

# Спектрально-люминесцентные характеристики переходов ${}^5I_7 \leftrightarrow {}^5I_8$ иона гольмия в заготовках и волокнах на основе алюмосиликатного стекла, легированных ионами $\text{Ho}^{3+}$

П.А.Рябочкина, А.Н.Чабушкин, А.Ф.Косолапов, А.С.Курков

*Определены спектральные зависимости сечений поглощения на переходах  ${}^5I_8 \rightarrow {}^5I_6$  и  ${}^5I_8 \rightarrow {}^5I_7$  ионов  $\text{Ho}^{3+}$  в алюмосиликатных волоконных световодах, легированных ионами  $\text{Ho}^{3+}$ . Получена спектральная зависимость сечения вынужденного излучения на лазерном переходе  ${}^5I_7 \rightarrow {}^5I_8$  ионов  $\text{Ho}^{3+}$  в заготовках алюмосиликатных световодов, легированных ионами  $\text{Ho}^{3+}$ . Измерено время жизни верхнего лазерного уровня  ${}^5I_7$  ионов  $\text{Ho}^{3+}$  в этих заготовках.*

**Ключевые слова:** ионы  $\text{Ho}^{3+}$ , алюмосиликатное стекло, волоконные световоды, люминесценция, сечение вынужденного излучения.

## 1. Введение

В последнее десятилетие активно ведутся работы по созданию лазеров и лазерных усилителей на основе волокон, легированных ионами гольмия. Интерес к этим устройствам обусловлен тем, что их спектр излучения лежит в области длин волн, превышающих 2 мкм, что дает возможность использовать данные устройства в медицине. Кроме того, в области 2.1–2.2 мкм находится локальный максимум пропускания атмосферы, что позволяет использовать такие лазеры в атмосферной оптической связи, локации и т. д. В настоящее время продемонстрирована лазерная генерация в диапазоне 2–2.21 мкм [1, 2] с возможностью перестройки ее частоты [3]. Максимальная выходная мощность двухмикронного волоконного лазера составила 140 Вт [4], а квантовая эффективность – 0.81 [5]. В работах [6, 7] сообщается о волоконном лазере на переходе  ${}^5I_7 \rightarrow {}^5I_8$  ионов  $\text{Ho}^{3+}$ , генерирующем излучение в режимах субпикосекундных и фемтосекундных импульсов. Также авторами [8, 9] было продемонстрировано эффективное усиление импульсов различной мощности.

Несмотря на то что к настоящему времени на основе оптически активных кварцевых волокон реализован целый ряд двухмикронных волоконных лазеров, генерирующих излучение на переходе  ${}^5I_7 \rightarrow {}^5I_8$  ионов  $\text{Ho}^{3+}$ , основные спектроскопические характеристики (спектральные зависимости сечения поглощения для перехода иона  $\text{Ho}^{3+}$ , на котором осуществляется накачка при получении двухмикронной генерации, и сечения вынужденного излучения для лазерного перехода  ${}^5I_7 \rightarrow {}^5I_8$ , а также время

жизни верхнего лазерного уровня  ${}^5I_7$  ионов  $\text{Ho}^{3+}$ ) этих ионов в кварцевом стекле не были определены. Попытка их определения была предпринята авторами работы [10], однако полученные ими результаты исследования спектрально-люминесцентных свойств ионов  $\text{Ho}^{3+}$  в кварцевом стекле представляются сомнительными, поскольку в данной работе была обнаружена полоса поглощения в области 1.75 мкм, которая приписывается ионам гольмия, не имеющим в этой спектральной области соответствующего оптического перехода. Вследствие этого определение основных спектроскопических характеристик ионов гольмия, особенно для лазерного перехода  ${}^5I_7 \rightarrow {}^5I_8$  ионов  $\text{Ho}^{3+}$  в кварцевом стекле, представляется актуальным, т. к. позволяет построить адекватные модели усилителей и лазеров с целью оптимизации их параметров.

В настоящей работе приведены результаты измерения характеристик поглощения и люминесценции ионов  $\text{Ho}^{3+}$  в волокнах и заготовках на основе алюмосиликатного стекла, легированного ионами  $\text{Ho}^{3+}$ . Определены спектральные зависимости сечений поглощения для переходов  ${}^5I_8 \rightarrow {}^5I_6$  и  ${}^5I_8 \rightarrow {}^5I_7$ , сечения вынужденного излучения для перехода  ${}^5I_7 \rightarrow {}^5I_8$ , а также время жизни ионов  $\text{Ho}^{3+}$  на метастабильном уровне  ${}^5I_7$ .

## 2. Характеристика объектов исследования и методика проведения эксперимента

В качестве объектов исследования в настоящей работе использовались заготовки и оптические волокна на основе кварцевого стекла, легированные ионами гольмия и оксидом алюминия. Для их изготовления применялся стандартный метод осаждения из газовой фазы (MCVD) с дополнительным легированием пропиткой. Концентрация ионов гольмия составляла в различных образцах от  $4.1 \times 10^{19}$  до  $1.2 \times 10^{20}$  см<sup>-3</sup>. Контроль концентрации ионов  $\text{Ho}^{3+}$  осуществлялся методом рентгенофлуоресцентного анализа.

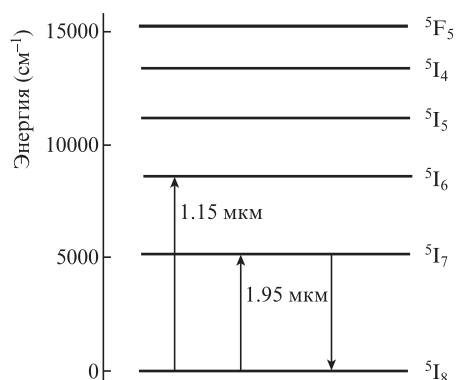
На рис. 1 представлен фрагмент схемы энергетических уровней ионов  $\text{Ho}^{3+}$ . В оптически активных световодах, легированных ионами  $\text{Ho}^{3+}$ , усиление и лазерная генерация в области 2.0–2.1 мкм осуществляются на переходе  ${}^5I_7 \rightarrow {}^5I_8$  ионов  $\text{Ho}^{3+}$ . При этом накачка проводится либо

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

А.Ф.Косолапов. Научный центр волоконной оптики РАН, Россия, 119991 Москва, ул. Вавилова, 38

А.С.Курков. Институт общей физики им. А.М.Прохорова РАН, Россия, 119991 Москва, ул. Вавилова, 38; Лаборатория фотоники Пермского научного центра УрО РАН, Россия, 614990 Пермь, ул. Ленина, 13а

Поступила в редакцию 18 февраля 2014 г., после доработки – 12 мая 2014 г.

Рис.1. Фрагмент схемы уровней иона  $\text{Ho}^{3+}$  в кварцевом стекле.

на уровень  $^5I_6$  с последующей безызлучательной релаксацией на уровень  $^5I_7$ , либо непосредственно на уровень  $^5I_7$ . Для определения спектральных характеристик данных переходов были измерены спектры поглощения для переходов  $^5I_8 \rightarrow ^5I_6$ ,  $^5I_8 \rightarrow ^5I_7$  ионов  $\text{Ho}^{3+}$  в образцах активных волокон, легированных ионами  $\text{Ho}^{3+}$ , получено распределение концентрации ионов гольмия по сечению заготовки, зарегистрированы спектр люминесценции для перехода  $^5I_7 \rightarrow ^5I_8$  и кинетика ее затухания для заготовки алюмосиликатного световода.

Для измерения спектров поглощения применялся метод «обламывания» с использованием отрезков волокна с различной концентрацией активных ионов и длиной от нескольких единиц до нескольких десятков сантиметров. Спектр поглощения зарегистрирован с помощью монохроматора МДР-2. Источником излучения служила галогенная лампа, а в качестве детектора использовался приемник на основе  $\text{InGaAs}$ . Погрешность регистрации спектра поглощения не превышала 10%.

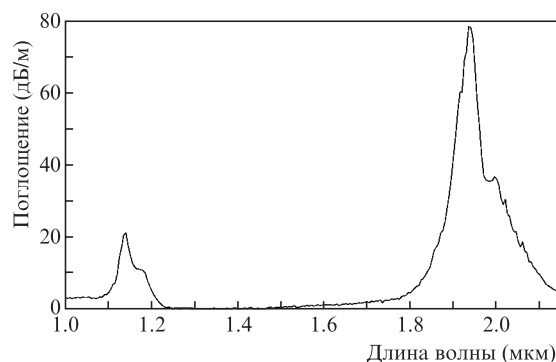
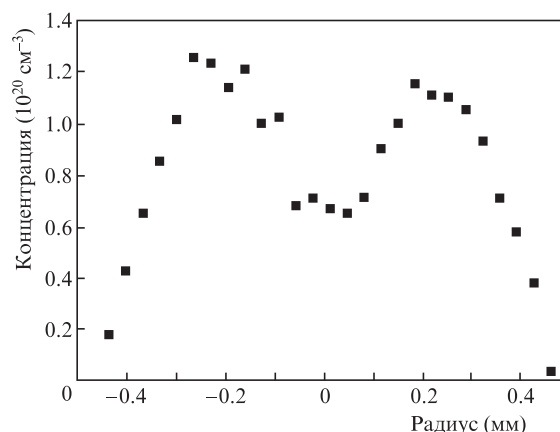
Распределение концентрации ионов гольмия в заготовках активных волокон, легированных ионами  $\text{Ho}^{3+}$ , получено методом флуоресцентного рентгеновского микроанализа.

Спектры люминесценции ионов  $\text{Ho}^{3+}$  при возбуждении непрерывным лазерным излучением с  $\lambda = 532$  нм в образцах заготовок алюмосиликатных световодов, легированных ионами  $\text{Ho}^{3+}$ , были зарегистрированы с помощью монохроматора МДР-23. В качестве приемника излучения использовалось фотосопротивление на основе  $\text{PbS}$ . Для синхронного детектирования сигнала люминесценции применялся усилитель SR-810. Спектр люминесценции для перехода  $^5I_7 \rightarrow ^5I_8$  ионов  $\text{Ho}^{3+}$  получен с учетом калибровки спектральной чувствительности установки.

Кинетика затухания люминесценции с уровня  $^5I_7$  ионов  $\text{Ho}^{3+}$  в заготовке алюмосиликатного световода регистрировалась при возбуждении уровня  $^5S_2$  ионов  $\text{Ho}^{3+}$  излучением второй гармоники YAG:Nd-лазера с длительностью импульса  $\sim 10$  нс. Приемником излучения служило фотосопротивление на основе  $\text{PbS}$  с временным разрешением  $\sim 30$  мкс. Регистрация кинетики затухания люминесценции осуществлялась с помощью цифрового осциллографа GDS-720C.

### 3. Экспериментальные результаты

На рис.2 представлен спектр поглощения алюмосиликатного волокна, легированного ионами  $\text{Ho}^{3+}$  с концентрацией  $4.1 \times 10^{19} \text{ см}^{-3}$ . Видно, что максимумы поглоще-

Рис.2. Спектр поглощения оптического волокна, легированного ионами  $\text{Ho}^{3+}$  с концентрацией  $4.1 \times 10^{19} \text{ см}^{-3}$ .Рис.3. Радиальное распределение концентрации ионов  $\text{Ho}^{3+}$  в заготовке активного световода.

ния, обусловленного переходами  $^5I_8 \rightarrow ^5I_6$  и  $^5I_8 \rightarrow ^5I_7$  ионов  $\text{Ho}^{3+}$ , соответствуют длинам волн 1.15 и 1.95 мкм. На рис.3 показано характерное радиальное распределение концентрации ионов гольмия по сечению заготовки активного световода, легированного ионами  $\text{Ho}^{3+}$ . Измерения проводились в пяти образцах с максимальной концентрацией активных ионов от  $4.1 \times 10^{19}$  до  $1.2 \times 10^{20} \text{ см}^{-3}$ .

При оценке сечения поглощения учитывалась свертка радиальных распределений мощности зондирующего излучения и концентрации ионов гольмия. Полученные спектральные зависимости сечения поглощения дали следующие значения сечений в максимумах полос поглощения для переходов  $^5I_8 \rightarrow ^5I_6$  и  $^5I_8 \rightarrow ^5I_7$  ионов  $\text{Ho}^{3+}$ :  $\sigma_{\text{abs}}(1.15 \text{ мкм}) = 1.4 \times 10^{-21} \text{ см}^2$  и  $\sigma_{\text{abs}}(1.95 \text{ мкм}) = 8.5 \times 10^{-21} \text{ см}^2$ . Сечения поглощения для оптических световодов с разными концентрациями ионов  $\text{Ho}^{3+}$  различались не более чем на 10%.

На рис.4 представлена кинетика затухания люминесценции на переходе  $^5I_7 \rightarrow ^5I_8$  ионов  $\text{Ho}^{3+}$  при возбуждении уровня  $^5S_2$ . Концентрация активной примеси была равна  $8 \times 10^{19} \text{ см}^{-3}$ . Время жизни уровня  $^5I_7$ , определенное по уменьшению интенсивности  $I$  люминесценции в  $e$  раз, составило 7 мс.

Принимая во внимание то, что вероятность безызлучательной релаксации уровня  $^5I_7$  достаточно мала, мы также определили время его жизни по рассчитанной нами вероятности  $A$  излучательного перехода  $^5I_7 \rightarrow ^5I_8$ :

$$\tau_r = 1/A. \quad (1)$$

Вероятность  $A$  определялась по формуле

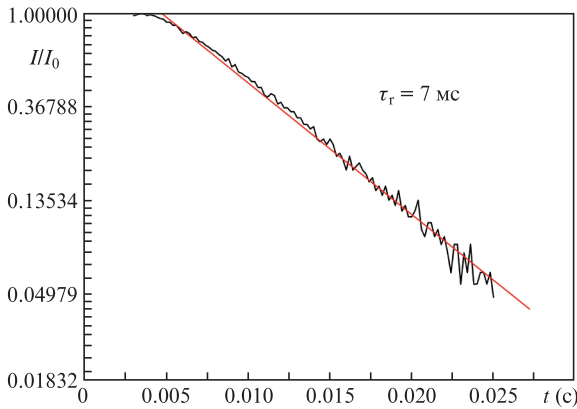


Рис.4. Кинетика затухания люминесценции на переходе  ${}^5I_7 \rightarrow {}^5I_8$  ионов  $\text{Ho}^{3+}$  для заготовки аллюмосиликатного световода, легированного ионами  $\text{Ho}^{3+}$ . Серая линия – аппроксимация.

$$A = \frac{8\pi n_\lambda^2 c}{N\lambda^4} \frac{2J' + 1}{2J + 1} \int k(\lambda) d\lambda, \quad (2)$$

где  $k(\lambda)$  – коэффициент поглощения;  $J'$  и  $J$  – полные моменты количества движения 4f-электронов в основном и возбужденном состояниях, равные в нашем случае 8 и 7 соответственно;  $N$  – концентрация ионов  $\text{Ho}^{3+}$ ;  $n_\lambda = 1.46$  – показатель преломления среды;  $\lambda$  – длина волны перехода.

Время жизни уровня  ${}^5I_7$  ионов  $\text{Ho}^{3+}$  в аллюмосиликатном световоде, активированном ионами  $\text{Ho}^{3+}$ , полученное с использованием формулы (2), составило 6.7 мс, что хорошо согласуется с временем жизни  $\tau_r = 7$  мс, определенным по кривой кинетики затухания люминесценции.

Представленная на рис.5 спектральная зависимость сечения вынужденного излучения на лазерном переходе  ${}^5I_7 \rightarrow {}^5I_8$  ионов  $\text{Ho}^{3+}$  для заготовок аллюмосиликатных световодов, легированных ионами  $\text{Ho}^{3+}$ , получена с использованием формулы Фухтбауэра–Ладенбурга:

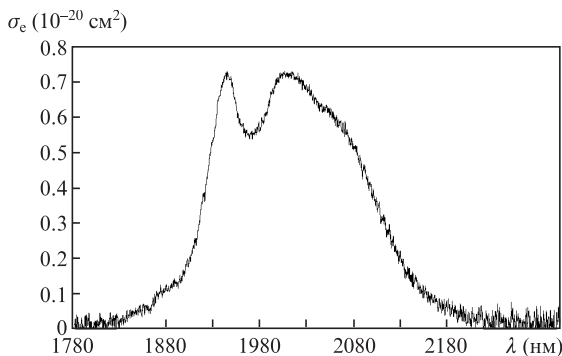


Рис.5. Спектральная зависимость сечения вынужденного излучения на лазерном переходе  ${}^5I_7 \rightarrow {}^5I_8$  ионов  $\text{Ho}^{3+}$  для заготовок аллюмосиликатного световода, активированной ионами  $\text{Ho}^{3+}$ .

$$\sigma_e(\lambda) = \frac{\lambda^5}{8\pi c n_\lambda^2 \tau_r} \frac{I(\lambda)}{\int \lambda I(\lambda) d\lambda}. \quad (3)$$

Следует отметить, что формула (3) часто применяется для определения сечения вынужденного излучения на лазерном переходе редкоземельного иона в кристаллах, активированных ионами редкоземельных элементов. Так, например, она использовалась в работе [11] при исследовании спектрально-люминесцентных характеристик кристалла  $\text{ZrO}_2\text{-Y}_2\text{O}_3\text{-Ho}_2\text{O}_3$ .

#### 4. Заключение

Таким образом, в настоящей работе определены основные спектрально-люминесцентные характеристики переходов  ${}^5I_7 \leftrightarrow {}^5I_8$  иона  $\text{Ho}^{3+}$  в заготовках и аллюмосиликатных волокнах, активированных ионами  $\text{Ho}^{3+}$ . Получены спектральные зависимости сечений поглощения для переходов  ${}^5I_8 \rightarrow {}^5I_6$  и  ${}^5I_8 \rightarrow {}^5I_7$  ионов  $\text{Ho}^{3+}$  в аллюмосиликатных волоконных световодах. Измерено время жизни верхнего лазерного уровня  ${}^5I_7$  и найдена спектральная зависимость сечения вынужденного излучения на лазерном переходе  ${}^5I_7 \rightarrow {}^5I_8$  ионов  $\text{Ho}^{3+}$ . Результаты настоящей работы могут быть использованы для оптимизации лазеров и усилителей на основе волокон, активированных ионами гольмия.

Авторы благодарят А.В.Маракулина, Л.А.Минашину (РФЯЦ ВНИИТФ, Снежинск) и П.А.Рогожникову (Пермская научно-производственная приборостроительная компания) за предоставление образцов заготовок и волокон.

Работа выполнена при финансовой поддержке Государственного задания № 0708 0210059 611 («Организация проведения научных исследований»).

1. Kurkov A.S., Sholokhov E.M., Medvedkov O.I., Dvoyrin V.V., Pyrkov Yu.N., Tsvetkov V.B., et al. *Laser Phys. Lett.*, **6**, 661 (2009).
2. Антипов С.О., Камынин В.А., Медведков О.И., Маракулин А.В., Минашина Л.А., Курков А.С., Бараников А.В. *Квантовая электроника*, **43**, 603 (2013).
3. Hemming A., Bennetts S., Simakov N., Davidson A., Haub J., Carter A. *Opt. Express*, **21**, 4560 (2013).
4. Курков А.С., Шолохов Е.М., Цветков В.Б., Маракулин А.В., Минашина Л.А., Медведков А.С., Косолапов А.Ф. *Квантовая электроника*, **41**, 492 (2011).
5. Kamynin V.A., Kablukov S.I., Raspopin K.S., Antipov S.O., Kurkov A.S., et al. *Laser Phys. Lett.*, **9**, 893 (2012).
6. Чаморовский А.Ю., Маракулин А.В., Лейнонен Т., Курков А.С., Охотников О.Г. *Квантовая электроника*, **42**, 12 (2012).
7. Chamorovskiy A.Yu., Marakulin A.V., Ranta S., Tavast M., Rautiainen J., Leinonen T., Kurkov A.S., Okhotnikov O.G. *Opt. Lett.*, **37**, 1448 (2012).
8. Antipov S.O., Kurkov A.S. *Laser Phys. Lett.*, **10**, 125106 (2013).
9. Камынин В.А., Антипов С.О., Бараников А.В., Курков А.С. *Квантовая электроника*, **44**, 161 (2014).
10. Watekar P.R., Ju S., Han W.T. *J. Non-Cryst. Solids*, **354**, 1453 (2008).
11. Борик М.А., Ломонова Е.Е., Ляпин А.А., Кулебякин А.В., Рябочкина П.А., Ушаков С.Н., Чабушкин А.Н. *Квантовая электроника*, **43**, 838 (2013).