

# Перестраиваемая лазерная генерация в двухмикронном диапазоне спектра на кристаллах кальций-ниобий-галлиевого граната, легированного ионами $\text{Ho}^{3+}$

П.А.Рябочкина, А.Н.Чабушкин, Н.Г.Захаров, К.В.Воронцов, С.А.Хрущалина

*На переходе  ${}^5I_7 \rightarrow {}^5I_8$  ионов  $\text{Ho}^{3+}$  в кристаллах кальций-ниобий-галлиевого граната, легированного ионами  $\text{Ho}^{3+}$ , получена лазерная генерация на длине волны около 2095 нм с выходной мощностью 2.1 Вт при накачке лазером на кристалле  $\text{LiYF}_4:\text{Tm}$ . С использованием интерференционно-поляризационного фильтра реализована перестраиваемая лазерная генерация на данных кристаллах в области длин волн 2045–2120 нм.*

**Ключевые слова:** кристаллы со структурой граната, ионы  $\text{Ho}^{3+}$ , лазерная генерация.

## 1. Введение

Кристаллы кальций-ниобий-галлиевого граната (КНГГ) и кальций-литий-ниобий-галлиевого граната (КЛНГГ) относятся к кристаллам с разупорядоченной кристаллической структурой. Впервые эти кристаллы были синтезированы более тридцати лет назад [1]. Их характерной особенностью является более низкая (1430–1470 °С) температура плавления по сравнению с кристаллами иттрий-алюминиевого граната (ИАГ), гадолиний-скандий-алюминиевого граната (ГСАГ), гадолиний-скандий-галлиевого граната (ГСГГ). Это упрощает процесс выращивания кристаллов КНГГ и КЛНГГ и позволяет применять для их синтеза технологию, не использующую иридий.

Из-за разупорядоченности кристаллической структуры КНГГ и КЛНГГ спектры поглощения и люминесценции редкоземельных (РЗ) ионов активаторов в них являются неоднородно уширенными. Данный факт представляет интерес с точки зрения реализации на кристаллах КНГГ и КЛНГГ, легированных РЗ ионами, лазеров, перестраиваемых по частоте излучения, а также получения на них лазерной генерации в режиме синхронизации мод.

К настоящему времени имеется достаточно богатый экспериментальный материал по изучению спектрально-люминесцентных и генерационных свойств кристаллов КНГГ и КЛНГГ, легированных ионами  $\text{Nd}^{3+}$ ,  $\text{Tm}^{3+}$ ,  $\text{Yb}^{3+}$  [2–14]. В работе [15] представлены результаты исследования спектроскопических характеристик кристаллов КНГГ: $\text{Ho}^{3+}$ . Однако работ по изучению лазерных свойств данных кристаллов при резонансной накачке на уровень  ${}^5I_7$  ионов  $\text{Ho}^{3+}$  в доступных нам литературных источниках не было обнаружено.

Цель настоящей работы – исследование генерационных характеристик кристаллов КНГГ: $\text{Ho}$  при резонанс-

ной накачке излучением  $\text{LiYF}_4:\text{Tm}$ -лазера на уровень  ${}^5I_7$  ионов  $\text{Ho}^{3+}$ .

## 2. Образцы и методика проведения эксперимента

Кристаллы кальций-ниобий-галлиевого граната, легированного ионами  $\text{Ho}^{3+}$  ( $\text{Ca}_3(\text{NbGa})_5\text{O}_{12}:\text{Ho}$ ), были выращены методом Чохральского в платиновом тигле. Концентрация ионов  $\text{Ho}^{3+}$  в выращенных кристаллах составила 0.7 ат.%. Для проведения спектрально-люминесцентных измерений из полученных кристаллов КНГГ вырезалась плоскопараллельная пластинка толщиной 7.5 мм. В генерационных экспериментах использовался активный элемент в форме цилиндра длиной 18 мм и диаметром 4 мм.

Регистрация спектров поглощения осуществлялась с помощью спектрофотометра Lambda 950 Perkin Elmer. В качестве источника излучения использовалась галогеновая лампа. Приемником излучения при регистрации спектра поглощения на переходе  ${}^5I_8 \rightarrow {}^5I_7$  ионов  $\text{Ho}^{3+}$  служил полупроводниковый фотодетектор на основе PbS. Для регистрации спектров люминесценции на данном переходе использовался монохроматор МДР-23. Источником возбуждения служил твердотельный лазер MGL-F-532nm-2W-11110021 на кристалле  $\text{YVO}_4:\text{Nd}$  с длиной волны излучения 532 нм. Сигнал люминесценции регистрировался фотосопротивлением на основе PbS.

Спектр лазерной генерации записывался с помощью спектрометра Toptica HR 1000 и фотодетектора на основе PbS.

## 3. Экспериментальные результаты

Для получения лазерной генерации на переходе  ${}^5I_7 \rightarrow {}^5I_8$  при резонансной накачке на уровень  ${}^5I_7$  ионов  $\text{Ho}^{3+}$  необходимо знание спектрально-люминесцентных характеристик оптических переходов  ${}^5I_8 \rightarrow {}^5I_7$  и  ${}^5I_7 \rightarrow {}^5I_8$  ионов  $\text{Ho}^{3+}$  в соответствующей кристаллической матрице. Спектр поглощения на переходе  ${}^5I_8 \rightarrow {}^5I_7$  ионов  $\text{Ho}^{3+}$  активного элемента при  $T = 300$  К представлен на рис. 1.

Зависимость сечения вынужденного излучения от длины волны  $\sigma_{\text{em}}(\lambda)$  для перехода  ${}^5I_7 \rightarrow {}^5I_8$  ионов  $\text{Ho}^{3+}$  в

П.А.Рябочкина, А.Н.Чабушкин, С.А.Хрущалина. Национальный исследовательский Мордовский государственный университет им. Н.П.Огарёва, Россия, 430005 Саранск, ул. Большевикская, 68; e-mail: ryabochkina@freemail.mrsu.ru

Н.Г.Захаров, К.В.Воронцов. ФГУП «Всероссийский научно-исследовательский институт экспериментальной физики», Россия, Нижегородская обл., 607188 Саров, просп. Мира, 37

Поступила в редакцию 15 марта 2017 г.

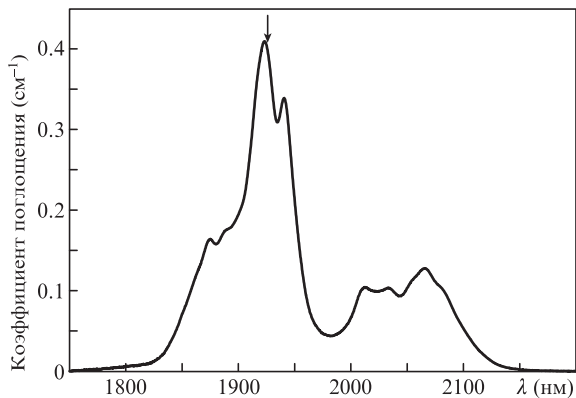


Рис.1. Спектр поглощения для перехода  $^5I_8 \rightarrow ^5I_7$  ионов  $Ho^{3+}$  активного элемента кристалла КНГГ:Ho ( $C_{Ho} = 0.7$  ат.%;  $T = 300$  К. Стрелкой указана длина волны, на которой осуществлялась оптическая накачка на уровень  $^5I_7$  ионов  $Ho^{3+}$  в кристаллах КНГГ:Ho.

кристалле КНГГ:Ho ( $C_{Ho} = 0.7$  ат.%) была определена по формуле Фухтбауэра–Ладенбурга [16]:

$$\sigma_{em}(\lambda) = \frac{\lambda^5 \beta_{JJ'} I_{em}(\lambda)}{8\pi c n^2 \tau_{rad} \int I_{em}(\lambda) \lambda d\lambda}, \quad (1)$$

где  $\tau_{rad}$  – излучательное время жизни с уровня  $^5I_7$  ионов  $Ho^{3+}$ ;  $n$  – показатель преломления среды;  $I_{em}(\lambda)$  – относительная интенсивность люминесценции;  $c$  – скорость света;  $\beta_{JJ'}$  – коэффициент ветвления люминесценции;  $\lambda$  – длина волны. Для перехода  $^5I_7 \rightarrow ^5I_8$   $\beta_{JJ'} = 1$ . Время жизни  $\tau_{rad}$  определялось как обратная величина излучательной вероятности перехода  $^5I_7 \rightarrow ^5I_8$  ионов  $Ho^{3+}$  в кристаллах КНГГ:Ho [17] и составило 13 мс.

Зависимости сечений поглощения и вынужденного излучения от длины волны для переходов  $^5I_8 \rightarrow ^5I_7$  и  $^5I_7 \rightarrow ^5I_8$  ионов  $Ho^{3+}$  представлены на рис.2.

Используя полученные спектральные зависимости  $\sigma_{abs}(\lambda)$  и  $\sigma_{em}(\lambda)$ , можно определить спектральную зависимость контура усиления для лазерного перехода  $^5I_7 \rightarrow ^5I_8$  ионов  $Ho^{3+}$  в кристаллах КНГГ:Ho:

$$\sigma_g(\lambda) = P\sigma_{em}(\lambda) - (1 - P)\sigma_{abs}(\lambda), \quad (2)$$

( $P$  – относительная инверсная населенность уровней). На рис.3 приведены расчетные спектральные зависимости контура усиления  $\sigma_g$  для  $P = 0.1, 0.2, 0.3$ . Видно, что область

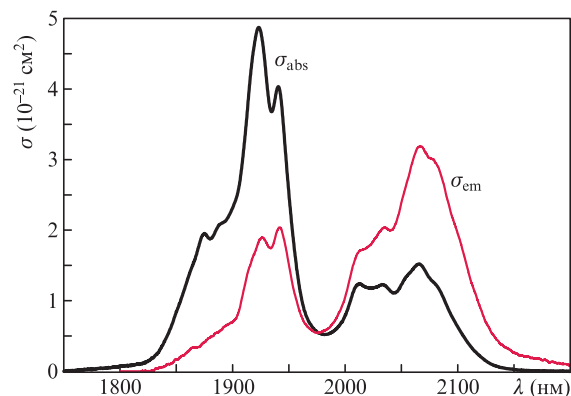


Рис.2. Спектральные зависимости сечений поглощения и вынужденного излучения на переходах  $^5I_8 \rightarrow ^5I_7$  и  $^5I_7 \rightarrow ^5I_8$  ионов  $Ho^{3+}$ ;  $T = 300$  К.

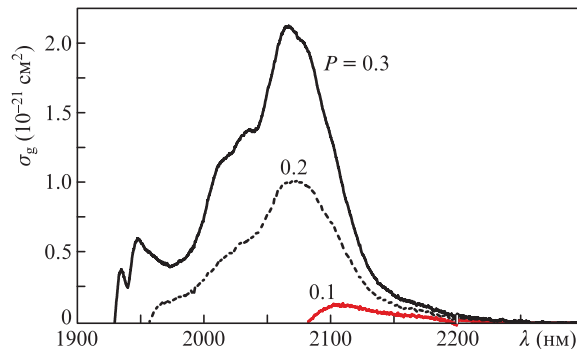


Рис.3. Спектральная зависимость контура усиления для перехода  $^5I_8 \rightarrow ^5I_7$  ионов  $Ho^{3+}$  в кристаллах КНГГ:Ho ( $C_{Ho} = 0.7$  ат.%) при инверсной населенности  $P = 0.1, 0.2, 0.3$ .

усиления при  $P = 0.3$  для кристаллов  $Ca_3(NbGa)_5O_{12}:Ho$  соответствует диапазону длин волн 1970–2200 нм.

Из спектра поглощения ионов  $Ho^{3+}$  в кристаллах КНГГ:Ho следует, что эффективную накачку активного элемента лучше всего осуществлять на длине волны  $\lambda_p = 1925$  нм (см. рис.1). В соответствии с этим в качестве источника накачки мы использовали лазер на кристалле  $LiYF_4:Tm$ , генерирующий излучение на  $\lambda_p = 1925$  нм. Данная длина волны излучения была получена в результате внутрирезонаторной селекции, осуществленной с помощью интерференционного поляризационного фильтра (ИПФ). Лазер на кристалле  $LiYF_4:Tm$  накачивался двумя диодными линейками (ДЛ) с волоконным выходом. Максимальная мощность излучения лазера накачки составила 15 Вт.

Оптическая схема твердотельного лазера на кристаллах КНГГ:Ho при накачке излучением  $LiYF_4:Tm$ -лазера приведена на рис.4. Излучение лазера накачки фокусировалось в активный элемент из кристалла КНГГ:Ho с помощью линз Л1 и Л2 с фокусными расстояниями 200 и 100 мм соответственно. Диаметр перетяжки пучка накачки при этом составил 160 мкм. Резонатор лазера на кристаллах КНГГ:Ho был образован входным плоским зеркалом с коэффициентом пропускания  $T = 90\%$  на длине волны накачки и коэффициентом отражения  $R = 99.8\%$  на длине волны генерации. В качестве выходных зеркал использовались сферические зеркала с радиусом кривизны  $r = 150$  мм и коэффициентами пропускания на длине волны генерации  $T = 2.1\%, 3.9\%$  и  $6.8\%$ . Максимальная

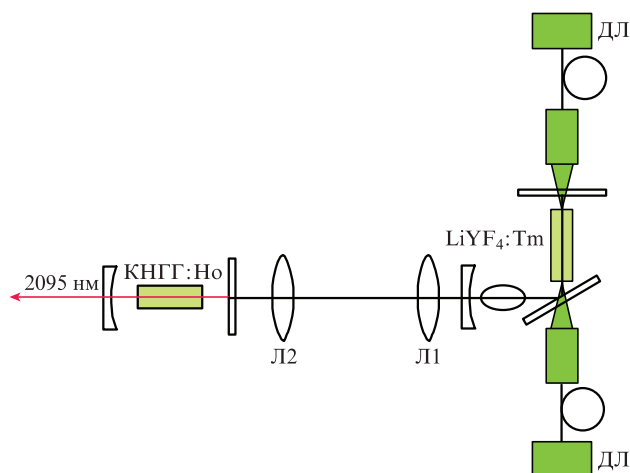


Рис.4. Оптическая схема твердотельного лазера на кристаллах КНГГ:Ho при накачке излучением  $LiYF_4:Tm$ -лазера.

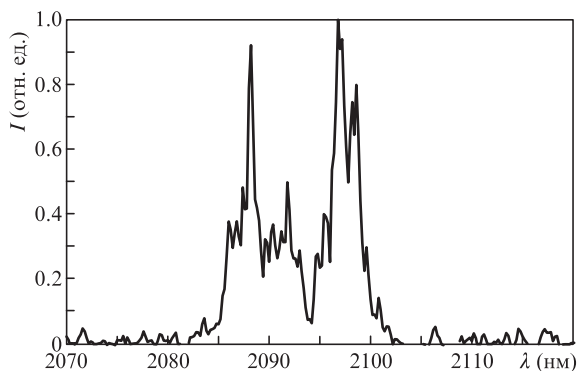


Рис.5. Спектр лазерной генерации на кристалле КНГГ:Но при мощности лазерного излучения 1.5 Вт.

мощность и наибольшая эффективность генерации лазера на кристаллах КНГГ:Но достигались с использованием выходного зеркала с коэффициентом пропускания  $T = 6.8\%$ .

На рис.5 представлен спектр лазерной генерации на кристалле КНГГ:Но. Видно, что генерация лазера происходит на длине волны около 2095 нм.

На рис.6 показана зависимость выходной мощности лазера на кристалле КНГГ:Но от мощности излучения накачки, поглощенной в активном элементе, для выходного зеркала с коэффициентом пропускания  $T = 6.8\%$ . При этом в активном элементе поглощалось менее 50% от падающей мощности накачки. Порог лазерной генерации  $P_{th} = 0.7$  Вт по мощности, поглощенной в активном элементе. Коэффициент преобразования излучения на-

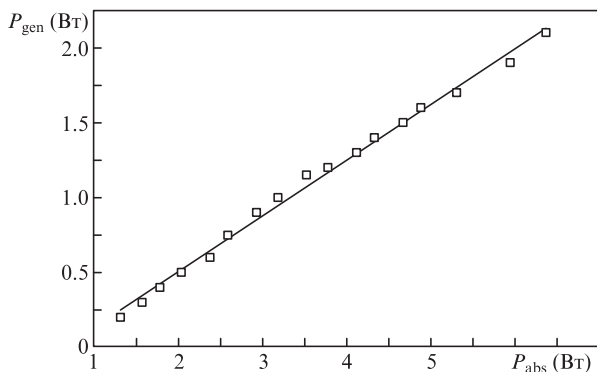


Рис.6. Зависимость мощности лазерного излучения лазера на кристаллах КНГГ:Но от мощности излучения накачки, поглощенной в активном элементе.

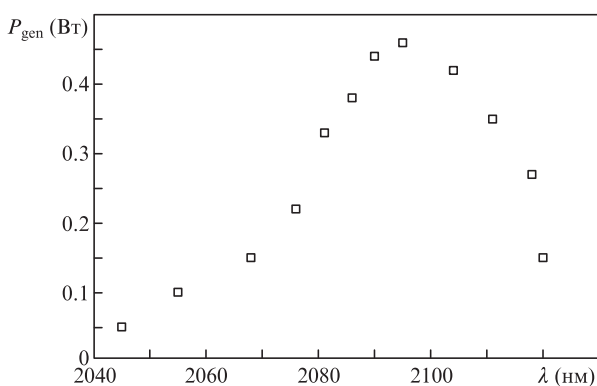


Рис.7. Перестроенная кривая лазера на кристаллах КНГГ:Но при падающей мощности накачки 8.1 Вт.

качки, поглощенной в активном элементе, в излучение лазерной генерации  $\eta = 37\%$ . Стоит заметить, что указанное значение эффективности было получено для активного элемента без просветляющих покрытий на торцах.

С помощью интерференционно-поляризационного фильтра, представляющего собой плоскопараллельную пластинку из кристалла  $Al_2O_3$  толщиной 4 мм, была осуществлена перестройка длины волны излучения лазера на кристаллах КНГГ:Но. Установлено, что спектральный диапазон работы лазера на кристаллах КНГГ:Но составляет 2045–2120 нм (рис.7).

#### 4. Заключение

В работе сообщается о получении лазерной генерации на переходе  $^5I_7 \rightarrow ^5I_8$  ионов  $Ho^{3+}$  в кристаллах кальций-ниобий-галлиевого граната, легированного ионами  $Ho^{3+}$ , при накачке лазером на кристалле  $LiYF_4:Tm$  ( $\lambda_p = 1925$  нм). Получена лазерная генерация на длине волны около 2095 нм с выходной мощностью излучения 2.1 Вт.

При установке в резонатор лазера на кристаллах КНГГ:Но интерференционно-поляризационного фильтра реализована перестраиваемая лазерная генерация в области длин волн 2045–2120 нм, что говорит о возможности создания эффективного лазера, генерирующего излучение в этом спектральном диапазоне.

Авторы выражают благодарность Н.А.Еськову за предоставление кристаллов кальций-ниобий-галлиевого граната, легированного ионами  $Ho^{3+}$ .

Работа выполнена при финансовой поддержке Минобрнауки РФ (проект № 1.4926.2017/ВУ).

1. Еськов Н.А., Фаерман М.Д., Сурова Н.А. *Укр. хим. журн.*, **51**, 457 (1985).
2. Воронько Ю.К., Гессен С.Б., Еськов Н.А., Осико В.В., Соболев А.А., Тимошечкин М.И., Ушаков С.Н., Цымбал Л.И. *Квантовая электроника*, **15**, 312 (1988).
3. Воронько Ю.К., Гессен С.Б., Еськов Н.А., Соболев А.А., Ушаков С.Н., Цымбал Л.И. *Квантовая электроника*, **17**, 307 (1990).
4. Воронько Ю.К., Гессен С.Б., Еськов Н.А., Рябочкина П.А., Соболев А.А. и др. *Квантовая электроника*, **20**, 363 (1993).
5. Воронько Ю.К., Гессен С.Б., Еськов Н.А., Кирюхин А.А., Рябочкина П.А., Соболев А.А., Татаринцев В.М., Ушаков С.Н., Цымбал Л.И. *Квантовая электроника*, **20**, 1100 (1993).
6. Воронько Ю.К., Еськов Н.А., Подставкин А.С., Рябочкина П.А., Соболев А.А., Ушаков С.Н. *Квантовая электроника*, **31**, 531 (2001).
7. Voronko Yu.K., Sobol A.A., Karasik A.Ya., Eskov N.A., Rabochkina P.A., Ushakov S.N. *Opt. Mater.*, **20**, 197 (2002).
8. Naito K., Yokotani A., Sasaki T., Yamanaoka M., Nakai S., Fukuda T., Timoshechkin M.I. *Proc. Conf. Advanced Solid State Lasers (ASSL 1992)* (Santa Fe, NM, USA, 1992, paper DL7).
9. Zhang B., Guo S., He J., Liu S., et al. *Appl. Phys. B*, **105**, 807 (2011).
10. Gao W.L., Xie G.Q., Ma J., Liu M.N., Yuan P., Qian L.J., Yu H.H., Zhang H.J., Wang J.Y. *Opt. Mater.*, **35**, 715 (2013).
11. Ma J., Xie G.Q., Gao W.L., Yuan P., et al. *Opt. Lett.*, **37**, 1376 (2012).
12. Liu J., Yang H., Zhang H., Mateos X., Petrov V., Wang J. *Laser Phys. Lett.*, **5**, 874 (2008).
13. Liu J., Kong W., Tian X., Zhou Zh., Han W., Han Sh., Zhang H. *Laser Phys. Lett.*, **9**, 394 (2012).
14. Воронько Ю.К., Гессен С.Б., Еськов Н.А., Овчинников А.Г., Смолин Д.В., Соболев А.А., Ушаков С.Н., Цымбал Л.И., Шестаков А.В. *Квантовая электроника*, **23**, 229 (1996).
15. Ryabochkina P.A., Antoshkina S.A., Bolshakova E.V., Ivanov M.A., Kochurihin V.V., et al. *J. Lumin.*, **132**, 1900 (2012).
16. Weber M.J. *CRC Handbook of Laser Science and Technology. Vol. I: Lasers and Masers* (Boca Raton: CRC Press, 1982).
17. Большакова Е.В. *Канд. дис.* (МГУ им. Н.П.Огарёва, Саранск, 2011).