

УДК 539.26, 538.958, 621.373.8

ПАССИВНАЯ МОДУЛЯЦИЯ ДОБРОТНОСТИ ЛАЗЕРА НА КРИСТАЛЛЕ Er:YAG С ЗАТВОРОМ ИЗ СТЕКЛОКЕРАМИКИ, СОДЕРЖАЩЕЙ НАНОКРИСТАЛЛЫ $\text{Co}^{2+}:\gamma\text{-Ga}_2\text{O}_3$

Скопцов Н.А.¹, Лойко П.А.^{1,2}, Юмашев К.В.¹,
Yang Shi³, Chunqing Gao³, Qing Ye³, Shuo Wang³, Qing Wang³, Mingwei Gao³,
Дымшиц О.С.⁴, Жилин А.А.⁴, Запалова С.С.⁴

¹НИЦ Оптических материалов и технологий, Белорусский национальный технический университет
Минск, Республика Беларусь

²Университет ИТМО, Кронверкский пр., 49, 197101 Санкт-Петербург, Российская Федерация

³School of Opto-Electronics, Beijing Institute of Technology, Beijing, Republic of China

⁴Государственный Оптический Институт им С. И. Вавилова, Санкт-Петербург, Российская Федерация

Безопасные для глаз лазеры спектрального диапазона 1.5-1.6 мкм нашли широкое применение в дальнометрии, зондировании атмосферы, волоконных системах связи и других областях.

Лазеры, работающие в режиме пассивной модуляции добротности, позволяют получать сверхкороткие лазерные импульсы. Такие лазеры отличаются компактной конструкцией, проще в производстве и эксплуатации, обладают более низкой стоимостью по сравнению с системами с активной модуляцией добротности.

В настоящей работе мы представляем результаты исследования режима пассивной модуляции добротности лазера на основе монокристалла Er:YAG с резонансной накачкой волоконным лазером на длине волны 1532 нм. В качестве насыщающегося поглотителя использовался пассивный затвор на основе прозрачной стеклокерамики, содержащей нанокристаллы $\text{Co}^{2+}:\gamma\text{-Ga}_2\text{O}_3$.

Исходное стекло литиевогаллиевоалюмосиликатной системы состава $13\text{Li}_2\text{O} \cdot 23\text{Ga}_2\text{O}_3 \cdot 64\text{SiO}_2$ с добавкой оксида кобальта было синтезировано в тигле из кварцевой керамики при температуре 1580 °C с перемешиванием, отлито на металлическую плиту и отожжено при температуре 640 °C [1, 2]. Исходное стекло было термообработано при температуре 730 °C в течение 6 часов. В результате термообработки получен прозрачный материал светло-синего цвета. Результаты РФА (рисунок 1) показывают, что материал содержит кристаллы оксида галлия Ga_2O_3 нанометрового размера.

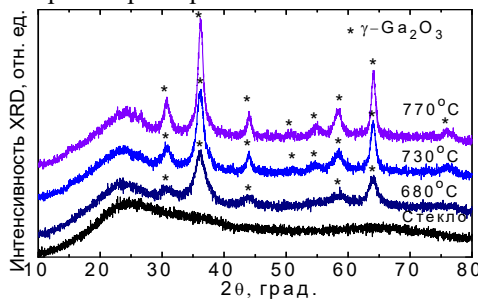


Рисунок 1 – Рентгенограмма ситаллов, содержащих нанокристаллы $\text{Co}^{2+}:\gamma\text{-Ga}_2\text{O}_3$

Спектры поглощения ситаллов, содержащих нанокристаллы $\text{Co}^{2+}:\gamma\text{-Ga}_2\text{O}_3$ (рисунок 2), измерены на спектрофотометре Cary Varian 5000. Из спектров видно, что край полосы по-

глощения ионов кобальта, вызванный переходами $^4\text{A}_2(^4\text{F}) \rightarrow ^4\text{T}_1(^4\text{F})$, в ситалле находится в области 1.75 мкм, что недоступно для других материалов, активированных ионами кобальта. Указанная особенность позволяет использовать данный материал как пассивный затвор в лазерах спектрального диапазона 1.4-1.75 мкм.

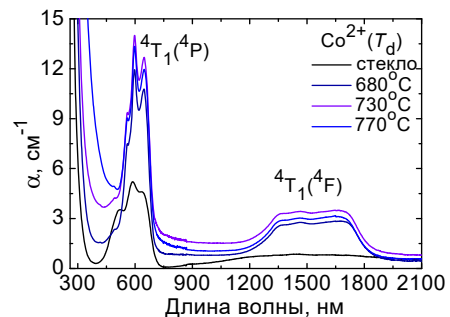


Рисунок 2 – Спектры поглощения ситаллов, содержащих нанокристаллы $\text{Co}^{2+}:\gamma\text{-Ga}_2\text{O}_3$

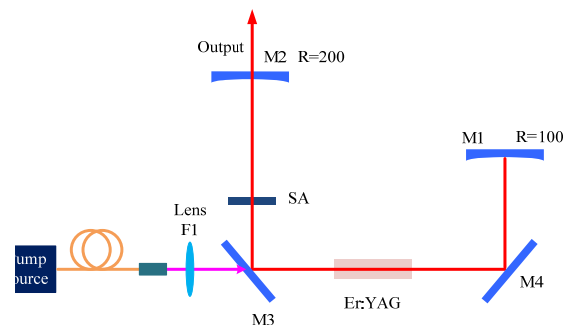


Рисунок 3 – Схема лазера на кристалле Er:YAG с пассивным затвором $\text{Co}^{2+}:\gamma\text{-Ga}_2\text{O}_3$

Схема лазера на кристалле Er:YAG с пассивным затвором $\text{Co}^{2+}:\gamma\text{-Ga}_2\text{O}_3$ представлена на рисунке 3. Резонатор лазера образован двумя сферическими зеркалами. Длина резонатора составляет 285 мм. Зеркало M1 радиусом 100 мм глухое, пропускание (T) зеркала M2 радиусом 200 мм составляет 10 % или 22 % на длине волны генерации 1645 нм. Для предотвращения повреждения волоконного лазера накачки излучением твердотельного лазера Er:YAG, в резонатор поместили два промежуточных зеркала M3 и M4. Зеркала M3 и M4 обладают высоким T на длине волны накачки 1532 нм и высоким коэффициентом отражения на длине волны генерации лазера

1.6 мкм. Активной средой лазера является стержень Er:YAG диаметром 4 мм и длиной 40 мм. Концентрация ионов эрбия в кристалле составляет 0.25 ат.%. Источником накачки служит волоконный лазер мощностью 20.6 Вт (IPG Photonics, ELR-20) с длиной волны 1532 нм и спектральной шириной 0.2 нм. Пассивный затвор толщиной 470 мкм представляет собой полированную пластинку без покрытий. Радиус моды лазерного излучения в плоскости пассивного затвора составляет 270 мкм.

Был получен режим свободной генерации (без пассивного затвора). При использовании выходного зеркала с $T = 10\%$ выходная мощность равна 5.35 Вт, с $T = 22\%$ – 7.02 Вт на $\lambda = 1645$ нм при мощности накачки 20.6 Вт.

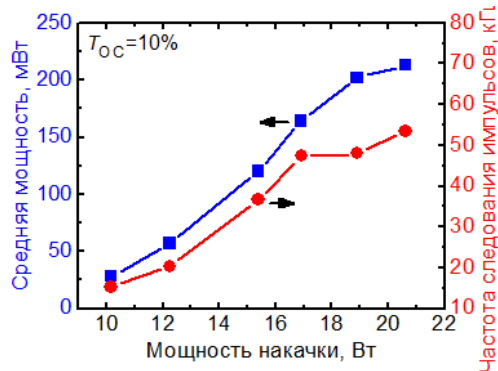


Рисунок 4 – Зависимость средней мощности и частоты следования импульсов лазера от мощности накачки

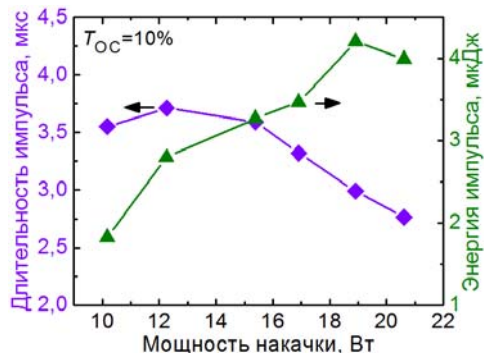


Рисунок 5 – Зависимость длительности и энергии импульса лазера от мощности накачки

При установке пассивного затвора в резонатор лазера был получен режим модуляции добротности (рисунки 4 и 5). Длина волны излучения лазера была измерена спектрометром Ocean Optics, NIR Quest-512. При использовании зеркала с $T = 10\%$ наблюдалась конкуренция между двумя длинами волн, 1617 нм и 1645 нм. Для зеркала с $T = 22\%$ наблюдалось только излучение с длиной волны 1645 нм.

Лазер на кристалле Er:YAG обладает высокими сечениями стимулированного испускания на длинах волн 1617 нм и 1645 нм, однако в данном кристалле наблюдается сильное перепоглощение, поэтому при высоких значениях инверсной населенности $\beta > 0.35$ происходит переключение лазера на длину волны 1617 нм.

Выходные параметры лазера на кристалле Er:YAG при работе в режиме пассивной модуляции добротности при резонансной накачке мощностью 20.6 Вт представлены в таблице 1, где P_{av} – средняя мощность генерации лазера, E – энергия одиночного импульса, f – частота следования импульсов, t – длительность одиночного импульса.

Таблица 1

T , %	P_{av} , мВт	E , мкДж	f , кГц	t , мкс
10%	213	4	20.6	2.7
22%	273	5.6	48.12	3.6

Следует отметить, что при работе не наблюдалось разрушения пассивного затвора в лазере под действием лазерного излучения, что говорит о высоком пороге разрушения – не менее $\sim 20 \pm 2$ Дж/см².

Таким образом, впервые изучена работа пассивного затвора на основе ситалла, содержащего нанокристаллы $\text{Co}^{2+}:\gamma\text{-Ga}_2\text{O}_3$, в лазере Er:YAG с резонансной накачкой, работающем на длине волны 1617 нм и 1645 нм. Получен режим пассивной модуляции добротности. Показано, что ситаллы с нанокристаллами оксида галлия $\text{Co}^{2+}:\gamma\text{-Ga}_2\text{O}_3$ являются перспективной средой для пассивной модуляции добротности лазеров спектрального диапазона 1.3–1.75 мкм.

Авторы 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 $\gamma\text{-Ga}_2\text{O}_3$: Co^{2+} nanocrystals: Saturable absorber for 1.5–1.7 μm Er lasers», *Laser Phys. Lett.* – 2015. – Vol. 12 – P. 035803.
2. Y. Shi, C. Gao, Q. Ye, S. Wang, Q. Wang, M. Gao, P. Loiko, N. Skoptsov, O. Dymshits, A. Zhilin, S. Zapalova, M. Tsenter, V. Vitkin, X. Mateos, K. Yumashev «Passively Q-switched 1.6 μm Er:YAG laser with a $\gamma\text{-Ga}_2\text{O}_3$:Co-based glass-ceramics as a saturable absorber» *Laser Phys. Lett.* – 2018. – Vol. 15, No. 4. – P. 045004-1-5.