

Запись ДОЭ в поверхностном слое ФТР стекла с помощью фемтосекундного лазера

Д.В. Кузьмин¹, В.Ю. Железнов¹, С.Б. Одинок¹, А.Ю. Бетин¹, Н.В. Никоноров²,
С.А. Иванов²

¹Московский государственный технический университет имени Н. Э. Баумана, 2-я Бауманская 5, стр.1, Москва, Россия, 105005

²Санкт-Петербургский национальный исследовательский университет информационных технологий, механики и оптики, Кронверкский пр. 49, Санкт-Петербург, Россия, 197101

Аннотация. В этой статье представлены результаты эксперимента, в котором были записаны, в поверхностном слое ФТР стекла, зоны с дифракционными оптическими элементами, с разной частотой и энергией в импульсе, с помощью импульсного фемтосекундного лазера ближнего ИК-диапазона.

1. Введение

Фототерморефрактивные (ФТР) стекла, как голографическая среда, уже давно зарекомендовали себя для записи высокоэффективных объемных голографических и дифракционных элементов, используемых в лазерной технике: узкополосных зеркал, спектральных и пространственных фильтров, сумматоров лазерных пучков и т.д. Также на основе (классических) ФТР стекол изготавливаются голографические дифракционные оптические элементы, которые можно использовать в системах оптической связи, системах записи, хранения и обработки информации. Классические ФТР стекла и оптические элементы на их основе имеют следующие достоинства: высокий прирост показателя преломления ($\Delta n \approx 5 \cdot 10^{-4}$), высокая дифракционная эффективность (до 95%), большая толщина голограммы (несколько мм), неограниченный срок хранения голограммы (десятки лет), высокая термическая, механическая и оптическая прочность (эти характеристики близки к промышленному оптическому стеклу К8). В ФТР стекле можно записать решетки с пространственной частотой до 10000 мм^{-1} благодаря малому размеру кристаллической фазы стекла (от 10 до 40 нм). Кроме этого, малый размер нанокристаллов значительно уменьшает уровень светорассеяния на границе кристаллической и стеклообразной фазы. Наведенные оптические потери в ФТР стекле могут достигать $0,1 \text{ см}^{-1}$ для видимой области и $0,01 \text{ см}^{-1}$ для ближней инфракрасной области спектра. Несмотря на то, что данный материал предназначен, в первую очередь, для записи объемных трехмерных (толстых) фазовых решеток Брэгга, возможность записи, в толстой фоточувствительной среде, двумерной (тонкой) решетки, также остается актуальной в наше время. Поэтому целью нашей работы, является запись дифракционного оптического элемента (ДОЭ), на поверхности ФТР стекла.

2. Общая характеристика ФТР стекол

Фототерморепрозрачные стекла были созданы на основе фоточувствительных стекол системы $\text{Na}_2\text{O-ZnO-Al}_2\text{O}_3\text{-SiO}_2\text{-NaF}$, которые были впервые разработаны сотрудниками компании Corning (США) S.D. Stokey, J.E. Pirson, G.H. Beall в 1977 и получили первоначальное название как название «полихромные» стекла (ПХС) [1-3]. В тоже время в России велась разработка фоточувствительных сред, названных «мультихромными» стеклами (МХС) [4-5]. В состав ПХС/МХС помимо стеклообразователей Na_2O , Al_2O_3 , ZnO и SiO_2 входят следующие добавки: фоточувствительные компоненты, играющие роль доноров электронов (церий), акцепторы электронов (серебро, сурьма, олово), а также галогениды (фтор, бром) которые участвуют в образовании кристаллической фазы. Позже в конце 1980-х начале 90-х годов сотрудниками ГОИ Л.Б. Глебовым и Н.В. Никоноровым было предложено использовать МХС для записи трехмерных фазовых голограмм [6-8]. В отличие от процесса окраски ПХС и МХС в данном случае применялась лишь одна стадия УФ облучения и термообработки. При разработке методов УФ облучения и термообработки особое внимание авторы уделяли разнице показателей преломления между облученной и не облученной областями, т.е разницей в показателях преломления кристаллической и стеклообразной фаз. В результате были разработаны фоточувствительные среды, которые впоследствии авторы [9] стали называть фототерморепрозрачными (ФТР) стеклами.

Фототерморепрозрачные стекла – это особый класс фоточувствительных неорганических материалов, которые созданы для записи высокоэффективных термостабильных объемных брэгговских решеток. Изменение показателя преломления в ФТР-стекле происходит за счет процесса фототермоиндуцированной кристаллизации (Рисунок 1).

Добавки, определяющие физико-химические характеристики стекла, как голографической среды: ионы трехвалентного церия определяют спектральную фоточувствительность стекла и являются донорами фотоэлектронов; ионы серебра и сурьмы выполняют роль акцепторов фотоэлектронов. Так, ионы серебра участвуют в захвате фотоэлектронов и формировании серебряных кластеров и наночастиц, выполняющих роль центров кристаллизации, ионы брома и фтора участвуют в процессе кристаллизации с образованием на серебряных наночастицах оболочки из бромида серебра и наноразмерных кристаллов фторида натрия.

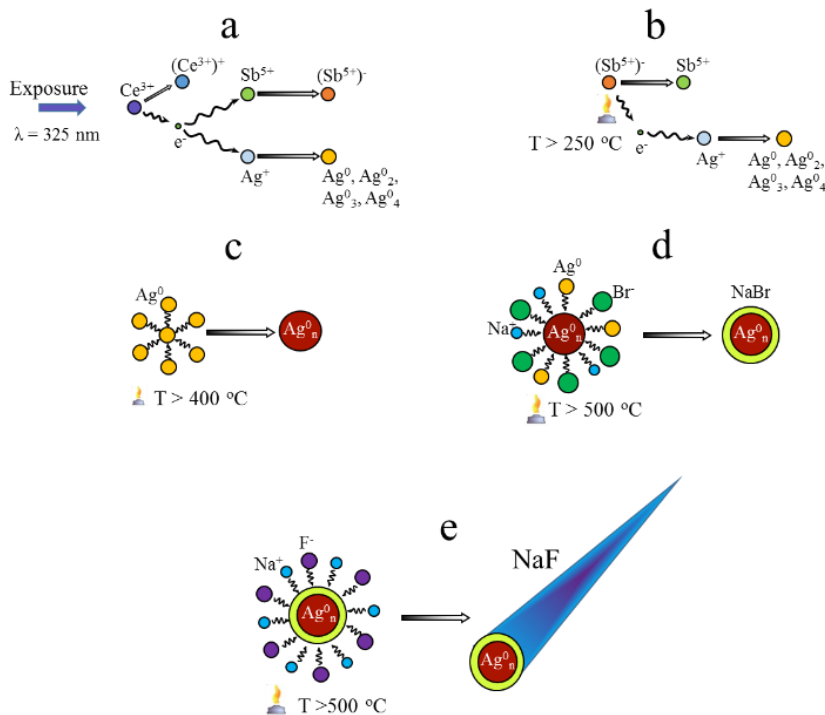


Рисунок 1. Процесс фототермоиндуцированной кристаллизации в фототерморепрозрачном стекле, а – фотоионизация церия и захват электрона сурьмой, б – освобождение электрона сурьмой и захват его серебром с образованием молекулярных кластеров, в – агрегация атомов серебра в коллоиды, с последующим образованием серебряных наночастиц, г – формирование оболочки на серебряной наночастице, д – рост кристалла фторида натрия.

3. Запись ДОЭ в ФТР стекле

В основе записи голограммы лежит двухступенчатый процесс фототермоиндуцированной кристаллизации стекла [10]. На первом этапе производится запись интерференционной картины ультрафиолетовым (УФ) лазером $\lambda = 325$ нм, длина волны излучения которого близка к полосе поглощения Ce^{3+} ($\lambda_{\text{max}} \approx 310$ нм). Световой пучок может быть пространственно модулирован (цифровыми данными), как в случае двухлучевой голографии или проекционной схемы, в случае поэлементной записи пучок фокусируется до необходимых размеров.

На втором этапе повышение температуры (до 500°C) ведет сначала к росту на коллоидных частицах серебра оболочки из AgBr и NaBr и затем к росту на этой структуре кристаллической фазы NaF . Изменение показателя преломления ФТР стекла составляет $\Delta n = 9,7 \cdot 10^{-4}$ при экспозиции 2 Дж/см². В этом случае дифракционные оптические элементы, имеют большую толщину от 1 до 10 мм, благодаря которой они обладают высокой угловой ($\delta < 1$ угл. мин) и спектральной ($\Delta\lambda < 0,1$ нм) селективностью.

Для того, чтобы получить двумерный (тонкий) дифракционный оптический элемент в поверхностном слое, использовалась нелинейная фоточувствительность ФТР стекла. При облучении стекла короткими импульсами ближнего ИК-диапазона (Рисунок 2), происходит трёхфотонная фотоионизация. В стеклянной матрице образуются свободные электроны, которые необходимы для восстановления ионов серебра и образования наночастиц. В качестве источника излучения использовался иттербиевый фемтосекундный волоконный лазер, с длиной волны 1030 нм и длительностью импульса 200 фс.

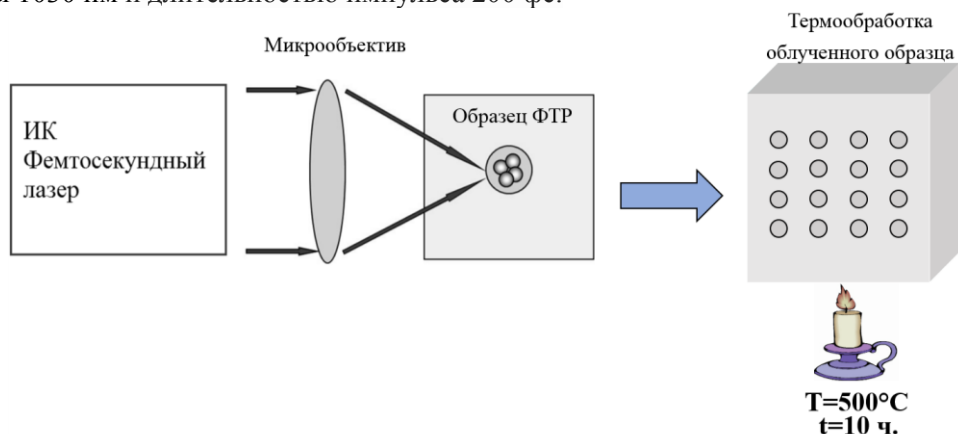


Рисунок 2. Схема записи фемтосекундным лазером.

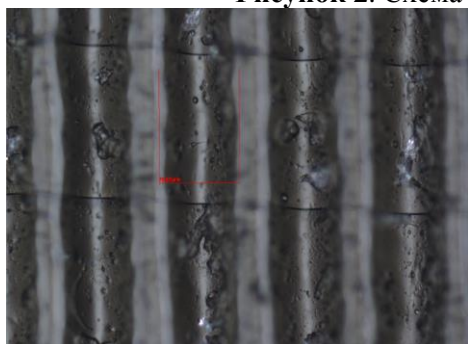


Рисунок 3. Фотография микроканавки ДОЭ сделанная с увеличением 200х.

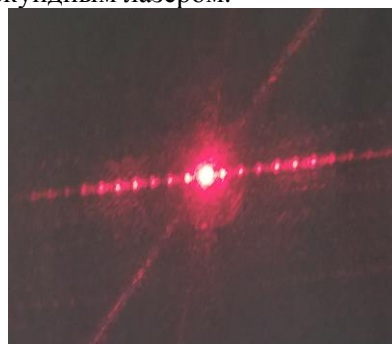


Рисунок 4. Фотография дифракции He-Ne-лазера на длине волны 633 нм на решетках в ФТР стекле, полученных при записи фемтосекундным лазером.

На поверхности образца были записаны разные зоны с ДОЭ, в которых при записи изменялась частота и энергия в импульсе. Полученный образец исследовался под микроскопом, и в дальнейшем проходил термообработку. Полученная на образце дифракция представлена на Рисунке 4. На Рисунке 5, видно, что на образце есть зоны, где процесс фототермоиндуцированной кристаллизации стекла не произошел, в связи с низкой мощностью

излучения и нелинейной фоточувствительностью стекла на данной длине волны. И также есть зоны, где в связи с высокой мощностью излучения, образец стекла начал разрушаться, произошло гравирование с абляцией, и в результате получились микроканавки (Рисунок 3).

4. Заключение

В результате данной работы, с помощью импульсного фемтосекундного лазера ближнего ИК-диапазона, был записан на поверхности, толстой фоточувствительной среды, двумерный дифракционный оптический элемент (Рисунок 5).

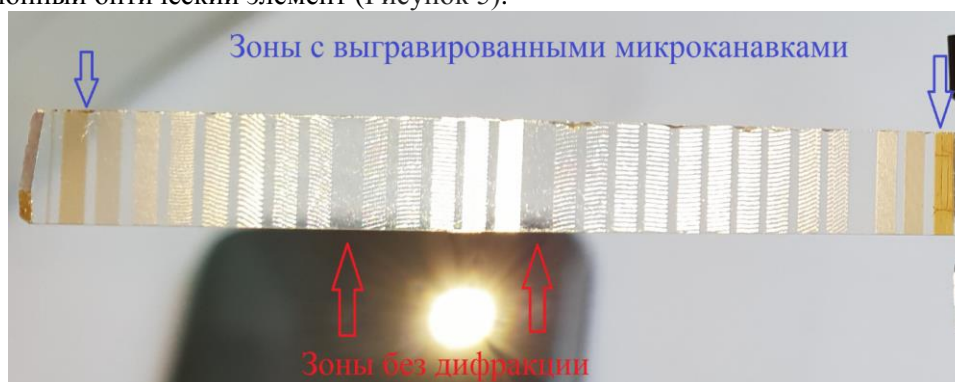


Рисунок 5. Фотография образца, после термообработки.

5. Литература

- [1] Суханов, В.И. Оптическая голография с записью в трехмерных средах / В.И Суханов, М.В. Хазова. – Л.: Наука, 1989. – С. 86-105.
- [2] Stookey, S.D. Full-color photosensitive glass / S.D. Stookey, G.H. Beall, J.E. Pierson // J. Appl. Phys. – 1978. – Vol. 49(10). – P. 5114. DOI:10.1063/1.324458.
- [3] Pierson, J.E. United States Patent 4,057,408 / J.E. Pierson, S.D. Stookey, 1977
- [4] Pierson, J.E. United States Patent 4,017,318 / J.E. Pierson, S.D. Stookey, 1977.
- [5] Panysheva, E.I. A Study of Coloring in Polychromatic Glasses / E.I. Panysheva, I.V. Tunimanova, V.A. Tsekhomskii // Fiz Khim Stekla. – 1990. – Vol. 16(2). – P. 239-244. (in Russian).
- [6] Dotsenko, A.V. On the Absorption Spectra of Polychromatic / A.V. Dotsenko, A.M. Efimov, V.K. Zakharov, E.I. Panysheva, I.V. Tunimanova // Fiz Khim Stekla. – 1985. – Vol. 11(5). – P. 592-595. (in Russian).
- [7] Glebov, L.B. New Possibilities of Photosensitive Glasses for the Recording of Volume Phase Diagrams / L.B. Glebov, N.V. Nikonorov, E.I. Panysheva // Opt. Spektros. – 1992. – Vol. 73(2). – P. 404-412. (in Russian).
- [8] Kuchinskii, S.A. Properties of Volume Phase Holograms on Polychromatic Glasses / S.A. Kuchinskii, N.V. Nikonorov, E.I. Panysheva, V.V. Savvin, I.V. Tunimanova // Opt. Spektrosk. – 1991. – Vol. 70(6). – P. 1286-1300. (in Russian).
- [9] Nikonorov, N.V. Polychromatic Glasses-A New Medium for Optical Data Recording / N.V. Nikonorov, E.I. Panysheva // All-Union Conference "Optical Image and Recording Media". – Leningrad: GOI. – 1990. – Vol. 2. – P. 48. (in Russian).
- [10] Glebov, L.B. Laser Damage Resistance of Photo-Thermo-Refractive Glass Bragg Gratings / L.B. Glebov, L.N. Glebova, V.I. Smirnov, F.L. Tel, M. Dubinskii, L.D. Merkle // East. – 2004. – P. 4-8.

Recording of diffraction optical element in the surface layer of PTR glass by means of a femtosecond laser

D.V. Kudzmin¹, V.Y. Zheleznov¹, S.B. Odinkov¹, A.Y. Betin¹, N.V. Nikonov², S.A. Ivanov²

¹Moscow State Technical University named N.E. Bauman, 2nd Bauman Str. 5, Building 1, Moscow, Russia, 105005

²St. Petersburg National Research University of Information Technologies, Mechanics and Optics, Kronverksky Pr. 49, St. Petersburg, Russia, 197101

Abstract. This article presents the results of the experiment in which in the surface layer of the PTR glass were recorded zones with diffractive optical elements with different frequency and energy per pulse, using a pulsed femtosecond laser in the near IR range.