

Исследование экспозиционной характеристики ФТР стекол при записи дифракционных решеток с помощью импульсного фемтосекундного лазера, с излучением в ИК и УФ диапазонах длин волн

В.Ю. Железнов¹, Д.В. Кузьмин¹, С.Б. Одинок¹, А.Ю. Бегин¹, 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 49, Санкт-Петербург, Россия, 197101

Аннотация. В данной статье описан метод записи дифракционных оптических элементов на образцах ФТР стекол, при записи ИК фемтосекундным импульсным лазерным излучением, описан метод их последующей обработки. Представлены результаты исследования измерения зависимости дифракционной эффективности образцов стекол при различных параметрах экспозиции на длинах волн 1030 нм ИК излучения и 343 нм УФ излучения.

1. Введение

Фототерморепрозрачные (ФТР) стекла уже давно хорошо зарекомендовали себя для применения в голографии. 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 (десять лет), высокая термическая, механическая и оптическая прочность (эти характеристики близки к промышленному оптическому стеклу К8).

2. Характеристики ФТР стекол

Фототерморепрозрачные 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). В тоже время в России велась разработка фоточувствительных сред, названных «мультихромными» стеклами (МХС). 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. Основной особенностью данного класса стекол является селективное поглощение в видимой области спектра. Что приводит к тому что ПХС/МХС могут окрашиваться различными цветами под воздействием УФ облучения и последующим термическом воздействии.

ФТР стекло – это силикатное стекло, созданное для записи голографических и дифракционных оптических элементов (узкополосных спектральных и пространственных фильтров, мультиплексоров, селекторов и т.д.), используемых в лазерной технике.

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.

3. Запись дифракционных решеток в ФТР стекле

В основе записи голограммы лежит двухступенчатый процесс фототермоиндуцированной кристаллизации стекла. 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 °С) 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 голограмма записывается по всей толщине стекла. Запись же оптического элемента в тонком слое стекла происходит с помощью фемтосекундных импульсов ближнего ИК диапазона (Рис.1).

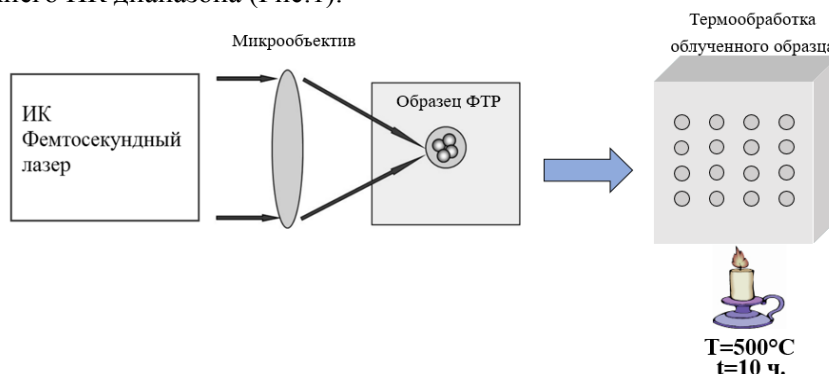


Рисунок 1. Процесс записи ДОЭ на ФТР стекле импульсным фемтосекундным лазером ИК диапазона.

Голограммы, записанные в данном стекле, 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. 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 $0,1$ см⁻¹ для видимой области и $0,01$ см⁻¹ для ближней инфракрасной области спектра. Голограммы на ФТР стекле имеют высокую механическую и химическую прочность. По этим характеристикам ФТР стекло практически не отличается от оптического стекла К8 или его зарубежного аналога ВК7 (Schott).

4. Результаты

Дифракционные оптические элементы были записаны с помощью фемтосекундного ИК лазера на длинах волн 1030 нм и 343 нм. В первом эксперименте образцы фототермоопрефрактивных стекол, в виде плоскопараллельных пластин, облучались УФ излучением с длиной волны 343 нм (третья гармоника), длительность импульса составляла 210 фс, частота следования импульсов 5 МГц. Во втором эксперименте образцы облучались ИК излучением с длиной волны 1030 нм, длительностью импульса 210 фс, частотой следования импульсов 5 МГц. При облучении ИК излучением происходит многофотонная ионизация, в стеклянной матрице образуются свободные электроны, которые необходимы для восстановления ионов серебра и образования наночастиц. После проведенных экспериментов образцы прошли термообработку при температуре 500 °С, время термообработки 10 часов. В результате экспериментов были получены графики зависимости дифракционной эффективности от величины экспозиции.

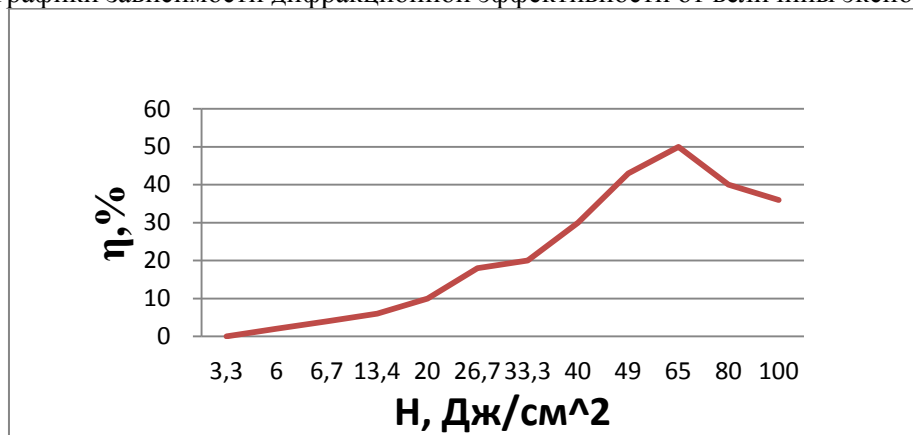


Рисунок 2. Экспозиционная характеристика при записи ДОЭ с помощью ИК излучения.

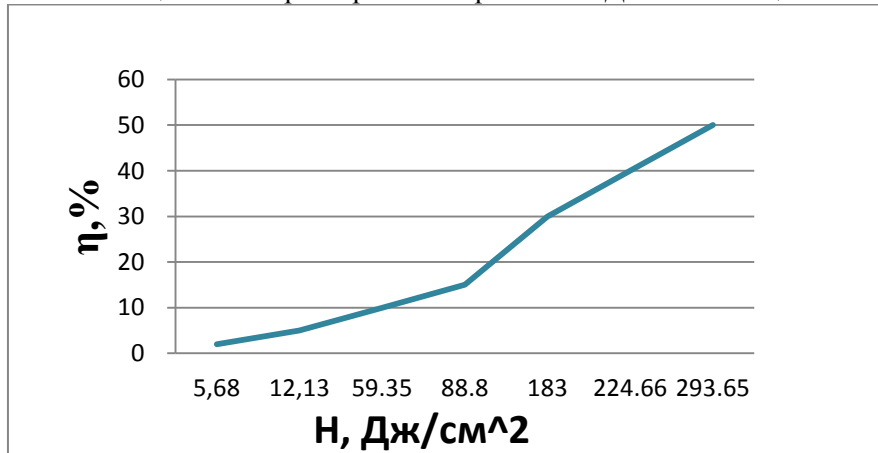


Рисунок 3. Экспозиционная характеристика при записи ДОЭ с помощью УФ излучения.

5. Заключение

Полученные результаты показывают, что при записи на образцах ФТР стекол с помощью ИК фемтосекундного лазера, можно получить дифракционные оптические элементы с достаточно высокой дифракционной эффективностью. Это позволяет использовать ФТР стекла в различных оптических и голографических системах. В дальнейшем будут продолжены исследования в этой области.

6. Литература

- [1] 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).

- [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] Panyшева, Е.И. A Study of Coloring in Polychromatic Glasses / Е.И. Panyшева, I.V. Tunimanova, V.A. Tsekhomskii // *Fiz. Khim. Stekla.* – Vol. 16(2). – P. 239-244. (in Russian).
- [5] Иванов, С.А. Голографические характеристики модифицированного фототерморефрактивного стекла / Иванов С.А. [и др.] // *Оптический журнал.* – 2014. – № 6Б/С.
- [6] Glebov, L.B. New Possibilities of Photosensitive Glasses for the Recording of Volume Phase Diagrams / L.B. Glebov, N.V. Nikonorov, E.I. Panyшева // *Opt. Spektros.* – 1992. – Vol. 73(2). – P. 404-412. (in Russian).
- [7] Glebov, L. Fluorinated silicate glass for conventional and holographic// *Optical Elements.* – 2017. – Vol. 6545(2007). – P. 1-9.
- [8] Nikonorov, N.V. Polychromatic Glasses-A New Medium for Optical Data Recording / N.V. Nikonorov, E.I. Panyшева // *All-Union Conference “Optical Image and Recording Media”.* – Leningrad: GOI. – 1990. – Vol. 2. – P. 48. (in Russian).

Exposure characteristics research of PTR glasses when recording diffraction gratings using a femtosecond laser in IR and UV wavelengths

V.Y. Zheleznov¹, D.V. Kudzmin¹, S.B. Odinkov¹, A.Y. Betin¹, N.V. Nikonorov², 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 describes the method of recording diffractive optical elements on FTR glass samples, when recording infrared femtosecond pulsed laser radiation, and describes the method of their subsequent processing. The results of the study of the measurement of the dependence of the diffraction efficiency of glass samples at various exposure parameters at wavelengths of 1030 nm IR and 343 nm UV radiation are presented.