

Запись лазерно-индуцированных периодических структур на поверхности оптических волокон фс лазерным излучением

К.А. Бронников^{1,2}, В.С. Терентьев¹, В.А. Симонов¹, В.Е. Федяй^{1,3},
А.Э. Симанчук¹, С.А. Бабин^{1,3}, А.А. Кучмижак^{4,5}, А.В. Достовалов^{1*}

¹ Институт автоматики и электрометрии СО РАН

² Физический факультет, университет ИТМО

³ Новосибирский государственный университет

⁴ Институт автоматики и процессов управления ДВО РАН

⁵ Дальневосточный федеральный университет

* E-mail: dostovalov@iae.nsk.su

DOI:10.31868/RFL.2024.115-116

Структурирование поверхности оптических волокон актуально для многих задач биофотоники, сенсорики, лазерной терапии и хирургии [1]. В частности, благодаря этому в последнее время активно развиваются такое направление исследований как «лаборатория на волокне» (англ. «lab-on-fiber»). В данном случае, регулярные структуры на торцевой или боковой поверхностях оптических волокон позволяют создавать высокочувствительные биологические сенсоры, которые благодаря малым размерам оптических волокон ($d < 250$ мкм), их гибкости и биосовместимости могут быть интегрированы в медицинские инструменты (катетеры и иглы) и способны выполнять измерения *in vivo* внутри тела человека с точной локализацией области измерения.

Традиционные методы функционализации и создания наноструктур на поверхности оптических волокон основаны на методах фотолитографии, химического осаждения из газовой фазы, травления при воздействии сфокусированного ионного пучка. Однако данные методы, являются дорогостоящими, низкопроизводительными и требуют специальных условий (высокий вакуум), что препятствует широкому тиражированию создаваемых сенсоров, быстрому и гибкому изменению параметров структур для прототипирования новых образцов сенсоров.

Создание суб-волновых структур за счет эффекта формирования лазерно-индуцированных периодических поверхностных структур (ЛИППС) при воздействии сфокусированного лазерного излучения [2] является привлекательной альтернативой данным методам, поскольку позволяет получать высокоупорядоченные периодические структуры в одно-стадийном процессе при воздействии лазерного излучения на образец при обычных условиях (нормальная атмосфера). Однако образование данных структур исследовалось преимущественно на плоских поверхностях различных материалов и пленок [3].

В данной работе представлены результаты по исследованию режимов формирования ЛИППС на криволинейных поверхностях при воздействии ИК ($\lambda = 1026$ нм) фемтосекундного ($\tau = 230$ фс) лазерного излучения на боковую поверхность оптических волокон. Были исследованы режимы формирования ЛИППС в зависимости от направления поляризации падающего излучения, энергии импульсов (1-3 мкДж), скорости сканирования (1-100 мкм/с).

Показано, что степень упорядоченности формируемых структур зависит от направления поляризации. При направлении поляризации поперек оси волокна (рис. 1а) наблюдается формирование упорядоченных структур (рис. 1б) с периодом 670 нм (рис. 1г), который зависит от толщины наносимой пленки

металла, как и в случае плоских образцов. При направлении поляризации вдоль оси волокна наблюдается формирование слабо упорядоченных ЛИППС с расходящимися от центра к краям волокна структурами. При этом поперечный размер зоны записи равен 85 мкм, т.е. структуры также формируются на склоне боковой поверхности волокна. Из анализа размеров модифицируемой зоны, можно сделать вывод, что структуры формируются в широком диапазоне изменения положения поверхности по высоте (>25 мкм). Таким образом, показана возможность формирования структур на криволинейных поверхностях с существенным изменением высоты профиля поверхности, что невозможно сделать с помощью альтернативных методов. Также было исследовано формирование ЛИППС на боковой поверхности бессердцевинного волокна, у которого отсутствует сердцевина и излучение распространяется по всей области волокна диаметром 125 мкм, что увеличивает взаимодействие излучения со структурой. На рис. 1в представлен результат дифракции видимого света, распространяющегося в волокне. Таким образом, продемонстрирована возможность вывода излучения из волокна в окружающую среду через созданные структуры, что актуально для многих задач биофотоники, малоинвазивной лазерной хирургии (англ. Endovenous laser therapy (EVLТ)) и сенсорики.

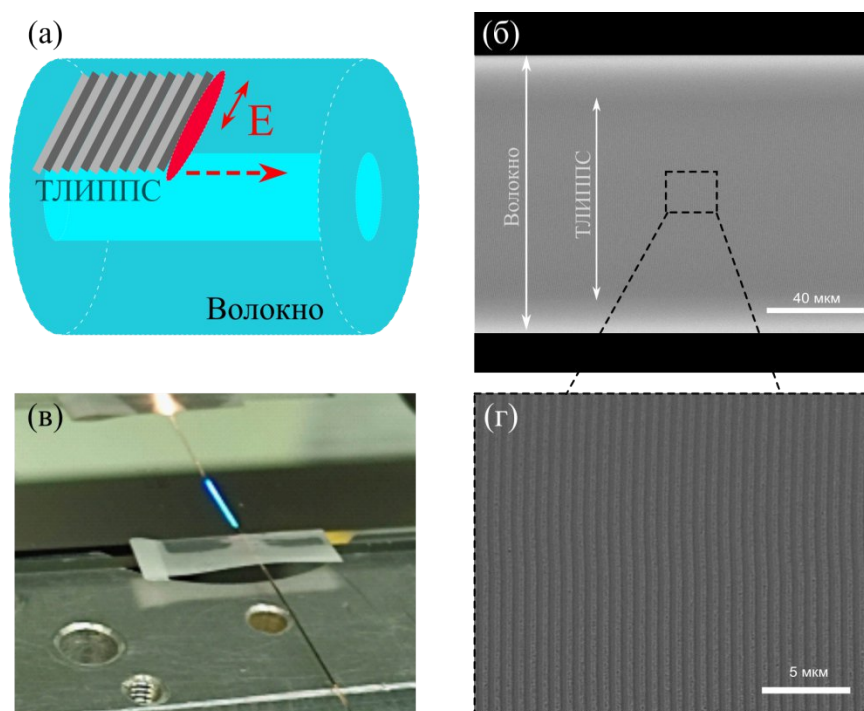


Рис. 1. Схема формирования ЛИППС на боковой поверхности оптического волокна при воздействии астигматического гауссова пучка (а), СЭМ-изображение сформированных ЛИППС при энергии лазерных импульсов 1,25 мкДж и скорости сканирования 3 мкм/с (б), результат дифракции белого света на структурах, записанных на боковой поверхности бессердцевинного волокна (в) и увеличенное СЭМ-изображение соответствующих структур (г).

Работа выполнена при поддержке РФФИ (№21-72-20162). При выполнении работ использовалось оборудование центров коллективного пользования (ЦКП): ЦКП ДВФУ, ЦКП ИАиЭ СО РАН, ЦКП НГУ.

Литература

- [1] P. Vaiano et al, *Laser & Photonics Reviews* **10**, 922–961 (2016).
- [2] J. Bonse, *Nanomaterials* **10**, 1950 (2020).
- [3] K. Bronnikov et al, *Nanomaterials* **12**, 306 (2022)