

# Исследование характеристик маломодовых микроструктурированных оптических волокон с 6 сердцевинами, выполненными из высоколегированного GeO<sub>2</sub> кварцевого стекла, и наведенной киральностью

Г.А. Пчелкин  
АО «НПО ГОИ им. С.И. Вавилова»  
СПбГУТ им. проф. М.А. Бонч-  
Бруевича  
Санкт-Петербург, Россия  
beegrig@mail.ru

В.В. Демидов  
АО «НПО ГОИ им. С.И. Вавилова»  
Санкт-Петербург, Россия  
demidov@goi.ru

Е.В. Тер-Нерсисянц  
АО «НПО ГОИ им. С.И. Вавилова»  
Санкт-Петербург, Россия

А.С. Матросова  
АО «НПО ГОИ им. С.И. Вавилова»  
Университет ИТМО  
Санкт-Петербург, Россия  
matrosova@goi.ru

А.В. Хохлов  
АО «НПО ГОИ им. С.И. Вавилова»  
Санкт-Петербург, Россия

А.В. Бурдин  
АО «НПО ГОИ им. С.И. Вавилова»  
СПбГУТ им. проф. М.А. Бонч-  
Бруевича  
ООО «ОптоФайбер Лаб»  
Санкт-Петербург, Россия  
bourdine@yandex.ru

А.Н. Подопригра  
СПбГУТ им. проф. М.А. Бонч-  
Бруевича  
Санкт-Петербург, Россия  
podoprigora1861@gmail.com

К.В. Дукельский  
АО «НПО ГОИ им. С.И. Вавилова»  
СПбГУТ им. проф. М.А. Бонч-  
Бруевича  
Университет ИТМО  
Санкт-Петербург, Россия  
kdukel@mail.ru

М.В. Дашков  
ПГУТИ  
Самара, Россия  
mvd.srttc@gmail.com

В.М. Пилипова  
СПбГУТ им. проф. М.А. Бонч-  
Бруевича  
Санкт-Петербург, Россия

В.В. Давыдов  
СПбПУ Петра Великого  
СПбГУТ им. проф. М.А. Бонч-  
Бруевича  
Санкт-Петербург, Россия  
davydov\_vadim66@mail.ru

В.Б. Ромашова  
АО «ЛЛС»  
Санкт-Петербург, Россия

Р.Р. Кашина  
АО «ЛЛС»  
Санкт-Петербург, Россия  
r.kashina@lenlasers.ru

**Аннотация**—Экспериментально обоснована необходимость использования маломодовых микроструктурированных оптических волокон с наведенной продольной скруткой. Рассмотрен случай с 6-сердцевинной структурой построения поперечного сечения оптического волокна. Разработана и модернизирована схема для контроля модового состава и дефектов оптического волокна. Изготовлены и исследованы опытные образцы микроструктурированных оптических волокон для изучения квази-кольцевого распределения оптического поля в поперечном сечении. Представлены результаты экспериментальных исследований оптического элемента с 6 сердцевинами, выполненными на основе германосиликатного стекла, и дана оценка зависимости базовых характеристик от параметров технологического цикла его производства.

**Ключевые слова**— микроструктурированное оптическое волокно, сердцевина, германосиликатное стекло, лазерное излучение, киральность, оптические вихри.

## 1. ВВЕДЕНИЕ

Развитие научно-технического прогресса неразрывно связано с увеличением объемов передаваемой информации по различным сетям связи [1]. Среди наземных сетей связи наибольшими преимуществами обладают волоконно-оптические линии (ВОЛС). Необходимо отметить, что ВОЛС входят также в системы сотовых и спутниковых линий связи, выполняя в их составе важную функцию. Основной проблемой, с которой сейчас сталкиваются разработчики при модернизации ВОЛС, является предел скорости и объема передаваемых данных по одномодовому оптическому волокну (ОВ), как на магистральных линиях связи, так и на локальных (расположенных вне зданий – подвергаются воздействию градиента температуры). Технологии спектрального уплотнения в каналах связи достигли своего предела, дальнейшее уплотнение приводит к потере информации или резкому увеличению затухания сигнала [1].

Одним из возможных решений этой проблемы может стать использование микроструктурированного ОВ с заданным модовым составом [2-4]. Этот тип ОВ, как и стандартные одномодовые ОВ, устойчив к перепадам температуры. При исследовании ОВ с 6 сердцевинами, выполненными из высоколегированного  $\text{GeO}_2$  кварцевого стекла, и наведенной киральностью было установлено, что при выборе определенных параметров возможно обеспечить наличие в ОВ только трех пространственных мод ( $\text{LP}_{01}$ ,  $\text{LP}_{11}$ ,  $\text{LP}_{21}$ ), необходимых для устойчивой передачи больших объемов информации и низкого затухания сигнала. Параметры производства данного ОВ подбираются в несколько этапов. На первом этапе – моделированием. Далее следует этап экспериментальных исследований, так как в численном расчете почти невозможно корректно учесть искажения ОВ. В настоящей работе подробно представлен один из этих этапов – экспериментальные исследования.

## 2. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ И ОБСУЖДЕНИЕ

Для детектирования квази-кольцевых (вихревых) распределений оптического поля в маломодовых микроструктурированных ОВ с 6 сердцевинами, выполненными из высоколегированного  $\text{GeO}_2$  кварцевого стекла, был доработан измерительный стенд. Ранее используемая оптическая схема обладала большими габаритами, избыточными потерями при прохождении излучения и повышенными требованиями к стабилизации температуры.

На рис. 1 в качестве примера представлены топологии маломодовых микроструктурированных ОВ, для которых были проведены исследования распределения оптического излучения на выходе при различной частоте продольного скручивания и других параметрах технологического цикла.

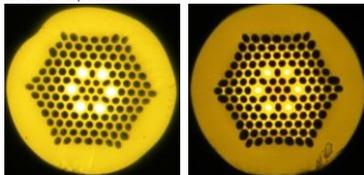


Рис. 1. Изображения поперечных сечений изготовленных маломодовых микроструктурированных ОВ с 6 сердцевинами: степень киральности (слева направо) 50, 100 об/м

На рис. 2 в качестве примера представлено продольное сечение изготовленного маломодового микроструктурированного ОВ с 6 сердцевинами и степенью киральности 100 об/м. Для него были проведены исследования модового состава излучения при различной, от 50 до 400 об/м, частоте скручивания и других параметрах технологического цикла.



Рис. 2. Изображение продольного сечения изготовленного маломодового микроструктурированного ОВ с 6 сердцевинами

На рис. 3 в качестве примера представлены поперечные распределения оптического излучения на выходе маломодовых микроструктурированных ОВ исследуемой топологии при различных частотах

скручивания и других технологических параметрах. Длина волны излучения 1550 нм.

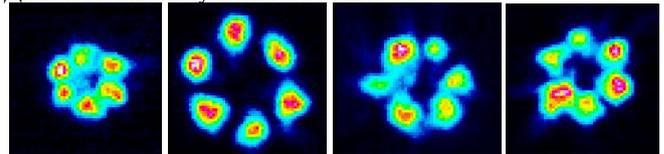


Рис. 3. Изображения поперечных распределений оптического излучения на выходе изготовленных маломодовых микроструктурированных ОВ с 6 сердцевинами: степень киральности (слева направо) 50, 100, 400, 500 об/м

Анализ представленных данных показывает, что распределение оптического излучения является квази-кольцевым и неравномерным. Этим распределением возможно управлять.

## 3. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Результаты проведенных исследований свидетельствуют о том, что использование разработанного измерительного стенда позволяет точнее определять модовый состав и квази-кольцевые распределения оптического поля в маломодовых микроструктурированных ОВ неклассической конструкции. Экспериментально установлена возможность объединения модового поля в микроструктурированном ОВ с 6 сердцевинами, выполненными из высоколегированного  $\text{GeO}_2$  кварцевого стекла, и относительно высокой степенью наведенной киральности. Полученные результаты позволяют скорректировать процесс формирования структуры преформы микроструктурированного ОВ, установить оптимальный диапазон изменения частоты продольного скручивания в сочетании с относительным размером пустот в оболочке для равномерного по интенсивности объединения модового пятна в кольцо.

## БЛАГОДАРНОСТИ

Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ, DST, NSFC и NRF в рамках научного проекта № 19-57-80016 БРИКС\_Т.

## ЛИТЕРАТУРА

- [1] Burdin, V.A. New silica laser-optimized multimode optical fibers with extremely enlarged 100- $\mu\text{m}$  core diameter for gigabit onboard and industrial networks / V.A. Burdin, M.V. Dashkov, V.V. Demidov, A.E. Zhukov, A.V. Bourdine // *Fibers*. – 2020. – Vol. 8(3). – P. 18.
- [2] Gizatulin, A.R. Design of vortex optical fibers for RoF systems. Part 1: overview and alternative solutions / A.R. Gizatulin, I.K. Meshkov, E.P. Grakhova, A.A. Ishmiyarov, I.A. Kuk, A.Kh. Sultanov, V.Kh. Bagmanov, G.I. Abdrakhmanova, I.L. Vinogradova, A.V. Bourdine, V.V. Demidov, E.V. Ter-Nersesyants, V.A. Burdin // *SPIE Proc.* – 2020. – Vol. 11516. – P. 115161S.
- [3] Bourdine, A.V. Design of vortex optical fibers for RoF systems. Part II: pilot samples of chiral microstructured optical fibers / A.V. Bourdine, V.A. Burdin, V.V. Demidov, K.V. Dukelskii, A.R. Gizatulin, A.V. Khokhlov, I.K. Meshkov, A.Kh. Sultanov, E.V. Ter-Nersesyants, S.V. Ustinov, E.S. Zaitseva // *SPIE Proc.* – 2020. – Vol. 11516. – P. 115161T.
- [4] Bourdine, A.V. Twisted silica microstructured optical fiber with equiangular spiral six-ray geometry / A.V. Bourdine, A.Yu. Barashkin, V.A. Burdin, M.V. Dashkov, V.V. Demidov, K.V. Dukelskii, A.S. Evtushenko, Y. Ismail, A.V. Khokhlov, A.A. Kuznetsov, A.S. Matrosova, O.G. Morozov, G.A. Pchelkin, F. Petruccione, A.Zh. Sakhabutdinov, G. Singh, E.V. Ter-Nersesyants, M. Tiwari, E.S. Zaitseva, V. Janyani, J. Yin // *Fibers*. – 2021. – Vol. 9(5). – P. 27.
- [5] Barlow, A.J. Birefringence and polarization mode dispersion in spun single-mode fibers / A.J. Barlow, J.J. Ramkov-Hansen, D.N. Payne, // *Appl. Opt.* – 1981. – Vol. 20. – P. 2962-2968.