}^4F_{3/2}$. Индекс j соответствует начальному состоянию перехода – ${}^4F_{3/2}$. Индексы i и k обозначают конечное состояние перехода – ${}^4I_{9/2}$, ${}^4I_{11/2}$ и

${}^4I_{13/2}$, индекс α – состояние поляризации излучения люминесценции.

В таблице 1 представлены полученные результаты в сравнении с теоретически рассчитанными в работе [6]. Для кристалла Nd:CLiV в данной работе нами проведены расчеты по теории Джадда–Офельта [10–11], которые уточняют данные из [6]. Исследуемые кристаллы кальциевых ванадатов являются оптически одноосными. Поэтому для сравнения экспериментальных данных с результатами теоретического расчета использовались средние значения коэффициентов ветвления в соответствии с выражением $\beta_{ji} = (\beta_{ji}^\pi + 2\beta_{ji}^\sigma) / 3$. Здесь индексы π и σ обозначают коэффициенты ветвления, определенные из спектров люминесценции в поляризованном свете, зарегистрированных для поляризации параллельно и перпендикулярно оптической оси кристаллов соответственно.

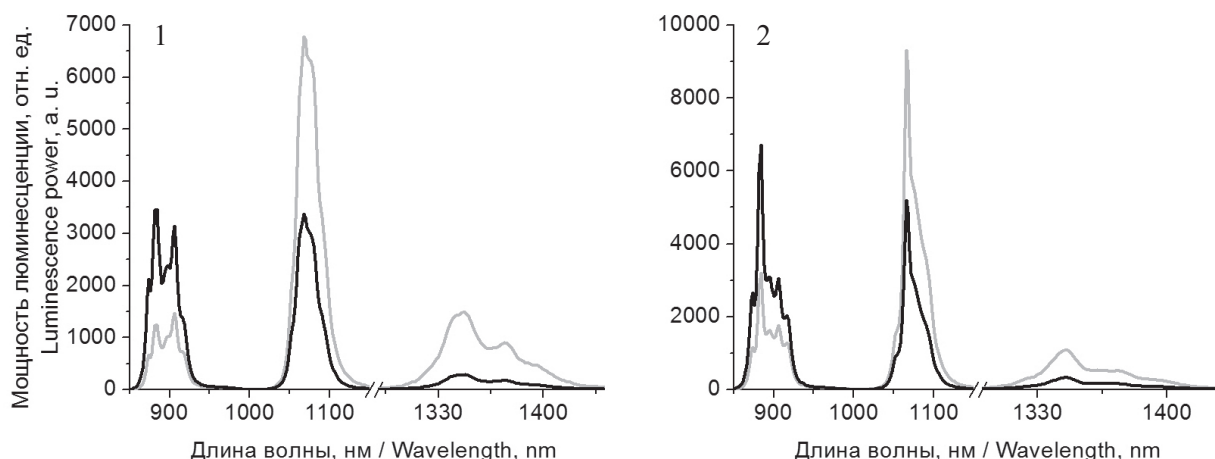


Рисунок 4 – Спектр люминесценции для π (1) и σ (2) поляризации $\text{Nd}^{3+}:\text{Ca}_9\text{La}(\text{VO}_4)_7$ до (серая линия) и после коррекции (черная линия) на спектральную чувствительность люминесцентной установки

Figure 4 – Luminescence spectra for π (1) и σ (2) polarizations of $\text{Nd}^{3+}:\text{Ca}_9\text{La}(\text{VO}_4)_7$ crystal before (gray line) and after (black line) spectral correction

Таблица 1 / Table 1

Коэффициенты ветвления люминесценции при переходах с уровня ${}^4F_{3/2}$
Branching ratios for the ${}^4F_{3/2}$ manifold

Переход Transition	Диапазон длин волн, нм Wavelength range, nm	Nd:CLiV		Nd:CKV		Nd:CLaV	
		β_{exp}	β_{calc}	β_{exp}	$\beta_{calc}^{[6]}$	β_{exp}	β_{calc}
${}^4F_{3/2} \rightarrow {}^4I_{9/2}$	850–1000	0,47	0,47	0,45	0,44	0,47	0,46
${}^4F_{3/2} \rightarrow {}^4I_{11/2}$	1020–1150	0,46	0,45	0,48	0,49	0,46	0,45
${}^4F_{3/2} \rightarrow {}^4I_{13/2}$	1280–1460	0,07	0,08	0,07	0,07	0,07	0,08
$\tau_{rad}^?$ МКС			140		92		125

Как видно из таблицы 1, для всех кристаллов наблюдается хорошее согласие теоретических и экспериментальных результатов, различие между которыми составляет не более 14 %.

Откорректированные спектры люминесценции использованы для расчета спектров сечений стимулированного испускания (СИ) по ФЛ [12].

$$\sigma_{ji}^a(\lambda) = \beta_{ji} \frac{\lambda^4}{8\pi c n^2 \tau_{rad}} g_{ji}^a(\lambda), \quad (4)$$

где c – скорость света в вакууме; n – показатель преломления среды; τ_{rad} – радиационное время жизни верхнего лазерного уровня; $g_{ji}^a(\lambda)$ – форма спектральной линии:

$$g_{ji}^a(\lambda) = \frac{3\lambda P_{ji}^a(\lambda)}{\int [2P_{ji}^\sigma(\lambda) + P_{ji}^\pi(\lambda)] \lambda d\lambda}. \quad (5)$$

На рисунке 5 представлены спектры сечений СИ, рассчитанные по ФЛ для переходов диапазонов спектра 1020–1140 нм и 1280–1460 нм.

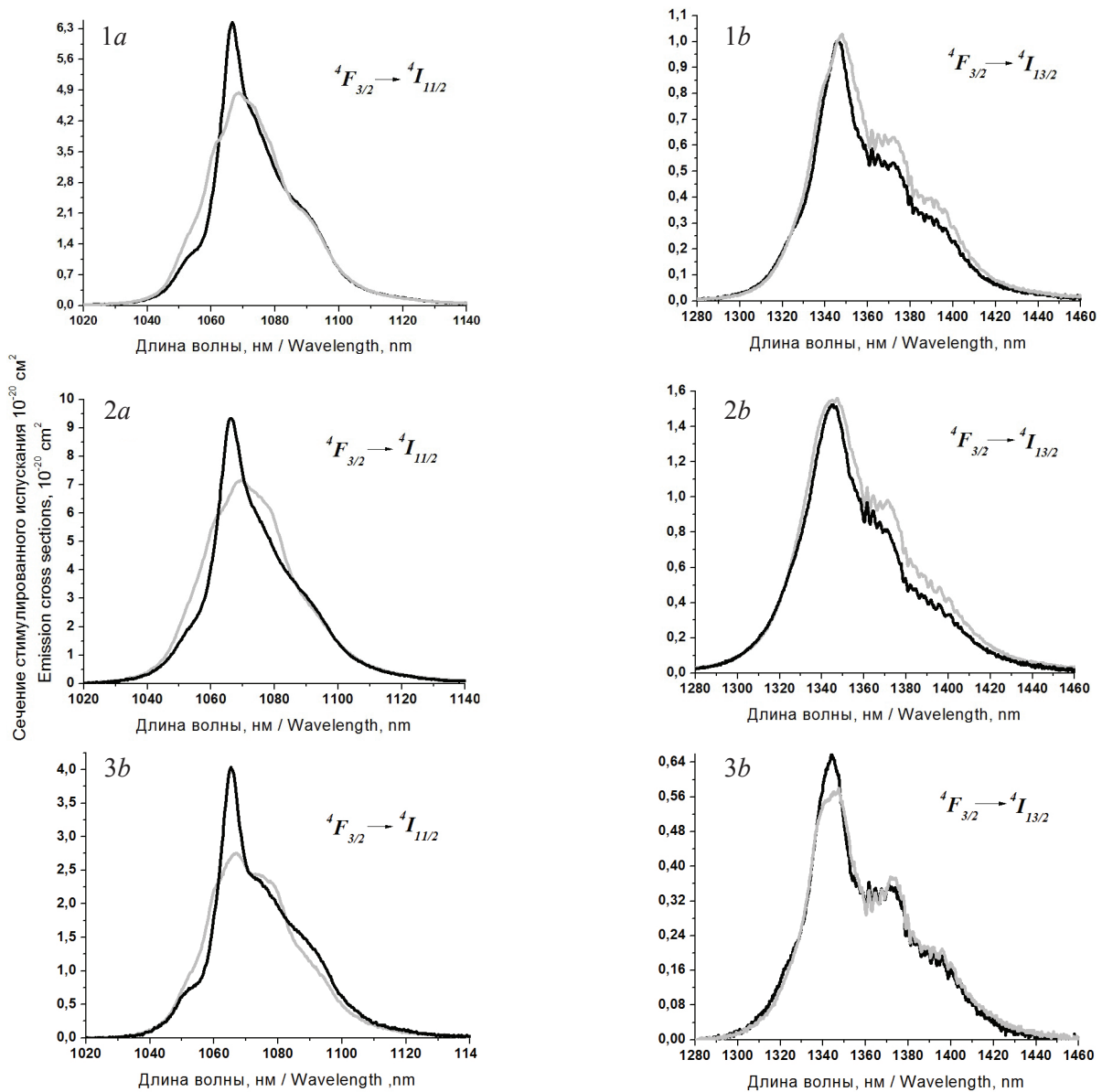


Рисунок 5 – Спектры поперечных сечений стимулированного испускания кристаллов, рассчитанные по формуле Фюхтбауэра–Ладенбурга: серые линии – π -поляризация; черные линии – σ -поляризация; 1 – $\text{Nd}^{3+}:\text{Ca}_{10}\text{Li}(\text{VO}_4)_7$; 2 – $\text{Nd}^{3+}:\text{Ca}_{10}\text{K}(\text{VO}_4)_7$; 3 – $\text{Nd}^{3+}:\text{Ca}_9\text{La}(\text{VO}_4)_7$

Figure 5 – Emission cross sections spectra calculated by Füchtbauer–Ladenburg equation: gray line – π -polarization; black line – σ -polarization; 1 – $\text{Nd}^{3+}:\text{Ca}_{10}\text{Li}(\text{VO}_4)_7$; 2 – $\text{Nd}^{3+}:\text{Ca}_{10}\text{K}(\text{VO}_4)_7$; 3 – $\text{Nd}^{3+}:\text{Ca}_9\text{La}(\text{VO}_4)_7$

Таблица 2 / Table 2

**Поперечное сечения стимулированного испускания $\sigma_{em} \cdot 10^{20}$ (см²) и ширина полосы (нм)
Emission cross sections $\sigma_{em} \cdot 10^{20}$ (cm²) and FWHM (nm)**

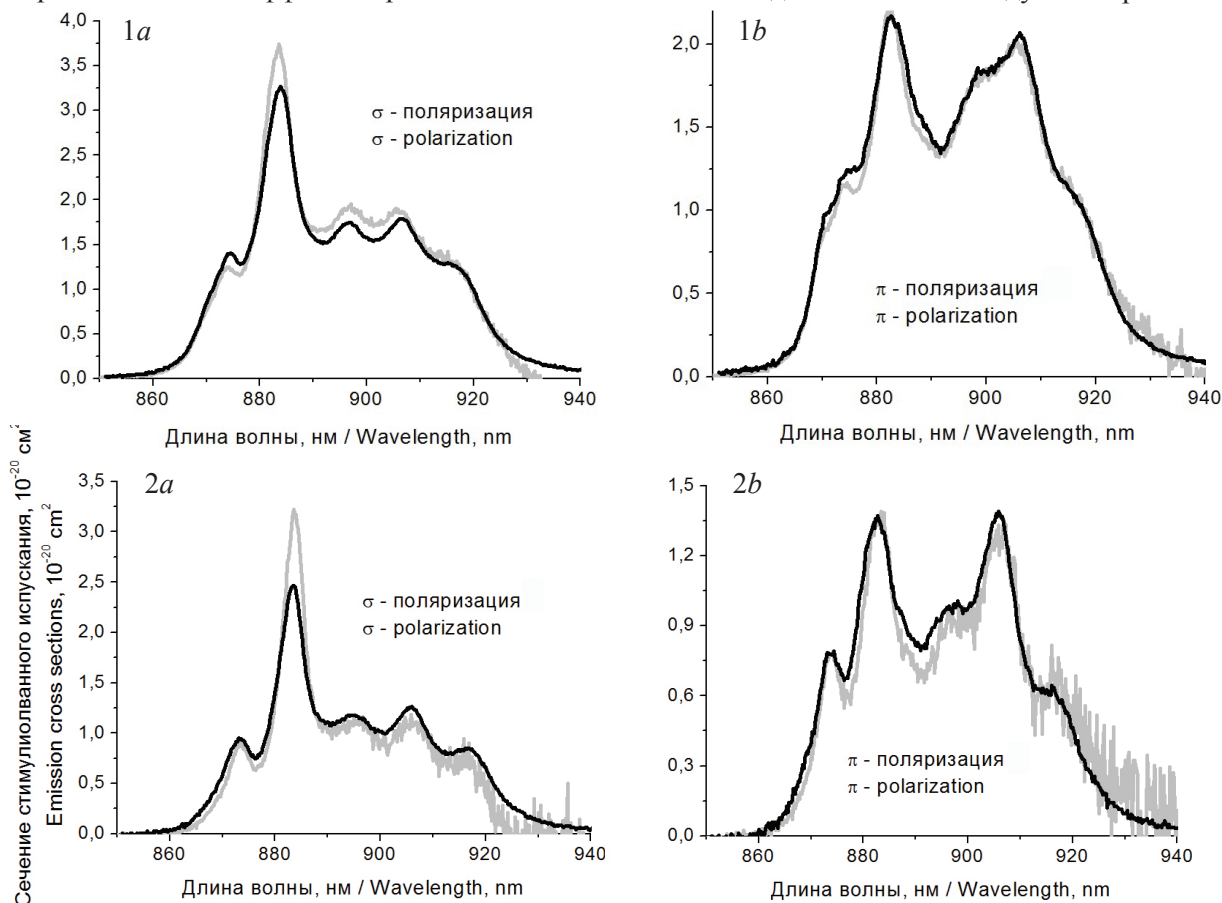
Длина волны, мкм Wavelength, μm	Nd:CLiV		Nd:CKV		Nd:CLaV	
	σ	π	σ	π	σ	π
~0,98	3,7 (9)	2,17 (43)	3,2 (6)	1,38 (40)	3,06 (7)	3,06 (40)
~1,07	6,44 (19)	4,78 (28)	9,33 (19)	7,17 (30)	4,02 (19)	2,74 (30)
~1,35	1,0 (40)	1,03 (46)	1,52 (43)	1,55 (50)	0,66 (41)	0,59 (47)

Как видно из рисунка 5, формы спектров СИ для соответствующих переходов слабо отличаются друг от друга для различных кристаллов, в то время как значение сечения в максимуме спектра для σ -поляризации кристалла Nd:CKV составляет $9,3 \cdot 10^{-20}$ см², что примерно в 2 раза больше, чем для Nd:CLaV, и в 1,5 раза – чем для Nd:CLiV (таблица 2).

Уровень $^4I_{9/2}$, в отличие от $^4I_{11/2}$ и $^4I_{13/2}$, является термически заселенным, поэтому спектры люминесценции на переходе $^4F_{3/2} \rightarrow ^4I_{9/2}$ могут быть искажены за счет перепоглощения. Вследствие этого, мы провели расчет спектров СИ для этого перехода по ФЛ и интегральным методом соответствия [13], который свободен от эффекта перепоглощения:

$$\sigma_{em}^{\alpha}(\lambda) = \frac{3 \exp(-hc/kT\lambda)}{8\pi c n^2 \tau_{rad} \sum_i \int \lambda^{-4} \sigma_{abs}^i(\lambda) \exp(-hc/kT\lambda) d\lambda} \sigma_{abs}^{\alpha}(\lambda). \quad (6)$$

На рисунке 6 представлены спектры сечений стимулированного испускания, рассчитанные по этим двум методам. Как видно, наиболее сильно искажены спектры для σ -поляризации. Так, для этой поляризации сечения поглощения имеют большие значения, чем для π -поляризации, и здесь наблюдается значительное перекрытие линий поглощения и люминесценции в области 880 нм. В наибольшей степени это проявляется для кристалла Nd:CKV, где наибольшая концентрация ионов неодима из всех исследуемых кристаллов.



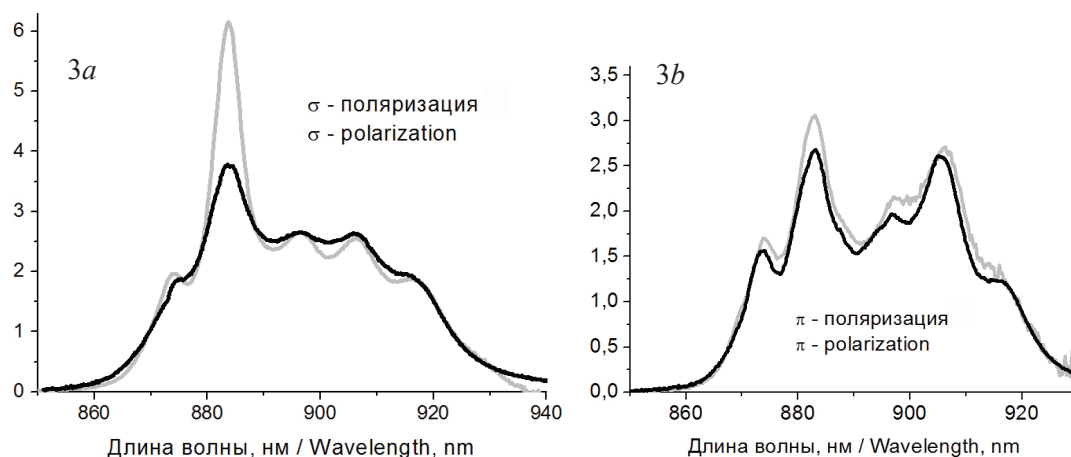


Рисунок 6 – Спектры поперечных сечений стимулированного испускания перехода ${}^4F_{3/2} \rightarrow {}^4I_{9/2}$, рассчитанные по формуле Фюхтбауэра–Ладенбурга (черные линии) и по интегральному методу соответствия (серые линии): 1 – $\text{Nd}^{3+}:\text{Ca}_{10}\text{Li}(\text{VO}_4)_7$; 2 – $\text{Nd}^{3+}:\text{Ca}_9\text{La}(\text{VO}_4)_7$; 3 – $\text{Nd}^{3+}:\text{Ca}_{10}\text{K}(\text{VO}_4)_7$

Figure 6 – Emission cross sections spectra (${}^4F_{3/2} \rightarrow {}^4I_{9/2}$ transition) calculated by Fuchtbauer–Ladenburg equation (black line) and by integral method of reciprocity (gray line): 1 – $\text{Nd}^{3+}:\text{Ca}_{10}\text{Li}(\text{VO}_4)_7$; 2 – $\text{Nd}^{3+}:\text{Ca}_9\text{La}(\text{VO}_4)_7$; 3 – $\text{Nd}^{3+}:\text{Ca}_{10}\text{K}(\text{VO}_4)_7$

Заклучение

Определены коэффициенты ветвления люминесценции и сечений стимулированного испускания кристаллов семейства двойных ортованадатов $\text{Ca}_9\text{La}(\text{VO}_4)_7$ и $\text{Ca}_{10}\text{A}(\text{VO}_4)_7$ (A – Li, K), активированных ионами неодима. Для корректного определения этих спектроскопических параметров проведена калибровка люминесцентной установки по спектральной чувствительности.

Значения сечений стимулированного испускания в пике полосы в области 1,06 мкм для σ -поляризации равны $(6,4; 9,3 \text{ и } 4) \cdot 10^{-20} \text{ см}^2$ для кристаллов $\text{Nd}:\text{CLiV}$, $\text{Nd}:\text{CaKV}$ и $\text{Nd}:\text{CLaV}$ соответственно.

Спектры стимулированного испускания исследуемых кристаллов имеют ширину полосы от 20 до 40 нм (в зависимости от кристалла и состояния поляризации излучения), что делает их привлекательными в качестве активных сред лазеров для получения ультракоротких импульсов (< 100 фс) в режиме синхронизации мод.

Список использованных источников

1. Kisel, V.E. Femtosecond pulse generation with a diode-pumped $\text{Yb}^{3+}:\text{YVO}_4$ laser / V.E. Kisel [et al.] // Optics Letters. – 2005. – Vol. 30, № 10. – P. 1150–1152.
2. Ter-Gabrielyan, N. Spectroscopic and laser properties of resonantly (in-band) pumped $\text{Er}:\text{YVO}_4$ and $\text{Er}:\text{GdVO}_4$ crystals: a comparative study / N. Ter-Gabrielyan [et al.] // Opt. Lett. Express. – 2012. – Vol. 2, № 8. – P. 1040–1049.
3. Chen, H.R. Passive mode-locking in diode-pumped c-cut $\text{Nd}:\text{LuVO}_4$ laser with a semiconductor saturable-absorber mirror / H.R. Chen [et al.] // Appl. Phys. B. – 2009. – Vol. 96. – P. 19–23.

4. Petrov, V.V. Partially disordered $\text{Yb}:\text{CdxY1-xVO}_7$ crystal for femtosecond lasers / V.V. Petrov [et al.] // International Conference on Lasers, Applications and Technologies: Conference program, Minsk, Belarus, May 28 – June 1 / V.I. Stepanov Institute of Physics; ed. by V.A. Orlovich [et al.]. – Minsk, 2007. – P. 67310I-1.
5. Belik, A.A. Crystal Structures of Double Vanadates, $\text{Ca}_9\text{R}(\text{VO}_4)_7$. I. R = La, Pr, and Eu / A.A. Belik [et al.] // Cryst. reports. – 1997. – Vol. 42, № 5. – P. 751–756.
6. Loiko, P.A. Growth, spectroscopic and thermal properties of Nd-doped disordered $\text{Ca}_9(\text{La/Y})(\text{VO}_4)_7$ and $\text{Ca}_{10}(\text{Li/K})(\text{VO}_4)_7$ crystals / P.A. Loiko [et al.] // Journal of Luminescence. – 2013. – Vol. 137. – P. 252–258.
7. Левшин, Л.В. Люминесценция и ее измерения: Молекулярная люминесценция / Л.В. Левшин, А.М. Селечкий. – М.: Изд-во МГУ, 1989. – 272 с.
8. The infrared and electro-optical systems handbook: in 8 volumes / Joseph S. Accetta, David L. Shumaker (executive editors). – Washington: SPIE optical eng. press. – Vol. 2: Atmospheric propagation of radiation / Frederick G. Smith (editor). – 1993. – 322 p.
9. Kramida A., Ralchenko Yu., Reader J., and NIST ASD Team (2013). *NIST Atomic Spectra Database* (ver. 5.1), [Online]. Available: <http://physics.nist.gov/asd> [2013, October 22]. National Institute of Standards and Technology, Gaithersburg, MD.
10. Judd, B.R. Optical absorption intensities of rare-earth ions / B.R. Judd // Phys. Rev. – 1962. – Vol. 127. – P. 750–761.
11. Ofel, G.S. Intensities of crystal spectra of rare earth ions / G.S. Ofel // Journal Chem. Phys. – 1962. – Vol. 37. – P. 511–520.
12. Payne, S.A. Infrared cross-section measurements for crystals doped with Er^{3+} , Tm^{3+} and Ho^{3+} / S.A. Payne [et al.] // IEEE J. of Quantum Electron. – 1992. – Vol. 28. – P. 2619–2630.
13. Yasukevich, A.S. Integral method of reciprocity in the spectroscopy of laser crystals with impurity centers / A.S. Yasukevich [et al.] // Journal of App. Spectroscopy. – 2004. – Vol. 71. – P. 202–208.

Application of Füchtbauer–Ladenburg equation and reciprocity method for determination of emission cross sections of Nd-doped laser media

Demesh M.P.¹, Gusakova N.V.¹, Yasukevich A.S.¹, Kuleshov N.V.¹,
Grigor'ev S.V.¹, Krot Y.A.², Kosmyna M.B.³, Shekhotsov A.N.³

¹Belarusian National Technical University,
Nezavisimosty Ave., 65, 220013, Minsk, Belarus

²A.N. Sevchenko Institute of Applied Physical Problems of Belarusian State University,
Kurchatova St., 7, 220045, Minsk, Belarus

³Institute for Single Crystal of the National Academy of Science of Ukraine,
Lenin Ave., 60, 61001, Kharkov, Ukraine

Received 09.06.2015

Accepted for publication 23.10.2015

Abstract. Rare-earth doped crystals with broad bands of gain spectra are attractive for femtosecond laser applications. Therefore, for this purposes crystals with disordered structure are of great interest. In this article we investigate laser-related spectroscopic properties of new trigonal crystals Nd³⁺:Ca₁₀K(VO₄)₇ (Nd:CKV), Nd³⁺:Ca₉La(VO₄)₇ (Nd:CLaV) и Nd³⁺:Ca₁₀Li(VO₄)₇ (Nd:CLiV). The Füchtbauer-Ladenburg equation and the integral reciprocity method were applied for determination of stimulated emission cross section spectra for Nd³⁺ ions. The maximum values of emission cross sections and bandwidth (FWHM) near $\lambda = 1,07 \mu\text{m}$ are $9,33 \cdot 10^{-20} \text{cm}^2$ (σ – polarization, Nd:CKV) and 30 nm (π – polarization, Nd:CKV), near $\lambda = 1,35 \mu\text{m}$ – $1,55 \cdot 10^{-20} \text{cm}^2$ and 50 nm (π – polarization, Nd:CKV). The broad and smooth bands of the gain spectra in the regions near 1,07 and 1,35 μm make it possible to generate ultra short light pulses with duration of about 60 fs (1,07 μm) and 45 fs (1,35 μm) in the mode-locking regime.

Keywords: calcium vanadate, luminescence branching ratio, stimulated emission cross-sections, the Füchtbauer-Ladenburg equation, the integral method of reciprocity.

Адрес для переписки:

Ясюкевич А.С.
Белорусский национальный технический университет,
пр. Независимости, 65, 220013, г. Минск, Беларусь
e-mail: anatol@bntu.by

Address for correspondence:

Yasukevich A.S.
Belarusian National Technical University,
Nezavisimosty Ave., 65, 220013, Minsk, Belarus
e-mail: anatol@bntu.by

Для цитирования:

Демеш М. П., Гусакова Н. В., Ясюкевич А. С., Кулешов Н. В.,
Григорьев С. В., Крот Ю. А., Космына М. Б., Шеховцов Н. А.
Применение методов Фюхтбауэра–Ладенбурга и соответствия
для определения спектров сечений стимулированного излучения
неодимовых лазерных сред
Приборы и методы измерений
2015. – Т. 6, № 2. – С. 211–219

For citation:

Demesh M. P., Gusakova N. V., Yasukevich A. S., Kuleshov N. V.,
Grigor'ev S. V., Krot Y. A., Kosmyna M. B., Shekhotsov A. N.
Application of Füchtbauer–Ladenburg equation and reciprocity
method for determination of emission cross sections of Nd-doped
laser media
Devices and Methods of Measurements
2015, vol. 6, No. 2, pp. 211–219

References

1. Kisel V.E., Troshin A.E., Shcherbitsky V.G., Kuleshov N.V., Matrosov V.N., Matrosova T.A., Kupchenko M.I., Brunner F., Paschotta R., Morier-Genoud F., Keller U. Femtosecond pulse generation with a diode-pumped Yb³⁺:YVO₄ laser. *Optics Letters*, 2005, vol. 30, pp. 1150–1152.
2. Ter-Gabrielyan N., Fromzel V., Ryba-Romanowski W., Likasiewicz T, Dubinskii M. Spectroscopic and laser properties of resonantly (in-band) pumped Er:YVO₄ and Er:GdVO₄ crystals: a comparative study. *Opt. Lett. Express*, 2012, vol. 2, pp. 1040–1049.
3. Chen H.R., Lin J.H., Song K.T., Lin K.H., Hsieh W.F. Passive mode-locking in diode-pumped c-cut Nd:LuVO₄ laser with a semiconductor saturable-absorber mirror. *Appl. Phys. B*, 2009, vol. 96, pp. 19–23.
4. Petrov V.V., Pestryakov E.V., Trunov V.I., Kirpichnikov A.V., Merzliakov M.A., Laptev A.V., Matrosov V.N., Klimin S.A. Partially disordered Yb:CdxY1-xVO₇ crystal for femtosecond lasers. International Conference on Lasers, Applications and Technologies: Conference program, Minsk, Belarus, May 28 – June 1 / B.I. Stepanov Institute of Physics, Minsk 2007, p. 67310I-1.
5. Belik A. A., Morozov V. A., Grechkin S.V., Khasanov S. S., Lazoryak B.I. Crystal Structures of Double Vanadates, Ca₃R(VO₄)₇. I. R = La, Pr, and Eu. *Cryst. Reports*. 1997, vol. 42, pp. 751–756.
6. Loiko P.A., Yasukevich A. S., Gulevich A. E., Demesh M.P., Kosmyna M.B., Nazarenko B.P., Puzikov V.M., Shehovtsov A.N., Kornienko A.A., Dunina E.B., Kuleshov N.V., Yumashev K.V. Growth, spectroscopic and thermal properties of Nd-doped disordered Ca₉(La/Y)(VO₄)₇ and Ca₁₀(Li/K)(VO₄)₇ crystals. *Journal of Luminescence*, 2013, vol. 137, pp. 252–258.
7. Levshin L.V. *Lyumineszenziya i yeye izmereniya* [Luminescence and its measurements]. Moscow, Moscow St. Univ Publ, 1989. 272 p.
8. Frederick G. Smith (editor). Atmospheric propagation of radiation. Washington : SPIE optical eng. press. 1993, vol. 2, 322 p. The infrared and electro-optical systems handbook : in 8 volumes. Accetta Joseph S., Shumaker David L. (executive editors).
9. Kramida A., Ralchenko Yu., Reader J., and NIST ASD Team (2013). *NIST Atomic Spectra Database* (ver. 5.1), [Online]. Available: <http://physics.nist.gov/asd> [2013, October 22]. National Institute of Standards and Technology, Gaithersburg, MD.
10. Judd B.R. Optical absorption intensities of rare earth ions. *Phys. Rev.* 1962, vol. 127, pp. 750–761.
11. Ofelt G.S. Intensities of crystal spectra of rare earth ions. *Journal Chem. Phys.* 1962, vol. 37. pp. 511–520.
12. Payne S.A., Chase L.L., Smith Larry K., Kway Wayne L., Krupke William F. Infrared cross-section measurements for crystals doped with Er³⁺, Tm³⁺ and Ho³⁺. *IEEE J. of Quantum Electron.* 1992, vol. 28, pp. 2619–2630.
13. Yasukevich A.S., Shcherbitskii V.G., Kisel V.E., Mandrik A.V., Kuleshov N.V. Integral method of reciprocity in the spectroscopy of laser crystals with impurity centers. *Journal of App. Spectroscopy.* 2004, vol. 71, pp. 202–208.