

УДК 535.5

Запись волноводов в объеме силикатного стекла с помощью ультракоротких лазерных импульсов

Рупасов Алексей Евгеньевич

rupasovan@lebedev.ru

SPIN-код: 5942-6443

Горевой Алексей Владимирович

a.gorevoy@lebedev.ru

Кудряшов Сергей Иванович

kudryashovsi@lebedev.ru

ФГБУН ФИАН, Москва, Россия

Аннотация. Экспериментально изучены процессы прямой лазерной модификации силикатного стекла при частоте следования импульсов 500 кГц. Исследовано влияние энергии (0,15...0,62 мкДж) и скорости записи (50...1000 мкм/с) на геометрию и оптику формируемых структур. Цифровая голографическая микроскопия выявила линейный рост фазового сдвига и поперечных размеров областей модификации с увеличением энергии импульса. Во всех случаях зафиксировано изотропное увеличение показателя преломления ($\sim 10^{-3}$). Оптимальные показатели пропускания (33 %) соответствуют режимам с энергией 0,52 мкДж при скорости до 100 мкм/с. В результате систематизации данных построена диаграмма режимов, позволяющая четко разграничить области: отсутствия модификации, эффективной записи волноводов (шириной от 3 до 15 мкм), режима с центральной неоднородностью и зону абляции. Работа демонстрирует, что использование высокой частоты следования и эффектов тепловой аккумуляции является ключевым фактором для получения волноводов с низкими потерями.

Ключевые слова: прямая лазерная запись, фемтосекундный лазер, силикатное стекло, оптические волноводы, тепловое накопление, цифровая голографическая микроскопия

Economy of reusability of future cosmonautics and issues of efficiency

Rupasov Aleksey Evgenievich

rupasovan@lebedev.ru

SPIN-code: 5942-6443

Gorevoy Aleksey Vladimirovich

a.gorevoy@lebedev.ru

Kudryashov Sergey Ivanovich

kudryashovsi@lebedev.ru

FGBUN LPI, Moscow, Russia

Abstract. The processes of direct laser modification of silicate glass at a pulse repetition rate of 500 kHz have been experimentally studied. The influence of pulse energy (0.15–0.62 μ J) and writing speed (50–1000 μ m/s) on the geometry and optical properties of the formed structures was investigated. Digital holographic microscopy revealed a linear increase in the phase shift and transverse dimensions of the modified regions with increasing pulse energy. In all cases, an isotropic increase in the refractive index ($\sim 10^{-3}$) was recorded. Optimal transmittance values (33%) correspond to regimes with a pulse energy of 0.52 μ J

at speeds up to 100 $\mu\text{m/s}$. As a result of data systematization, a regime diagram was constructed, allowing a clear distinction between the following areas: no modification, efficient waveguide writing (width from 3 to 15 μm), regime with a central inhomogeneity, and the ablation zone. The work demonstrates that the use of a high repetition rate and heat accumulation effects is a key factor for obtaining low-loss waveguides.

Keywords: direct laser writing, femtosecond laser, silicate glass, optical waveguides, thermal storage, digital holographic microscopy

Введение. Оптические волноводы — ключевые элементы фотоники для телекоммуникаций, сенсорики и квантовых технологий. Традиционные методы (ионный обмен, имплантация) ограничены созданием двумерных структур и сложны в реализации [1, 2]. Фемтосекундная лазерная запись, впервые продемонстрированная в 1996 г., позволяет создавать трехмерные структуры внутри объема материалов за счет нелинейного поглощения [1, 3]. В зависимости от энергии импульса возникают модификации с положительным (тип I) или отрицательным (тип II) изменением показателя преломления, лежащие в основе различных геометрий волноводов [2, 4–6]. Высокая частота следования импульсов (>1 МГц) запускает режим теплового накопления, обеспечивающий низкие оптические потери (до 0,2 дБ/см). В данной работе методами цифровой голографической микроскопии исследована запись волноводов типа I в силикатном стекле и определены оптимальные режимы для волноводов с низкими потерями.

Материалы и методы. Для записи волноводов типа I использовалась фемтосекундная лазерная система Satsuma ($\lambda = 1030$ нм, $\tau = 0,3$ пс, частота 500 кГц). Излучение фокусировалось в объеме силикатного стекла микрообъективом с $\text{NA} = 0,25$ (радиус пучка ~ 2 мкм) на глубине 500 мкм. Перемещение образца осуществлялось со скоростью 50...1000 мкм/с. В первом эксперименте варьировалась энергия импульсов (0,2...0,7 мкДж) при фиксированной скорости 100 мкм/с; во втором — скорость сканирования (50...1000 мкм/с) при энергии 0,52 мкДж. Записывались линии длиной 2,5 см. Морфология структур исследовалась методом оптической микроскопии (до $\times 1000$). Фазовый сдвиг проходящего излучения измерялся с помощью цифровой голографической микроскопии на основе интерферометра Маха — Цендера ($\lambda = 633$ нм); обработка интерферограмм выполнялась в MATLAB с использованием алгоритмов пространственно-частотной фильтрации и развертки фазы. Для измерения коэффициента пропускания волноводов собрана установка на базе гелий-неонового лазера и двух микрообъективов ($\text{NA} = 0,55$ и $0,2$), позволяющая вводить и выводить излучение через торцы образца. Пропускание T определялось как отношение мощности на выходе к мощности на входе с учетом потерь в оптике и фонового сигнала.

Результаты. Исследование формирования волноводов в силикатном стекле фемтосекундными импульсами (500 кГц) выявило, что ключевые параметры — энергия и скорость сканирования. Морфология сечений показывает пороговый характер: при низкой энергии модификация отсутствует,

с ростом энергии появляется слабый центр, а максимальный контраст достигается в среднем диапазоне, после чего возникают трещины. Пропускание немонотонно зависит от энергии: растет до пика при оптимальной энергии, затем падает; с увеличением скорости оно снижается из-за ослабления теплового накопления. Зарегистрирован рост показателя преломления ($\Delta n \sim 10^{-3}$), причем фазовый сдвиг и ширина области увеличиваются с энергией и уменьшаются со скоростью. Построена диаграмма режимов, выделяющая зоны отсутствия модификации, оптимальной записи (с максимумом качества), появления неоднородностей и разрушения. Вывод: высокая частота следования и тепловое накопление критичны для создания управляемых низкочастотных волноводов.

Заключение. В работе исследована лазерная модификация силикатного стекла фемтосекундными импульсами (1030 нм, 500 кГц). Методом цифровой голографической микроскопии установлено, что в диапазоне энергий 0,15...0,62 мкДж фазовый сдвиг и размеры структур линейно растут с энергией и уменьшаются с ростом скорости сканирования. Зафиксировано формирование волноводов типа I с изотропным приростом показателя преломления $\sim 10^{-3}$.

Прямые измерения пропускания выявили максимум эффективности ввода 33 % при энергии 0,52 мкДж и скорости 50–100 мкм/с. Построена карта режимов в координатах энергия-скорость, выделяющая области отсутствия модификации, оптимальной записи, режимы с повышенными потерями и зону термодеструкции.

Результаты позволяют оптимизировать запись волноводов для интегральной оптики.

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда (проект № 22-72-10076-П).

Список источников

- [1] Li J., Cao C., Qiu Y., Kuang C., Liu X. Optical Waveguides Fabricated via Femtosecond Direct Laser Writing: Processes, Materials, and Devices. *Advanced Materials Technologies*, 2023, vol. 8, art. no. 2300620.
- [2] Ng J.C., Qian L., Herman P.R. Thermal poling of femtosecond laser-written waveguides in fused silica. *Opt. Lett.*, 2016, vol. 41, no. 5, pp. 1022–1025.
<https://doi.org/10.1364/OL.41.001022>
- [3] Choudhury D., Macdonald J.R., Kar A.K. Ultrafast laser inscription: perspectives on future integrated applications. *Laser Photonics Rev.*, 2014, vol. 8, no. 6, pp. 827–846.
- [4] Corrielli G., Crespi A., Osellame R. Femtosecond laser micromachining for integrated quantum photonics. *Nanophotonics*, 2021, vol. 10, no. 15, pp. 3789–3812.
- [5] Zhang Y., Yu B., Zhang Z., Duan X., Wang J. Developments of Waveguide Lasers by Femtosecond Laser Direct-Writing Technology. *Photonics*, 2024, vol. 11, art. no. 803.
- [6] Davis K.M., Miura K., Sugimoto N., Hirao K. Writing waveguides in glass with a femtosecond laser. *Opt. Lett.*, 1996, vol. 21, no. 21, pp. 1729–1731.