

ОПТИМАЛЬНЫЕ УСЛОВИЯ ФОКУСИРОВКИ ДЛЯ ТРЕХМЕРНОЙ ФЕМТОСЕКУНДНОЙ ЛАЗЕРНОЙ ЗАПИСИ В КВАРЦЕВОМ СТЕКЛЕ

✉ С. А. Журавицкий¹, Н. Н. Скрябин¹,
И. В. Дьяконов¹, С. С. Страупе^{1,2}, С. П. Кулик¹

¹ Центр квантовых технологий, Московский государственный университет
им. М. В. Ломоносова, Москва, Россия

² Российский квантовый центр, Сколково, Москва, Россия

✉ zhuravicky.sa15@physics.msu.ru

Технология фемтосекундной лазерной записи является одностадийным процессом создания интегрально-оптических схем, обеспечивающим быстрое прототипирование устройств непосредственно в лаборатории. При фокусировке лазерных импульсов фемтосекундной длительности в объеме оптически прозрачного материала происходит нелинейное поглощение, приводящее к локальному перманентному изменению показателя преломления [1]. Методика позволяет изготавливать как планарные, так и объемные оптические схемы, а также перестраиваемые схемы путем нанесения электродов на поверхность образца [2].

В работе применялся волоконный фемтосекундный лазер *Antaus Avesta* с длиной волны 1030 нм. Излучение второй гармоники (515 нм) фокусировалось в образце из кварцевого стекла. Длительность импульса 250 фс, частота следования импульсов 1 МГц. Для записи различных структур использовались скорости записи $v = 0,2-8$ мм/с и энергии импульса $E = 30-400$ нДж. Фокусировка производилась асферическими линзами с $NA = 0,4-0,83$. Для плавного изменения жесткости фокусировки применялось неполное заполнение входной апертуры линзы при помощи расширителя пучка *2X-8X Research-Grade Variable Beam Expander*. Образец устанавливается на системе позиционирования *Aerotech FiberGlide 3D* (рис. 1).

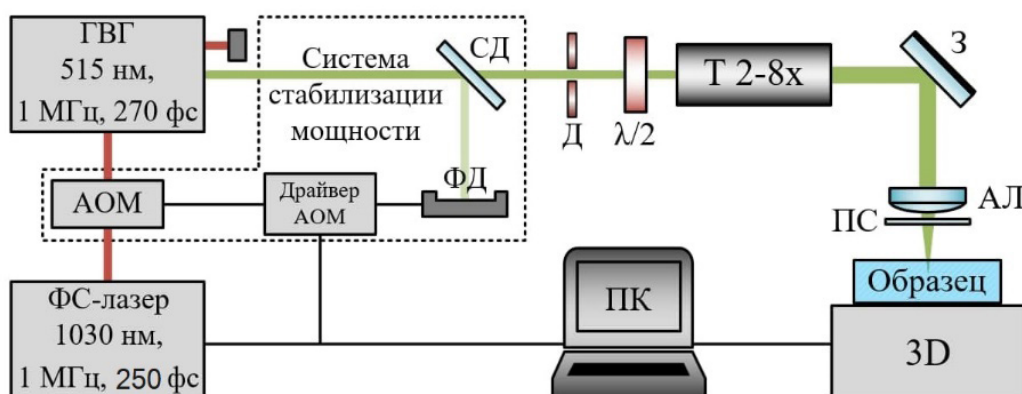


Рис. 1. Схема установки для фемтосекундной лазерной записи

Найдено два различных режима записи волноводов (см. таблицу).

Характеристики режимов записи с мягкой и жесткой фокусировкой

NA	v , мм/с	Е, нДж	Δn	Потери на распространение, дБ/см	Радиус изгиба, мм	Глубина записи, мкм	Однородность по глубине
0,3	0,2	30-120	$\sim 10^{-3}$	0,6	60	20	Нет
0,55	0,5-8	250-400	$\sim 10^{-4}$	$< 0,3$	700	600-1000	Да

1. Режим с $NA = 0,3$ — мягкая фокусировка. В этом режиме волноводы обладают идентичными характеристиками в диапазоне глубин 600–1000 мкм, что позволяет записывать объемные оптические схемы. Прямые волноводы с потерями $< 0,3$ дБ/см дают возможность создания оптических схем для нелинейной топологической фотоники (рис. 2), где важно обеспечить сохранение величины нелинейно-индуцированного показателя на всей длине оптической схемы [3, 4].

2. Режим с $NA = 0,55$ — жесткая фокусировка. Позволяет записывать волноводы у поверхности с низкими потерями на изгиб, а также вырезать электроды на поверхности чипа для изготовления перестраиваемых оптических схем (см. рис. 2) [2].

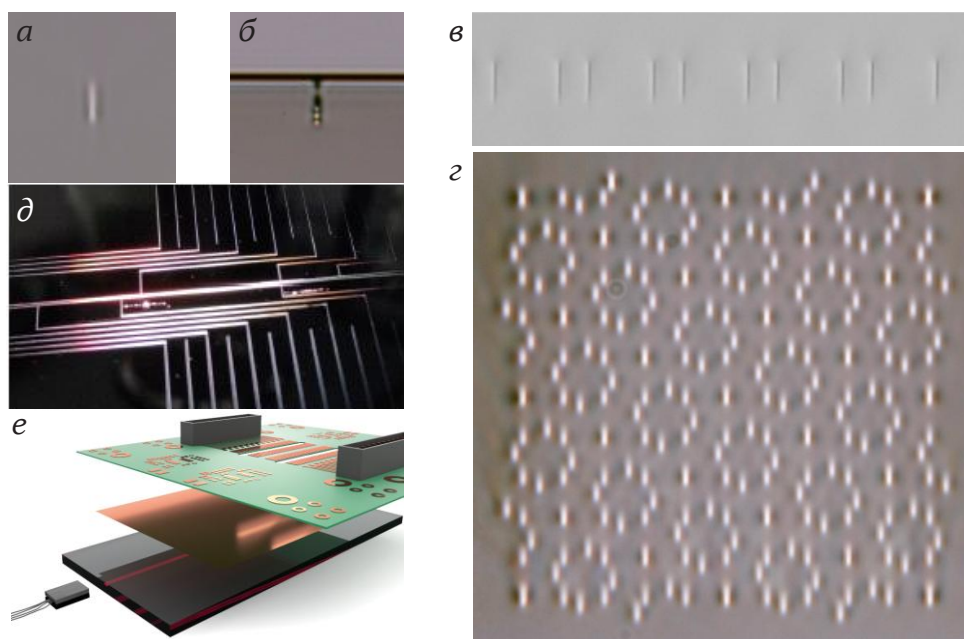


Рис. 2. Микрофотографии волноводов при мягкой (а) и жесткой (б) фокусировке; в — топологическая решетка димеров (режим 1) [4]; z — усеченная решетка Муара (режим 1); d — фотография электродов, вырезанных из металлической пленки, напыленной на поверхность оптического чипа (режим 2); e — схема универсального перестраиваемого оптического чипа 4×4 [2]

Нами были найдены режимы записи волноводов в кварцевом стекле с мягкой и жесткой фокусировкой, позволяющие изготавливать планарные перестраиваемые оптические схемы у поверхности стеклянного образца и объемные оптические схемы из прямых волноводов. Дальнейшая работа будет направлена на исследование режима записи $0,3 < NA < 0,4$, что может позволить объединить преимущества двух описанных режимов.

Список литературы

1. Szameit A., Nolte S. Discrete optics in femtosecond-laser-written photonic structures // J. Phys. B: At. Mol. Opt. Phys. 2010. Vol. 43. P. 163001.
2. Dyakonov I. V., Pogorelov I. A., Bobrov I. B. et al. Reconfigurable Photonics on a Glass Chip // Phys. Rev. Appl. 2018. Vol. 10. P. 044048.
3. Kartashov Y. V., Arkhipova A. A., Zhuravitskii S. A. et al. Observation of Edge Solitons in Topological Trimer Arrays // Phys. Rev. Lett. 2022. Vol. 128. P. 093901.
4. Arkhipova A. A., Ivanov S. K., Zhuravitskii S. A. et al. Observation of nonlinearity-controlled switching of topological edge states // Nanophotonics. 2022.