

II. Фото-термо-рефрактивные стекла для новых приложений в голографии, метрологии и лазерной технике

Н. В. Никоноров, С. А. Иванов, И. С. Пичугин

Санкт-Петербургский национальный исследовательский университет информационных технологий, механики и оптики, Санкт-Петербург, Россия

В работе рассмотрены вопросы создания новых фото-термо-рефрактивных (ФТР) стекол, исследования их физико-химических свойств и применения в голографии, метрологии и лазерной технике.

Ключевые слова: фото-термо-рефрактивное стекло, показатель преломления, нанокристаллы, лазерная техника, метрология.

Цитирование: Никоноров, Н. В. Фото-термо-рефрактивные стекла для новых приложений в голографии, метрологии и лазерной технике / Н. В. Никоноров, С. А. Иванов, И. С. Пичугин // HOLOEXPO 2018 : XV международная конференция по голографии и прикладным оптическим технологиям : Тезисы докладов. — М. : МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2018. — С. 43–44.

Новые фторидные, хлоридные и бромидные ФТР стекла разработаны в Университете ИТМО (Санкт-Петербург) [1, 2]. В этих стеклах в результате облучения УФ излучением и последующей термообработки вырастают наночастицы серебра и нанокристаллы фторида натрия (NaF), хлорида (AgCl) и бромида (AgBr) серебра в виде оболочки на серебряной наночастице. Формирование кристаллической фазы в облученной области приводит к изменению показателя преломления, достигающему значения $\Delta n \approx 10^{-3}$. Для фторидных ФТР стекол Δn отрицательное, для хлоридных и бромидных ФТР стекол Δn положительное. Наведенные потери в ФТР стеклах обусловлены прежде всего полосой поглощения наночастиц серебра в спектральной области 420–450 нм. Для фторидных ФТР стекол наведенные потери малы и не превышают $0,1 \text{ см}^{-1}$, для хлоридных и бромидных стекол наведенные потери могут превышать 100 см^{-1} . Эти потери могут быть уменьшены до $0,1 \text{ см}^{-1}$ за счет технологии обесцвечивания с использованием импульсного лазерного излучения ($\lambda \approx 1 \text{ мкм}$) фемтосекундной длительности [3]. Такое обесцвечивание приводит к фотофрагментации серебряных наночастиц, при этом кристаллическая оболочка (AgCl, AgBr) сохраняется. Различие в показателях преломления облученной и необлученной области позволяет записывать фазовые (для случая фторидных ФТР стекол) или амплитудно-фазовые (для хлоридных и бромидных ФТР стекол) голограммы. В свою очередь, амплитудно-фазовые голограммы на хлоридных и бромидных ФТР стеклах могут быть преобразованы в чисто фазовые за счет технологии обесцвечивания.

Можно отметить следующие достоинства ФТР стекол и голограмм на их основе.

Голограммы (в том числе, брэгговские решетки) могут быть записаны на большой глубине (0,1–10 мм). Записанные элементы имеют высокую дифракционную эффективность (до 99 %), а также угловую (0,1 мрад) и спектральную (0,1 нм) селективность. Голограммы, записанные в ФТР стекле, обладают высокой химической устойчивостью, механической и термической прочностью, которые близки коммерческому оптическому стеклу К8 (зарубежный аналог BK7). Кроме

того, они выдерживают воздействие мощного непрерывного и импульсного лазерного излучения. Пороги оптического пробоя ФТР стекла близки к порогам пробоя коммерческого оптического стекла BK7: 30–40 Дж/см² при импульсном облучении (8 нс, $\lambda = 1064 \text{ нм}$) и 100 кВт/см² при непрерывном облучении ($\lambda = 1095 \text{ нм}$) [4]. Также стоит отметить, что голограммы могут выдерживать многократный нагрев до высоких температур (450 °C) без потери своих свойств.

Достоинством ФТР стекол, как материала для записи голограмм, также является его однородность (флуктуации показателя преломления в объеме порядка 10^{-5}) и воспроизводимость характеристик как при синтезе исходного стекла, подобно оптическому стеклу К8 (BK7), так и при фото-термо-индуцированной кристаллизации. ФТР стекла допускают применение традиционных методов механической обработки — шлифование и полирование, а также разнообразные технологии формования (например, прессование, молирование и создание асферических поверхностей). Также возможна вытяжка оптического волнока из ФТР стекла. Изготовление ФТР стекла можно осуществлять как в лабораторных (до 5–10 кг), так и в промышленных (до 300 кг) условиях с использованием простой и нетоксичной технологии. При этом химические реактивы, необходимые для синтеза стекла, являются коммерчески доступными и недорогими.

Следует также отметить некоторые необычные для регистрирующих сред свойства ФТР стекол.

Так, ФТР стекла содержат щелочную компоненту (ионы натрия), и к таким стеклам применима ионообменная технология, которая позволяет создавать ионообменные оптические волноводы, а также упрочнять поверхность за счет сжимающих диффузионных напряжений [5]. Ионообменная технология позволяет повышать механическую, термическую и оптическую прочность ФТР стекла, а также его химическую устойчивость.

В работе [6] показано, что скорость травления закристаллизованной области материала в 10^{-15} раз выше скорости травления исходного стекла. Этот эффект позволяет создавать трехмерные микрофлюидные

структуры в объеме ФТР стекла. В работе [7] показана возможность легирования ФТР стекол редкоземельными ионами (неодимом, иттербием, эрбием), что открывает возможность записи брэгговских решеток непосредственно внутри активной среды, т. е. позволяет создавать лазеры с распределенным брэгговским отражателем и с распределенной обратной связью.

Отмеченные особенности ФТР стекол позволили в настоящей работе разработать и продемонстрировать широкий спектр голографических оптических элементов и устройств для лазерной техники и метрологии:

— сверхузкополосные спектральные фильтры (ширина полосы до 5 нм) для повышения спектральной

яркости и температурной стабилизации длины волны излучения лазерных диодов [8] (совместно с ФТИ им. А. Ф. Иоффе РАН),

— голографические призмы на основе мультиплексных брэгговских решеток (более 20 решеток, записанных в единичном объеме) для высокоточных угловых измерений [9] (совместно с концерном «ЦНИИ «Электроприбор»),

— метки для коллиматорных голографических прицелов [10] (совместно с МГТУ им. Н. Э. Баумана).

Список источников

- [1] **Nikonorov, N.** New photo-thermo-refractive glasses for holographic optical elements: properties and applications / N. Nikonorov, S. Ivanov, V. Dubrovin, A. Ignatiev // Chapter 19 in book of Holographic materials and optical systems, edited by I. Nayadenova, D. Nazarova and T. Babeva, InTech. — 2017. — P. 435–461.
- [2] **Dubrovin, V.** Bromide photo-thermo-refractive glass for volume Bragg gratings and waveguide structure recording / V. Dubrovin, N. Nikonorov, A. Ignatiev // Optical Materials Express. — 2017. — Vol. 7. — № 7. — P. 2280–2292.
- [3] **Klyukin, D.** Volume Bragg gratings in chloride photo-thermo-refractive glass after femtosecond laser bleaching / D. Klyukin, V. Krykova, S. Ivanov, P. Obraztsov, M. Silvennoinen, N. Nikonorov // Optical Materials Express. — 2017. — Vol. 7. — № 11. — P. 4131–4137.
- [4] **Glebov, L.** Fluorinated silicate glass for conventional and holographic optical elements / L. Glebov // Window and Dome Technologies and Materials X. Proc. of SPIE. — 2007. — Vol. 6545. — P. 654507.
- [5] **Sgibnev, Y. M.** Optical gradient waveguides in photo-thermo-refractive glass formed by ion exchange method / Y. M. Sgibnev, N. V. Nikonorov, V. N. Vasilev, A. I. Ignatiev // Journal of Lightwave Technology. — 2015. — Vol. 33. — № 17. — P. 3730–3735.
- [6] **Sgibnev, Y.** Photostructurable photo-thermo-refractive glass / Y. Sgibnev, N. Nikonorov, A. Ignatiev, V. Vasilev, M. Sorokina // Optics Express. — 2016. — Vol. 24. — № 5. — P. 4563–4572.
- [7] **Nikonorov, N. V.** Effect of rare-earth-dopants on Bragg gratings recording in PTR glasses / N. V. Nikonorov, S. A. Ivanov, D. A. Kozlova, I. S. Pichugin // Proceedings of SPIE. — 2017. — Vol. 10233. — P. 102330.
- [8] **Ivanov, S. A.** Narrowing of the emission spectra of high-power laser diodes with a volume Bragg grating recorded in photo-thermo-refractive glass / S. A. Ivanov, N. V. Nikonorov, A. I. Ignatiev, V. V. Zolotarev, Ya. V. Lubyanskiy, N. A. Pikhtin, I. S. Tarasov // Semiconductors. — 2016. — Vol. 50. — № 6. — P. 819–823.
- [9] **Angervaks, A. E.** Holographic prism made from photo-thermo-refractive glass: requirements and possibilities / A. E. Angervaks, K. S. Gorokhovskii, V. A. Granovskii, Van Bac Doan, S. A. Ivanov, R. A. Okun', N. V. Nikonorov, A. I. Ryskin // Optics and spectroscopy. — 2017. — Vol. 123. — № 6. — P. 970–976.
- [10] **Ivanov, S. A.** Recording holographic marks for telescopic systems in photo-thermo-refractive glass / S. A. Ivanov, A. E. Angervaks, A. S. Shcheulin, A. I. Ignatiev, N. V. Nikonorov // Optics and spectroscopy. — 2014. — Vol. 117. — № 6. — P. 971–976.

Photo-thermo-refractive glasses for new applications in holography, metrology and laser technology

N. V. Nikonorov, S. A. Ivanov, I. S. Pichugin

Saint Petersburg National Research University of Information Technology, Mechanics and Optics, Saint Petersburg, Russia

This work presents issues of development of a new photo-thermo-refractive (PTR) glasses, the research of its physical and chemical properties and applications in holography, metrology and laser technology.

Keywords: Photo-thermo-refractive glasses, Refractive index, Nanocrystals, Metrology, Laser technology.