

ГЕНЕРАЦИОННЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ КВАЗИТРЕХУРОВНЕВОГО Nd : KGW-ЛАЗЕРА С ДИОДНЫМ ВОЗБУЖДЕНИЕМ

И. В. СТАШКЕВИЧ¹⁾, Р. И. НОВИЦКАЯ¹⁾

¹⁾Белорусский государственный университет, пр. Независимости, 4, 220030, г. Минск, Республика Беларусь

Отмечено, что эффективность генерации неодимового лазера по квазитрехуровневой схеме при накачке с различных подуровней основного состояния определяется главным образом параметрами кристаллической матрицы и существенно зависит от температуры. Проведено теоретическое исследование и сравнение энергетических характеристик излучения неодимового лазера с матрицами калий-гадолиниевого вольфрамата и иттриево-алюминиевого граната при генерации по такой схеме. Анализ выполнялся для модели лазера с торцовой накачкой лазерным диодом. Использовалась точечная модель активной среды, балансные уравнения решались методом Рунге – Кутты. Показано, что для матрицы калий-гадолиниевого вольфрамата эффективность генерации на порядок выше, чем для иттриево-алюминиевого граната, что обусловлено более высокими значениями концентрации ионов неодима и сечения поглощения. Пороговая мощность возбуждения в случае обеих матриц сильно зависит от энергии подуровня, с которого происходит поглощение, и увеличивается примерно на порядок при накачке с самого верхнего из возможных подуровней по сравнению с нижним, что связано с различной тепловой заселенностью всех подуровней основного состояния, определяемой температурой среды. Рассмотрено влияние температуры на параметры генерации лазера. Показано, что интенсивность излучения монотонно убывает, а пороговая мощность увеличивается с ростом температуры при накачке со всех подуровней.

Ключевые слова: неодимовый лазер; квазитрехуровневая схема; эффективность; порог генерации.

THE LASING CHARACTERISTICS OF QUASI-THREE-LEVEL DIODE-PUMPED Nd : KGW LASER

I. V. STASHKEVICH^a, R. I. NAVITSKAYA^a

^aBelarusian State University, Nezavisimosti avenue, 4, 220030, Minsk, Republic of Belarus

The generation efficiency of a quasi-three-level neodymium laser on pumping from different sublevels of the ground state is mainly governed by the crystal parameters, being significantly dependent on temperature. This paper presents a theoretical analysis and comparison of the lasing characteristics of neodymium-doped potassium-gadolinium tungstate crystals and neodymium-doped yttrium aluminium garnet lasers when using such pumping scheme. The analysis is performed for a diode end-pumped laser. A point model for the active medium is applied. The balance equations are solved by the Runge – Kutta method. It is shown that, as compared to yttrium aluminium garnet, the generation efficiency for potassium-gadolinium tungstate is higher almost by an order of magnitude due to higher concentrations of neodymium ions and also to greater absorption cross-sections. For both crystals, the threshold pump power is strongly dependent on the energy of the pumping sublevel from which absorption takes place, growing approximately by an order of magnitude in the case of pumping from the upper sublevel compared to the lower one. This stems from different thermal populations of all sublevels of the ground state which are determined by the medium temperature. Besides, the parameters of lasing are considered as a function of temperature. It is shown that, for pumping from all sublevels, the radiation intensity is decreasing and the threshold pump power is growing with temperature.

Key words: neodymium laser; quasi-three-level scheme; efficiency; generation threshold.

Образец цитирования:

Сташкевич И. В., Новицкая Р. И. Генерационные характеристики квазитрехуровневого Nd : KGW-лазера с диодным возбуждением // Вестн. БГУ. Сер. 1, Физика. Математика. Информатика. 2016. № 3. С. 71–75.

For citation:

Stashkevich I. V., Navitskaya R. I. The lasing characteristics of quasi-three-level diode-pumped Nd : KGW laser. *Vestnik BGU. Ser. 1, Fiz. Mat. Inform.* 2016. No. 3. P. 71–75 (in Russ.).

Авторы:

Игорь Вячеславович Сташкевич – кандидат физико-математических наук, доцент; доцент кафедры лазерной физики и спектроскопии физического факультета.
Роза Игоревна Новицкая – студентка физического факультета.

Authors:

Ihar Stashkevich, PhD (physics and mathematics), docent; associate professor at the department of laser physics and spectroscopy, faculty of physics.
ihar007@gmail.com
Roza Navitskaya, student at the faculty of physics and mathematics.
r.navitskaya@gmail.com

Квазитрехуровневая схема генерации неодимового лазера с различными кристаллическими матрицами в настоящее время используется для получения высококогерентного излучения в синем диапазоне длин волн [1]. В настоящей работе теоретически рассматривается эффективность генерации по такой схеме неодимового лазера на основе кристалла калий-гадолиниевого вольфрамата (KGW). Для сравнения приводятся данные для неодимового лазера с матрицей иттриево-алюминиевого граната (YAG). Концентрация ионов неодима в KGW считалась равной 8 % (рассматривалась N_m -поляризация), в YAG – 1 %. Данные концентрации являются оптимальными для указанных матриц. При их превышении начинает проявляться концентрационное тушение.

Уровни энергии Nd : KGW, задействованные в квазитрехуровневой схеме генерации, показаны на рис. 1 (значения энергии подуровней взяты из [2]).

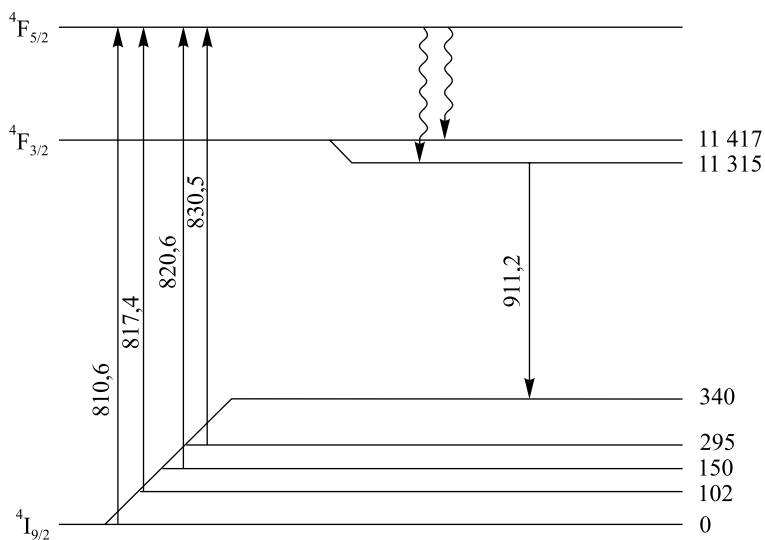


Рис. 1. Схема энергетических уровней и переходов Nd : KGW; длины волн указаны в нм, уровни энергии – в см⁻¹

Схема уровней и переходов для кристалла Nd : YAG аналогична приведенной на рис. 1, отличие заключается только в значениях энергий подуровней: 0, 134, 197, 311, 848 см⁻¹ – для $4I_{9/2}$; 11 414, 11 502 см⁻¹ – для $4F_{3/2}$. Уровень $4I_{9/2}$ в обоих кристаллах расщеплен на 5 подуровней, что позволяет проводить накачку ионов активной среды со всех подуровней, кроме самого верхнего, который участвует в генерации. Время жизни ионов на уровне $4F_{5/2}$ составляет около 10 нс, переходы с него на нижележащий метастабильный уровень $4F_{3/2}$ являются безызлучательными. Вынужденные переходы осуществляются с нижнего подуровня $4F_{3/2}$ на верхний подуровень расщепленного основного состояния.

Главные параметры рассматриваемых кристаллов приведены в таблице. Остальные характеристики резонатора и активной среды, использованные в расчетах, соответствуют реальному DPSS-лазеру и одинаковы для обеих матриц: длина активного элемента – 2 мм, резонатора – 200 мм, диаметр области, на которую фокусируется излучение накачки, – 0,3 мм.

Значения длин волн накачки (с основного подуровня) и генерации, сечений поглощения и излучения, времени жизни на уровне $4F_{3/2}$ и показателей преломления лазерных кристаллов Nd : YAG и Nd : KGW

Кристалл	Длина волны накачки (λ_0), нм	Длина волны генерации (λ), нм	Сечение поглощения (σ_a), 10 ⁻²⁰ см ²	Сечение излучения (σ_e), 10 ⁻²⁰ см ²	Время жизни на уровне $4F_{3/2}$ (τ_2), мс	Показатель преломления (n)
Nd : YAG	808,6	946,4	7,7	5,0	230,0	1,82
Nd : KGW	810,6	911,2	26,0	7,0	109,0	2,014

Сечение излучения на длине волны 911,2 нм для Nd : KGW было получено из спектра люминесценции [3] с помощью уравнения Фюхтбауэра – Ладенбурга [4]:

$$\sigma_e(\lambda) = \frac{\lambda^5}{8\pi c n^2 \tau} \frac{I(\lambda)}{\int I(\lambda) \lambda d\lambda},$$

где $I(\lambda)$ – спектр люминесценции; $\tau = \tau_2$ – время жизни на уровне ${}^4F_{3/2}$.

Сечение поглощения считалось равным сечению излучения на длине волны 810,6 нм, что следует из формулы Маккамбера [5]:

$$\sigma_a(\lambda) = \sigma_e(\lambda) \exp\left(\frac{h\nu - E_0}{kT}\right).$$

Расчеты проводились в приближении точечной модели активной среды (пространственное изменение переменных не рассматривалось) на основе балансных уравнений [6]. Ниже приведены балансные уравнения, записанные для квазитрехуровневой схемы генерации. Из решения этих уравнений можно получить зависимость плотности потока фотонов (и интенсивности) в резонаторе от времени:

$$\begin{aligned} \frac{dS}{dt} &= \mu v_c \sigma_e S (c_2 n_2 - n_1) - S r_{lc}; \\ \frac{dn_1}{dt} &= \frac{a_1}{\tau_2} n_2 + a_1 \sigma_e S (c_2 n_2 - n_1) - R_0 \sigma_a a n_1; \\ \frac{dn_2}{dt} &= -\frac{n_2}{\tau_2} + \frac{n_3}{\tau_3} + \sigma_e S (n_1 - c_2 n_2); \\ \frac{dn_3}{dt} &= -\frac{n_3}{\tau_3} + R_0 \sigma_a c_2 \frac{a}{a_1} n_1, \end{aligned}$$

где n_i , τ_i , $i = 1, 2, 3$, – плотности населенности и времена жизни нижнего лазерного уровня (верхний подуровень ${}^4I_{9/2}$) и уровней ${}^4F_{3/2}$ и ${}^4F_{5/2}$ соответственно; объемная плотность ионов неодима в кристалле при концентрации 1 % равна $1,38 \cdot 10^{20} \text{ см}^{-3}$; S – плотность потока фотонов в резонаторе; R_0 – плотность потока фотонов накачки, определяемая мощностью накачки; величины μ и r_{lc} характеризуют степень заполнения резонатора активной средой и обратное время жизни фотона в резонаторе соответственно [7]; v_c – скорость света в среде; коэффициенты отражения выходных зеркал равны 100 и 98 %; коэффициенты a , a_1 , c_2 описывают относительное число частиц на подуровне, с которого проводится накачка, – нижнем и верхнем лазерных подуровнях соответственно.

При моделировании учитывалось, что в каждый момент времени населенности энергетических подуровней системы удовлетворяют распределению Больцмана [7], поэтому все подуровни некоторого состояния будут частично заселены. Например, при температуре 300 К относительная населенность нижнего лазерного подуровня составляет 7,7 % для Nd : KGW и 0,79 % для Nd : YAG. Такое предположение применимо при условии малости времени, необходимого для установления теплового равновесия (оно составляет менее 10 нс), по сравнению с характерным временем изменения населенностей вследствие лазерной генерации (около 1 мкс). Решение нелинейной системы дифференциальных уравнений находилось явным методом Рунге – Кутты четвертого порядка с адаптацией шага. Плотность узлов решения составляет 4 точки на 1 мкс.

Для сравнения эффективности генерации лазерных кристаллов по квазитрехуровневой схеме анализировались зависимости интенсивности излучения в резонаторе от мощности накачки для матриц KGW и YAG, а также исследовалось влияние температуры на интенсивность излучения и пороговую мощность накачки.

Графики зависимости интенсивности излучения в резонаторе от температуры для Nd : KGW и Nd : YAG при накачке с различных подуровней представлены на рис. 2.

Таким образом, для KGW при накачке со всех подуровней интенсивность убывает с ростом температуры. Для YAG такой характер зависимостей сохраняется только при накачке с трех нижних подуровней основного; в случае верхнего уровня интенсивность растет с температурой и увеличивается примерно на 14 % при изменении температуры от 0 до 100 °С. Значения интенсивности для YAG примерно на порядок меньше, чем для KGW (при тех же мощностях накачки), что в некоторой степени обусловлено значительной разницей в концентрации ионов неодима в кристалле: 1 % – у YAG и 8 % – у KGW.

Графики, иллюстрирующие влияние температуры на пороговую мощность накачки для лазера с матрицами KGW и YAG, представлены на рис. 3.

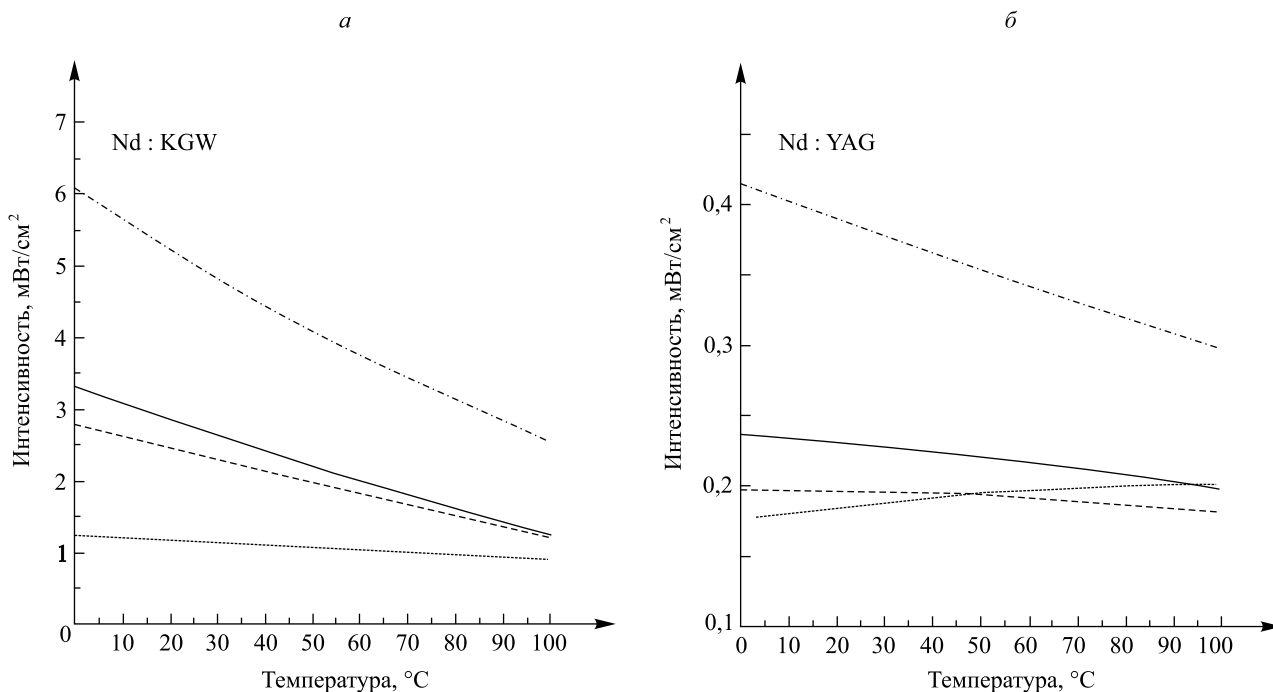


Рис. 2. Зависимости интенсивности излучения (I) в резонаторе от температуры при накачке Nd : KGW (a) и Nd : YAG (b) с различных подуровней основного состояния (мощности накачки для подуровней, начиная с нижнего, – 4; 5; 6 и 10 Вт соответственно):

a (см^{-1}): 296, ----- 150, ————— 102, - - - - - 0;
 b (см^{-1}): 311, ----- 197, ————— 134, - - - - - 0

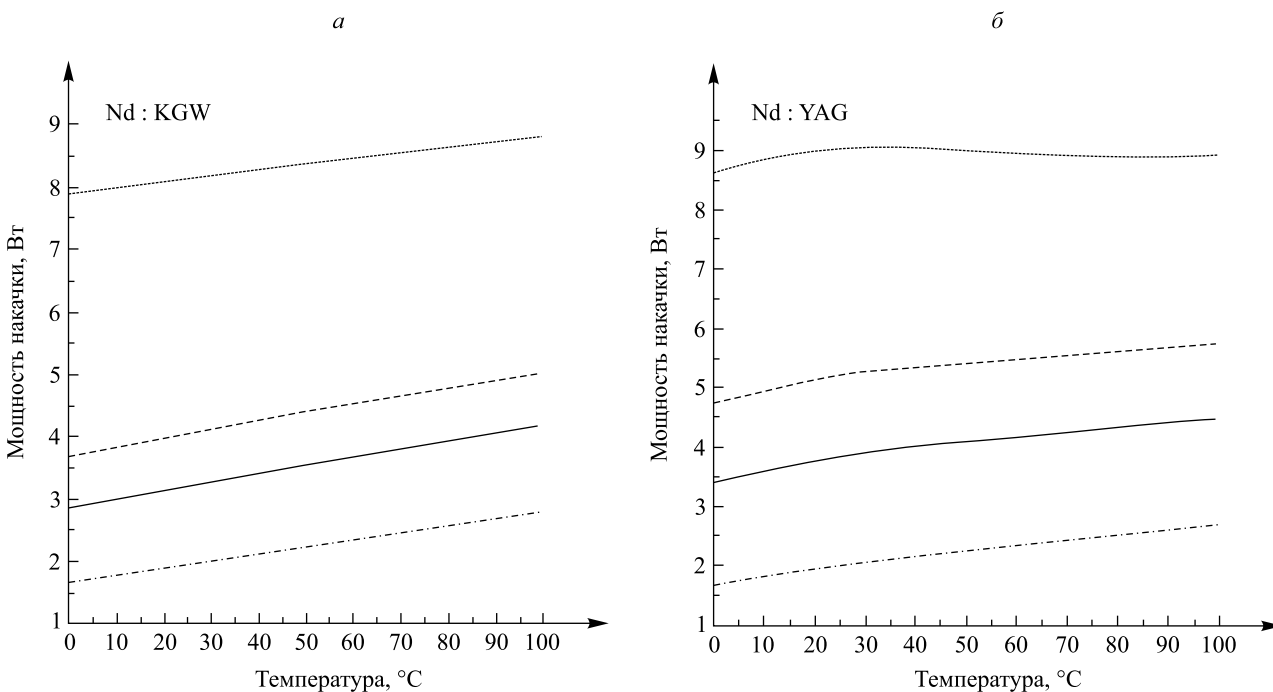


Рис. 3. Зависимости пороговой мощности (P_0) накачки от температуры для Nd : KGW (a) и Nd : YAG (b):

a (см^{-1}): 296, ----- 150, ————— 102, - - - - - 0;
 b (см^{-1}): 311, ----- 197, ————— 134, - - - - - 0

В данном случае для всех подуровней характерен монотонный рост порога генерации с ростом температуры. В случае матрицы YAG монотонный рост наблюдается только для трех нижних подуровней, для четвертого мощность изменяется с температурой нелинейно в пределах 5 %. Значения пороговой мощности несколько ниже для KGW по сравнению с YAG для всех подуровней, кроме нижнего, для которого пороговые мощности практически совпадают при одинаковых значениях температуры.

Графики зависимости интенсивности излучения в резонаторе от мощности накачки для рассматриваемых кристаллов представлены на рис. 4.

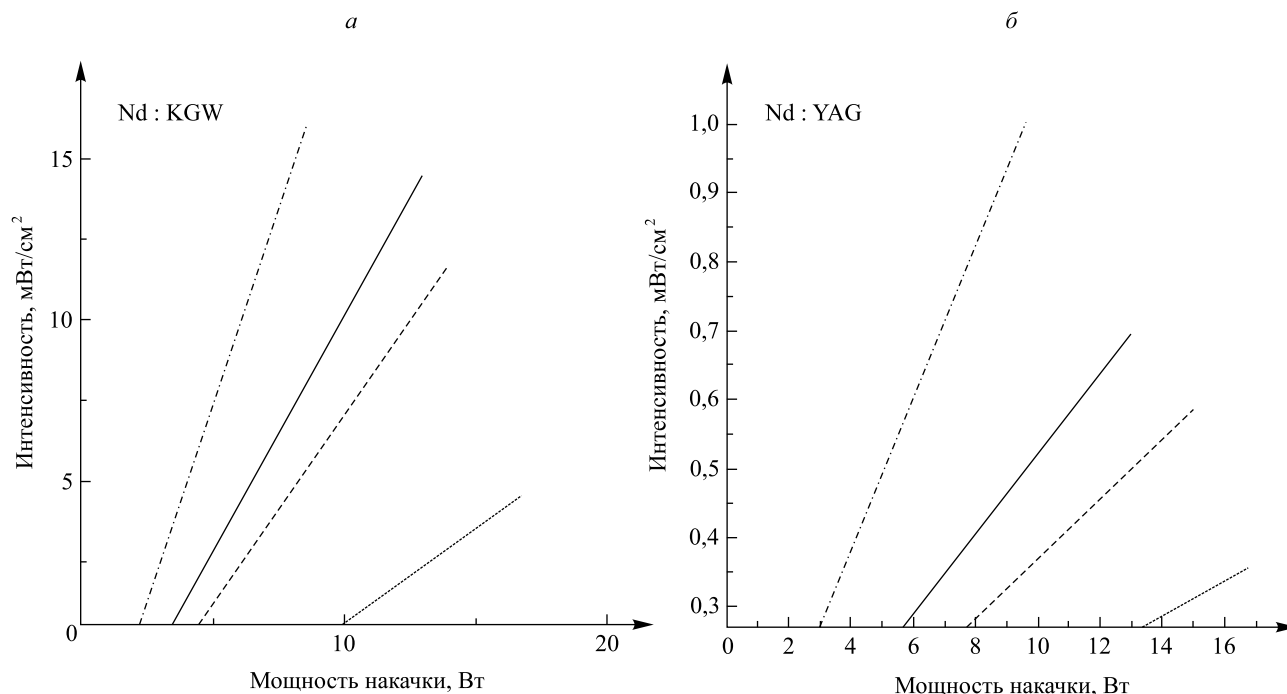


Рис. 4. Зависимости интенсивности в резонаторе от мощности накачки при возбуждении с различных подуровней Nd : KGW (а) и Nd : YAG (б) при температуре 300 К:
 а (см⁻¹): 296, - - - - - 150, ——— 102, 0;
 б (см⁻¹): 311, - - - - - 197, ——— 134, 0

И для KGW, и для YAG характерно уменьшение эффективности (коэффициента наклона прямых) при возбуждении с более высоких подуровней. По абсолютному значению эффективности KGW более чем на порядок превосходит YAG, что обусловлено высокой концентрацией ионов и большим сечением поглощения. Относительное значение эффективности, равное отношению коэффициентов наклона при поглощении с данного и с основного подуровней, характеризует ее изменение для разных подуровней. Более высокие значения относительной эффективности для KGW, по сравнению с YAG, указывают на меньшую величину расщепления энергетического уровня основного состояния.

Таким образом, лазерные кристаллы Nd : KGW имеют существенные преимущества при генерации по квазитрехуровневой схеме и могут рассматриваться как перспективный материал для создания лазеров синего диапазона.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК (REFERENCES)

1. Risk W. P., Gosnell T., Nurmikko A. V. Compact Blue-Green Lasers. Cambridge, 2003.
2. Kaminskii A. A. Laser crystals, their physics and properties. Berlin ; Heidelberg, 1990.
3. Лазерные кристаллы CASTECH INC. URL: http://www.optoscience.com/maker/castech/pdf/Nd_KGW.pdf (date of access: 25.04.2016).
4. Aull B. F., Janssen H. P. Vibronic Interaction in Nd : YAG Resulting in Nonreciprocity of Absorption and Stimulated Emission Cross Sections // IEEE J. Quant. Electron. 1982. Vol. 18, № 5. P. 925–930 [Aull B. F., Janssen H. P. Vibronic Interaction in Nd : YAG Resulting in Nonreciprocity of Absorption and Stimulated Emission Cross Sections. IEEE J. Quant. Electron. 1982. Vol. 18, No. 5. P. 925–930 (in Engl.)].
5. McCumber D. E. Einstein relations connecting broadband emission and absorption spectra // Phys. Rev. 1964. Vol. 136, № 4A. P. 954 [McCumber D. E. Einstein relations connecting broadband emission and absorption spectra. Phys. Rev. 1964. Vol. 136, No. 4A. P. 954 (in Engl.)].
6. Храмов В. Ю. Расчет элементов лазерных систем для информационных и технологических комплексов. СПб., 2008.
7. Сташкевич И. В., Кореновская Ю. В. Влияние температуры на генерационные характеристики неодимового лазера с квазитрехуровневой схемой // Вестн. БГУ. Сер. 1, Физика. Математика. Информатика. 2016. № 1. С. 68–74 [Stashkevich I. V., Karanouskaya Y. V. Temperature dependence generation of quasi-three-level Nd laser. Vestnik BGU. Ser. 1, Fiz. Mat. Inform. 2016. No. 1. P. 68–74 (in Russ.)].

Статья поступила в редакцию 28.03.2016.
 Received by editorial board 28.03.2016.