

48. Запись дифракционных оптических элементов на поверхности ФТР-стекла фемтосекундным лазером

Д. В. Кузьмин¹, В. Ю. Железнов¹, С. Б. Одинокоев¹, А. Ю. Бетин¹, Н. В. Никоноров²,
С. А. Иванов²

¹ Московский государственный технический университет имени Н. Э. Баумана, Москва, Россия

² Санкт-Петербургский национальный исследовательский университет информационных технологий, механики и оптики, Санкт-Петербург, Россия

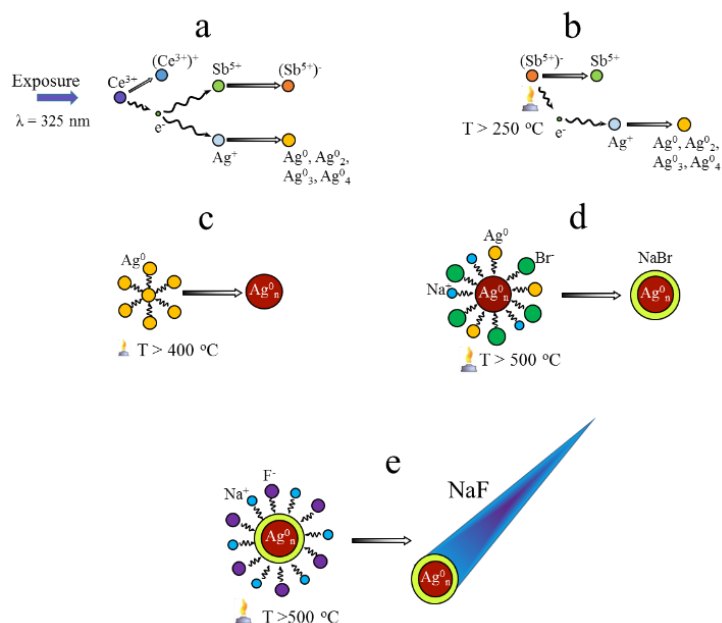
Представлены результаты эксперимента по записи в поверхностном слое ФТР стекла, зон с дифракционными оптическими элементами, с разной экспозицией, с помощью импульсного фемтосекундного лазера ближнего ИК-диапазона.

Ключевые слова: Фемтосекундный лазер, Фототерморелактивное стекло, Дифракционные оптические элементы.

Цитирование: Кузьмин, Д. В. Запись дифракционных оптических элементов на поверхности ФТР-стекла фемтосекундным лазером / Д. В. Кузьмин, В. Ю. Железнов, С. Б. Одинокоев, А. Ю. Бетин, Н. В. Никоноров, С. А. Иванов // HOLOEXPO 2019 : XVI международная конференция по голографии и прикладным оптическим технологиям : Тезисы докладов. — М. : МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2019. — С. 253–257.

Введение

Фототерморелактивные (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 ($\Delta n \approx 5 \times 10^{-4}$), 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 $10\,000\text{ мм}^{-1}$ 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 фоточувстви-



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

Рис. 1. Процесс фототермоиндуцированной кристаллизации в фототерморелаксационном стекле

тельной среде, двумерной (тонкой) решетки, также остается актуальной в наше время. Поэтому целью нашей работы, является запись дифракционного оптического элемента (ДОЭ), на поверхности ФТР стекла.

Общая характеристика ФТР стекол

Фототерморелаксационные стекла были созданы на основе фоточувствительных стекол системы $\text{Na}_2\text{O}-\text{ZnO}-\text{Al}_2\text{O}_3-\text{SiO}_2-\text{NaF}$, 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 показате-

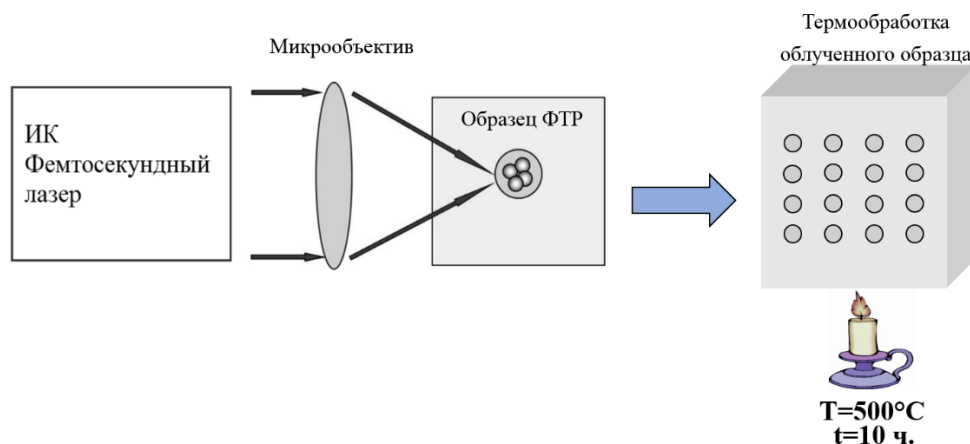


Рис. 2. Схема записи фемтосекундным лазером

лях преломления кристаллической и стеклообразной фаз. В результате были разработаны фоточувствительные среды, которые впоследствии авторы [9] стали называть фототермофрактивными (ФТР) стеклами.

Фототермофрактивные 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, представленном на рисунке 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.

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 $\lambda = 325\text{ нм}$, длина волны излучения которого близка к полосе поглощения Ce_3^+ ($\lambda_{\text{max}} \approx 310\text{ нм}$). 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 $\Delta n = 9,7 \times 10^{-4}$ при экспозиции 2 Дж/см^2 . В этом случае дифракционные оптические элементы, имеют большую толщину от 1 до 10 мм, благодаря которой они обладают высокой угловой ($\delta < 1^{\circ}$) и спектральной ($\Delta\lambda < 0,1\text{ нм}$) селективностью.

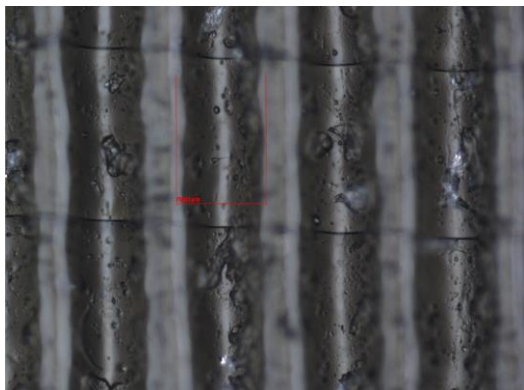


Рис. 3. Фотография микроканавки ДОЭ
сделанная с увеличением 200^х

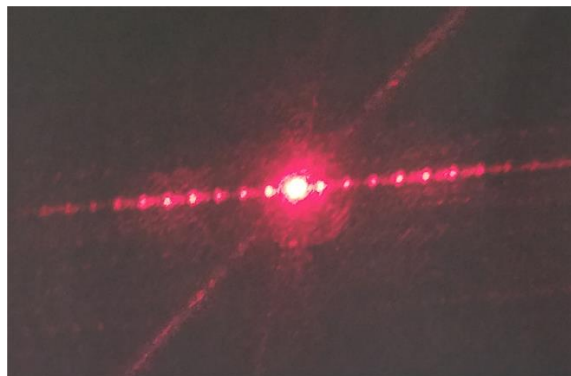


Рис. 4. Фотография дифракции He-Ne
лазера на длине волны 633 нм на
решетках в ФТР стекле, полученных
при записи фемтосекундным лазером

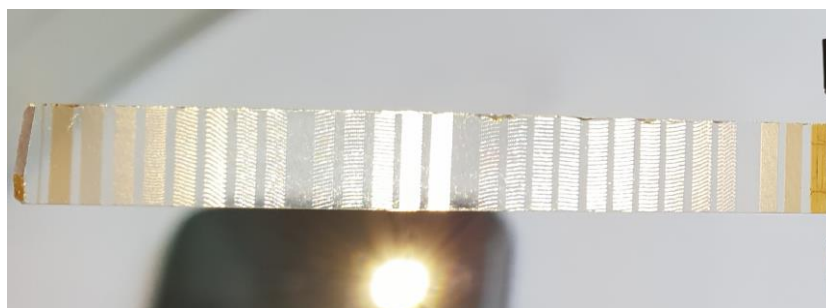


Рис. 5. Фотография образца, после термообработки

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.

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 гравирувание с абляцией, и в результате получились микроканавки (рисунок 3).

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).

Список источников

- [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] **Патент № 4 057 408 US.** Scientific invention / J. E. Pierson, S. D. Stookey, — Оpubл. 1977
- [4] **Патент № 4 017 318 US.** Scientific invention / J. E. Pierson, S. D. Stookey, — Оpubл. 1977.
- [5] **Panysheva, E. I.** A Study of Coloring in Polychromatic Glasses / E. I. Panysheva, I. V. Tunimanova, V. A. Tsekhomski // Fiz Khim Stekla. — Vol. 16. — № 2. — P. 239–244.
- [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.
- [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.
- [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.
- [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.
- [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.