

Влияние хлоридов на спектральные свойства серебряных ионообменных слоев фото-термо-рефрактивного стекла

© Д.В. Марасанов, Е.М. Сгибнев, Н.В. Никоноров

Университет ИТМО,
199034 Санкт-Петербург, Россия
e-mail: dmitriymarasanov@bk.ru

Поступила в редакцию 16.02.2022 г.

В окончательной редакции 14.03.2022 г.

Принята к публикации 14.03.2022 г.

Исследовано влияние хлоридов на спектральные свойства наночастиц серебра в ионообменных слоях фото-термо-рефрактивного стекла. Показано, что в ионообменных слоях фото-термо-рефрактивного стекла, не содержащего хлориды, наночастицы серебра формируются только в УФ облученной области, а показатель преломления не меняется под действием УФ излучения. Установлено, что УФ облучение и последующая термическая обработка приводят к росту нанокристаллов NaF на наночастицах ядро-оболочка Ag-AgCl/NaCl, сформированных в УФ облученном ионообменном фото-термо-рефрактивном стекле с хлоридами. Контраст показателя преломления облученного и необлученного участков фото-термо-рефрактивного стекла с хлором достигает $\Delta n = -3 \cdot 10^{-3}$. Результаты исследования демонстрируют возможность записи амплитудных решеток в ионообменных слоях бесхлоридного и амплитудно-фазовых решеток в ионообменных слоях хлоридного фото-термо-рефрактивного стекла.

Ключевые слова: ионный обмен, серебро, хлоридное фото-термо-рефрактивное стекло, наночастицы серебра, нанокристаллы, фото-термо-индуцированная кристаллизация.

DOI: 10.21883/OS.2022.07.52729.3286-22

Введение

Фото-термо-рефрактивные (ФТР) стекла представляют большой практический интерес в оптике [1,2] как светочувствительный материал для записи брэгговских решеток, а также как матрица для формирования люминесцентных молекулярных кластеров серебра и плазмонных наночастиц [2–4]. Прототипом ФТР стекла явилось полихромное (ПХ) стекло, разработанное для записи цветных изображений в стекле S.D. Stokey, J.E. Pierson и G.H. Beal в американской компании Corning в 1977 г. [5,6]. В СССР аналогичное стекло было разработано под руководством В.А. Цехомского в ГОИ им. С.И. Вавилова в 80-е годы. Разработанные стекла имели тот же функционал, что и ПХ стекла, и получили похожее название „мультихромные“ (МХ) стекла [7]. В конце 80-х–начале 90-х гг. Л.Б. Глебов и Н.В. Никоноров в ГОИ им. С.И. Вавилова обнаружили, что фото-термо-индуцированная кристаллизация приводит к изменению показателя преломления ПХ стекол, что обусловлено различием показателей преломления выделившейся кристаллической фазы и матрицы стекла, и предложили использовать этот эффект для записи объемных фазовых голограмм [8]. Они также предложили новое название для этого класса голографических материалов — „фото-термо-рефрактивное стекло“ [9], т.е. стекло, в котором показатель преломления изменяется в результате облучения и последующей термической обработки. Это название закрепилось в голографическом сообществе и постепенно вытеснило названия ПХ и МХ

стекла и стало активно использоваться как в России, так и за рубежом [1,10].

ФТР стекло синтезируется на основе системы $\text{Na}_2\text{O}-\text{ZnO}-\text{Al}_2\text{O}_3-\text{SiO}_2-\text{F}$ с добавками CeO_2 , Sb_2O_3 , Ag_2O и галогена (брома или хлора). Эти добавки ответственны за процесс фото-термо-индуцированной кристаллизации [11–14]. После воздействия УФ излучения, соответствующего полосе поглощения Ce^{3+} , происходит их фотоионизация с последующим захватом электронов сурьмой Sb^{5+} . При температурах выше 250°C центры $(\text{Sb}^{5+})^-$ высвобождают захваченные электроны, которые, в свою очередь, захватываются ионами Ag^+ . Серебро при температуре выше 400°C обладает высокой подвижностью для образования наночастиц серебра размером 2–3 нм [2,15]. При повышении температуры термообработки выше температуры стеклования, которая составляет около $460-490^\circ\text{C}$ для ФТР-стекла в зависимости от состава, вокруг наночастиц серебра образуется смешанная оболочка из галогенидов серебра и натрия [13,14,16]. Далее, вокруг наночастицы с оболочкой также образуется кристаллическая фаза фторида натрия. Известно, что нанокристаллы фторида натрия снижают показатель преломления стекла (показатель преломления объемных кристаллов NaF составляет 1.33) [17]. В результате возникает разница показателей преломления между облученной и необлученной областями ФТР стекла [1].

Кроме того, известно, что улетучивание ионов фтора с поверхности ФТР стекла при термообработке приводит к формированию оптических волноводов [18,19], что

является причиной отсутствия кристаллов NaF в приповерхностном слое стекла толщиной в несколько микрон. В результате запись брэгговских решеток возможна только в объеме стекла. Однако запись брэгговских решеток в поверхностном слое стекла и их комбинация с волноводными структурами позволили бы обеспечить эффективный ввод/вывод излучения в системах дополненной и виртуальной реальности [20,21]. Таким образом, сочетание волноводных и фоточувствительных свойств ФТР стекла является актуальной задачей. Волноводный слой на поверхности стекла может быть сформирован методом низкотемпературного ионного обмена (ИО) [16,22], который позволяет вводить серебро в гораздо более высокой концентрации по сравнению с традиционным синтезом стекла. ИО представляет собой процесс замены щелочных катионов в стекле, в основном натрия, другими щелочными ионами или ионами переходных металлов (Ag^+ , Cu^+ , Tl^+) при температуре значительно ниже температуры стеклования. В настоящее время уже исследованы спектральные свойства наноструктур серебра в объеме ФТР стекла [13]. Однако влияние галогенидов в составе ФТР стекла на спектральные свойства серебра, введенного методом ИО, остается малоизученным. В то же время из-за того, что в процессе низкотемпературного ИО серебро вводится в „замороженную“ сетку стекла, свойства таких неравновесных с термодинамической точки зрения слоев могут существенно отличаться от свойств стекла, полученных путем высокотемпературного синтеза. Оптические свойства нанокристаллов бромидов серебра исследовали в ионообменном бромидном ФТР стекле ФТР без других добавок [23]. Целью данной работы является изучение влияния хлора в составе стекла на спектральные свойства наноструктур серебра, формирующихся в ионообменном слое стекла ФТР.

Эксперимент

В работе были изучены ФТР стекла на основе системы $\text{Na}_2\text{O}-\text{ZnO}-\text{Al}_2\text{O}_3-\text{SiO}_2-\text{F}$, с добавками оксидов сурьмы Sb_2O_3 и церия CeO_2 , а также $0(\text{GC10})-1(\text{GC11})$ мол.% хлора. Синтез стекла проводился в высокотемпературной печи Gero при температуре 1500°C в атмосфере воздуха с использованием платиновых тиглей, расплавы гомогенизировались с помощью платиновой мешалки. После синтеза были подготовлены плоские полированные пластины толщиной около 1 мм. ИО проводился в расплаве $\text{AgNO}_3/\text{NaNO}_3$, содержащем 0.1–5 мол.% AgNO_3 при температуре 320°C в течение 15 min. После ИО были измерены эффективные показатели преломления волноводных мод методом селективного резонансного возбуждения с использованием стеклянных призм для ввода/вывода излучения He–Ne-лазера ($\lambda = 632.8$ nm). Профили показателя преломления ионообменных стекол рассчитывались на основе измеренных эффективных показателей преломления волноводных мод с использованием обратного метода

Венцеля-Крамерса-Бриллюэна [24]. Образцы облучались волоконной УФ лампой Exfo Novacure 2100 дозой 1 kJ для изучения их фоточувствительности. Затем образцы подвергались термической обработке (ТО) при температуре 500°C длительностью до 3 h. На каждом этапе измерялись спектры поглощения в спектральном диапазоне 200–800 nm на спектрофотометре Lambda 650 (Perkin-Elmer). Показатель преломления n_d определялся с помощью рефрактометра Аббе (ИРФ-454 Б2М) с погрешностью ± 0.0002 . Рентгенофазовые исследования были выполнены на рентгеновском дифрактометре Ultima IV (Rigaku). Расчет диаметра кристаллов и наночастиц по данным РФА проводился по формуле Шеррера [25–29]:

$$d = K\lambda / (\beta \cdot \cos \theta), \quad (1)$$

где K — постоянная Шеррера, λ — длина волны рентгеновского излучения, β — ширина пика на полувысоте, θ — угол дифракции. Эффективный оптический размер наночастиц серебра рассчитывался по теории Ми [30–32] с использованием следующего уравнения:

$$d = (2v_F) / \Delta w, \quad (2)$$

где d — средний диаметр наночастиц серебра, v_F — скорость Ферми ($1.39 \cdot 10^8$ cm/s для серебра [33]), Δw — полуширина на полувысоте в единицах угловой частоты.

Результаты

На рис. 1 представлены спектры поглощения образцов GC10 и GC11, демонстрирующие низкое поглощение матрицы ФТР стекла во всем видимом диапазоне. Полоса поглощения с максимумом на 310 nm связана с поглощением ионов Ce^{3+} в спектре исходного стекла, а коротковолновое плечо соответствует поглощению ионов Ce^{4+} [22]. Увеличение амплитуды поглощения трехвалентного церия в хлоридных стеклах связано с изменением окислительно-восстановительных условий при синтезе стекол с введением хлорида натрия в шихту стекла и, как следствие, с изменением соотношения $\text{Ce}^{3+}/\text{Ce}^{4+}$.

За счет замещения ионов натрия в поверхностном слое стекла ионами серебра в процессе ИО происходит увеличение показателя преломления. Причиной этого является более высокая поляризуемость ионов серебра по сравнению с ионами натрия [34]. Концентрация ионов серебра в случае Na^+/Ag^+ ИО сильно зависит от продолжительности и температуры процесса ИО при постоянной концентрации серебра в солевом расплаве. Например, увеличение длительности ИО приводит к росту толщины слоя, обогащенного серебром [35]. На рис. 2 представлены профили показателя преломления ФТР стекол GC10 и GC11. В хлоридном ФТР стекле эффективные показатели преломления ТЕ волноводных мод были выше по значениям, по сравнению со стеклом без хлора (отметим, что эффективные показатели преломления для ТЕ и ТМ волноводных мод совпадали, что

говорит об отсутствии двулучепреломления и соответственно напряжений в волноводном слое). Кроме того, обнаружено увеличение толщины ИО слоя с 7 до 9 μm. Причиной различия профилей показателя преломления ионообменных стекол GC10 и GC11 является разрыв связей Si–O хлором и меньшая связанность сетки стекла, что приводит к увеличению коэффициента диффузии ионов серебра в хлоридном стекле.

После процесса ИО наблюдался длинноволновый сдвиг края УФ поглощения. Сдвиг обусловлен $4d^{10} \rightarrow 4d^9 5s^1$ абсорбционными переходами ионов Ag^+ [3,36–38]. При концентрации нитрата серебра в расплаве 5 mol% полоса поглощения Ce^{3+} „закрывалась“ поглощением Ag^+ (рис. 3), что приводило к существенному снижению УФ чувствительности ионообменного ФТР стекла. После ТО край УФ поглощения смещается в коротковолновую область за счет уменьшения концентрации ионов серебра и образования наночастиц серебра. УФ облучение не оказывает существенного

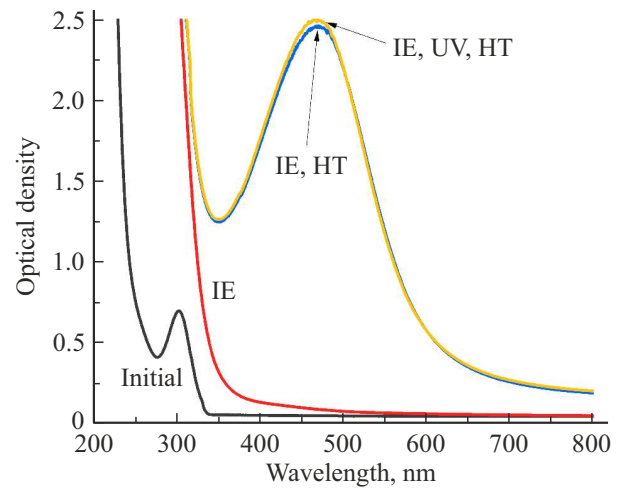


Рис. 3. Спектры поглощения хлоридного ФТР стекла до и после серебряного ИО, после ИО, ТО, после ИО, УФ и ТО. Параметры ИО: 5% $AgNO_3$, 15 min, 320°C. Параметры ТО: 500°C, 3 h.

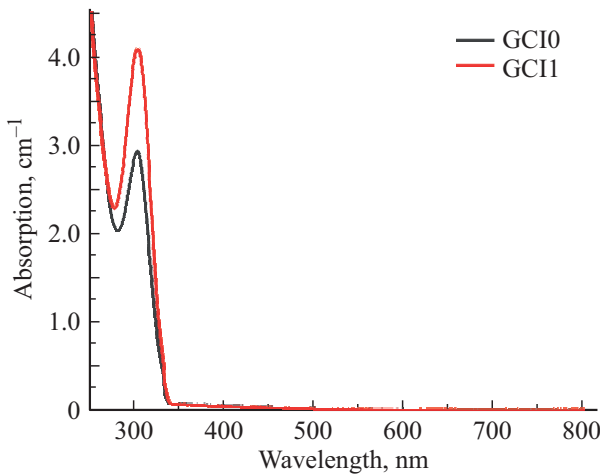


Рис. 1. Спектры поглощения исходных стекол.

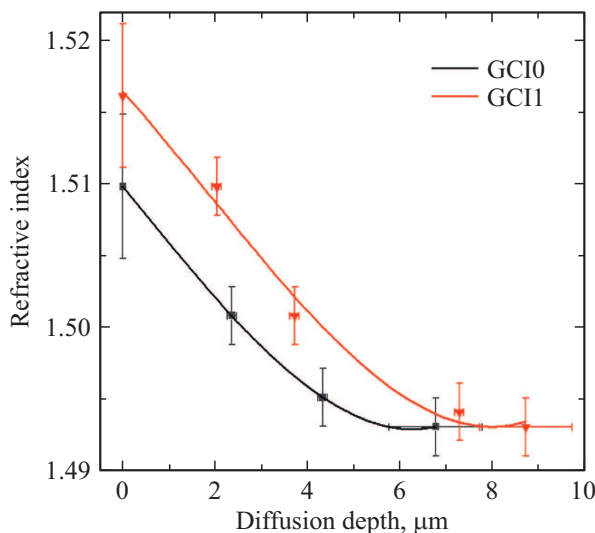
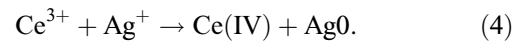
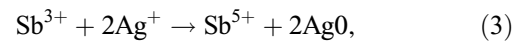


Рис. 2. Профиль показателя преломления ионообменного слоя.

влияния на амплитуду поглощения наночастиц серебра. Причиной образования наночастиц в стекле без УФ облучения является окислительно-восстановительная реакция ионов серебра с сурьмой Sb^{3+} и церием Ce^{3+} [16]:



Поскольку концентрация ионов серебра в ионообменном слое ФТР стекла на 2–3 порядка выше концентрации ионов Sb^{3+} и Ce^{3+} , химическое равновесие указанных окислительно-восстановительных реакций смещено в сторону восстановления серебра. Таким образом, для получения наночастиц только в УФ облученных областях необходимо уменьшить концентрацию ионов серебра, вводимых в процесс ИО, что снизит вероятность восстановления ионов серебра и предотвратит „перекрытие“ полос поглощения ионов Ce^{3+} .

На рис. 4 представлены спектры поглощения стекол GC10 и GC11 после ИО, УФ облучения и ТО. Формирование наночастиц серебра в ионообменном слое происходит в облучаемой области стекла за счет фото-термо-индуцированной кристаллизации аналогично процессу в объеме обычного ФТР стекла. Максимум полосы поглощения наночастиц серебра в спектре стекла GC10 приходится на 400 nm. Диаметр наночастиц серебра, рассчитанный по теории Ми, составляет 4 nm. Из-за более низкой концентрации серебра в солевом расплаве в процессе ИО рост наночастиц серебра не наблюдался без УФ облучения в ФТР стекле без хлора.

В стекле GC11 максимум поглощения наночастиц серебра смещен в длинноволновую сторону по сравнению со стеклом GC10 с 400 до 438 nm (рис. 5). Последнее объясняется изменением показателя преломления окружения наночастиц серебра вследствие образования

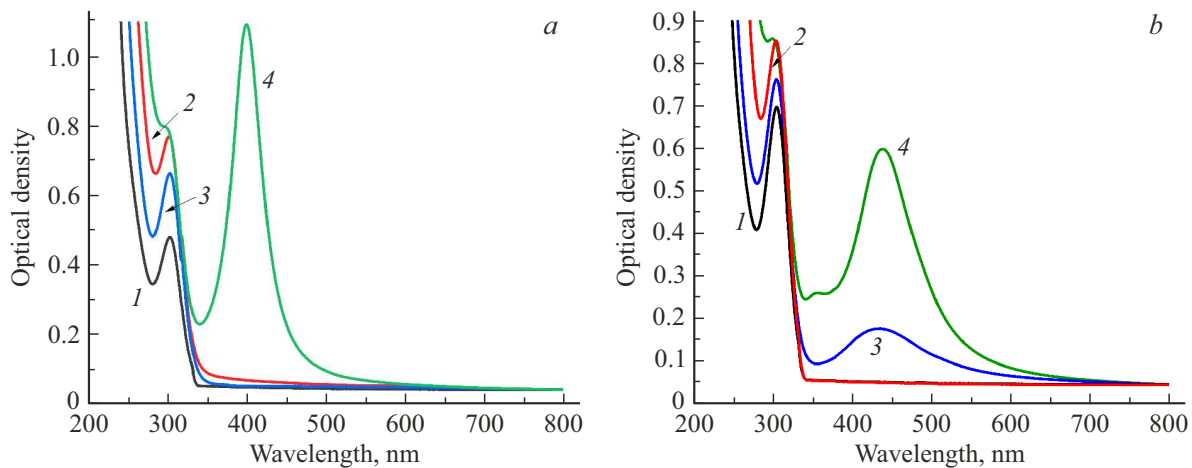


Рис. 4. Спектры поглощения ФТР GCl0 (a) и GCl1 (b) стекл: исходного (1), после ИО (2), после ИО и ТО (3), после ИО, УФ и ТО (4). Параметры ИО: 0.1% AgNO_3 , 15 min, 320°C. Параметры ТО: 500°C, 3 h.

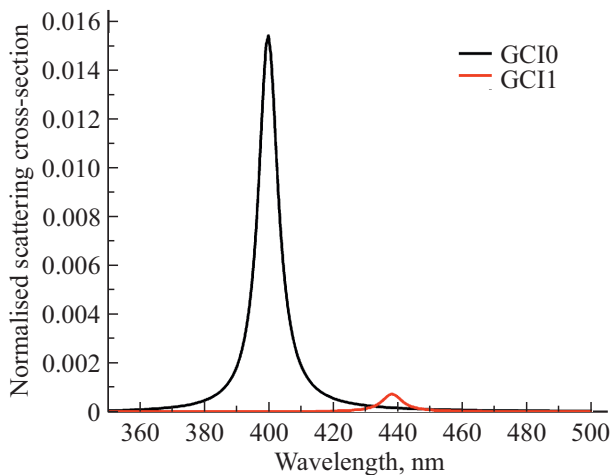


Рис. 5. Рассчитанные спектры сечения рассеяния наночастиц серебра и наночастиц ядро оболочка Ag-AgCl в матрице ФТР стекла. Параметры расчета: дисперсия серебра [40], в стекле GCl0: $n = 1.494$, $R = 2$ nm; в стекле GCl1: $n = 1.491$, радиус ядра 1 nm, параметры оболочки: $h = 0.35$ nm, $n = 2.067$.

кристаллической оболочки AgCl/NaCl [1,3,39]. Согласно теории Ми, диаметр наночастиц серебра в этом случае составлял 2 nm. Важно отметить, что в необлученной области хлоридного стекла также наблюдается рост наночастиц ядро-оболочка. Однако без воздействия УФ излучения амплитуда полосы поглощения наночастиц ядро-оболочка в 4 раза меньше.

С использованием полученных размеров наночастиц серебра и программы калькулятора Ми, разработанной в Университете ИТМО, были рассчитаны сечения рассеяния наночастиц серебра в ФТР стеклах. Расчетное значение в бесхлоридном стекле хорошо согласуется с экспериментально наблюдаемым положением полосы поглощения наночастиц серебра. Максимум сечения рассеяния наночастиц ядро-оболочка Ag-AgCl смещен

к 438 nm из-за высокого показателя преломления хлорида серебра ($n = 2.067$) толщиной 0.35 nm. С другой стороны, в работе [14] было показано, что возможно формирование смешанной оболочки AgCl/NaCl на наночастицах серебра в матрице ФТР стекла. Таким образом, показатель преломления оболочки находится между показателями преломления AgCl и NaCl. Таким образом, на итоговый спектр поглощения наночастиц ядро-оболочка оказывает влияние как химический состав оболочки, так и ее толщина.

В ФТР стекле GCl0 методом рентгенофазового анализа (РФА) обнаружено только наличие наночастиц серебра (рис. 6, a). В ФТР стеклах без кристаллической фазы NaF возможна запись только амплитудных решеток с низкой дифракционной эффективностью [7]. Показатель преломления ФТР стекла GCl0 составлял 1.494 независимо от УФ облучения. Диаметр наночастиц серебра по результатам РФА был рассчитан по формуле Шеррера и оказался равным 4 nm.

РФА хлоридного ФТР стекла GCl1 после ИО, УФ и ТО показывает как пики серебра, так и фазы NaF [41–43]. Фазы хлорида серебра в рентгенограммах не было обнаружено, что, по-видимому, объясняется чрезвычайно малой толщиной хлоридной оболочки на наночастицах (менее 1 nm). Расчетный размер кристаллов NaF и наночастиц серебра в хлоридном стекле составил 2 nm. Показатель преломления хлоридного стекла ФТР в облученной области составил 1.491, а в необлученной — 1.494. Так, разница в показателе преломления между облученной и необлученной областями оказалась равной $3 \cdot 10^{-3}$, что позволяет регистрировать брэгговские решетки с дифракционной эффективностью до 99% в обычных ФТР стеклах [10,44]. Уменьшение показателя преломления в УФ облученном хлоридном ФТР стекле связано с ростом кристаллов NaF.

Исходное стекло, а также стекло после ИО, ИО и ТО, визуально прозрачны в видимом диапазоне. После УФ и ТО стекла приобретают желтоватую окраску, связанную

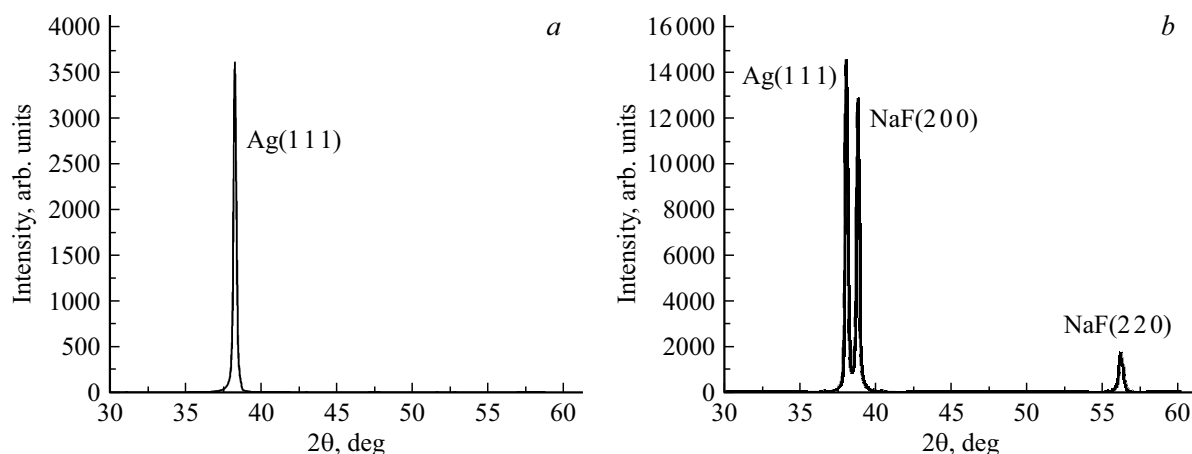


Рис. 6. Рентгенофазовый анализ УФ облученных и термообработанных GCl0 (a) и GCl1 (b) ФТР стекло.

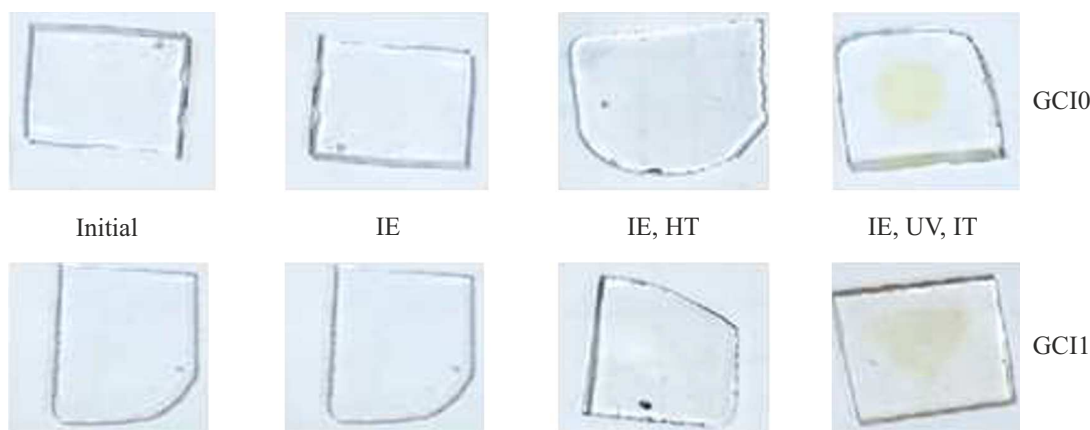


Рис. 7. Фото образцов ФТР GCl0 и GCl1 стекло. Образцы расположены слева направо: исходное, после ИО, после ИО и ТО, после ИО, УФ и ТО. Параметры ИО: 0.1% AgNO_3 , 15 min, 320°C . Параметры ТО: 500°C .

с наночастицами серебра (рис. 7). В стекле с хлором наличие кристаллов NaF не влияет на цвет облучаемого участка стекла. Необлученная область стекла также прозрачна из-за меньшей концентрации наночастиц.

Выводы

Исследовано влияние хлора на спектральные свойства наноструктур серебра, сформированных ионным обменом в ФТР стекле. Установлено, что наночастицы серебра с максимумом поглощения на 400 nm образуются в $\text{Na}^+\text{-Ag}^+$ ионообменных слоях бесхлоридного ФТР стекла. Показано, что образования нанокристаллов NaF в бесхлоридном ФТР стекле не происходит. Показатель преломления УФ облученной области этого стекла не изменился по сравнению с необлученной областью и составил величину 1.494. В таком стекле возможна запись только амплитудных решеток. Впервые синтезировано и исследовано хлоридное ФТР стекло с ионообменными слоями серебра. Введение хлора в состав стекла приводит к различному соотношению $\text{Ce}^{3+}/\text{Ce}^{4+}$

в синтезированном стекле по сравнению с ФТР стеклом, не содержащим хлоридов. Выявлено также увеличение концентрации внедренного в стекло серебра, связанное с меньшей связностью сетки стекла. В результате фото-термо-индуцированной кристаллизации нанокристаллы NaF формировались вокруг наночастиц типа ядро-оболочка в облученной области стекла. Формирование галогенидной оболочки смещает полосу поглощения наночастиц серебра в длинноволновую область спектра до 438 nm. Показатель преломления облученной области для стекла с хлором отличался от показателя преломления необлученной области на $\Delta n = -3 \cdot 10^{-3}$. Этот эффект может быть использован для записи амплитудно-фазовых решеток в ионообменном ФТР стекле с хлором.

Благодарности

Авторы благодарят Р.К. Нурыева за проведение рентгенофазового анализа.

Финансирование работы

Эта работа была финансово поддержана Российским научным фондом (проект № 20-19-00559).

Конфликт интересов

Авторы заявляют, что у них нет конфликта интересов.

Список литературы

- [1] N.V. Nikonorov, E.I. Panysheva, I.V. Tunimanova, A.V. Chukharev. *Glas. Phys. Chem.*, **27** (3), 241–249 (2001). DOI: 10.1023/A:1011392301107
- [2] Y.M. Sgibnev, N.V. Nikonorov, A.I. Ignatiev. *J. Lumin.*, **188**, 172–179 (2017). DOI: 10.1016/j.jlumin.2017.04.028
- [3] Y.M. Sgibnev, N.V. Nikonorov, A.I. Ignatiev. *J. Lumin.*, **176**, 292–297 (2016). DOI: 10.1016/j.jlumin.2016.04.001
- [4] Y. Sgibnev, B. Asamoah, N. Nikonorov, S. Honkanen. *J. Lumin.*, **226**, 117411 (2020). DOI: 10.1016/j.jlumin.2020.117411
- [5] J.E. Pierson, S.D. Stokey. Patent 4017318 US, 1977.
- [6] S.D. Stokey, G.H. Beal, J.E. Pierson. *J. Appl. Phys.*, **49** (10), 5114–5123 (1978). DOI: 10.1063/1.324458
- [7] А.В. Доценко, А.М. Ефремов, В.К. Захаров. *Физика и химия стекла*, **11** (5), 592–595 (1985).
- [8] Л.Б. Глебов, Н.В. Никоноров, Е.И. Панышева, Г.Т. Петровский, В.В. Саввин, И.В. Туниманова, В.А. Цехомский. *ДАН СССР*, **314** (4), 849–853 (1990).
- [9] Л.Б. Глебов, Н.В. Никоноров, Е.И. Панышева, И.В. Туниманова, В.В. Саввин, В.А. Цехомский. В сб.: *Тезисы докладов VII Всесоюзной конференции по радиационной физике и химии неорганических материалов* (Рига, Изд. ИФ АН Латв. ССР, 1989), ч. 2, с. 527.
- [10] O.M. Efimov, L.B. Glebov, L.N. Glebova, K.C. Richardson, V.I. Smirnov. *Appl. Opt.*, **38** (4), 619–627 (1999). DOI: 10.1364/ao.38.000619
- [11] J. Lumeau, E.D. Zanotto. *Int. Mater. Rev.*, **62** (6), 348–366 (2017). DOI: 10.1080/09506608.2016.1264132
- [12] N. Nikonorov, S. Ivanov, V. Dubrovin, A. Ignatiev. *Holographic Materials and Optical Systems* (IntechOpen, London, 2017), p. 435–462. DOI: 10.5772/66116
- [13] V.D. Dubrovin, A.I. Ignatiev, N.V. Nikonorov. *Opt. Mater. Express.*, **6** (5), 1701–1713 (2016). DOI: 10.1364/OME.6.001701
- [14] V. Dubrovin, N. Nikonorov, A. Ignatiev. *Opt. Mater. Express.*, **7** (7), 2280–2292 (2017). DOI: 10.1364/OME.7.002280
- [15] J.J. Mock, D.R. Smith, S. Schultz. *Nano Lett.*, **3** (4), 485–491 (2003). DOI: 10.1021/nl0340475
- [16] E.M. Sgibnev, A.I. Ignatiev, N.V. Nikonorov, A.M. Efimov, E.S. Postnikov. *J. Non. Cryst. Solids.*, **378**, 213–226 (2013). DOI: 10.1016/j.jnoncrysol.2013.07.010
- [17] J. Lumeau, L. Glebova, V. Golubkov, E.D. Zanotto, L.B. Glebov. *Opt. Mater.*, **32** (1), 139–146 (2009). DOI: 10.1016/j.optmat.2009.07.007
- [18] Y. Sgibnev, N. Nikonorov, A. Ignatiev, V. Vasilyev, M. Sorokina. *Opt. Express.*, **24** (5), 4563–4572 (2016). DOI: 10.1364/oe.24.004563
- [19] L.B. Glebov, N.V. Nikonorov, E.I. Panysheva, I.V. Tunimanova, M.V. Kharchenko. *Opt. Spectrosc.*, **68** (4), 471–473 (1990).
- [20] M. Colburn. In: *2020 IEEE International Electron Devices Meeting (IEDM)*, (2020), p. 33.3.1–33.3.4. DOI: 10.1109/IEDM13553.2020.9372103
- [21] K. Yin, Z. He, J. Xiong, J. Zou, K. Li, S.T. Wu. *J. Phys. Photonics.*, **3** (2), 022010 (2021). DOI: 10.1088/2515-7647/abf02e
- [22] Y.M. Sgibnev, N.V. Nikonorov, V.N. Vasilev, A.I. Ignatiev. *J. Light. Technol.*, **33** (17), 3730–3735 (2015). DOI: 10.1109/JLT.2015.2456239
- [23] Y. Sgibnev, N. Nikonorov, A. Ignatiev. *Appl. Sci.*, **11** (9), 3891 (2021). DOI: 10.3390/app11093891
- [24] J.M. White, P.F. Heidrich. *Appl. Opt.*, **15** (1), 151–155 (1976). DOI: 10.1364/AO.15.000151
- [25] A.L. Patterson. *Phys. Rev.*, **56** (10), 978 (1939). DOI: 10.1103/PhysRev.56.978
- [26] S. Devesa, A.P. Rooney, L.C. Costa, M.P. Gra-a, D. Cooper. *Mater. Sci. Eng. B*, **263**, 114830 (2021). DOI: 10.1016/j.mseb.2020.114830
- [27] D. Agency, M.M. Ndamitso, A.S. Abdulkareem, J.T. Oladejo, D.T. Shuaib, A.K. Mohammed, A. Sumaila. *Adv. Nat. Sci. Nanosci. Nanotechnol.*, **10** (4), 045013 (2019). DOI: 10.1088/2043-6254/ab52f7
- [28] I.N. Leontyev, A.B. Kuriganova, M. Allix, A. Rakhmatullin, P.E. Timoshenko, O.A. Maslova, A.S. Mikheykin, N.V. Smirnova. *Phys. Stat. Sol.*, **255** (10), 1800240 (2018). DOI: 10.1002/pssb.201800240
- [29] A.O. Bokuniaeva, A.S. Vorokh. *J. Phys. Conf. Ser.*, **1410** (1), 012057 (2019). DOI: 0.1088/1742-6596/1410/1/012057
- [30] G.W. Arnold. *J. Appl. Phys.*, **46** (10), 4466–4473 (1975). DOI: 10.1063/1.321422
- [31] H. Hövel, S. Fritz, A. Hilger, U. Kreibitz. *Phys. Rev. B — Condens. Matter Mater. Phys.*, **48** (1), 18178–18188 (1993). DOI: 10.1103/PhysRevB.48.18178
- [32] X. Wang, G. Zhang, G. Li, R. Lou, Z. Sun, X. Xie, W. Li, G. Cheng. *Micromachines.*, **12** (6), 615 (2021). DOI: 10.3390/mi12060615
- [33] J.A. Jiménez, M. Sendova, H. Liu. *J. Lumin.*, **131**, 535–538 (2011). DOI: 10.1016/j.jlumin.2010.09.023
- [34] T. Findakly. *Opt. Eng.*, **24** (2), 244–250 (1985). DOI: 10.1117/12.7973463
- [35] B. Pantchev, Z. Nikolov. *IEEE J. Quantum Electron.*, **29** (9), 2459–2465 (1993). DOI: 10.1109/3.247703
- [36] H. Sanaeepur, A.E. Amooghin, A. Kargari, M. Omidkhah, A.F. Ismail, S. Ramakrishna. *Iran. J. Chem. Eng.*, **16** (2), 70–94 (2019).
- [37] L. Zhang, Y. Xia, X. Shen, W. Wei. *J. Mater. Res.*, **33** (16), 2434–2439 (2018). DOI: 10.1557/jmr.2018.228
- [38] F. Wang, Z. Li, H. Wang, M. Chen, C. Zhang, P. Ning, H. He. *Nano Res.*, **15** (1), 452–456 (2022). DOI: 10.1007/s12274-021-3501-1
- [39] N.V. Nikonorov, A.I. Sidorov, V.A. Tsekhomski, K.E. Lazareva. *Condensed-Matter Spectrosc.*, **107** (5), 705–707 (2009). DOI: 10.1134/S0030400X09110058
- [40] Mie Calculator [Электронный ресурс]. URL: <https://physics.itmo.ru/ru/mie#/materials>
- [41] Z. Fu, J. Zhao, Y. Dai, R. Liu. *J. Nucl. Mater.*, **543**, 152560 (2021). DOI: 10.1016/j.jnucmat.2020.152560
- [42] J. Lumeau, K. Chamma, L. Glebova, L.B. Glebov. *J. Non. Cryst. Solids.*, **405**, 188–195 (2014). DOI: 10.1016/j.jnoncrysol.2014.09.019
- [43] Y. Zhang, X. Wang, G. Zhang, R. Stoian, G. Cheng. *Nanomaterials.*, **11** (6), 1432 (2021). DOI: 10.3390/nano11061432
- [44] L.A. Siiman, J. Lumeau, L. Canioni, L.B. Glebov. *Opt. Lett.*, **34** (17), 2572 (2009). DOI: 10.1364/ol.34.002572