

УДК 535.343:548.517

ИССЛЕДОВАНИЕ ТЕПЛО ВЫДЕЛЕНИЯ В КРИСТАЛЛАХ Yb:GGG С РАЗЛИЧНОЙ КОНЦЕНТРАЦИЕЙ ИОНОВ Yb³⁺ ПРИ ИСПОЛЬЗОВАНИИ ЛАЗЕРНОЙ ДИОДНОЙ НАКАЧКИ

Д. А. Николаев, В. Б. Цветков, И. А. Щербаков, А. М. Бульканов¹, И. А. Иванов¹

Проведено исследование тепловыделения в кристаллах Yb:GGG с различной концентрацией ионов Yb³⁺ в зависимости от поглощенной мощности лазерной диодной накачки. Первоначально величина тепловыделения в исследуемых образцах Yb:GGG существенно (в 2–4 раза) превосходила теоретически ожидаемые значения. Проведение дополнительного отжига образцов в кислородной атмосфере позволило существенно уменьшить тепловыделение в кристаллах вплоть до теоретически ожидаемой величины. Таким образом, было показано, что одной из основных причин повышенного тепловыделения в кристаллах Yb:GGG может являться наличие в них центров окраски.

Сила проявления термооптических эффектов в активных элементах (таких как, например, образование термолинзы и термодвулучепреломления) увеличивается с величиной тепловыделения. Это, в свою очередь, негативно сказывается на выходных параметрах лазерной генерации. Схема энергетических уровней ионов Yb³⁺ в активных средах включает в себя всего два электронных уровня, из которых уровень ²F_{7/2} является основным лазерным уровнем, а уровень ²F_{5/2} является верхним лазерным уровнем. Длина волны максимума линии поглощения у кристалла Yb:GGG составляет 971 нм, а длина волны максимума спектра излучения составляет 1025 нм [1]. Таким образом,

¹НИИ Материаловедения, 103460, г. Москва, К-460.

следует ожидать, что величина тепловыделения в активном элементе не должна превышать значения 8%. В работе [2] утверждается, что эта величина должна быть не более 15%. Малая величина тепловыделения выгодно отличает Yb-содержащие активные среды от активных элементов на основе кристаллов, активированных ионами Nd^{3+} , у которых тепловыделение при селективной накачке на уровень $^4\text{F}_{5/2}$ в отсутствие генерации составляет $\sim 30\%$ [3]. Однако, как следует из данных, приведенных в работе [4], величина тепловыделения в различных Yb-содержащих гранатах может существенно различаться и превышать теоретически ожидаемое значение.

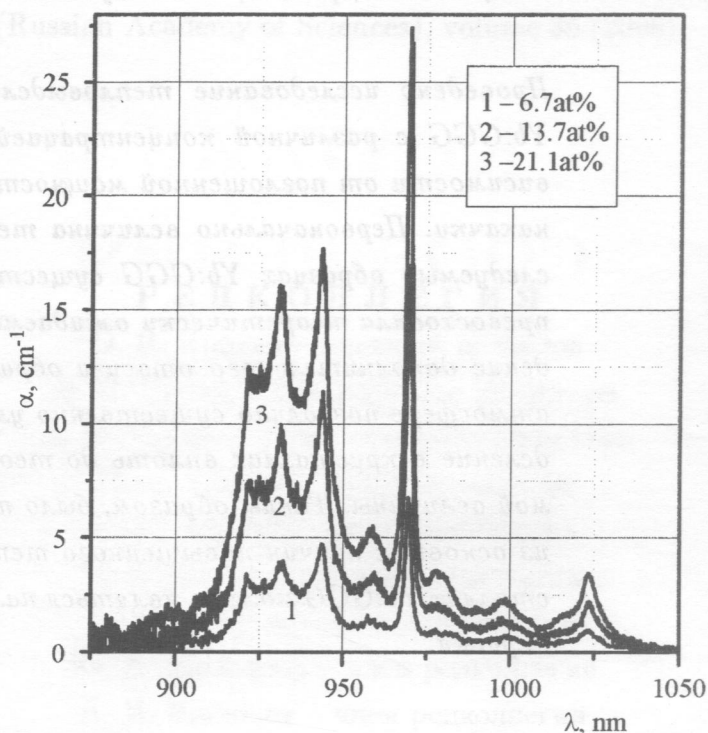


Рис. 1. Спектры поглощения кристаллов Yb:GGG с различной концентрацией ионов Yb^{3+} .

Основной целью настоящей части работы являлось исследование величины тепловыделения в активных элементах Yb:GGG с различными концентрациями ионов Yb^{3+} при использовании селективной диодной лазерной накачки. В качестве исследуемых образцов использовались элементы одинакового размера ($5.1 \times 5.1 \times 15 \text{ мм}^3$) и с различной концентрацией ионов Yb^{3+} (6.7, 13.7 и 21.1 at%). Спектры поглощения образцов приведены на рис. 1. Исследования люминесценции кристаллов при возбуждении в УФ- и видимой области спектра показали наличие малых концентраций неконтролируемых примесей редкоземельных элементов (Er^{3+} , Ho^{3+} и др.), находившихся в определенных

количествах в исходной шихте (чистота 5N). Кристаллы были произведены в НИИ Материаловедения, г. Зеленоград.

Для измерения величины тепловыделения в активных элементах использовался высокочувствительный метод интерференционной калориметрии, в котором исследуемые образцы играли роль отражающих интерферометров Фабри-Перо.

Оптическая схема эксперимента представлена на рис. 2. Непрерывное излучение полупроводникового лазера с длиной волны 959 нм и с шириной спектральной линии равной 3 нм, доставлялось при помощи оптического волокна F с диаметром сердцевины, равным 600 мкм, и числовой апертурой 0.22. Далее излучение накачки при помощи собирающей линзы $L1$ направлялось в активный элемент AR в виде пучка с диаметром перетяжки ~ 350 мкм.

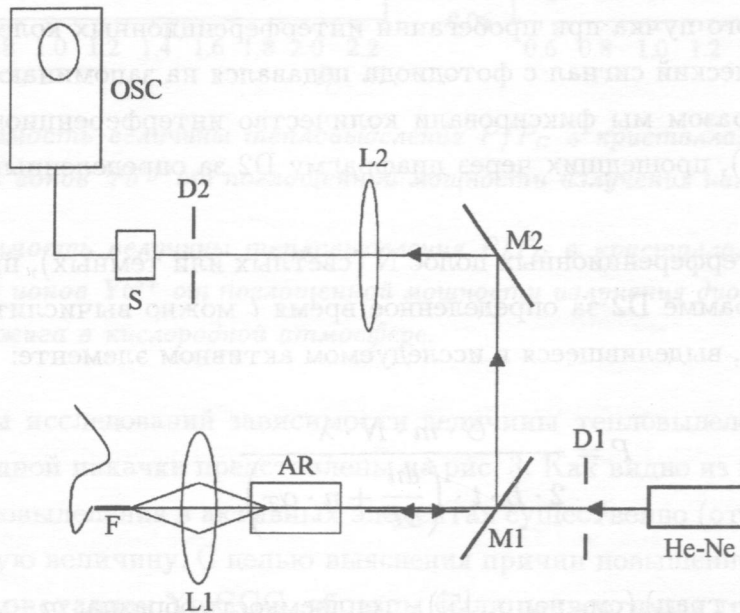


Рис. 2. Оптическая схема экспериментальной установки. He-Ne – лазер с длиной волны излучения 543.5 нм; $M1$ и $M2$ – зеркала с коэффициентами отражения 50% и 100% соответственно на длине волны 543.5 нм; $D1$ и $D2$ – диафрагмы; $L1$ и $L2$ – собирающие линзы; AR – исследуемый активный элемент; F – оптическое волокно; S – фотодиод; OSC – осциллограф.

В качестве тестирующего излучения использовался пучок He-Ne лазера с длиной волны 543.5 нм и расходимостью 10^{-4} рад, предварительно расширенный телескопом. Диаметр пучка ограничивался диафрагмой $D1$ и составлял 5 мм. Пробное излучение

направлялось в активный элемент. Активный элемент не охлаждался и был термоизолирован. Два пучка He-Ne лазера, отраженные от обоих торцов активного элемента, интерферировали между собой. Интерференционная картина рассматривалась в плоскости диафрагмы D2. Собирающая линза L2 проецировала торец активного элемента (правый на рис. 2) в плоскость диафрагмы D2.

В отсутствие излучения накачки интерференционная картина в плоскости диафрагмы D2 представляла собой пятно с равномерным поперечным распределением интенсивности. При нагреве активного элемента под действием лазерной диодной накачки возникали бегущие интерференционные кольца. Диаметр отверстия диафрагмы D2 примерно соответствовал половине толщины светлого или темного интерференционного кольца, а само отверстие диафрагмы было смещено относительно центра интерференционной картины. За диафрагмой D2 устанавливался фотодиод S, регистрировавший изменение интенсивности пробного пучка при пробегании интерференционных колец в плоскости диафрагмы. Электрический сигнал с фотодиода подавался на запоминающий осциллограф OSC. Таким образом мы фиксировали количество интерференционных колец N (светлых или темных), прошедших через диафрагму D2 за определенный промежуток времени.

По количеству интерференционных полос N (светлых или темных), прошедших через отверстие в диафрагме D2 за определенное время t можно вычислить количество тепловой мощности P , выделившееся в исследуемом активном элементе:

$$P = \frac{C \cdot m \cdot N \cdot \lambda}{2 \cdot L \cdot t \cdot \left(\frac{dn}{dT} + n \cdot \alpha_T \right)}. \quad (1)$$

Здесь $C = 0.381$ Дж/(г·град) (см., напр., [5]) – теплоемкость образца, m – масса образца, λ – длина волны излучения тестирующего He-Ne лазера, L – длина кристалла, $n = 1.98$ (см., напр., [6]) – показатель преломления исследуемого кристалла, $dn/dT = 21.2 \cdot 10^{-6}$ 1/град (см., напр., [6]) – температурный коэффициент изменения показателя преломления, $\alpha_T = 8.5 \cdot 10^{-6}$ 1/град [7] – температурный коэффициент расширения активного элемента.

Одновременно с измерениями количества тепловой мощности, выделившейся в образцах, мы проводили измерение мощности излучения диодной накачки P_C , поглотившейся в АЭ. Совместно, оба эти измерения позволяли нам определять относительную величину тепловыделения P/P_C в исследуемых образцах.

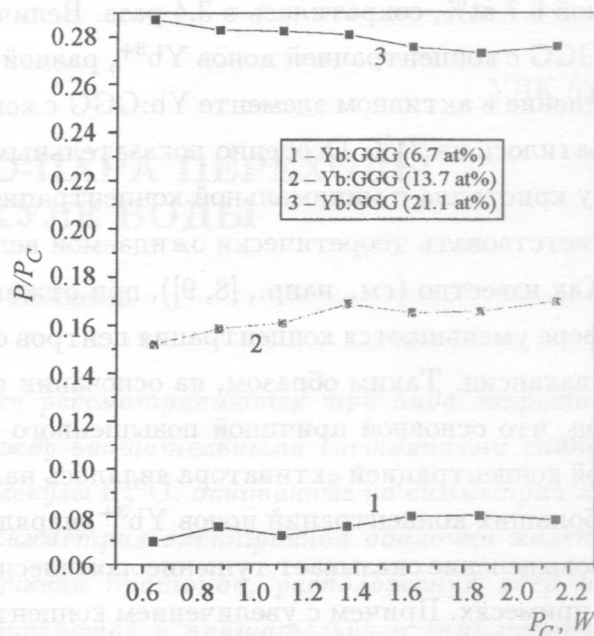
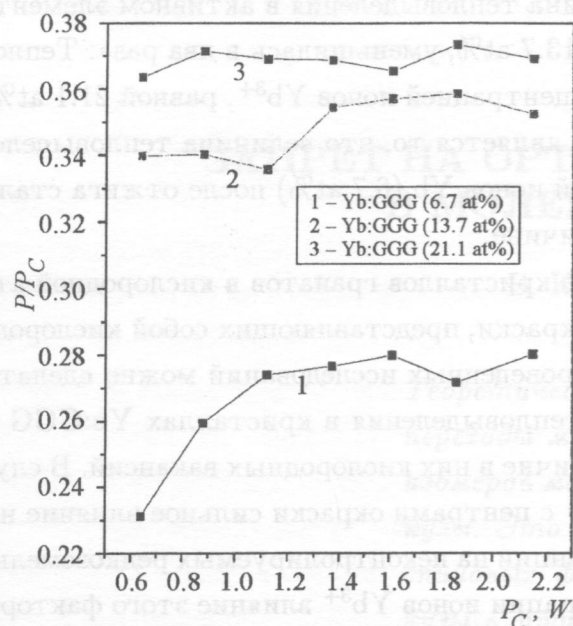


Рис. 3. Зависимость величины тепловыделения P/P_C в кристаллах Yb:GGG с различной концентрацией ионов Yb^{3+} от поглощенной мощности излучения накачки P_C .

Рис. 4. Зависимость величины тепловыделения P/P_C в кристаллах Yb:GGG с различной концентрацией ионов Yb^{3+} от поглощенной мощности излучения диодной накачки P_C после проведения отжига в кислородной атмосфере.

Результаты исследований зависимости величины тепловыделения от поглощенной мощности диодной накачки представлены на рис. 3. Как видно из приведенных данных, величина тепловыделения в активных элементах существенно (от 2 до 4 раз) превосходила ожидаемую величину. С целью выяснения причин повышенного тепловыделения в исследуемых кристаллах Yb:GGG, образцы были подвергнуты термической обработке – отжигу в кислородной атмосфере при температуре $1200^{\circ}C$ в течение 4.5 часов. Это было сделано с целью уменьшения количества или полного устранения центров окраски, образующихся в активных элементах во время роста. Наличие данных центров окраски могло являться причиной существенного увеличения тепловыделения.

После проведения отжига вышеописанные исследования тепловыделения в образцах были повторены. Результаты этих исследований представлены на рис. 4.

При сопоставлении тепловыделения в активной среде до и после отжига (рис. 3 и 4) видно, что величины тепловыделения у всех образцов существенно уменьшились. Величина тепловыделения в активном элементе Yb:GGG с концентрацией ионов Yb^{3+} ,

равной 6.7 at%, сократилась в 3.4 раза. Величина тепловыделения в активном элементе Yb:GGG с концентрацией ионов Yb³⁺, равной 13.7 at%, уменьшилась в два раза. Тепловыделение в активном элементе Yb:GGG с концентрацией ионов Yb³⁺, равной 21.1 at%, сократилось на 24%. Особенно показательным является то, что величина тепловыделения у кристалла с минимальной концентрацией ионов Yb (6.7 at%) после отжига стала соответствовать теоретически ожидаемой величине.

Как известно (см., напр., [8, 9]), при отжиге кристаллов гранатов в кислородной атмосфере уменьшается концентрация центров окраски, представляющих собой кислородные вакансии. Таким образом, на основании проведенных исследований можно сделать вывод, что основной причиной повышенного тепловыделения в кристаллах Yb:GGG с малой концентрацией активатора являлось наличие в них кислородных вакансий. В случае больших концентраций ионов Yb³⁺, наряду с центрами окраски сильное влияние на тепловыделение оказывает тушение люминесценции на неконтролируемых редкоземельных примесях. Причем с увеличением концентрации ионов Yb³⁺ влияние этого фактора возрастает за счет ускорения миграции возбуждения по ансамблю ионов Yb³⁺.

Работа выполнена при частичной поддержке РФФИ (проект 07-02-12118-офи).

ЛИТЕРАТУРА

- [1] S. Chenais, F. Druon, F. Balembois, et al., *Optical Materials* **22**, 99 (2003).
- [2] J. Vetrovec, *Proc. SPIE* **4968**, 87 (2003).
- [3] D. C. Brown, *IEEE J. of Quantum Electronics* **34**, 560 (1998).
- [4] S. Chenais, F. Balembois, F. Druon, et al., *IEEE Journal of Quantum Electronics* **40**(9), 37 (2004).
- [5] Y. F. Kitaeva, E. V. Uiarikov, and I. L. Chisty, *Physica Status Solidi(a)*, **92**(2), 475 (1985).
- [6] E. V. Zharikov, P. A. Studenikin, V. A. Chikov, et al., Preprint No 190 GPI RAS (Moscow, GPI RAS, 1987).
- [7] W. P. Krupke, M. D. Shinn, J. E. Marion, et al., *Journal of the Optical Society of America B* **3**(1), 102 (1986).
- [8] A. M. Bulkanov, I. A. Ivanov, D. A. Nikolaev, and V. B. Tsvetkov, in: *Proceeding of IX National Conference "Crystals Growth"*, Moscow, 2000 (IKAN, Moscow, 2000), p. 102.
- [9] R. Feldman, Y. Shimony, and Z. Burshtein, *Proc. of SPIE* **4970**, 61 (2003).

Институт общей физики
им. А. М. Прохорова РАН

Поступила в редакцию 11 декабря 2007 г.