

Таким образом, в работе показано, что синтезирован новый лазерный материал – ситалл на основе наноразмерных кристаллов шпинели  $\text{Li}(\text{Al,Ga})_5\text{O}_8$ , активированной ионами  $\text{Co}^{2+}$ . Исследованы его спектрально-люминесцентные и нелинейно-оптические свойства.

Полученные результаты дают основания для проведения исследований по получению пассивной модуляции добротности для лазеров спектрального диапазона 1,4–1,7 мкм.

*О.Д. и А.Ж. выражают благодарность РФФИ, грант № 16-03-01130, за частичную поддержку работы.*

#### Литература:

1. P.A. Loiko, O.S. Dymshits, V.V. Vitkin, N.A. Skoptsov, A.A. Kharitonov, A.A. Zhilin, I.P. Alekseeva, S.S. Zapalova, A.M. Malyarevich, I.V. Glazunov, K.V. Yumashev «Glass-ceramics with  $\gamma\text{-Ga}_2\text{O}_3$ :  $\text{Co}^{2+}$  nanocrystals: Saturable absorber for 1.5–1.7  $\mu\text{m}$  Er lasers», *Laser Physics Letters* Vol. 12 (2015) 035803.

2. Denisov I.A., Demchuk M.I., Kuleshov N.V., Yumashev K.V.  $\text{Co}^{2+}:\text{LiGa}_5\text{O}_8$  saturable absorber passive Q-switch for 1.34  $\mu\text{m}$   $\text{Nd}^{3+}:\text{YAlO}_3$  and 1.54

$\mu\text{m}$   $\text{Er}^{3+}:\text{glass lasers}$ . *Appl. Phys. Lett.*, **77**, 2455–2457 (2000).

3. Konstantin V. Yumashev, «Saturable absorber  $\text{Co}^{2+}:\text{MgAl}_2\text{O}_4$  crystal for Q switching of 1.34- $\mu\text{m}$   $\text{Nd}^{3+}:\text{YAlO}_3$  and 1.54- $\mu\text{m}$   $\text{Er}^{3+}:\text{glass lasers}$ », *Appl. Opt.* **38**, 6343–6346 (1999).

4. K.V. Yumashev, I.A. Denisov, N.N. Posnov, P.V. Prokoshin, V.P. Mikhailov. Nonlinear absorption properties of  $\text{Co}^{2+}:\text{MgAl}_2\text{O}_4$  crystal. *Appl. Phys. B* **70**, 179–184 (2000).

5. John B. Gruber, Ann W. Kennedy, Bahram Zandi and James A. Hutchinson «Modeling of the  $\text{Co}^{2+}$  saturable absorber Q-switch for the  $\text{Er}:\text{Yb}:\text{glass laser}$  (1.534  $\mu\text{m}$ )», *Proc. SPIE* 3928, Nonlinear Materials, Devices, and Applications, 142 (2000).

6. Alexander M. Malyarevich, Igor A. Denisov, Konstantin V. Yumashev, Olga S. Dymshits, Alexander A. Zhilin, and Uk Kang, «Cobalt-doped transparent glass ceramic as a saturable absorber Q switch for erbium:glass lasers», *Appl. Opt.* 2001, **40**, 4322–4325.

7. Yumashev K.V., Denisov I.A., Posnov N.N., Kuleshov N.V., Moncorge R. Excited state absorption and passive Q-switch performance of  $\text{Co}^{2+}$ -doped oxide crystals // *Journal of Alloys and Compounds*. – 2002. – Vol. 341, № 1–2. – P. 366–370.

УДК 621.372.821.1

### РОСТ МОНОКРИСТАЛЛИЧЕСКОГО СЛОЯ ДВОЙНОГО ВОЛЬФРАМАТА С ИОНАМИ ГОЛЬМИЯ МЕТОДОМ ЖИДКОФАЗНОЙ ЭПИТАКСИИ Дернович О.П.<sup>1</sup>, Курильчик С.В.<sup>2</sup>, Вилейшикова Е.В.<sup>1</sup>, Кисель В.Э.<sup>1</sup>, Кулешов Н.В.<sup>1</sup>, Кравцов А.В.<sup>3</sup>, Гурецкий С.А.<sup>3</sup>, Колесова И.М.<sup>3</sup>

<sup>1</sup>НИЦ Оптических материалов и технологий БНТУ, Минск, Республика Беларусь

<sup>2</sup>Optoelectronics Research Centre, University of Southampton, United Kingdom

<sup>3</sup>ГНПО «Научно-практический центр НАН Беларуси по материаловедению», Минск, Республика Беларусь

Лазерное излучение с длиной волны в спектральной области двух микрометров требуется для дистанционного зондирования земли, медицинских применений, обработки материалов, в качестве источника возбуждения оптических параметрических генераторов [1–3]. В твердотельных лазерах, активная среда которых легирована ионами редкоземельных элементов, для генерации в области 2 мкм используются активирующие ионы тулия и гольмия. Материалы, легированные ионами тулия, могут накачиваться широко распространенными лазерными диодами на основе  $\text{AlGaAs}$ , излучающими в области 800 нм. При этом благодаря эффективному процессу кросс-релаксации квантовая эффективность накачки приближается к двум [4]. Кроме того, широкая полоса испускания позволяет реализовывать непрерывную перестройку длины волны генерации в диапазоне ~ 200 нм [5]. Однако поперечные сечения переходов иона тулия сравнительно невелики. Ионы гольмия характеризуются большими сечениями поглощения и испускания, но полоса поглощения, подходящая для накачки, расположена в области

1,9 мкм, в которой отсутствуют доступные лазерные диоды. Чтобы применять диодную накачку гольмиевых сред, в них вводят ионы тулия в качестве сенсбилизатора. Однако процессы апконверсии и обратного переноса энергии от ионов гольмия к ионам тулия при высоких значениях накачки приводят к большой тепловой нагрузке в материале и невысоким средним мощностям.

Еще одним решением является схема, в которой тулиевый лазер с диодной накачкой, генерирующий в спектральной области около 1,95 мкм, используется для накачки лазера, активный элемент которого легирован ионами гольмия. В этом случае отсутствуют потери на обратный перенос энергии, наблюдается низкая вероятность апконверсионных процессов и малые стоксовые потери, т. к. длина волны генерации близка к длине волны возбуждения.

В данной работе нами исследуется монокристаллический слой калиевого вольфрамата сложного состава, легированный трехвалентными ионами гольмия, для применения его в качестве

активного элемента волноводного лазера в условиях резонансной лазерной накачки.

В качестве активной среды волноводных планарных лазеров выступает тонкий слой активного вещества с более высоким показателем преломления по сравнению с окружающим его материалом. Это позволяет локализовать излучение накачки и генерации в узкой пространственной области размером несколько десятков или сотен мкм на протяжении всей длины волновода, что приводит к высокой пространственной согласованности мод резонатора и накачки. Что в свою очередь обеспечивает высокие коэффициенты усиления, низкие пороги генерации и большую устойчивость к термическим эффектам. Активные волноводные структуры позволяют создавать интегральные оптические системы для обработки информации.

Рост монокристаллического слоя калий-иттриевого вольфрамата, солегированного оптически инертными ионами гадолиния и иттербия (в условиях резонансной накачки) и активным ионом гольмия, производился методом жидкофазной эпитаксии на подложке кристалла  $KY(WO_4)_2$ , которая имела поперечные размеры  $10 \times 10$  мм и толщину в направлении кристаллографической оси  $b$  2 мм. Процесс кристаллизации в методе жидкофазной эпитаксии осуществляется за счёт пересыщения раствора-расплава вблизи границы раздела в центральной приповерхностной зоне. Рост производился при температуре  $900-920^\circ C$  и скорости вращения подложки 30-40 оборотов в минуту. Раствор-расплав нагревался в тигле выше температуры насыщения на  $30-50^\circ$  и проводилась гомогенизация в течение 12 часов. Далее температура опускалась до температуры на  $1,5-2,5^\circ C$  ниже температуры насыщения и проводился рост плёнки до получения заданной толщины.

Полученный образец был вырезан вдоль осей оптической индикатрисы кристалла  $N_m$  и  $N_g$  и отполирован до толщины слоя 140 мкм (вдоль кристаллографической оси  $b$ ). Фотография торца слоя, сделанная через микроскоп Полам РП-1 (ЛОМО) с помощью CCD камеры, представлена на рисунке 1. Выращенный слой характеризуется отсутствием неоднородностей, трещин и существенных дефектов.



Рисунок 1 – Фотография монокристаллического слоя, активированного ионами гольмия, выращенного на кристалле  $KY(WO_4)_2$

Рентгеноструктурный анализ эпитаксиального слоя, который был проведен на дифрактометре Bruker D2 Phaser, подтвердил высокое структурное качество слоя. Так как исследовался объемный ориентированный образец, в дифрактограмме, которая приведена на рисунке 2, присутствуют только рефлексы, относящиеся к дифракции от плоскостей  $(0k0)$ . Определенный по ним параметр  $b$  кристаллической решетки слоя равняется  $10,341 \text{ \AA}$  и рассогласованность с параметром  $b$  подложки составила  $0,009\%$ . Данное значение на порядок превышает допустимый предел, позволяющий растить слои свободные от трещин [6].

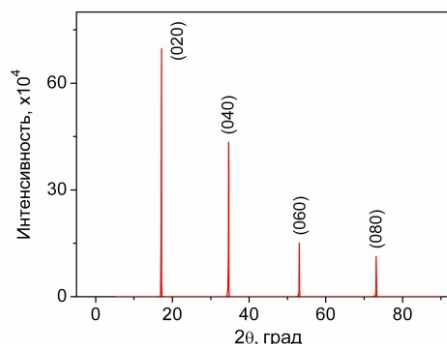


Рисунок 2 – Дифрактограмма монокристаллического слоя  $Ho(4.97 \text{ ат\%}):KGd_{0.0284}Yb_{0.0469}Y_{0.9247}(WO_4)_2$

Методом энергодисперсионной рентгеновской спектроскопии было определено содержание редкоземельных элементов в эпитаксиальном слое. Концентрация ионов гольмия  $Ho^{3+}$  составила  $4,97 \text{ ат\%}$ , а стехиометрическая формула состава –  $Ho:KGd_{0.0284}Yb_{0.0469}Y_{0.9247}(WO_4)_2$ .

На фурье-спектрометре Vertex 70 (Bruker) был зарегистрирован спектр поглощения образца, измеренный со спектральным разрешением  $1 \text{ см}^{-1}$  в спектральном диапазоне  $1800-2200 \text{ нм}$  для излучения, поляризованного вдоль осей оптической индикатрисы  $N_m$  и  $N_g$ , который представлен на рисунке 3. Полученный спектр поглощения характеризуется существенной анизотропией для излучения различных поляризаций и идентичен спектру объемного кристалла [7].

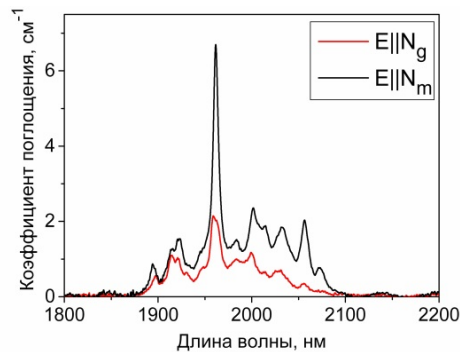


Рисунок 3 – Спектр поглощения монокристаллического слоя  $Ho(4.97 \text{ ат\%}):KGd_{0.0284}Yb_{0.0469}Y_{0.9247}(WO_4)_2$  в области  $2 \text{ мкм}$

Таким образом, методом жидкофазной эпитаксии получен образец слоя  $\text{KGd}_{0,0284}\text{Yb}_{0,0469}\text{Y}_{0,9247}(\text{WO}_4)_2$  с содержанием ионов  $\text{Ho}^{3+}$  4.97 ат.% толщиной 140 мкм, который характеризуется высоким оптическим и структурным качеством и может быть использован в качестве активной среды планарных волноводных лазеров, излучающих в спектральной диапозоне около 2 мкм.

### Литература

1. Walsh, B.M. Review of Tm and Ho Materials; Spectroscopy and Lasers / B.M. Walsh // *Laser Physics*. – 2009. – Vol. 19, No. 4. – PP. 855–866.
2. Sorokina, I.T. Solid-State Mid-Infrared Laser Sources / I.T. Sorokina, K.L. Vodopyanov. – Berlin-Heidelberg: Springer-Verlag, 2003. – P. 558.
3. Godart, A. Infrared (2–12  $\mu\text{m}$ ) solid-state laser sources: a review / A. Godard // *Comptes Rendus Physique*. – 2007. – Vol. 8. – P. 1100–1128.

4. Thulium doped monoclinic  $\text{KLu}(\text{WO}_4)_2$ : growth and spectroscopy / O. Silvestre [et al.] // *Appl. Phys. B*. – 2007. – Vol. 87. – P. 707.

5. Перестраиваемый непрерывный лазер на кристалле  $\text{Tm}^{3+}:\text{KLu}(\text{WO}_4)_2$  с диодной накачкой / О.П. Дернович [и др.] // Новые направления развития приборостроения: материалы 8-ой Междунар. студенческой науч.-технич. конф., Минск, 22–24 апреля 2015 г. / пред. редкол. Гусев О.К. – Минск : БНТУ, 2015. – С. 197.

6. Engineering lattice matching, doping level, and optical properties of  $\text{KY}(\text{WO}_4)_2:\text{Gd}$ ,  $\text{Lu}$ ,  $\text{Yb}$  layers for a cladding-side-pumped channel waveguide laser / S. Aravazhi [et al.] // *Appl. Phys. B*. – 2013. – Vol. 111. – P. 433–446.

7. Growth, spectroscopy and laser operation of  $\text{Ho}:\text{KY}(\text{WO}_4)_2$  / V. Lambunathan [et al.] // *Journal of Luminescence*. – 2016. – Vol. 179. – P. 50–58.

УДК 621.373.826

### Yb:YAB BASED CHIRPED PULSE REGENERATIVE AMPLIFIER

V.E. Kisel,<sup>1</sup> A.S. Rudenkov,<sup>1</sup> K.N. Gorbachenya<sup>1</sup>, V.V. Maltsev<sup>2</sup>, N.I. Leonyuk<sup>2</sup>, and N.V. Kuleshov<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Center for Optical Materials and Technologies, Belarusian National Technical University, Minsk, Belarus

<sup>2</sup>Department of Crystallography and Crystal Chemistry, Moscow State University, Moscow, Russia

#### 1. Introduction

Diode-pumped femtosecond laser sources with pulse repetition rates of hundreds kHz and pulse energies of tens microjoules are of practical importance for high-precision micromachining in industry and biomedicine [1].

These pulse trains can be generated conveniently with RA systems based on bulk regenerative amplifiers. One of the highest output power reported so far for bulk RAs is 28 W in an Yb:CALGO operating at 500 kHz, with 217 fs pulses [2]. The output power of about 21 W at 200 kHz PRF with 200 fs pulse duration is obtained on Yb:KGW dual crystal system [3]. Generalizing the above data, we can conclude that the search for new laser media with appropriate spectroscopic properties for regenerative amplification of ultrashort laser pulse is still of high interest.

Yb:YAB crystal demonstrate promising spectroscopic properties that confirmed by excellent experimental results in mode-locked lasers provided near-transform limited pulses with wide spectra [4].

In our paper we present the experimental results of Yb:YAB-based chirped pulse regenerative amplifier for the first time to the best of our knowledge.

#### 2. Experimental layout

The conceptual scheme of the system layout is shown in Fig. 1. As a seed laser diode-pumped Yb:KYW oscillator was used which provided 100 fs pulse train with 70 MHz PRF and 10 nJ single pulse energy. The seed pulse spectrum was 12 nm wide (FWHM) and centered at 1037.7 nm. A BaB2O4 (BBO)-based pulse-picker was used to reduce pulse

repetition frequency to the levels of 1–100 kHz. For stretching the pulse Martinez-scheme stretcher based on the reflection Au-coated grating was used with period of 1800  $\text{mm}^{-1}$ .

The stretched seed pulse duration was about 150 ps. After passing through a Faraday isolator, the seed pulse was injected into the RA. The isolator was employed to protect the seeder from high-intensity back reflections and, at the same time, for separating the amplified output pulse from the seed oscillator.

A grating compressor is employed at the RA output in order to compress the chirped femtosecond pulse. Compressor consists of two reflection Au-coated grating with period of 1700  $\text{mm}^{-1}$ . Transmission of the compressor was about 76 %.

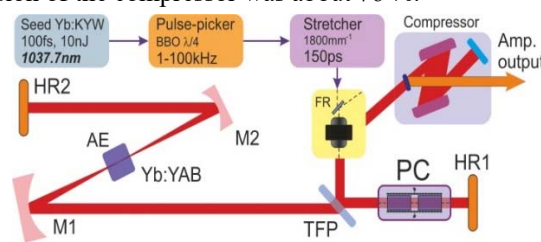


Fig. 1. Schematic of the Yb:YAB chirped pulse regenerative amplifier

As a pump source a multiple single emitter InGaAs fiber coupled laser diode ( $\varnothing 105 \mu\text{m}$ ,  $\text{NA}=0.15$ ) with maximum output power of about 25 W was used. The pump light was formed by set of lenses into the spot with diameter of about 180  $\mu\text{m}$  ( $1/e^2$ ). The losses on transmission of the