

СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ СПОСОБОВ ЛАЗЕРНОГО ФЕМТОСЕКУНДНОГО ФОРМИРОВАНИЯ ОПТИЧЕСКИХ ВОЛНОВОДОВ

М. А. БУХАРИН^{1,2}, Д. В. ХУДЯКОВ^{2,3}

¹Московский физико-технический институт (государственный университет),
141701, Долгопрудный, Московская область, Россия
E-mail: mikhail.bukharin@phystech.edu

²ООО „Оптосистемы“, 142191, Москва, Россия

³Центр физического приборостроения Института общей физики им. А. М. Прохорова РАН,
142190, Москва, Россия

Представлен сравнительный анализ двух альтернативных способов формирования оптических волноводов на основе экспериментально полученных пространственных профилей показателя преломления кварцевого стекла при фемтосекундной микрообработке. Рассматриваются преимущества и недостатки обеих методик — создания сердцевины волновода с повышенным показателем преломления и создания оболочки волновода с пониженным показателем преломления. Проведен численный анализ влияния наиболее существенных наблюдаемых в ходе эксперимента возмущений на основные параметры волновода: эффективный показатель преломления, диаметр и форму модового распределения, входные и выходные потери на согласование мод со стандартными оптическими волокнами. В качестве основных возмущений при фемтосекундной записи рассмотрены локальное уменьшение пиковой интенсивности лазерного излучения (вызывающее локальное уменьшение индуцируемого показателя преломления) и локальное отклонение точки фокусировки от заданной траектории (на характерную величину 2 мкм). Результаты исследования могут быть использованы при фемтосекундной записи волноводов с пониженными потерями на рассеяния, а также для повышения повторяемости и надежности данной технологии микрообработки.

Ключевые слова: лазерно-индуцированное воздействие, фемтосекундная запись, локально модифицированная область, индуцированный показатель преломления, волновод

Введение. Прямая фемтосекундная запись является перспективной безмасочной и широко распространенной технологией создания оптических волноводов в объеме стекол и кристаллов [1—7]. Оптические стекла и кристаллы могут быть разделены на три группы на основе знака постоянно изменяющегося показателя преломления (ПП):

- 1) материалы, ПП которых увеличивается при фемтосекундной микрообработке;
- 2) материалы, ПП которых понижается;

* В разделе представлены избранные статьи по материалам конференции „Фундаментальные основы лазерных микро- и нанотехнологий“, состоявшейся в июле 2016 г.

3) материалы (такие как кварцевое стекло), ПП которых может увеличиваться и уменьшаться при различных режимах фемтосекундной записи и в различных областях зоны обработки [8—10].

В материалах третьей группы волноводы могут быть созданы и путем формирования жилы с повышенным ПП, и путем формирования оболочки с пониженным ПП; на рис. 1 области, модифицированные фемтосекундным лазерным излучением, обозначены темно-серым ($\Delta n > 0$) и светло-серым ($\Delta n < 0$) тоном. При этом числовая апертура волноводов, сформированных по различным методикам, может быть сопоставима, но модовое распределение и величина потерь существенно различаются.

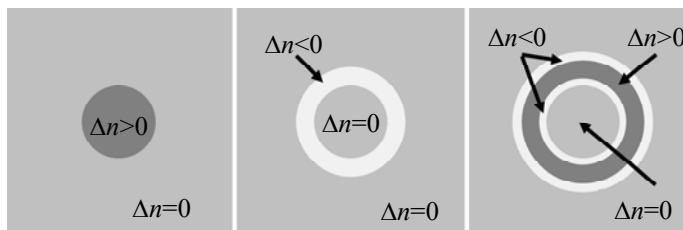


Рис. 1

В настоящей статье предложен экспериментальный подход, заключающийся в использовании периферийных областей (с пониженным ПП), созданных несколькими близко расположенными треками, в качестве волновода в кварцевом стекле (см. рис. 1). Новая геометрия позволяет использовать преимущества методики создания оболочки волноводов даже в материалах с увеличенным ПП в центре фокальной области.

Сравнительное исследование преимуществ и недостатков обоих типов фемтосекундно-записанных волноводов, с указанием областей их применения, проведено на основе аналитических методов и численного моделирования волноводов при нестабильностях параметров лазерного излучения, которые обычно наблюдаются в экспериментах по фемтосекундной микрообработке. Были исследованы неоднородности наведенного (индуцируемого) ПП и неоднородности геометрических параметров оболочки волновода и степень их влияния на оптические потери. Актуальность работы обусловлена широким распространением и перспективами технологии фемтосекундной записи, а также активным использованием материалов третьей группы в оптике и фотонике.

Эксперимент. Показатель преломления кварцевого стекла изменялся от $-1,5 \cdot 10^{-3}$ до $4 \cdot 10^{-3}$ под действием сфокусированных фемтосекундных лазерных импульсов с длительностью 370 фс и энергией 60—150 нДж на длине волны 1040 нм. Структуры индуцированы посредством ортогональной схемы, которая показана на рис. 2. Лазерное излучение фокусировалось асферической линзой ($NA=0,5$) в материал на глубину максимальной компенсации сферической аберрации (850 мкм для данной линзы). Относительно высокая частота повторения импульсов (1 МГц) и скорость записи (776 мкм/с), используемые в экспериментах, определяли кумулятивный режим записи [10]. На основе последовательно создаваемых параллельных треков сформирована оболочка волновода с уменьшением показателя преломления, так чтобы периферические области треков с уменьшенным ПП касались друг друга. На основе измерения расходимости излучения, выходящего из волновода, определена числовая апертура волновода ($NA=0,08$), которая является достаточной для стыковки с широко используемыми оптическими волокнами ($NA=0,10$).

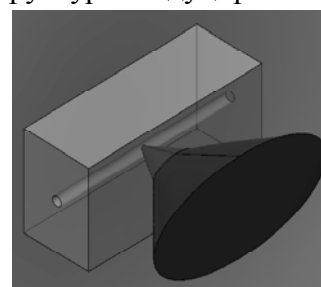


Рис. 2

На рис. 3 показаны: *a* — пространственный профиль ПП, индуцированного в кумулятивном режиме в кварцевом стекле (Δn от $-1,5 \cdot 10^{-3}$ до $4 \cdot 10^{-3}$); *b* — моделирование профиля ПП в записываемом волноводе; *в* — его модовое распределение на длине волны 1040 нм;

г — микрофотография торца записанного многомодового волновода (диаметром 60 мкм), подтверждающая работоспособность методики использования периферических областей для создания оболочки волновода [10].

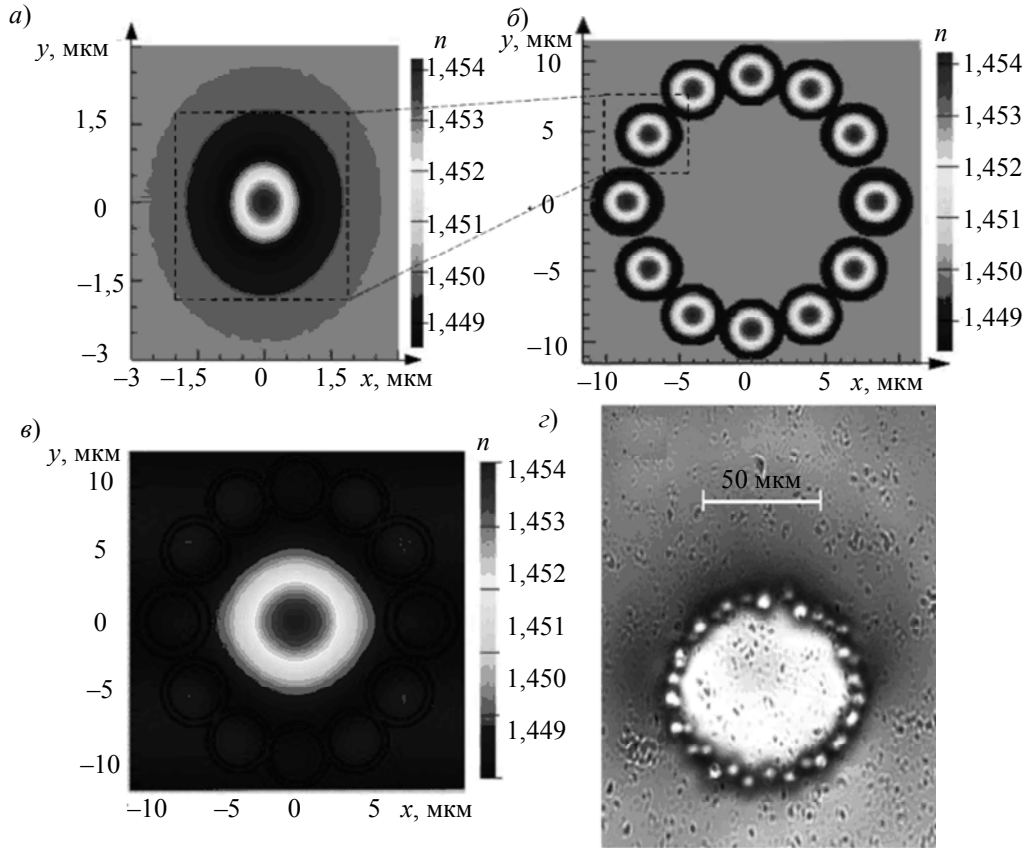


Рис. 3

Численный анализ. Фемтосекундно-записанные волноводы характеризуются относительно высокими оптическими потерями (0,3—1,5 дБ/см [1, 10]), поэтому одной из важнейших задач в области развития данной технологии является разработка методики уменьшения потерь.

Оптические потери в лазерно-индуцированных волноводах возникают в основном вследствие рассеяния на неоднородностях из-за кратковременной нестабильности параметров лазерного излучения в области фокусировки. После создания волновода величина рассеяний в нем может быть измерена экспериментально [11]. Для численной оценки оптических потерь, вызванных несовершенством геометрии волновода, можно использовать модель, описанную в работах [12, 13], или интегральную модель, основанную на анализе неоднородностей эффективного ПП:

$$\Delta\Phi(z) = k \int_0^z \delta n_{\text{eff}}(z') dz',$$

где k — волновой вектор, δn_{eff} — локальная неоднородность эффективного ПП n_{eff} волновода вследствие различного рода причин [14].

Большинство нестабильностей параметров фемтосекундной записи, которые обычно наблюдаются в экспериментах, можно разделить на две группы:

— локальное уменьшение индуцированного ПП, которое может возникнуть вследствие неоднородности поверхности образца, нестабильности параметров лазерного излучения или фокусировки, а также вследствие дефектов в обрабатываемом материале;

— локальное смещение фокального пятна — обрабатываемой области (на характерную величину 1—2 мкм), которое может возникнуть вследствие спиральной траектории движения

координатного стола (типичной для систем передвижения с шаговым двигателем), неустойчивости фокусировки из-за вибраций, а также дискретности шагов системы передвижения.

Волноводы, созданные посредством формирования оболочки, обладают существенно большей устойчивостью к возникающим неоднородностям вследствие усреднения воздействий по множеству независимо индуцированных треков, образующих оболочку с пониженным ПП. По сравнению с волноводами, в которых фемтосекундным излучением формируется жила, вероятность изменения показателя n_{eff} на ту же величину, вследствие локальных неоднородностей, в $F = P^{-(N-1)}$ раз меньше, здесь P — вероятность локальной неоднородности, N — число треков, образующих оболочку волновода.

Для количественной проверки этой гипотезы было проведено численное моделирование n_{eff} и модового распределения для трех случаев (рис. 4): *a* — волновода, созданного без возмущений; *б* — волновода с локальным уменьшением (на 50 %) индуцированного показателя преломления; *в* — волновода с локально смещенным треком, образующим оболочку (сдвиг 2 мкм). Моделирование проводилось для волноводов с диаметром поля моды 10 мкм на длине волны 1040 мкм и оболочкой, образованной четырьмя и шестью параллельными треками. (Для сравнения аналогичное численное моделирование с такими же неоднородностями проводилось и для волновода с индуцированной жилой.)

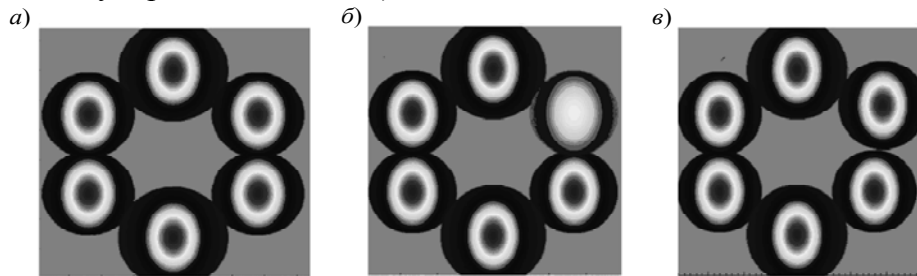


Рис. 4

Результаты и обсуждение. Сравнение волноводов с индуцированной оболочкой и жилой показало, что чувствительность эффективного показателя преломления и модового распределения к неоднородностям быстро падает с увеличением числа треков, формирующих волновод (см. таблицу), а зависимость может быть описана показательной функцией. Потери на согласование определены на основе расчета интеграла перекрытия с гауссовым пучком того же диаметра.

Условия записи	Параметр		
	Количество треков	Относительное изменение n_{eff} , %	Потери на согласование, дБ
Неоднородность индуцированного ПП (уменьшение на 50 %)	1	49	0,22
	4	2	0,16
	6	0,1	0,01
Смещение индуцированного трека (2 мкм)	1	53	0,70
	4	3	0,17
	6	0,4	0,05

Полученные результаты показывают следующие преимущества формирования оболочки волновода относительно фемтосекундной записи жилы:

— значительное уменьшение влияния условий эксперимента на основные характеристики волновода — потери на рассеяние и обратное отражение (определяются локальным изменением n_{eff}), а также изменение модового распределения;

— простота регулировки диаметра волновода без изменения параметров лазерных импульсов и фокусирующей оптики (в отличие от [15, 16]); при формировании оболочки волновода диаметр определяется лишь траекторией движения излучения, а не параметрами лазерных импульсов;

— параметры волноводов с индуцированной оболочкой в радиационно-стойком кварцевом стекле не изменяются при воздействии радиации.

Заключение. Предложенный новый подход к прямой фемтосекундной записи волноводов в кварцевом стекле заключается в формировании оболочки с пониженным показателем преломления на основе периферийных областей последовательно созданных параллельных треков. Такие волноводы позволяют одновременно использовать и высокие характеристики кварцевого стекла, и преимущества методики фемтосекундной записи оболочки (легко регулируемая геометрия, неизменные спектральные характеристики материала в жиле). Записанные структуры обеспечивают низкие потери на рассеяние и низкую чувствительность к неоднородности параметров лазерной записи. Исследованы неоднородности индуцированного показателя преломления и неоднородности геометрических параметров оболочки волновода. Показано, что, в отличие от широко распространенного метода формирования жилы волновода, запись оболочки с пониженным показателем преломления обеспечивает значительно большую устойчивость к возмущениям. Результаты, полученные в ходе исследования, могут способствовать развитию технологии фемтосекундной записи оптических интегральных элементов и формированию волноводов с низкими потерями на рассеяние.

Статья подготовлена по результатам работы, выполненной при поддержке Фонда содействия инновациям по программе УМНИК (9398ГУ2/2015 № 0020265 и 8611ГУ/2015 № 0018824).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Osellame R., Cerullo G., Ramponi R.* Femtosecond Laser Micromachining Photonic and Microfluidic Devices in Transparent Materials. London: Springer, 2012.
2. *Okhrimchuk A. G., Shestakov A. V., Khrushchev I., Mitchell J.* Depressed cladding, buried waveguide laser formed in a YAG: Nd³⁺ crystal by femtosecond laser writing // *Opt. Lett.* 2005. Vol. 30, N 17. P. 2248—2250.
3. *Streltsov A. M., Borrelli N. F.* Fabrication and analysis of a directional coupler written in glass by nanojoule femtosecond laser pulses // *Opt. Lett.* 2001. Vol. 26, N 1. P. 42—43.
4. *Williams R. J., Kramer R. G., Nolte S., Withford M. J.* Femtosecond direct-writing of low-loss fiber Bragg gratings using a continuous core-scanning technique // *Opt. Lett.* 2013. Vol. 38, N. 11. P. 1918—1920.
5. *McMillen B. et al.* Ultrafast laser fabrication of Bragg waveguides in chalcogenide glass // *Opt. Lett.* 2014. Vol. 39, N. 12. P. 3579—3582.
6. *Dubov M., Boscolo S., Webb D. J.* Microstructured waveguides in z-cut LiNbO₃ by high-repetition rate direct femtosecond laser inscription // *Opt. Mater. Express.* 2014. Vol. 4, N. 8. P. 1706—1716.
7. *Ma Xiao-Song.* Integrated quantum photonics: On-chip teleportation // *Nature Photonics.* 2014. Vol. 8. P. 749.
8. *Mermillod-Blondin A. et al.* Size correction in ultrafast laser processing of fused silica by temporal pulse shaping // *Appl. Phys. Lett.* 2008. Vol. 93. P. 021921.
9. *Okhrimchuk A.G. et al.* Waveguide-saturable absorber fabricated by femtosecond pulses in YAG: Cr⁴⁺ crystal for Q-switched operation of Yb-fiber laser // *Opt. Lett.* 2009. Vol. 34. P. 3881—3883.
10. *Bukharin M. A., Khudyakov D. V., Vartapetov S. K.* Heat accumulation regime of femtosecond laser writing in fused silica and Nd: phosphate glass // *Appl. Phys. A.* 2015. Vol. 119, N. 1. P. 397—403.
11. *Zhang H., Eaton S. M., Herman P. R.* Low-loss Type II waveguide writing in fused silica with single picosecond laser pulses // *Opt. Express.* 2006. Vol. 14, N. 11. P. 4826—4834.
12. *Payne F., Lacey J.* A theoretical analysis of scattering loss from planar optical waveguides // *Opt. Quantum Electron.* 1994. Vol. 26. P. 977—986.
13. *Melati D., Morichetti F., Melloni.* A unified approach for radiative losses and backscattering in optical waveguides // *A. J. Opt.* 2014. Vol. 16. P. 055502.

14. *Semenov A. S., Smirnov V. L., Shmalko A. V.* Integral Optics for System of Information Transmission and Processing. Moscow: Radio and Communication, 1990.
15. *Osellame R., Taccheo S., Marangoni M., Ramponi R., Laporta P., Polli D., De Silvestri S., Cerullo G.* Femtosecond writing of active optical waveguides with astigmatically shaped beams // *J. Opt. Soc. Amer. B-Opt. Phys.* 2003. Vol. 20. P. 1559—1567.
16. *Ams M., Marshall G. D., Spence D. J., Withford M. J.* Slit beam shaping method for femtosecond laser direct-write fabrication of symmetric waveguides in bulk glasses // *Opt. Express.* 2005. Vol. 13. P. 5676—5681.

Сведения об авторах**Михаил Андреевич Бухарин**— аспирант; МФТИ; ООО „Оптосистемы“; научный сотрудник;
E-mail: mikhail.bukharin@phystech.edu**Дмитрий Владимирович Худяков**— канд. физ.-мат. наук, ООО „Оптосистемы“; ст. научный сотрудник;
Центр физического приборостроения ИОФ РАН

Рекомендована МФТИ

Поступила в редакцию
30.11.16 г.

Ссылка для цитирования: Бухарин М. А., Худяков Д. В. Сравнительный анализ способов лазерного фемтосекундного формирования оптических волноводов // *Изв. вузов. Приборостроение.* 2017. Т. 60, № 5. С. 454—459.

COMPARATIVE ANALYSIS OF WAYS FOR FEMTOSECOND LASER FORMATION OF OPTICAL WAVEGUIDES**M. A. Bukharin^{1,2}, D. V. Khudyakov^{2,3}**¹*Moscow Institute of Physics and Technology (State University),
141701, Dolgoprudny, Moscow Region, Russia
E-mail: mikhail.bukharin@phystech.edu*²*Optosystems Ltd., 142191, Moscow, Russia*³*Prokhorov General Physics Institute of the Russian Academy of Sciences, Physics Instrumentation Center,
142190, Moscow, Russia*

Comparative analysis is presented for two alternative ways to create optical waveguide on the base of spatial profiles of refractive index in quartz glass experimentally obtained by femtosecond treatment. Advantages and disadvantages of the two methods in creation of the waveguide core with enhanced refractive index and the cladding with reduced refractive index are discussed. Numerical simulation is employed to analyze the influence of the most significant perturbations observed in the experiment on the basic parameters of the waveguide: the effective refractive index, diameter and shape of the mode distribution, input and output losses for the approval of the mod with standard optical fibers. The following main disturbances affecting the femtosecond record are considered: local decrease in the peak intensity of the laser radiation causing a local reduction of the induced refractive index, and local deviation of the focus point from the desired path for characteristic size of 2 microns. The results of the study can be used to record femtosecond waveguides with reduced losses by scattering, and to increase the repeatability and reliability of the micromachining technology.

Keywords: laser-induced effect, femtosecond record, locally-modified area, induced refractive index, waveguide

Data on authors**Mikhail A. Bukharin**— Post-Graduate Student; Moscow Institute of Physics and Technology;
Optosystems Ltd.; Scientist; E-mail: mikhail.bukharin@phystech.edu**Dmitry V. Khudyakov**— PhD; Optosystems Ltd.; Senior Scientist; Prokhorov General Physics
Institute of the Russian Academy of Sciences, Physics Instrumentation
Center

For citation: Bukharin M. A., Khudyakov D. V. Comparative analysis of ways for femtosecond laser formation of optical waveguides // *Journal of Instrument Engineering.* 2017. Vol. 60, N 5. P. 454—459 (in Russian).

DOI: 10.17586/0021-3454-2017-60-5-454-459