

Оптический журнал

Физическая оптика
Physical optics

DOI: 10.17586/1023-5086-2023-90-05-10-18

УДК 666.22, 535.37, 535.42

Влияние ионов неодима на параметры брэгговских решеток, записанных в хлорсодержащих фототермопректических стеклах⁴

Халдун Нассер¹✉, Николай Валентинович Никоноров²,
Сергей Александрович Иванов³, Александр Иванович Игнатьев⁴

Университет ИТМО, Санкт-Петербург, Россия

¹khaldoon.nasser.94@gmail.com <https://orcid.org/0000-0001-6221-7086>

²nikonorov@oi.ifmo.ru <https://orcid.org/0000-0002-1341-067X>

³ykkaroh@gmail.com <https://orcid.org/0000-0002-4051-8803>

⁴ignatiev@oi.ifmo.ru <https://orcid.org/0000-0002-4452-5496>

Аннотация

Предметом исследования является хлорсодержащее фототермопректическое стекло, активированное ионами неодима. Целью работы является изучение влияния концентрации оксида неодима на процесс фототермоиндуцированной кристаллизации и амплитуду модуляции показателя преломления в брэгговской решетке, записанной в неодимовых хлорсодержащих фототермопректических стеклах. Метод. Для определения значений модуляции показателя преломления неодимового хлорсодержащего фототермопректического стекла были записаны объемные брэгговские решетки и измерены контуры их угловой селективности. Модуляция показателя преломления в решетке рассчитана по теории связанных волн. Основные результаты. Максимальное значение модуляции показателя преломления в решетке, записанной в исходном хлорсодержащем фототермопректическом стекле, составила $1,6 \times 10^{-3}$, а в стекле, активированном ионами неодима, — $0,6 \times 10^{-3}$. Практическая значимость. Активированное редкоземельными ионами хлорсодержащее фототермопректическое стекло дает возможность записывать брэгговские решетки и открывает новые возможности для применения его в устройствах объемной и интегральной оптики, например, для создания лазеров с брэгговским отражателем и распределенной обратной связью.

Ключевые слова: фототермопректическое стекло, объемная брэгговская решетка, неодим, модуляция показателя преломления, перенос энергии

Благодарность: работа выполнена в рамках проекта развития Университета ИТМО «Приоритет-2030».

Ссылка для цитирования: Нассер Х., Никоноров Н.В., Иванов С.А., Игнатьев А.И. Влияние ионов неодима на параметры брэгговских решеток, записанных в хлорсодержащих фототермопректических стеклах // Оптический журнал. 2023. Т. 90. № 5. С. 10–18. <http://doi.org/10.17586/1023-5086-2023-90-05-10-18>

Коды OCIS: 160.5335, 160.5690, 050.7330, 090.7330, 160.2750, 160.3130

Effect of neodymium ions on the parameters of volume Bragg gratings recorded in chlorine-containing photo-thermo-refractive glasses

KHALDOON NASSER¹✉, NIKOLAY V. NIKONOROV²,
SERGEY A. IVANOV³, ALEXANDER I. IGNATIEV⁴

ITMO University, St. Petersburg, Russia

¹khaldoon.nasser.94@gmail.com <https://orcid.org/0000-0001-6221-7086>

²nikonorov@oi.ifmo.ru <https://orcid.org/0000-0002-1341-067X>

³ykkaroh@gmail.com <https://orcid.org/0000-0002-4051-8803>

⁴ignatiev@oi.ifmo.ru <https://orcid.org/0000-0002-4452-5496>

Abstract

The Subject of study is the chlorine-containing photo-thermo-refractive glass activated by neodymium ions. **Aim of study** is to study the effect of neodymium concentration on the process of photo-thermo-induced crystallization and the refractive index modulation amplitude of the volume Bragg grating recorded in the glass. **Method.** To obtain the values of refractive index modulation amplitude, volume Bragg gratings were recorded in this glass. The angular selectivity contours of the transmission beam were measured. The values of refractive index modulation amplitude were calculated by means of the coupled-waves theory. **Main results.** The maximum value of the refractive index modulation amplitude in the virgin undoped chlorine-containing photo-thermo-refractive glass was 1.6×10^{-3} , and in the glass doped with neodymium was 0.6×10^{-3} . **Practical significance.** The chlorine-containing photo-thermo-refractive glass activated with rare-earth ions gives an opportunity to record volume Bragg gratings and opens new possibilities for its application in integrated optics devices, such as distributed-feedback lasers.

Keywords: photo-thermo-refractive glass, volume Bragg grating, neodymium, refractive index modulation amplitude, energy transfer

Acknowledgment: the work was carried out as part of ITMO University's "Priority 2030" development project.

For citation: Nasser K., Nikonorov N.V., Ivanov S.A., Ignatiev A.I. Effect of neodymium ions on the parameters of volume Bragg gratings recorded in chlorine-containing photo-thermo-refractive glasses [in Russian] // Opticheskii Zhurnal. 2023. V. 90. № 5. P. 10–18. <http://doi.org/10.17586/1023-5086-2023-90-05-10-18>

OCIS codes: 160.5335, 160.5690, 050.7330, 090.7330, 160.2750, 160.3130

ВВЕДЕНИЕ

В областях лазерной техники, датчиков и люминофоров важную роль играют оптические стекла, легированные ионами редкоземельных элементов, такими как неодим, тулий, эрбий и иттербий [1, 2]. Одним из наиболее востребованных редкоземельных активаторов для создания лазеров, которые работают в области ближнего инфракрасного диапазона, является ион неодима [3]. Спектры излучения ионов неодима характеризуются широкими полосами. Они охватывают как видимую, так и ближнюю инфракрасную области. Кроме того, лазеры на ионах неодима обладают высокой эффективностью и низким порогом генерации даже при комнатной температуре [4].

Силикатные стекла имеют высокие механическую, термическую и оптическую прочности, высокую прозрачность, они химически устойчивы и однородны. Среди существующих силикатных стекол можно выделить бромсодержащее фототерморефрактивное (ФТР) стекло, которое представляет собой перспективную фоточувствительную среду, крайне востребованную на рынке фотоники. В этом стекле в результате ультрафиолетового (УФ) облучения и последующей термической обработки выделяются наночастицы (НЧ) серебра, окруженные оболочками бромида серебра, на которых вырастают нанокристаллы (НК) фторида натрия. Такой процесс называется фототермоиндуцированной (ФТИ) кристаллизацией.

При ФТИ кристаллизации в ФТР стеклах в облученных местах происходит изменение показателя преломления. Поскольку кристаллы фторида натрия имеют показатель преломления меньший, чем у матрицы стекла, то такое изменение отрицательно и достигает 10^{-3} [5]. Этот эффект можно использовать для записи высокоэффективных объемных брэгговских решеток и голограмм. Так, на основе ФТР стекла создана широкая линейка разнообразных голографических оптических элементов: узкополосные спектральные и пространственные фильтры, метки для коллимационных прицелов, спектральные мультиплексоры, голографические призмы, сумматоры лазерных пучков, компрессоры лазерных импульсов и оптических комбинеров [6, 7].

В работах [8, 9] было предложено активировать стандартное бромсодержащее ФТР стекло редкоземельными ионами (Nd, Yb, Er). Такой подход дает возможность получения лазерной генерации и записи брэгговской решетки в одном стекле, что крайне актуально для создания лазеров с распределенной обратной связью [10]. В таких лазерах решетка Брэгга интегрируется непосредственно в активную среду и играет роль селективного зеркала. Таким образом она обеспечивает положительную обратную связь в активном элементе, что позволяет получить лазерное излучение с очень узкой спектральной линией. Спектрально-люминесцентные характеристики редкоземельных ионов в стандартных ФТР стеклах были детально исследованы во многих работах [11, 12], а также было изучено влияние введения активаторов (ионов эрбия и иттербия) на процесс ФТИ кристаллизации и на модуляцию показателя преломления в записанных брэгговских решетках [13]. По результатам работ был сделан вывод о том, что введение этих ионов в бромсодержащее ФТР стекло повышает температуру его стеклования, а также высказана гипотеза, что редкоземельные ионы удерживают вокруг себя фтор, создавая фторидное окружение, замедляя тем самым формирование НК NaF.

Недавно было разработано новое ФТР стекло, содержащее хлор [14]. Отличительной особенностью этого стекла является возможность введения серебра в больших концентрациях по сравнению со стеклом, содержащим бром. Вследствие этого ограниченное количество фтора участвует в формировании НК NaF на боль-

шом количестве серебряных НЧ. В этом случае в хлорсодержащем ФТР стекле вырастают НК NaF меньшего размера, чем в бромсодержащем стекле, что приводит к уменьшению рассеяния [15].

Целью данной работы является исследование влияния активации хлорсодержащего ФТР стекла ионами Nd³⁺ на процесс ФТИ кристаллизации и значение модуляции показателя преломления в решетках Брэгга, записанных в этом стекле.

1. ОБЪЕКТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ И МЕТОДИКА ЭКСПЕРИМЕНТОВ

Фототермоефрактивное стекло, содержащее хлор, было синтезировано в системе Na₂O-ZnO-Al₂O₃-SiO₂ методом, приведенным в публикации [14], и легировано следующими добавками: церием (отвечает за фоточувствительность), серебром и сурьмой (отвечают за захват и сброс фотоэлектронов), хлором и фтором (отвечают за рост оболочек и НК при термоиндуцированной кристаллизации). Оксид неодима был введен в состав стекла через эквимолярную замену оксида алюминия. Состав исследуемой серии стекол представлен в табл. 1.

Образцы были отполированы и подготовлены для записи решеток и оптических измерений.

Таблица 1. Молярный состав исследуемых хлорсодержащих ФТР стекол, активированных ионами неодима

Table 1. Composition of the studied Cl-containing photo-thermo-refractive glasses doped with neodymium ions

Образец	Концентрация неодима, мол %				
	0	0,25	0,5	1	2
SiO ₂	68,9	67,9	66,9	65,5	61,9
Na ₂ O	15,6	15,6	15,7	15,8	15,7
ZnO	4,9	4,8	4,8	4,7	4,4
Nd ₂ O ₃	0	0,25	0,48	0,97	2,00
Al ₂ O ₃	2,8	2,7	2,4	1,9	2,1
Cl	1,4	1,4	1,4	1,3	1,3
F	6,3	7,3	8,3	9,8	12,6
Sb ₂ O ₃	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02
CeO ₂	0,007	0,007	0,007	0,006	0,006
Ag ₂ O	0,006	0,006	0,006	0,006	0,006

Таблица 2. Температуры стеклования исследуемых хлорсодержащих ФТР стекол, легированных ионами неодима

Table 2. Temperatures of the studied Cl-containing photo-thermo-refractive glasses doped with neodymium ions

Образец	Концентрация неодима, мол %				
	0	0,25	0,5	1	2
T_g , град	480	486	496	492	480

Температура стеклования (T_g) каждого стекла определялась методом дифференциальной сканирующей калориметрии. В табл. 2 приведена зависимость T_g от концентрации неодима в хлорсодержащих ФТР стеклах. Следует отметить, что в это стекло было введено большее количество фтора для компенсации фтора, который удерживается ионами неодима [13], что приводит к уменьшению температуры стеклования стекол с большей концентрацией неодима.

Для записи брэгговских решеток использовался Не-Cd лазер (длина волны излучения $\lambda = 325$ нм, ТЕМ₀₀, *Kimtron*), для создания интерференционной картины – интерферометр Ллойда. Период картины составил порядка 1 мкм. Затем образцы были термообработаны в муфельной печи (*Nabertherm*). Температура термообработки выбрана относительно T_g , а именно $T_g + 30$ °С, что соответствует стандартному режиму термообработки ФТР стекла. Контуры угловой селективности брэгговских решеток измерены с использованием Не-Не лазера ($\lambda = 632,8$ нм) в пределах 1,2° вокруг угла Брэгга. Модуляция показателя преломления в решетках рассчитывалась аппроксимацией полученных контуров угловой селективности по теории связанных волн с помощью следующей формулы [16]:

$$\eta_t(\theta) = \frac{\exp[-2\alpha d / \cos \theta]}{z_0} (W_1 + W_2 + W_3 + W_4),$$

где α — коэффициент поглощения стекла на длине волны излучения лазера считывания, d — эффективная толщина голограммы, а W_1 , W_2 , W_3 и W_4 описываются выражениями

$$W_1 = \left(\frac{\vartheta^2}{2} + \frac{z_0}{2} \right) \cosh \left[\frac{d\sqrt{z_0} \cos(\psi_0 / 2)}{\cos \theta} \right],$$

$$W_2 = - \left(\frac{\vartheta^2}{2} - \frac{z_0}{2} \right) \cos \left[\frac{d\sqrt{z_0} \sin(\psi_0 / 2)}{\cos \theta} \right],$$

$$W_3 = \vartheta \sqrt{z_0} \sin \left(\frac{\psi_0}{2} \right) \sinh \left[\frac{d\sqrt{z_0} \cos(\psi_0 / 2)}{\cos \theta} \right],$$

$$W_4 = - \vartheta \sqrt{z_0} \cos \left(\frac{\psi_0}{2} \right) \sin \left[\frac{d\sqrt{z_0} \sin(\psi_0 / 2)}{\cos \theta} \right],$$

где ϑ , z_0 и ψ_0 определяются как

$$\vartheta = \frac{4\pi n_0 \sin \theta_B}{\lambda} (\sin \theta - \sin \theta_B),$$

$$z_0 = \left[\left(\vartheta^2 + 4(\kappa_1^2 - \kappa_2^2) \right)^2 + (8\kappa_1\kappa_2)^2 \right]^{1/2},$$

$$\psi_0 = \arccos \left(- \frac{\vartheta^2 + 4(\kappa_1^2 - \kappa_2^2)}{z_0} \right).$$

Здесь n_0 — показатель преломления матрицы стекла, θ_B — угол Брэгга и $\kappa_1 = \pi n_1 / \lambda$, $\kappa_2 = \alpha_1 / 2$, n_1 и α_1 — первые гармоники модуляции показателя преломления и коэффициента поглощения соответственно, λ — длина волны излучения лазера считывания.

2. РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Для сравнения были записаны решетки Брэгга в исходном (не активированном неодимом) хлорсодержащем ФТР стекле и в неодимовом (в концентрации 0,25 мол %) хлорсодержащем ФТР стекле. Контуры угловой селективности нулевого порядка дифракции приведены на рис. 1.

В общем случае тип решетки (фазовая, амплитудная или амплитудно-фазовая) определяется формой контуров угловой селективности нулевого порядка дифракции относительно угла Брэгга. У амплитудно-фазовых решеток форма контуров асимметрична, что говорит о модуляции как показателя преломления в решетке, так и коэффициента ее поглощения. Как видно из рис. 1, в рассматриваемых стеклах решетки имеют фазовый характер. Небольшие отклонения в симметрии обусловлены скорее отражением Френеля.

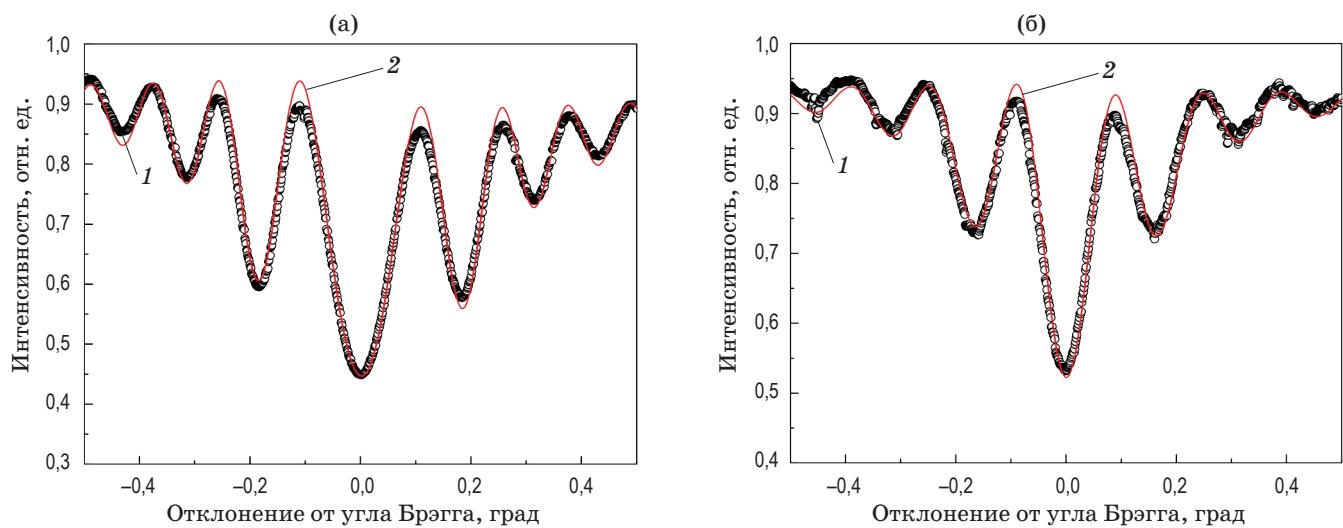


Рис. 1. Примеры экспериментальных (1) и расчетных (2) контуров угловой селективности брэгговских решеток, записанных в хлорсодержащих ФТР стеклах без неодима (а) и активированных ионами неодима (б)

Fig. 1. Examples of (1) experimental and (2) calculated angular selectivity contours of Bragg gratings recorded in (а) Nd-free Cl-containing photo-thermo-refractive glasses and (б) Nd-doped Cl-containing photo-thermo-refractive glasses

Это можно объяснить тем, что спектральная линия считающего лазера не попадает в полосу поглощения плазмонного резонанса серебряных НЧ. Расчетные контуры построены с использованием формулы, приведенной выше, и представлены на рис. 1. Из рис. 1 можно увидеть, что расчетные кривые отлично совпадают с экспериментальными контурами, кроме некоторых различий в области побочных максимумов. Это можно объяснить двумя факторами. Во-первых, с учетом особенностей записи решетка имеет градиент силы по глубине, а во-вторых, недостаточной коллимацией считающего лазерного излучения.

Для оценки влияния Nd^{3+} на способность ФТР стекла к записи голограмм были исследованы зависимости модуляции показателя преломления в решетке от экспозиции и длительности процесса термической обработки. Результаты измерений модуляции показателя преломления в обоих стеклах приведены на рис. 2. Как можно видеть из рис. 2а, с увеличением дозы облучения модуляция показателя преломления растет, а затем снижается. Пиковые значения наблюдаются при экспозициях 2 и 6 $\text{Дж}/\text{см}^2$ на исходном и активированном стеклах соответственно. Первоначальный рост можно объяснить образованием большего количества НЧ (центров кристаллизации) при увеличении экспозиции, а последующее

падение — переэкспозицией, которая приводит к увеличению средней интенсивности голограммы, что закономерно вызывает снижение контраста интерференционной картины. Кроме того, сдвиг пикового значения с 2 до 6 $\text{Дж}/\text{см}^2$ в активированном стекле означает, что в неодимовом стекле генерируется меньше фотоэлектронов, что ведет к росту дозы облучения, необходимой для достижения пикового значения модуляции показателя преломления.

Также было обнаружено, что в случае долгой термообработки обоих стекол при температуре $T_g + 30$ °С достигаются различные максимальные стационарные значения модуляции показателей преломления в решетках (рис. 2б). Эксперимент проведен после облучения исходного и активированного стекол дозами 2 и 6 $\text{Дж}/\text{см}^2$ соответственно. Значение модуляции показателя преломления определяется объемной долей кристаллической фазы фторида натрия. По истечении 15 ч термической обработки исследованных стекол стационарные значения исходного и неодимового стекол составили 16×10^{-4} и 6×10^{-4} соответственно. Более низкое значение исследуемой величины в активированном стекле говорит о том, что объемная доля кристаллов NaF в этом стекле меньше, чем в неактивированном [5]. Поскольку объемная доля соответствует концентрации НК, умноженной

на объем каждого НК, то можно заключить, что в активированном стекле концентрация фтора не достаточна. Одной из причин может являться не оптимальный состав стекла с Nd^{3+} , но, вместе с тем, полученные значе-

ния модуляции показателя преломления позволяют записывать отражательные брэгговские решетки с дифракционной эффективностью более 99% на длине волны генерации неодимового лазера (1 мкм) при толщине 220

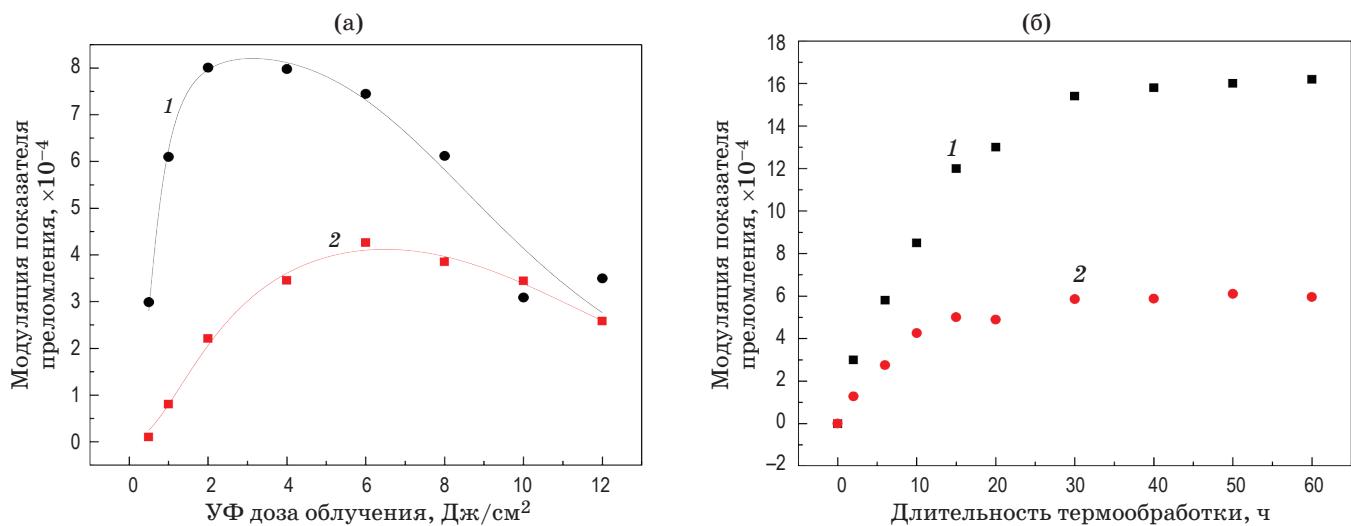


Рис. 2. Зависимости модуляции показателя преломления от экспозиции после термообработки в течение 10 ч при температуре $T_g + 30$ °С исходного (1) и активированного Nd_2O_3 (0,25 мол %) ФТР стекла (2) (а) и от времени их термообработки (б)

Fig. 2. Dependences of the refractive index modulation on (a) exposure after heat treatment for 10 h at a temperature of $T_g + 30$ °C of (1) the original and (2) activated Nd_2O_3 (0.25 mol %) photo-thermo-refractive glasses and (b) on the time of their heat treatment

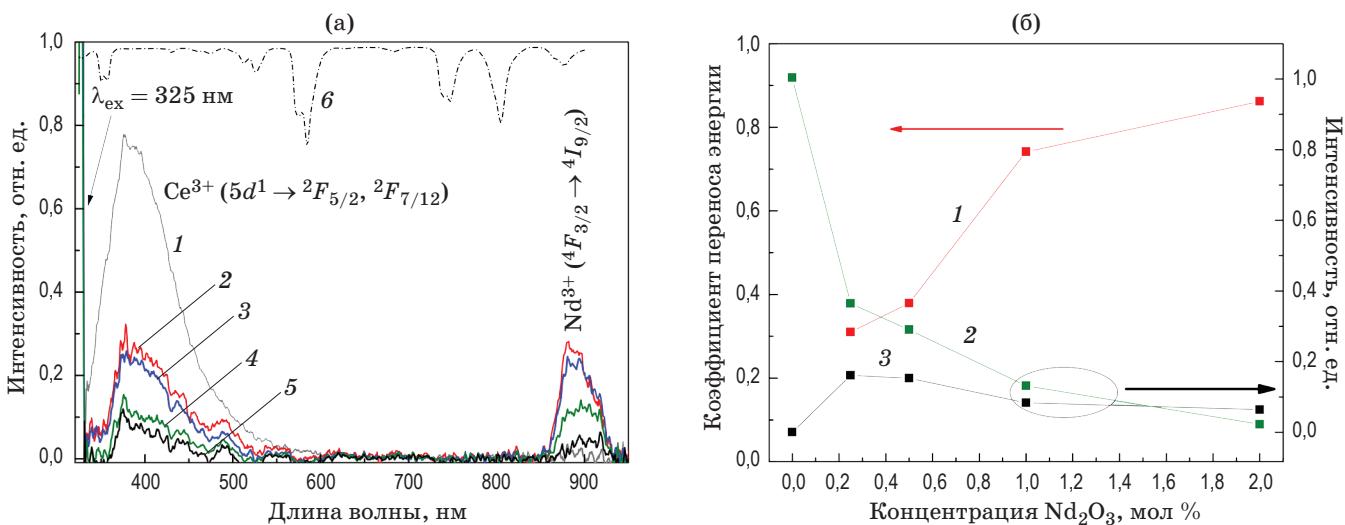


Рис. 3. Спектры люминесценции исходного (1) и неодимового (2) хлорсодержащих ФТР стекол с концентрациями Nd_2O_3 0,25 (3), 0,5 (4), 1 (5) и 2 (6) мол % при накачке на $\lambda = 325$ нм (а) и коэффициент переноса энергии с ионов церия на ионы неодима (1), интенсивность полосы люминесценции ионов церия (2) и неодима (3) при возбуждении на $\lambda = 325$ нм (б)

Fig. 3. Luminescence spectra of (1) the original Nd-free and (2) Nd-doped Cl-containing photo-thermo-refractive glasses in the concentrations of Nd_2O_3 (3) 0.25, (4) 0.5, (5) 1.0, and (6) 2.0 mol % when pumping at 325 nm are presented in (a) and energy transfer coefficient (1) from cerium ions to neodymium ions, luminescence intensity of the cerium (2) and neodymium (3) ions when excited at 325 nm are presented in (б)

и 780 мкм в исходном и активированном стеклах соответственно [17].

Для того чтобы объяснить сдвиг дозы облучения, при которой наблюдается максимум модуляции показателя преломления активированного стекла, и неудавшуюся запись брэгговских решеток в стеклах с большей концентрацией неодима, был исследован процесс переноса энергии с ионов церия на ионы неодима при записи брэгговских решеток лазером с длиной волны излучения 325 нм. Ионы неодима имеют пики поглощения в интервале длин волн 325–600 нм, а именно в этом интервале находится полоса излучения иона церия в ФТР стекле после возбуждения на $\lambda = 325$ нм (переход $4f - 5d \rightarrow 4f (2F_{7/2}, 2F_{5/2})$) [18]. С помощью интегрирующей сферы с многоканальным фотонным анализатором (РМА-12, *Namatatsu*) были записаны спектры люминесценции хлорсодержащих ФТР стекол, активированных Nd^{3+} , и измерены квантовые выходы в интервале длин волн 325–600 нм при накачке на длине волны 325 нм, соответствующей спектральной линии He-Cd лазера. Спектры люминесценции приведены на рис. 3а.

Из рис. 3а можно заметить, что в процессе облучения стекол, активированных Nd^{3+} , на $\lambda = 325$ нм происходит перенос энергии с церия на неодим, что приводит к появлению полосы излучения неодима на $\lambda = 900$ нм и некоторых минимумов в полосе излучения церия, совпадающих с полосами поглощения неодима. Такой канал переноса энергии приводит к уменьшению как эффективности облучения, так и значения модуляции показателя преломления. Коэффициенты переноса энергии были рассчитаны по формуле

$$\eta = 1 - \frac{\phi}{\phi_0},$$

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Samson B.N., Borrelli N.F., Tick P.A. Efficient neodymium-doped glass ceramic fiber laser and amplifier // Opt. Lett. 2001. V. 26. № 3. P. 145–147. <https://doi.org/10.1364/OL.26.000145>
2. Dussardier B., Blanc W., Peterka P. Tailoring of the local environment of active ions in rare-earth- and transition-metal-doped optical fibres, and potential applications: Selected topics on optical fiber technology // Eds. Yasin M., Harun S.W., Arof H. / IntechOpen. 2012. P. 28. <https://doi.org/10.5772/30125>
3. Thornton J., Fountain W., Flint G., et al. Properties of neodymium laser materials // Appl. Opt. 1969. V. 8. № 6. P. 1087–1102. <https://doi.org/10.1364/AO.8.001087>

где ϕ_0 — квантовый выход люминесценции Ce^{3+} в исходном стекле, не содержащем неодим, и ϕ — квантовый выход люминесценции Ce^{3+} в присутствии Nd^{3+} . Интенсивности полос люминесценции Ce^{3+} и Nd^{3+} и зависимость ϕ от концентрации Nd^{3+} представлены на рис. 3б. В стеклах, активированных неодимом в концентрациях 0,5, 1, и 2 мол %, не удалось записать брэгговские решетки из-за высокого значения коэффициента переноса энергии, которое достигает 93% у образца с 2 мол % Nd_2O_3 .

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В работе синтезировано хлорсодержащее ФТР стекло, активированное ионами неодима. Объемные брэгговские решетки записаны как в исходном, так и в активированном ФТР стекле. Измерены контуры угловой селективности решеток Брэгга и рассчитаны значения модуляции показателя преломления брэгговских решеток в стеклах. Установлено, что максимальное значение модуляции показателей преломления исходного хлорсодержащего ФТР стекла составляет 16×10^{-4} , а активированного ионами неодима стекла в концентрации 0,25 мол % — 6×10^{-4} . Эти значения получены при экспозиции 2 и 6 Дж/см² соответственно. Такое отличие связано с недостаточной концентрацией фтора в активированном стекле и увеличением вероятности переноса энергии с ионов церия на ионы неодима во время облучения.

Новое хлорсодержащее ФТР стекло, активированное ионами неодима, является одновременно лазерной и голограммической средой и открывает новые возможности для его применения в области фотоники.

REFERENCES

1. Samson B.N., Borrelli N.F., Tick P.A. Efficient neodymium-doped glass ceramic fiber laser and amplifier // Opt. Lett. 2001. V. 26. № 3. P. 145–147. <https://doi.org/10.1364/OL.26.000145>
2. Dussardier B., Blanc W., Peterka P. Tailoring of the local environment of active ions in rare-earth- and transition-metal-doped optical fibres, and potential applications: Selected topics on optical fiber technology // Eds. Yasin M., Harun S.W., Arof H. / IntechOpen. 2012. P. 28. <https://doi.org/10.5772/30125>
3. Thornton J., Fountain W., Flint G., et al. Properties of neodymium laser materials // Appl. Opt. 1969. V. 8. № 6. P. 1087–1102. <https://doi.org/10.1364/AO.8.001087>

4. Brown E., Hanley C.B., Hömmerich U., et al. Spectroscopic study of neodymium doped potassium lead bromide for mid-infrared solid state lasers // *J. Lumin.* 2013. V. 133. P. 244–248. <https://doi.org/10.1016/j.jlumin.2011.12.023>
5. Ivanov S., Dubrovin V., Nikonorov N., et al. Origin of refractive index change in photo-thermo-refractive glass // *J. Non-Crystall. Solids.* 2019. V. 521. P. 119496. <https://doi.org/10.1016/j.jnoncrysol.2019.119496>
6. Glebov L. Volume Bragg gratings in PTR glass — new optical elements for laser design // *Advanced Solid State Lasers / Nara, Japan. January 27–30, 2008.* P. 3.
7. Nikonorov N., Ivanov S., Dubrovin V., et al. New photo-thermo-refractive glasses for holographic optical elements: Properties and applications // *Holographic materials and optical systems /* Eds. Naydenova I., Nazarova D., Babeva T. IntechOpen. 2017. <https://doi.org/10.5772/66116>
8. Чухарев А.В. Спектрально-люминесцентные свойства эрбьевых фототермопрективных стекол для интегрально-оптических усилителей и лазеров // Дисс. канд. техн. наук. Университет ИТМО, Санкт-Петербург. 2001. 148 с.
9. Nikonorov N., Przhevuskii A., Chukharev A. Effect of pumping on spectral characteristics of Er-doped glasses // *Proc. SPIE.* 2001. V. 4282. P. 10. <https://doi.org/10.1117/12.424781>
10. Ryasnyanskiy A., Vorobiev N., Smirnov V., et al. DBR and DFB lasers in neodymium- and ytterbium-doped photothermorefractive glasses // *Opt. Lett.* 2014. V. 39. № 7. P. 2156–2159. <https://doi.org/10.1364/OL.39.002156>
11. Sato Y., Taira T., Smirnov V., et al. The study of spectroscopic properties of Nd: PTR glass // *The European Conf. Lasers and Electro-Optics.* Munich, Germany. June 14–19, 2009. P. 1–1.
12. Nasser K., Aseev V., Ivanov S., et al. Spectroscopic and laser properties of erbium and ytterbium co-doped photo-thermo-refractive glass // *Ceram. Internat.* 2020. V. 46. № 16. P. 26282–26288. <https://doi.org/10.1016/j.ceramint.2020.02.271>
13. Nikonorov N., Ivanov S.A., Kozlova D.A., et al. Effect of rare-earth-dopants on Bragg gratings recording in PTR glasses // *Proc. SPIE.* 2017. V. 10233. P. 8. <https://doi.org/10.1117/12.2265716>
14. Nasser K., Ivanov S., Kharisova R., et al. A novel photo-thermo-refractive glass with chlorine instead of bromine for holographic application // *Ceram. Internat.* 2022. V. 48. № 18. P. 26750–26757. <https://doi.org/10.1016/j.ceramint.2022.05.372>
15. Van De Hulst H.C., Twersky V. Light scattering by small particles // *Phys. Today.* 1957. V. 10. № 12. P. 28. <https://doi.org/10.1063/1.3060205>
16. Beléndez A., Fimia A., Carretero L., et al. Study of angular responses of mixed amplitude-phase holographic gratings: Shifted Borrman effect // *Opt. Lett.* 2001. V. 26. № 11. P. 786–788. <https://doi.org/10.1364/OL.26.000786>
17. Kogelnik H. Coupled wave theory for thick hologram gratings // *Bell System Technical J.* 1969. V. 48. № 9. 2909–2947. <https://doi.org/10.1002/j.1538-7305.1969.tb01198.x>
18. Glebova L., Ehrt D., Glebov L. Luminescence of dopants in PTR glass // *European J. Glass Sci. and Technol. Part B. Physics and Chemistry of Glasses.* 2007. V. 48. № 5. P. 328–331.
4. Brown E., Hanley C.B., Hömmerich U., et al. Spectroscopic study of neodymium doped potassium lead bromide for mid-infrared solid state lasers // *J. Lumin.* 2013. V. 133. P. 244–248. <https://doi.org/10.1016/j.jlumin.2011.12.023>
5. Ivanov S., Dubrovin V., Nikonorov N., et al. Origin of refractive index change in photo-thermo-refractive glass // *J. Non-Crystall. Solids.* 2019. V. 521. P. 119496. <https://doi.org/10.1016/j.jnoncrysol.2019.119496>
6. Glebov L. Volume Bragg gratings in PTR glass — new optical elements for laser design // *Advanced Solid State Lasers / Nara, Japan. January 27–30, 2008.* P. 3.
7. Nikonorov N., Ivanov S., Dubrovin V., et al. New photo-thermo-refractive glasses for holographic optical elements: Properties and applications // *Holographic materials and optical systems /* Eds. Naydenova I., Nazarova D., Babeva T. IntechOpen. 2017. <https://doi.org/10.5772/66116>
8. Chukharev A.V. Spectral-luminescent properties of erbium photo-thermo-refractive glasses for integrally optical amplifiers and lasers [in Russian] // *PhD Thesis.* St. Petersburg State University of Information Technologies, Mechanics and Optics. St. Petersburg, Russia. 2001. P. 148.
9. Nikonorov N., Przhevuskii A., Chukharev A. Effect of pumping on spectral characteristics of Er-doped glasses // *Proc. SPIE.* 2001. V. 4282. P. 10. <https://doi.org/10.1117/12.424781>
10. Ryasnyanskiy A., Vorobiev N., Smirnov V., et al. DBR and DFB lasers in neodymium- and ytterbium-doped photothermorefractive glasses // *Opt. Lett.* 2014. V. 39. № 7. P. 2156–2159. <https://doi.org/10.1364/OL.39.002156>
11. Sato Y., Taira T., Smirnov V., et al. The study of spectroscopic properties of Nd: PTR glass // *The European Conf. Lasers and Electro-Optics.* Munich, Germany. June 14–19, 2009. P. 1–1.
12. Nasser K., Aseev V., Ivanov S., et al. Spectroscopic and laser properties of erbium and ytterbium co-doped photo-thermo-refractive glass // *Ceram. Internat.* 2020. V. 46. № 16. P. 26282–26288. <https://doi.org/10.1016/j.ceramint.2020.02.271>
13. Nikonorov N., Ivanov S.A., Kozlova D.A., et al. Effect of rare-earth-dopants on Bragg gratings recording in PTR glasses // *Proc. SPIE.* 2017. V. 10233. P. 8. <https://doi.org/10.1117/12.2265716>
14. Nasser K., Ivanov S., Kharisova R., et al. A novel photo-thermo-refractive glass with chlorine instead of bromine for holographic application // *Ceram. Internat.* 2022. V. 48. № 18. P. 26750–26757. <https://doi.org/10.1016/j.ceramint.2022.05.372>
15. Van De Hulst H.C., Twersky V. Light scattering by small particles // *Phys. Today.* 1957. V. 10. № 12. P. 28. <https://doi.org/10.1063/1.3060205>
16. Beléndez A., Fimia A., Carretero L., et al. Study of angular responses of mixed amplitude-phase holographic gratings: Shifted Borrman effect // *Opt. Lett.* 2001. V. 26. № 11. P. 786–788. <https://doi.org/10.1364/OL.26.000786>
17. Kogelnik H. Coupled wave theory for thick hologram gratings // *Bell System Technical J.* 1969. V. 48. № 9. 2909–2947. <https://doi.org/10.1002/j.1538-7305.1969.tb01198.x>
18. Glebova L., Ehrt D., Glebov L. Luminescence of dopants in PTR glass // *European J. Glass Sci. and Technol. Part B. Physics and Chemistry of Glasses.* 2007. V. 48. № 5. P. 328–331.

АВТОРЫ

Халдун Нассер — инженер, Университет ИТМО, Санкт-Петербург, 199034, Россия; Scopus ID: 57208838107; <https://orcid.org/0000-0001-6221-7086>; khaldoon.nasser.94@gmail.com

Николай Валентинович Никоноров — доктор физико-математических наук, профессор, главный научный сотрудник, Университет ИТМО, Санкт-Петербург, 199034, Россия; Scopus ID: 7003772604; <https://orcid.org/0000-0002-1341-067X>; nikonorov@oi.ifmo.ru

Сергей Александрович Иванов — кандидат физико-математических наук, научный сотрудник, Университет ИТМО, Санкт-Петербург, 199034, Россия; Scopus ID: 56453860700; <https://orcid.org/0000-0002-4051-8803>; ykkapoh@gmail.com

Александр Иванович Игнатьев — ведущий инженер, Университет ИТМО, Санкт-Петербург, 199034, Россия; Scopus ID: 55412016500; <https://orcid.org/0000-0002-4452-5496>; ignatiev@oi.ifmo.ru

Статья поступила в редакцию 29.11.2022

Одобрена после рецензирования 26.01.2023

Принята к печати 26.03.2023

AUTHORS

Khaldoon Nasser — Engineer, ITMO University, St. Petersburg, 199034, Russia; Scopus ID: 57208838107; <https://orcid.org/0000-0001-6221-7086>; khaldoon.nasser.94@gmail.com

Nikolay V. Nikonorov — Doctor of Science (Habilitation), Professor, Chief Researcher, ITMO University, St. Petersburg, 199034, Russia; Scopus ID: 7003772604; <https://orcid.org/0000-0002-1341-067X>; nikonorov@oi.ifmo.ru

Sergey A. Ivanov — PhD, Researcher, ITMO University, St. Petersburg, 199034, Russia; Scopus ID: 56453860700; <https://orcid.org/0000-0002-4051-8803>; ykkapoh@gmail.com

Alexander I. Ignatiev — Lead Engineer, ITMO University, St. Petersburg, 199034, Russia; Scopus ID: 55412016500; <https://orcid.org/0000-0002-4452-5496>; ignatiev@oi.ifmo.ru

The article was submitted to the editorial office 29.11.2022

Approved after review 26.01.2023

Accepted for publication 26.03.2023