

режим генерации одной стоячей волны, вертикальными черточками – двух стоячих волн, треугольниками – автоколебания, стрелками показаны изменения средних значений разностей фаз на  $\pi$ , которые имеют место в области автоколебаний.

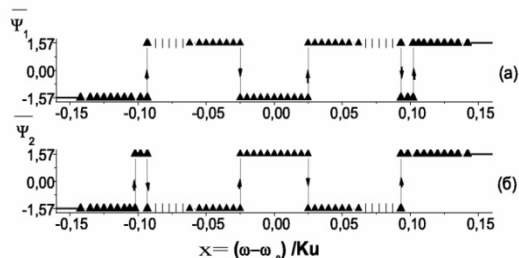


Рисунок 4 – Изменение средних значений разностей фаз при движении из области отрицательных в область положительных отстройек

Поведение мгновенных значений интенсивностей и разностей фаз для  $x = -0.0235$  (а) и  $x = -0.0287$  (б) иллюстрирует рис. 5.

В зависимости от условий регистрации, для которой выбирается некоторый конечный временной интервал, изменения средних значений разности фаз могут происходить как непрерывно, так и скачкообразно.

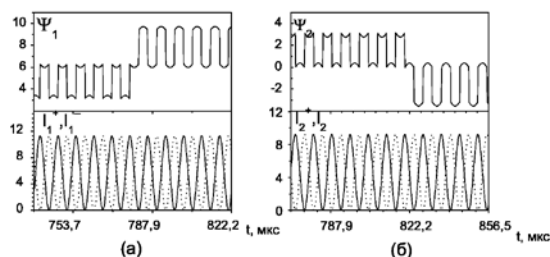


Рисунок 5 – Скачки мгновенных значений разностей фаз на  $2\pi$  при неизменных интенсивностях

1. Svirina, L.P. A four-frequency anisotropic-cavity ring gas laser / L.P. Svirina // *Quantum & Semiclassical Optics*, JEOS, part B. – 1998. – V. 10, № 1. P. 213–222.
2. Свирина, Л.П. Фазовая неустойчивость в четырехчастотном кольцевом газовом лазере с анизотропным резонатором / Л.П. Свирина // *Квантовая электроника*. – 2008. – Т38, № 1.– С.1–15 (приглашенная статья).
3. Yasinskii, V.M. Polarization dynamics in He - Ne ring laser/ V.M Yasinskii // *Proceedings of SPIE*. – 1996. – V. 2792. – P. 166-170.
4. Pando, C.L. /Phase dynamics in a single mode class B laser / C.L. Pando, G.A. Luno Acosta // *Optics Communications*. – 1995. – V. 114, №2. – P. 509-518.

УДК 539.26, 538.958, 621.373.8

### СПЕКТРАЛЬНО-ЛЮМИНЕСЦЕНТНЫЕ И НЕЛИНЕЙНО-ОПТИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА СИТАЛЛОВ, СОДЕРЖАЩИХ НАНОКРИСТАЛЛЫ ОКСИДА ГАЛЛИЯ, АКТИВИРОВАННЫХ ИОНАМИ КОБАЛЬТА

Скопцов Н. А.<sup>1</sup>, Глазунов И. В.<sup>1</sup>, Лойко П.А.<sup>1,4</sup>, Маляревич А. М.<sup>1</sup>, Юмашев К. В.<sup>1</sup>, Дымшиц О. С.<sup>2</sup>, Жилин А. А.<sup>2</sup>, Алексеева И. П.<sup>2</sup>, Шемчук Д. В.<sup>2</sup>, Виткин В.В.<sup>3</sup>, Харитонов А.А.<sup>3</sup>

<sup>1</sup>НИЦ оптических материалов и технологий, Белорусский национальный технический университет  
Минск, Республика Беларусь

<sup>2</sup>НИТИОМ ВНЦ «ГОИ им. С.И. Вавилова»

<sup>3</sup>Университет ИТМО

Санкт-Петербург, Россия

<sup>4</sup>Department of Materials and Nano Physics, School of Information and Communication Technology  
Kista, Sweden

В настоящее время большой интерес исследователей привлекает получение коротких и сверхкоротких импульсов лазерного излучения. Источники такого излучения востребованы в прецизионной обработке материалов, медицине дальнометрии, волоконных средствах передачи и обработки информации. Одним из способов получения лазерного излучения такой длительности является применение пассивных затворов на основе просветляющихся сред. Для лазеров спектрального диапазона 1.5 мкм большое распространение получили затворы на основе твёр-

дотельных сред с ионами кобальта [1-5]. Целью данной работы является создание и изучение спектрально-люминесцентных и нелинейно-оптических свойств новых материалов для пассивных затворов – ситаллов с наноразмерными кристаллами оксида галлия, легированных ионами кобальта,  $\text{Co}^{2+}:\text{Ga}_2\text{O}_3$ .

Исходное стекло литиевогаллиевоалюмо-силикатной системы  $13\text{Li}_2\text{O}\cdot 23\text{Ga}_2\text{O}_3\cdot 64\text{SiO}_2$  с добавкой оксида кобальта было синтезировано в платинородиевом тигле при температуре 1580 °С с перемешиванием, отлито на металлическую

плиту и отожжено при температуре 640 °С. Исходное стекло было термообработано при температуре 730 °С в течение 6 часов. В результате термообработки получен прозрачный материал светло-синего цвета.

Для определения структуры кристаллической фазы, выделившейся при термообработке, выполнен рентгенофазовый анализ (РФА). Измерение производилось с помощью дифрактометра Shimadzu XRD 6000 при излучении Cu K $\alpha$  с никелевым фильтром. Согласно данным РФА, материал содержит кристаллы оксида галлия Ga<sub>2</sub>O<sub>3</sub> нанометрового размера. Наличие кристаллической фазы также подтверждается данными просвечивающей электронной микроскопии (ТЕМ) (рисунок 1).

Регистрация спектров поглощения образцов стекол и ситаллов (рисунок 2) осуществлялась с помощью спектрофотометра Cary Varian 5000. Анализ спектра показывает, что в состав нанокристаллов входят двухвалентные тетракоординированные ионы кобальта. В спектре видно, что край полосы поглощения ионов кобальта, вызванный переходами  $^4A_2(^4F) \rightarrow ^4T_{1g}(^4F)$ , в ситалле находится в области 1.75 мкм, что недоступно для других материалов с ионами кобальта. Указанная особенность позволяет использовать данный материал для пассивных затворов в лазерах, излучающих в спектральном диапазоне 1,4-1,75 мкм.

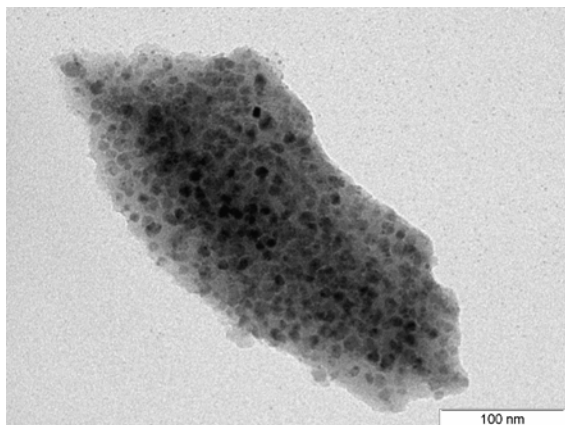


Рисунок 1. Снимок просвечивающей электронной микроскопии (ТЕМ) ситалла с нанокристаллами оксида галлия Co<sup>2+</sup>:Ga<sub>2</sub>O<sub>3</sub>

На рисунке 3 представлен спектр люминесценции ситалла с ионами кобальта. Возбуждение осуществлялось лазерным излучением с длиной волны 623 нм, регистрация производилась спектрометром SOLAR S-100. Полосы свечения обусловлены переходами ионов кобальта Co<sup>2+</sup> из возбужденного состояния  $^4A_{2g}(^4F)$  (0.6 мкм) и  $^4T_{2g}(^4F)$  (0.9 мкм) в основное состояние  $^4A_2(^4F)$ .

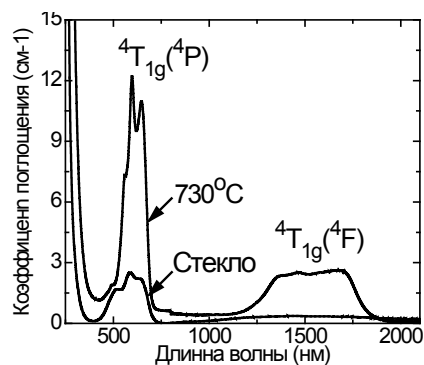


Рисунок 2. Спектр поглощения ионов кобальта в стекле и ситалле с нанокристаллами Co<sup>2+</sup>:Ga<sub>2</sub>O<sub>3</sub>

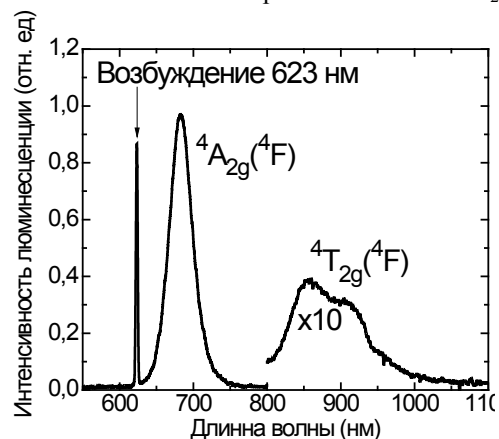


Рисунок 3. Спектр люминесценции ионов кобальта в ситалле с нанокристаллами Co<sup>2+</sup>:Ga<sub>2</sub>O<sub>3</sub>

На рисунке 4 представлена кинетика затухания люминесценции ионов кобальта из состояния  $^4A_{2g}(^4F)$ . Время жизни в возбужденном состоянии измерено с помощью фотоприемника Hamamatsu C 5460 и осциллографа Gwinstek GDS-71152A и составляет 170 нс.

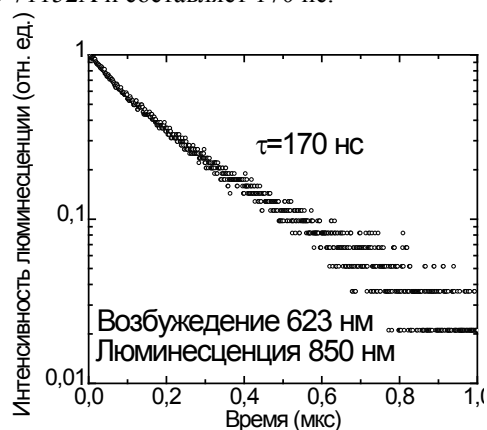


Рисунок 4. Кинетика затухания люминесценции ионов кобальта в ситалле с нанокристаллами Co<sup>2+</sup>:Ga<sub>2</sub>O<sub>3</sub>

Исследована зависимость пропускания ситаллов от интенсивности падающего лазерного излучения. Образец толщиной 4 мм облучался ла-

зерными импульсами с энергией 1.3 мДж, длительностью 85 нс на длине волны 1540 нм. Диаметр сфокусированного пятна на образце составлял 70 мкм. Для обработки экспериментальных данных, которые показывают, что ситалл с нанокристаллами  $\text{Co}^{2+}:\text{Ga}_2\text{O}_3$ , хорошо просветляется, использовалась модель медленно релаксирующего насыщающегося поглотителя [3]:

$$\frac{dE_0}{dz} = -I_{sa} \cdot \frac{\ln(1/T_0)}{L} \cdot \left[ (1-\gamma) \cdot (1 - e^{-\frac{E_0}{I_{sa}}}) + \gamma \cdot \frac{E_0}{I_{sa}} \right]$$

где  $I_{sa} = h\nu/\sigma_a$  – интенсивность насыщения поглощения;  $\gamma = \sigma_{esa}/\sigma_a$  – контраст просветления;  $\sigma_a$  и  $\sigma_{esa}$  – поперечные сечения поглощения из основного и возбужденного состояний, соответственно. По результатам моделирования определены контраст просветления  $\gamma=0.12$ , поперечные сечения поглощения из основного  $\sigma_a=1.7 \cdot 10^{-19}$  см<sup>2</sup> и возбужденного  $\sigma_{esa}=0.2 \cdot 10^{-19}$  см<sup>2</sup> состояний.

С помощью исследованного материала получена пассивная модуляция добротности лазера на эрбиевом стекле с поперечной диодной накачкой. Накачка осуществлялась лазерным диодом с длиной волны 940 нм и мощностью до 70 Вт. В качестве активной среды использовался стержень  $\varnothing 1.6 \times 24$  мм. Резонатор лазера длиной 65 мм был образован парой плоских зеркал. Пропускание выходного зеркала на длине волны генерации составляло 13%. Начальное пропускание пассивного затвора толщиной 0.5 мм  $T=85\%$ . Радиус моды внутрирезонаторного излучения на затворе составлял 150 мкм. В описанном лазере были получены импульсы излучения с энергией 1.75 мДж и длительностью 25.4 нс.

Таким образом, в работе синтезирован новый лазерный материал – ситалл, содержащий нано-

кристаллы оксида галлия с ионами кобальта  $\text{Co}^{2+}:\text{Ga}_2\text{O}_3$ . Исследованы его структурные, спектрально-люминесцентные и нелинейно-оптические свойства. Получена пассивная модуляция добротности эрбиевого лазера с поперечной диодной накачкой. Показано, что ситаллы с нанокристаллами оксида галлия  $\text{Co}^{2+}:\text{Ga}_2\text{O}_3$  являются перспективной средой для пассивной модуляции добротности лазеров спектрального диапазона 1.4-1.75 мкм.

1. 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).
2. 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).
3. 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).
4. [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 (March 23, 2000).
5. 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.* **40**, 4322-4325 (2001).

УДК 534-16:534-8:621.9.048.6

## КОНЦЕНТРАТОРЫ УЛЬТРАЗВУКОВЫХ КОЛЕБАНИЙ НА ОСНОВЕ НЕОДНОРОДНЫХ КОЛЬЦЕВЫХ УПРУГИХ ЭЛЕМЕНТОВ

Степаненко Д.А.

Белорусский национальный технический университет  
Минск, Республика Беларусь

Возможность создания концентраторов ультразвуковых колебаний на основе кольцевых упругих элементов с постоянной и переменной площадью поперечного сечения была ранее теоретически обоснована автором [1, 2]. Основными преимуществами концентраторов на основе кольцевых упругих элементов по сравнению со стержневыми концентраторами являются простота изготовления, малые габаритные размеры и масса. В данной работе дается теоретическое обоснование возможности использования в качестве концентраторов ультразвуковых колебаний неоднородных кольцевых упругих элементов,

состоящих из двух кольцевых сегментов, выполненных из материалов с различным модулем упругости. В качестве прототипа для подобного типа концентраторов послужили стержневые концентраторы, состоящие из двух соединенных между собой четвертьволновых стержней с различным модулем упругости и одинаковой площадью поперечного сечения, ступенчатое изменение модуля упругости в которых равносильно ступенчатому изменению площади поперечного сечения в ступенчатых стержневых концентраторах.