

- произведена замена материалов колец, обжимающих АЭ с метилвинилового силикона VMQ на кольца из резины FFKM;
- герметик Elasil RT772 был заменен на Dow Corning 93-500 и Пентглас 750;
- для всех материалов длительность дегазации увеличилась с 8 ч до 24 ч;

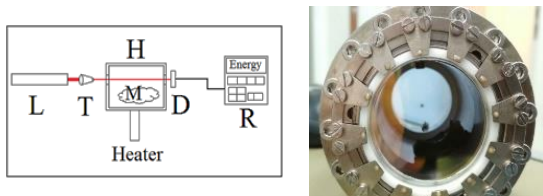


Рисунок 3 – Схема исследования материалов

– внутренний объем лазерного излучателя целесообразно заполнять смесью из очищенных кислорода и азота.

Установлено также что материалы на основе фторопластов после проведения дегазации хорошо подходят для применений в лазерном резонаторе. Разработанная методика отбора материалов оказалась наиболее эффективной для достижения ресурса в десятки миллионов импульсов.

Текущий подтвержденный ресурс ЛПБ 84 млн импульсов.

#### Литература

1. Wernham, D. Optical Coatings in Space / D. Wernham // Advances in Optical Thin Films IV, Proc. of SPIE. – 2011. – Vol. 81680F.

УДК 621.375.826

### УСЛОВИЯ И РЕЖИМЫ ВЫРАЩИВАНИЯ КРИСТАЛЛОВ МАГНИЙ-АЛЮМИНИЕВОЙ ШПИНЕЛИ, АКТИВИРОВАННЫХ ИОНАМИ $Co^{2+}$ С РАЗЛИЧНОЙ КОНЦЕНТРАЦИЕЙ, И ИХ ПРИМЕНЕНИЕ В ИМПУЛЬСНЫХ ЛАЗЕРАХ С ДИОДНОЙ НАКАЧКОЙ

Кисель В.Э., Горбаченя К.Н., Гоман В.И.

*НИЦ Оптических материалов и технологий БНТУ  
Минск, Республика Беларусь*

**Аннотация.** Исследованы условия и режимы роста кристаллов  $Co^{2+}:MgAl_2O_4$  с различной концентрацией двухвалентных ионов кобальта. Измерены спектры поглощения выращенных образцов, проведены лазерные эксперименты по исследованию их генерационных характеристик в лазере на основе Er:стекло с диодной накачкой.

**Ключевые слова:** рост кристаллов, спектры поглощения, кристалл, пассивная модуляция добротности, двухвалентные ионы кобальта.

### MAGNESIUM-ALUMINUM SPINEL CRYSTALS ACTIVATED WITH $Co^{2+}$ IONS WITH DIFFERENT CONCENTRATIONS: GROWS AND APPLICATION IN DIODE-PUMPED PULSED LASERS

Kisel V.E., Gorbachenya K.N., Goman V.I.

*Center for Optical Materials and Technologies BNTU  
Minsk, Republic of Belarus*

**Abstract.** Growth process of  $Co^{2+}: MgAl_2O_4$  crystals was investigated for different concentration of divalent cobalt ions. Absorption spectra of different samples were measured and their laser properties in Er:glass laser under diode-pumping were investigated.

**Key words:** crystal grows, absorption spectra, crystal, passive Q-switching, divalent cobalt ions.

Адрес для переписки: Кисель В.Э., пр. Независимости, 65, г. Минск, 220113, Республика Беларусь  
e-mail: vekisel@bntu.by

Лазерное излучение с длиной волны 1,5–1,6 мкм имеет ряд достоинств, интересных для широкого практического применения в лазерной дальнометрии, медицине, системах оптической локации и лазерно-искровой эмиссионной спектрометрии благодаря целому ряду причин. Основным преимуществом указанного излучения является условная безопасность для органов зрения людей вследствие того, что малая часть излучения попадает на сетчатку, поглощаясь до нее роговицей и хрусталиком. Кроме того, из-за высо-

кого поглощения излучения водой при микрохирургических вмешательствах на поверхности прозрачных тканей глаза излучением данной длины волны уменьшаются глубина термического некроза и порог абляции. К тому же, благодаря прозрачности атмосферы, а также высокому пропусканию излучения с длиной волны 1,5–1,6 мкм в условиях тумана, дыма и пара, лазерные источники указанного диапазона используются в системах оптической локации и дистанционного зондирования Земли.

В настоящее время существует большое количество источников лазерного излучения с длиной волны 1,5–1,6 мкм: волоконные лазеры, полупроводниковые лазеры, параметрические генераторы света и лазеры на основе вынужденного комбинационного рассеяния. Однако благодаря простоте и компактности конструкции, наибольший интерес разработчиков лазерных систем привлекают твердотельные лазеры на основе материалов, со-активированных ионами эрбия и иттербия, например Yb,Er:стекло, данная активная среда наиболее полно удовлетворяет требованиям получения эффективной лазерной генерации, в том числе, при диодной накачке. На практике наиболее востребованными являются импульсные излучатели. Одним из наиболее распространенных и простых методов получения импульсного лазерного излучения является режим пассивной модуляции добротности, для получения которого используют насыщающиеся поглотители. Для лазеров спектрального диапазона 1,5–1,6 мкм наиболее эффективным насыщающимся поглотителем выступает кристалл магний-алюминиевой шпинели с ионами  $\text{Co}^{2+}$ .

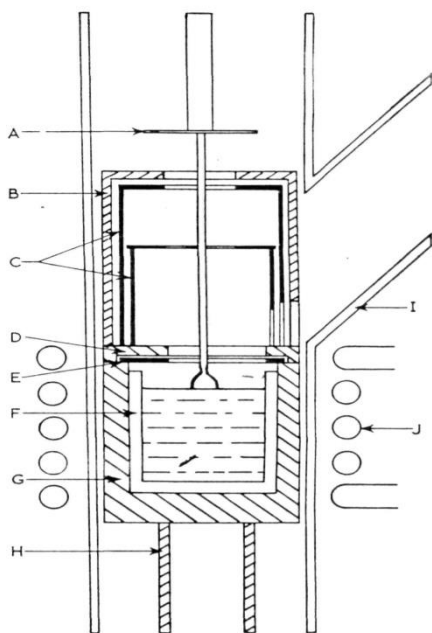


Рисунок 1 – Установка для выращивания монокристаллов шпинели методом Чохральского: *A* – отражающий диск Pt/20%Rh; *B* – алюминиевый чехол; *C* – иридиевые экраны; *D* – магниевая прокладка; *E* – иридиевое кольцо; *F* – иридиевый тигель; *G* – магниевый чехол; *H* – алюминиевое основание; *I* – кварцевая обшивка; *J* – радиочастотный индуктор

Кристаллы шпинели, использованные в работе, выращивались методом Чохральского в иридиевых тиглях. Для кристаллов  $\text{MgAl}_2\text{O}_4$  температура роста составляет 2350–2370 °С, что сравнимо с температурой плавления материала тигля 2410 °С. Для снижения тепловой нагрузки на

стенки тигля использовалась разработанная оригинальная низко градиентная тепловая схема (рисунок 1). Использование иридиевого экрана над тиглем снизило радиальные градиенты в расплаве для предотвращения растрескивания тигля и повышения качества кристаллов. Использование верхних иридиевых экранов снизило температурные градиенты в зоне охлаждения кристалла для уменьшения внутренних напряжений.

Спектры поглощения выращенных кристаллов  $\text{Co}^{2+}:\text{MgAl}_2\text{O}_4$  с различным уровнем примеси представлены на рисунке 2.

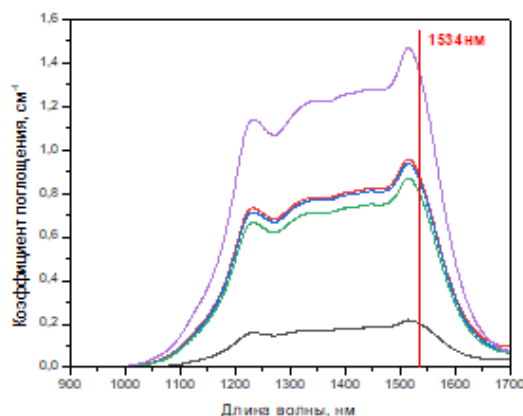


Рисунок 2 – Спектры поглощения выращенных кристаллов  $\text{Co}^{2+}:\text{MgAl}_2\text{O}_4$  различной концентрации

Для проведения лазерных экспериментов были изготовлены полированные образцы пассивных затворов с одинаковым уровнем начального пропускания на длине волны генерации лазера на основе Er: стекло около 1,534 мкм.

Для оценки влияния концентрации ионов  $\text{Co}^{2+}$  в кристаллах магний-алюминиевой шпинели на выходные характеристики лазерного излучения проведены экспериментальные исследования в схеме излучателя с продольной диодной накачкой. В качестве активного элемента использовалось плоскопараллельный образец фосфатного стекла с содержанием ионов эрбия около  $0,9 \cdot 10^{20} \text{ см}^{-3}$  и ионов иттербия около  $2,2 \cdot 10^{21} \text{ см}^{-3}$  толщиной 2,8 мм. Установка элемента в резонаторе имела ориентацию под углом Брюстера. Использовалось плоское выходное зеркало с пропусканием около 6,5 % на длине волны 1534 нм и плоское высокоотражающее зеркало. Затвор, без просветляющих диэлектрических покрытий, также устанавливался в резонаторе под углом Брюстера. Общая геометрическая база резонатора составляла 25–27 мм. Для накачки использовался лазерный диод с волоконным выводом излучения с выходной мощностью до 13 Вт на длине волны 940 нм. Излучение накачки фокусировалось в пятно диаметром около 600 мкм по уровню  $1/e^2$ . Параметры выходных импульсов для насыщающихся поглотителей, изготовленных из кристаллов с различной концентрацией  $\text{Co}^{2+}$ , представлены в таблице 1.

Таблица 1. Параметры выходного излучения

Коэфф-т поглощения на $\lambda = 1534$ нм, $\text{См}^{-1}$	Энергия импульса, мДж	Длительность импульса, нс	Пороговая мощность накачки, Вт
1,4	1,1	11	10,1
0,8	1,08	11,5	10,3
0,2	1,05	12	10,5

Из проведенных экспериментов видно, что при использовании менее концентрированных кристаллов наблюдается незначительное снижение энергии выходных импульсов и рост пороговой мощности накачки. Такое поведение может объясняться увеличением толщины насыщающихся поглотителей для достижения одинакового значения слабосигнального пропускания при снижении концентрации ионов  $\text{Co}^{2+}$  и соответствующего увеличения неактивных ненасыщаемых потерь.

УДК 621.375.826

### ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ПОСЛЕРОСТОВОГО ОТЖИГА КРИСТАЛЛОВ РЕДКОЗЕМЕЛЬНЫХ ВОЛЬФРАМАТОВ С ВЫСОКОЙ КОНЦЕНТРАЦИЕЙ ИТТЕРБИЯ НА ИХ СПЕКТРАЛЬНЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ И ОПТИЧЕСКОЕ КАЧЕСТВО

Кисель В.Э.<sup>1</sup>, Горбаченя К.Н.<sup>1</sup>, Гурецкий С.А.<sup>2</sup>, Кулешов Н.В.<sup>1</sup><sup>1</sup>НИИЦ Оптических материалов и технологий БНТУ<sup>2</sup>НПЦ НАН РБ по материаловедению

Минск, Республика Беларусь

**Аннотация.** Исследовано влияние различных процессов послеростового отжига кристаллов  $\text{Yb:KY}(\text{WO}_4)_2$  с высоким содержанием активатора на их спектрально-люминесцентные свойства и лучевую стойкость к излучению накачки.

**Ключевые слова:** кристаллы двойных вольфраматов, трехвалентные ионы иттербия, спектры поглощения.

### STUDY OF THE INFLUENCE OF POST-GROWTH ANNEALING OF RARE-EARTH TUNGSTATE CRYSTALS WITH HIGH YTTERBIUM CONCENTRATION ON THEIR SPECTRAL CHARACTERISTICS AND OPTICAL QUALITY

Kisel V.E.<sup>1</sup>, Gorbachenya K.N.<sup>1</sup>, Guretskii S.A.<sup>2</sup>, Kuleshov N.V.<sup>1</sup><sup>1</sup>Center for Optical Materials and Technologies BNTU<sup>2</sup>Scientific and Practical Materials Research Center NAS Belarus

Minsk, Republic of Belarus

**Abstract.** Influence of different after-grows annealing processes on spectral properties as well as on light induced damage under pump radiation were investigated for heavily Yb-doped  $\text{KY}(\text{WO}_4)_2$  crystals.

**Key words:** double tungstate crystals, trivalent ytterbium ions, absorption spectra.

Адрес для переписки: Кисель В.Э., пр. Независимости, 65, г. Минск, 220113, Республика Беларусь  
e-mail: vekisel@bntu.by

Кристаллы калий-иттриевого ( $\text{KY}(\text{WO}_4)_2$ ) вольфрамата относятся к ряду двойных калий-редкоземельных вольфраматов. Кристаллы являются моноклинными с пространственной группой симметрии  $C_{2h}^6 - C2/c$ . Параметры элементарной кристаллической ячейки:  $a = 8,05 \text{ \AA}$ ,  $b = 10,33 \text{ \AA}$ ,  $c = 7,54 \text{ \AA}$ ,  $\beta = 94^\circ$ . Ионы  $\text{Yb}^{3+}$  замещают в данных соединениях ионы  $\text{Y}^{3+}$  в позициях с локальной симметрией  $C_2$ . Образцы монокристаллов были выращены путем кристаллизации из раствора в расплаве  $\text{K}_2\text{WO}_4 + \text{WO}_3$  модифицированным методом Чохральского. В качестве шихты использовался окисел редкоземельного элемента. Были получены образцы высокого оптического качества с содержанием ионов  $\text{Yb}^{3+}$  от 0,2 ат.% до 100 ат.% по отношению к ионам  $\text{Y}^{3+}$ . С оптической точки зрения кристаллы являются двуосными. Главные значения показателей преломления кристалла

$\text{Yb}^{3+}:\text{KY}(\text{WO}_4)_2$  на длине волны 1030 нм составляют:  $n_g = 2,017$ ,  $n_m = 1,982$ ,  $n_p = 1,946$ . Теплопроводность кристаллов составляет около  $3,5 \text{ Вт/м}\cdot\text{К}^{-1}$  вдоль оси оптической индикатрисы  $N_g$ ,  $3,0 \text{ Вт/м}\cdot\text{К}^{-1}$  вдоль  $N_m$  и  $2,5 \text{ Вт/м}\cdot\text{К}^{-1}$  вдоль  $N_p$ .

Для исследования влияния послеростового отжига кристаллов редкоземельных вольфраматов с высокой концентрацией трехвалентных ионов иттербия на их спектральные характеристики и оптическое качество были изготовлены тестовые пластины толщиной 1–4 мм (рисунок 1).

Отжиг проводится после технологических операций по резке и шлифовке заготовок активных элементов, перед процессом чистовой полировки рабочих граней усиливающей среды.

Проведен отжиг кристаллов в двух температурных режимах с максимальными температурами  $400 \text{ }^\circ\text{C}$  и  $950 \text{ }^\circ\text{C}$ . Отжиг проводился в атмо-