

# Исследование характеристик опытного образца маломодового оптического волокна с увеличенной высотой ступенчатого профиля показателя преломления и наведенной киральностью

А.В. Бурдин<sup>1, 2, 3, 4</sup>, А.Ю. Барашкин<sup>1</sup>, В.А. Бурдин<sup>1</sup>, М.В. Дашков<sup>1</sup>, В.В. Демидов<sup>2</sup>,  
А.В. Хохлов<sup>2</sup>, Е.В. Тер-Нерсисянц<sup>2</sup>, А.С. Матросова<sup>2, 5</sup>, Г.А. Пчелкин<sup>2, 6</sup>,  
К.В. Дукельский<sup>2, 4, 5</sup>, А.С. Евтушенко<sup>1</sup>, Е.С. Зайцева<sup>1</sup>, Я. Исмаил<sup>7</sup>, Ю. Йин<sup>8</sup>,  
А.А. Кузнецов<sup>9</sup>, О.Г. Морозов<sup>9</sup>, А.Ж. Сахабутдинов<sup>9</sup>, Ф. Петруччионе<sup>7</sup>,  
Г. Сингх<sup>10</sup>, М. Тивари<sup>10</sup>, В. Джаньяни<sup>10</sup>

<sup>1</sup>Поволжский государственный университет телекоммуникаций и информатики,  
Самара, 443010, Российская Федерация

<sup>2</sup>Научно-производственное объединение Государственный оптический институт им. С.И. Вавилова,  
Санкт-Петербург, 192171, Российская Федерация

<sup>3</sup>ООО «ОптоФайбер Лаб»,  
Сколково, Москва, 121205, Российская Федерация

<sup>4</sup>Санкт-Петербургский государственный университет телекоммуникаций им. проф. М.А. Бонч-Бруевича,  
Санкт-Петербург, 193232, Российская Федерация

<sup>5</sup>Университет ИТМО,  
Санкт-Петербург, 197101, Российская Федерация

<sup>6</sup>Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого,  
Санкт-Петербург, 195251, Российская Федерация

<sup>7</sup>Университет Квазулу-Натал,  
Дурбан, 4001, Южно-Африканская Республика

<sup>8</sup>Научно-технический университет Китая,  
Хефэй, 230052, Китайская Народная Республика

<sup>9</sup>Казанский национальный исследовательский технический университет им. А.Н. Туполева – КАИ,  
Казань, 420111, Российская Федерация

<sup>10</sup>Национальный технологический институт Малави,  
Джайпур, 302017, Республика Индия

\*Адрес для переписки: bourdine@yandex.ru

## Информация о статье

Поступила в редакцию 24.02.2021

Принята к публикации 15.03.2021

**Ссылка для цитирования:** Бурдин А.В., Барашкин А.Ю., Бурдин В.А., Дашков М.В., Демидов В.В., Хохлов А.В., Тер-Нерсисянц Е.В., Матросова А.С., Пчелкин Г.А., Дукельский К.В., Евтушенко А.С., Зайцева Е.С., Исмаил Я., Йин Ц., Кузнецов А.А., Морозов О.Г., Сахабутдинов А.Ж., Петруччионе Ф., Сингх Г., Тивари М., Яниани В. Исследование характеристик опытного образца маломодового оптического волокна с увеличенной высотой ступенчатого профиля показателя преломления и наведенной киральностью // Труды учебных заведений связи. 2021. Т. 7. № 1. С. 6–19. DOI:10.31854/1813-324X-2021-7-1-6-19

**Аннотация:** В работе представлены результаты исследования характеристик изготовленных опытных образцов кирального маломодового оптического волокна с увеличенной высотой ступенчатого профиля показателя преломления. Рассмотрены вопросы выбора технологических параметров указанного маломодового волоконного световода на основании проведенных расчетов строгим численным и приближенным методами анализа описанной волноводной структуры. Приведены построенные спектральные характеристики дисперсионных параметров модового состава. Представлены результаты экспериментальных измерений профиля лазерного пучка в ближнем поле, а также спектрального и импульсного откликов оптических сигналов, возбуждаемых когерентными источниками оптического излучения.

**Ключевые слова:** маломодовое оптическое волокно, ступенчатый профиль показателя преломления, высота профиля, маломодовый режим, киральность, дифференциальная модовая задержка.

## Введение

Оптические волокна (ОВ) с наведенной киральностью (в данном случае, реализуемой путем закрутки вокруг собственной оси) известны с начала 1980-х годов. Оригинальная идея получения закрученного ОВ впервые была изложена в работе [1] и заключалась во вращении преформы с постоянной скоростью непосредственно в процессе вытяжки ОВ. Применительно к одномодовым ОВ эта концепция декларировалась как способ снижения поляризационной модовой дисперсии [1–4]. Для многомодовых ОВ наведенная киральность рассматривалась как один из методов снижения величины дифференциальной модовой задержки (ДМЗ) и, как следствие, увеличения полосы пропускания оптического сигнала [5, 6].

Цель настоящей работы состояла в адаптации стандартной технологии вытяжки волоконных световодов к получению оптических волноводов с наведенной киральностью, которая характеризовалась бы как малым, так и сравнительно большим количеством оборотов на единицу длины (обычно один метр), и ее апробации на изготовлении опытного образца маломодового ОВ (FMF, *аббр. от англ. Few Mode Fiber*) с увеличенной высотой ступенчатого профиля показателя преломления и контролируемой степенью киральности, а также теоретическом и экспериментальном исследовании ряда характеристик полученного волоконного световода, в том числе дисперсионных параметров модового состава, затухания, спектральных и импульсных откликов оптических сигналов, возбуждаемых когерентными источниками оптического излучения.

## Численное моделирование модового состава излучения и эффективного показателя преломления ОВ с квазиступенчатым профилем показателя преломления

На первом этапе исследования методом конечных элементов в программном пакете COMSOL Multiphysics был проведен численный анализ модового состава излучения и расчет эффективного (волноводного) показателя преломления отдельных модовых составляющих серии задаваемых волоконных световодов со ступенчатым профилем показателя преломления, отличающихся задаваемой комбинацией диаметра сердцевин и высоты профиля / числовой апертуры, для получения однозначных рекомендаций по выбору технологических параметров и последующего изготовления опытного образца искомого FMF.

Основные сформулированные требования к описанному ОВ сводились к воспроизведению маломодового режима передачи 3-4 пространственных мод ( $LP_{01}$ ,  $LP_{11}$ ,  $LP_{21}$ ,  $LP_{02}$ ) при возбуждении когерентным источником оптического излучения на

оптической несущей центральной области «С»-диапазона длин волн.

Поиск мод выполнялся по ранее предложенной и успешно апробированной методике [7–9], предполагающей численное решение системы линейных уравнений Максвелла для случая однородного изотропного диэлектрика в отсутствии свободных зарядов и токов, сведенных к волновым уравнениям для векторов напряженности электрического ( $E$ ) и магнитного ( $B$ ) поля [10]:

$$\nabla \times \left( \frac{1}{\mu} \nabla \times E \right) - k_0^2 \epsilon E = 0, \quad (1)$$

где  $k_0$  – волновое число в вакууме ( $k_0 = 2\pi/\lambda$ );  $\epsilon$  – диэлектрическая проницаемость ( $\epsilon = n^2$ ,  $n$  – показатель преломления среды);  $\mu$  – магнитная проницаемость.

С учетом наличия идеального согласованного слоя (PML, *аббр. от англ. Perfectly Matched Layer*) уравнение (1) преобразовывалось к виду [11]:

$$\nabla \times \left( \frac{1}{\mu'} \nabla \times \frac{1}{[S]} E \right) - k_0^2 \epsilon' \frac{1}{[S]} E = 0, \quad (2)$$

где  $\epsilon'$  и  $\mu'$  – модифицированные диэлектрическая и магнитная проницаемости соответственно;  $[S]$  – матрица коэффициентов слоя PML [11].

Решением уравнения (2) является уравнение электромагнитной волны, распространяющейся вдоль направления  $z$ -оси световода [10]:

$$E(z, t) = E_0 \exp \left[ j \left( \omega t - \frac{\omega}{c} n_{\text{eff}} z \right) \right], \quad (3)$$

где  $E_0$  – амплитуда напряженности электрического поля;  $\omega$  – круговая частота;  $c$  – скорость света в вакууме;  $t$  – время.

Эффективный показатель преломления  $n_{\text{eff}}$  определяется путем численного решения уравнения (3). Интерпретация синтезированных решений в терминах линейно-поляризованных мод осуществляется путем сопоставления построенных на основании результатов расчета радиальных распределений полей с известными однозначно идентифицируемыми изображениями полей мод заданного порядка.

В таблице 1 приведено сравнение результатов, полученных в ходе проведенных строгим численным методом, реализованным в ПО COMSOL Multiphysics, расчетов для ОВ со ступенчатым профилем показателя преломления, с тремя выбранными значениями диаметра сердцевин (8,3; 10,0; 11,0 мкм) и числовой апертурой от 0,14 до 0,24 (что приблизительно соответствует разности показателей преломления сердцевин и оболочки 0,02) на длине волны  $\lambda = 1550$  нм.

Анализ полученных результатов показывает, что для волоконных световодов с типовым диаметром сердцевин 8,3 мкм соответствующего «тра-

диционным» одномодовым телекоммуникационным ОВ, условие отсечки для 3...4 пространственных мод формально выполняется при максимальном, из исследуемого диапазона, значении числовой апертуры  $NA = 0,24$ .

**ТАБЛИЦА 1. Сопоставление результатов проведенного численного анализа ступенчатых ОВ диаметром оболочки 125 мкм для разных комбинаций диаметра сердцевинки и параметра высоты профиля показателя преломления / числовой апертуры ( $\lambda = 1550$  нм)**

TABLE 1. Comparison of Computational Results of Analysis of Step-Index Optical Fibers with Cladding Diameter 125  $\mu\text{m}$ , Performed for Various Combinations of Core Diameter and Refractive Index Profile Height / Numerical Aperture ( $\lambda = 1550$  nm)

№ п/п	Диаметр сердцевинки, мкм	Числовая апертура	Модовый состав	$n_{\text{eff}}$	$\Delta n_{\text{eff}}$
1	8,3	0,14	$LP_{01}$	1,460478	–
2	8,3	0,16	$LP_{01}$ $LP_{11}$	1,462210 1,457688	0,004522
3	8,3	0,18	$LP_{01}$ $LP_{11}$	1,464263 1,459082	0,005181
4	8,3	0,20	$LP_{01}$ $LP_{11}$	1,466624 1,460940	0,005684
5	8,3	0,22	$LP_{01}$ $LP_{11}$	1,469284 1,463199	0,006085
6	8,3	0,24	$LP_{01}$ $LP_{11}$ $LP_{21}$ $LP_{02}$	1,472237 1,465821 1,458136 1,457159	0,006416 0,014101 0,015078
7	10	0,14	$LP_{01}$ $LP_{11}$	1,461181 1,457847	0,003334
...					
17	11	0,22	$LP_{01}$ $LP_{11}$ $LP_{21}$ $LP_{02}$	1,470808 1,466767 1,461642 1,460198	0,004041 0,009166 0,010610
18	11	0,24	$LP_{01}$ $LP_{11}$ $LP_{21}$ $LP_{02}$ $LP_{31}$	1,473847 1,469664 1,464288 1,462650 1,458078	0,004183 0,009559 0,011197 0,015769

Однако для данной конфигурации ОВ моды  $LP_{21}$  и  $LP_{02}$  характеризуются неприемлемо низкой устойчивостью к распространению на сравнительно дальние расстояния: анализ радиального распределения полей показывает, что основная мощность этих мод сосредоточена не в сердцевине, а в оболочке, и, несмотря на выполнение условия отсечки, их оптический фактор ограничения  $P_{co} < 0,5$ . По этой причине можно сделать заключение, что из всей серии проанализированных ОВ с сердцевинкой диаметром 8,3 мкм ни одна из предложенных конфигураций не подходит для практической реализации в рамках поставленной задачи.

Аналогичное утверждение относится и к комбинации диаметра сердцевинки 10 мкм и числовой апертуры  $NA = 0,2$ : здесь также высшие моды  $LP_{21}$  и  $LP_{02}$  удовлетворяют условию отсечки, но при этом характеризуются неприемлемо низким ( $P_{co} < 0,5$ ) значе-

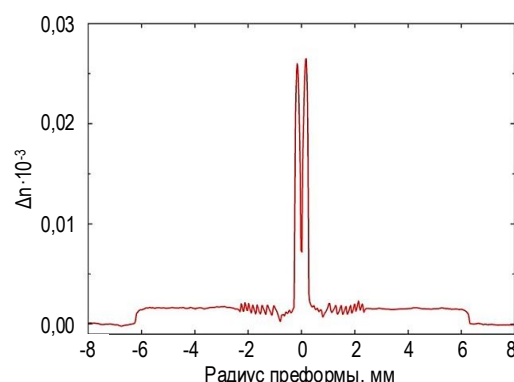
нием оптического фактора ограничения. В целом, искомый маломодовый режим функционирования при указанном диаметре сердцевинки обеспечивается выбором числовой апертуры 0,22 и 0,24.

В свою очередь, для диаметра сердцевинки 11 мкм, наилучшим образом условию распространения 3-4 пространственных мод отвечают две конфигурации ОВ – с числовой апертурой 0,20 и 0,22. При этом переход к  $NA = 0,24$  приводит к выполнению условия отсечки для пятой нежелательной высшей моды  $LP_{31}$ , а выбор заниженной  $NA = 0,18$  – также к неприемлемо низкому значению оптического фактора ограничения  $P_{co} < 0,5$  уже для низших направляемых мод  $LP_{21}$  и  $LP_{02}$ .

Таким образом, на основании анализа проведенных расчетов, было принято решение об изготовлении опытного образца FMF с диаметром сердцевинки 11 мкм, «традиционным» для телекоммуникационных ОВ диаметром оболочки 125 мкм и числовой апертурой  $NA = 0,22$  наиболее приемлемым, как с точки зрения практической реализации, так и достижения искомых характеристик.

#### Опытный образец FMF 11/125 с увеличенной высотой квазиступенчатого профиля показателя преломления и наведенной кривизной

В соответствии с выбранными технологическими параметрами, методом модифицированного химического газофазного осаждения (MCVD, аббр. от англ. Modified Chemical Vapor Deposition) была изготовлена преформа искомого FMF 11/125 с числовой апертурой  $NA = 0,22$ . На рисунке 1 представлен профиль показателя преломления указанной преформы ОВ с увеличенной высотой квазиступенчатого профиля показателя преломления.



**Рис. 1. Профиль показателя преломления преформы FMF, измеренный с использованием рефрактометра P101 (Photon Kinetics)**

Fig. 1. Refractive Index Profile of FMF Preform, Measured by Refractometer P101 (Photon Kinetics)

В центре сердцевинки (см. рисунок 1) профиля показателя преломления присутствует характерный для MCVD провал, обусловленный диффузией высоколетучего диоксида германия ( $\text{GeO}_2$ ) в процессе синтеза преформы волоконного световода.

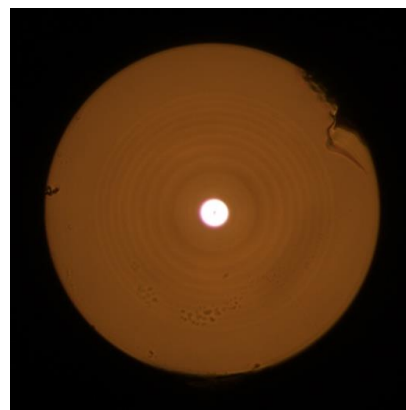
При этом абсолютная высота профиля достигает  $\sim 0,27$ , а величина провала  $\sim 0,08$ . По этой причине для корректной оценки высоты профиля показателя преломления использовали подход, основанный на вычислении площади, занимаемой центральной (сердцевинной) частью, и нахождения эффективной высоты профиля. В этом случае значение высоты профиля составило  $\sim 0,018$ , что эквивалентно числовой апертуре  $NA = 0,22$  для ОВ с сердцевинной диаметром 11 мкм.

На следующем этапе для получения эффекта с наведенной киральностью был модернизирован стандартный технологический процесс вытяжки ОВ, который обеспечил реализацию закрутки ОВ на данной стадии его изготовления. Традиционно преформа ОВ закрепляется в механическом патроне блока подачи преформы в жаровое пространство высокотемпературной печи вытяжной башни в стационарном положении и перетягивается без вращения. Однако в рассматриваемом случае для достижения контролируемой киральности ОВ в процессе вытяжки блок подачи был дополнительно оснащен шаговым двигателем, который осуществлял непрерывное вращение преформы с заданной скоростью. Минимальная скорость вращения двигателя составляла 20 об/мин, максимальная – 200 об/мин. С учетом того обстоятельства, что скорость вытягивания ОВ была выбрана минимальной (2–3 м/мин), в пересчете на степень наведенной киральности (закрутки вокруг собственной оси) это составило 10 и 66 об/м.

На рисунке 2 представлена фотография торца изготовленного опытного образца длины кирального FMF с диаметром сердцевины 11 мкм и числовой апертурой  $NA = 0,22$ , вытянутого из синтезированной преформы. На рисунке 3 приведен профиль пучка лазера (рабочая длина волны  $\lambda = 1550$  нм), зарегистрированного на выходе тестируемого FMF с помощью CCD-камеры в ближнем поле.

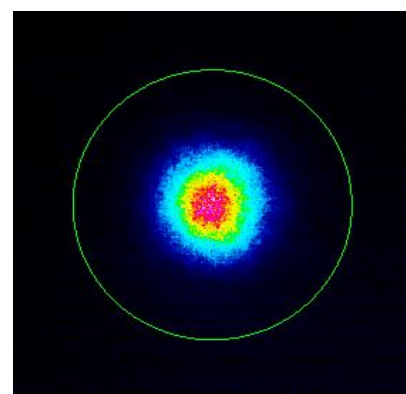
Для оценивания влияния степени наведенной закрутки на потери изготовленного ОВ дополнительно были выполнены измерения спектральных характеристик коэффициента затухания  $\alpha(\lambda)$  двух опытных образцов FMF с киральностью 10 и 66 об/м длиной по 50 м каждый (результаты представлены на рисунке 4). Измерения проводились методом обрыва с использованием галогенной лампы 64642 HLX (OSRAM), программируемого монохроматора ANDO, германиевого фотодиода (диапазон длин волн 900–1700 нм), оптического усилителя eLockIn (Anfatec Instruments) и измерителя оптической мощности ANDO AQ-1135E. Следует отметить, что основная цель на данном этапе изготовления опытного образца FMF 11/125 заключалась непосредственно в практической реализации маломодового режима передачи оптического сигнала за счет незначительного увеличения диаметра сердцевины и существенного увеличения высоты

профиля показателя преломления при одновременном наведении киральности.



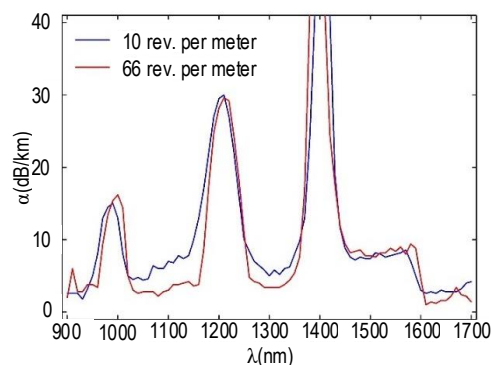
**Рис. 2.** Фотография торца изготовленного опытного образца длины 4-модового FMF с диаметром сердцевины 11 мкм и числовой апертурой  $NA = 0,22$ , вытянутого из синтезированной преформы (изображение получено с использованием оптического микроскопа высокого разрешения Nikon Eclipse N-U)

*Fig. 2. Photograph of Fabricated Pilot 4-Mode FMF Sample with Core Diameter 11  $\mu$ m and Numerical Aperture  $NA = 0,22$ , Drawn from Manufactured Preform (Image Was Shot by High Resolution Optical Microscope Nikon Eclipse N-U)*



**Рис. 3.** Профиль пучка лазера (рабочая длина волны  $\lambda = 1550$  нм), зарегистрированного на выходе тестируемого FMF с помощью CCD-камеры в ближнем поле

*Fig. 3. Laser Beam Profile (Operating Wavelength of Laser Source is  $\lambda = 1550$  nm), Measured at the Tested FMF Sample Output by CCD-Camera in the Near-Field*



**Рис. 4.** Спектральная характеристика коэффициента затухания изготовленного опытного образца FMF 11/125 с наведенной киральностью

*Fig. 4. Chiral Pilot FMF 11/125 Fabricated Sample Attenuation Spectral Curve*



По этой причине, изготовление преформы ОВ осуществлялось по упрощенному сценарию без удаления гидроксильных примесей  $\text{OH}^-$ , что и привело к появлению характерных резонансных «водяных» пиков на спектральной характеристике коэффициента затухания  $\alpha(\lambda)$ . Аналогичным образом, ожидаемо повышенное затухание в центральных областях «С»- и «О»-диапазонов длин волн, достигающее практически 7...8 дБ/км, объясняется отказом (в целях упрощения технологического процесса и снижения расхода реактивов) от проведения «традиционной» корректирующей операции добавления фтора F при записи преформы в области сердцевин для снижения негативного влияния диоксида германия  $\text{GeO}_2$  на увеличение затухания. Вместе с тем, обращает на себя внимание, что, в целом, для FMF с закруткой 66 об/м коэффициент затухания на «плоских» интервалах спектральной характеристики между резонансными пиками, несколько ниже, по сравнению с 10 об/м, что, по всей видимости, обусловлено «сглаживанием» технологических дефектов профиля показателя преломления, характерных для MCVD-технологии, при более высокой скорости вращения преформы.

#### Расчет дисперсионных параметров модового состава опытного образца FMF 11/125 с увеличенной высотой ступенчатого профиля показателя преломления

На следующем этапе был проведен расчет спектральных характеристик дисперсионных параметров модового состава рассматриваемого FMF. Для этой цели было предложено использовать ранее разработанный простой и быстрый приближенный метод, который является модификацией приближения Гаусса, обобщенной на случай оценки параметров передачи мод произвольного порядка, распространяющихся в слабо направляющем волоконном световоде с произвольным осесимметричным профилем показателя преломления [12] с уточнением (при необходимости) полученных решений строгим численным методом смешанных конечных элементов [13]. Указанное обобщение модификации приближения Гаусса (ОМПГ) базируется на совместном применении метода стратификаций [14] в сочетании с «классическим» приближением Гаусса [15]. Использование метода стратификаций позволяет отказаться от представления профиля показателя преломления, исследуемого ОВ с помощью одной или совокупности гладких функций, а, напротив, непосредственно обеспечить его детализированное воспроизведение.

Такой подход существенно снижает погрешность вычислений при решении прямой задачи расчета параметров передачи модового состава волоконного световода с увеличенным, по сравнению с одномодовыми ОВ, диаметром сердцевин и сложной формой профиля показателя преломле-

ния [12, 13]. В результате это позволяет ограничиться одним вариационным параметром – нормированным эквивалентным радиусом пятна моды  $R_0$ , который, в рамках приближения Гаусса, является базовым и полностью определяет искомые характеристики моды. Здесь для представления радиального распределения поля моды заданного порядка исследуемого ОВ используется известное аппроксимирующее выражение, соответствующее точному решению скалярного волнового уравнения для слабо направляющих ОВ с идеальным неограниченным параболическим профилем показателя преломления, записанное в базисе функций Лагерра – Гаусса [15]. Все это в итоге позволяет перейти к аналитической форме записи вариационного выражения и характеристического уравнения в виде конечных вложенных сумм и далее к их производным в рамках перехода к расчету модовой задержки и коэффициента хроматической дисперсии, что существенно снижает требования к вычислительным ресурсам даже при оценивании дисперсионных параметров мод высших порядков при одновременно малой (менее 1 % [12, 13]) погрешности вычислений.

На рисунке 5 представлен эквивалентный квазиступенчатый профиль показателя преломления, анализируемого FMF 11/125 с числовой апертурой  $NA = 0,22$ , восстановленный по данным протокола измерения, вытянутого из преформы ОВ. На первом этапе был проведен расчет оптического фактора ограничения модового состава указанного FMF 11/125 для области длин волн  $\lambda = 700...1700$  нм.

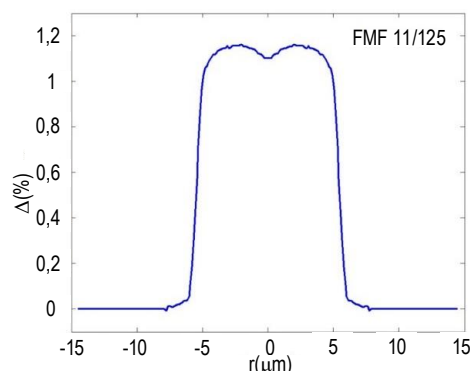


Рис. 5. Эквивалентный квазиступенчатый профиль с увеличенной высотой, восстановленный по данным протокола измерения

Fig. 5. Equivalent Quasi-Step Refractive Index Profile with Improved Height, Reconstructed Via Measurement Data Report

Результаты представлены в виде диаграммы на рисунке 6. Анализ полученных данных показывает, что искомый 4-модовый режим функционирования для исследуемого ОВ достигается в спектральном диапазоне  $\lambda = 1450...1700$  нм. В целом, для нижнего предела исследуемой области длин волн ( $\lambda = 700$  нм) условием отсечки формально удовлетворяет 38 мод  $LP_{lm}$  вплоть до  $l = 7$  азимутального и  $m = 9$  радиального порядков.

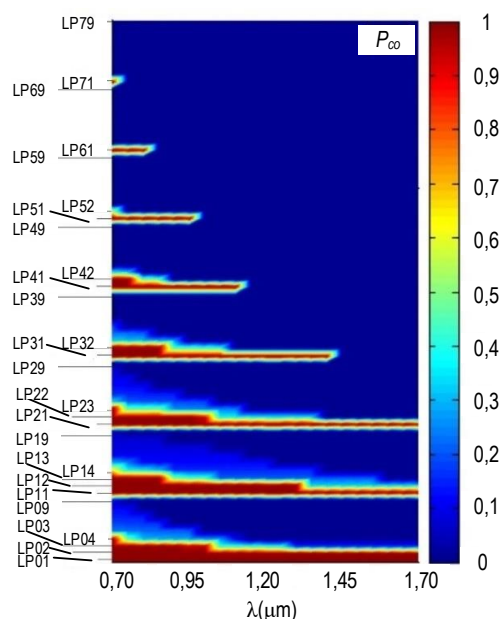


Рис. 6. Диаграмма распределения оптического фактора ограничения модового состава FMF 11/125 в области длин волн  $\lambda = 700...1700$  нм

Fig. 6. Diagram of Optical Confinement Factor Distribution Between Modes of FMF 11/125 Over Wavelength Band  $\lambda = 700...1700$  nm

Однако, с точки зрения критерия по значению оптического фактора ограничения  $P_{co} \geq 0,5$ , на этой же длине волны из них направляемыми являются только 19 мод также до  $l = 7$  азимутального, но уже до  $m = 4$  радиального порядков. В свою очередь, в центральной области «О»-диапазона (второе окно прозрачности:  $\lambda = 1300$  нм), исследуемое ОВ поддерживает распространение 6 направляемых мод: помимо перечисленных в предыдущем разделе мод  $LP_{01}$ ,  $LP_{11}$ ,  $LP_{21}$ ,  $LP_{02}$ , на данной оптической несущей условию отсечки при одновременно критерию  $P_{co} \geq 0,5$  также удовлетворяют моды  $LP_{12}$  и  $LP_{31}$ . Для перечисленных направляемых мод в указанном исследуемом диапазоне длин волн был проведен расчет дисперсионных параметров, результаты которого представлены на рисунках 7 и 8.

Анализ кривых модовой задержки показывает, что в области длины волны  $\lambda = 1300$  нм ДМЗ достигает 18,35 нс/км, в то время как для оптической несущей  $\lambda = 1550$  нм, благодаря «подавлению» двух высших мод  $LP_{12}$  и  $LP_{31}$ , для которых не выполняется условие отсечки, значение ДМЗ уже составляет 14,93 нс/км. С точки зрения сопоставления спектральных характеристик коэффициента хроматической дисперсии основной и высших мод, полученные кривые, в целом, напоминают графики коэффициента хроматической дисперсии для стандартных одномодовых ОВ рек. ITU-T G.652 [16]. Здесь также длина волны нулевой дисперсии основной моды и мод высших порядков находится в диапазоне 1300...1350 нм. Максимальный разброс значений данного параметра  $D$  между высшими модами составил 27,09 пс/(нм·км) на длине волны 1300 нм и 4,97 пс/(нм·км) для оптической несущей 1550 нм.

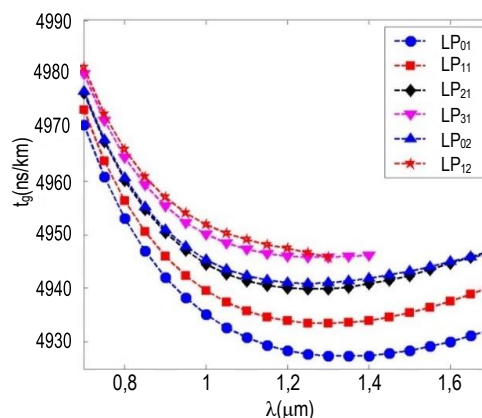


Рис. 7. Спектральная характеристика модовой задержки

Fig. 7. Mode Delay Spectral Curve

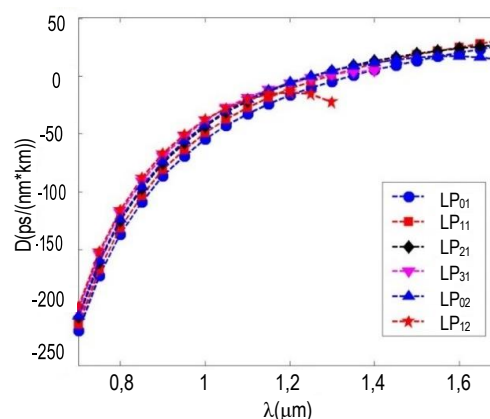


Рис. 8. Спектральная характеристика коэффициента хроматической дисперсии

Fig. 8. Chromatic Dispersion Parameter Spectral Curves

### Результаты измерения карты дифференциальной модовой задержки опытного образца FMF 11/125 с увеличенной высотой квазиступенчатого профиля показателя преломления

На следующем этапе были проведены измерения карты ДМЗ, выполненные в соответствии с общим подходом ратифицированных стандартов TIA-455-220-A/FOTR-220 и IEC 60793-2-10, которые предполагают поэтапное снятие (сканирование) полигона импульсных откликов маломодового оптического сигнала, вводимого в торец тестируемого ОВ через одномодовый согласующий световод сначала центрированно и далее с заданным прецизионным радиальным смещением относительно центра сердцевины.

Упрощенная структурная схема измерительной установки представлена на рисунке 9. Генерация опорного зондирующего оптического импульса и, соответственно, регистрация его отклика на выходе тестируемого ОВ осуществляется с помощью лабораторного комплекта анализатора ДМЗ R2D2, функционирующего на принципах стробоскопического эффекта [17–19]. Источник анализатора – ла-

зерный диод с резонатором Фабри-Перо «1» – возбуждает одиночный опорный зондирующий оптический импульс квазигауссовой формы (рисунок 10) с длительностью на уровне половины амплитуды (FWHM, *аббр. от англ.* Full Width at a Half Maximum)  $FWHM = 340$  пс на длине волны  $\lambda = 1310$  нм. Лазерный диод пигтелирован стандартным одномодовым ОВ рек. ITU-T G.652, оконцованного типовым волоконно-оптическим коннектором FC/PC «2», подключенным с внутренней стороны лицевой панели анализатора через проходную розетку этого же типа «3». С внешней стороны к разъему «3» подключается также стандартный одномодовый пигтейл FC/PC «4», через который непосредственно и осуществляется ввод опорного зондирующего оптического сигнала в тестируемый образец FMF 11/125 «6». Соединение волокна пигтейла «4» и FMF «6» реализуется с помощью сварочного аппарата Ericsson FSU-975 «5», при

этом используется программа № 8 «Аттенюатор» [20], позволяющая непосредственно задавать прецизионное значение осевого смещения  $d$ , мкм центров сердцевин, соединяемых ОВ. Здесь параметр требуемого ослабления (*от англ.* Desired Attenuation) устанавливался равным 0 дБ, в то время как параметр коррекции смещения (*от англ.* Offset Adjustment) для каждого последующего сварного соединения увеличивался на  $\Delta d = 1,0$  мкм вплоть до полного отсутствия отклика сигнала на мониторе R2D2 из-за неприемлемо высоких потерь, обусловленных слишком большим осевым смещением на вводе. Как результат, для исследуемого FMF 11/125 сканирование ввода было реализовано в диапазоне значений  $d$  от 0 до 9 мкм.

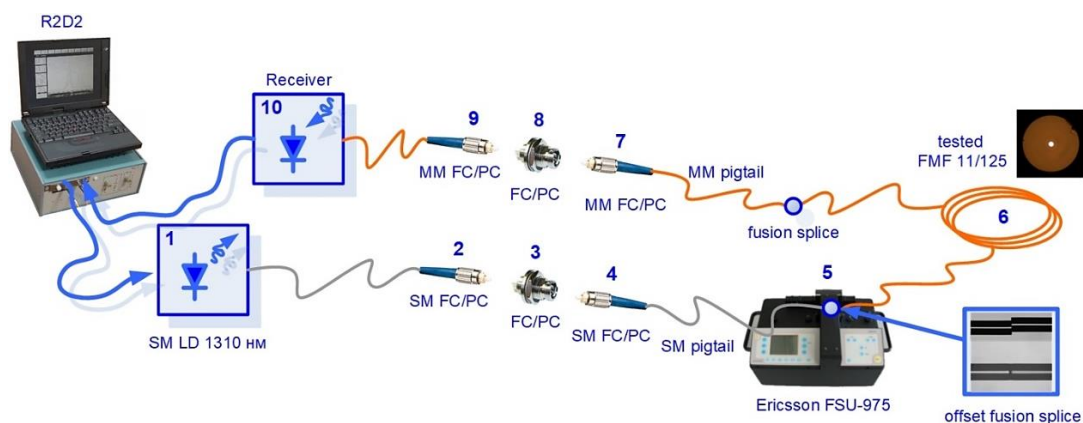


Рис. 9. Структурная схема установки для измерения карты ДМЗ опытного образца кирального FMF 11/125 с увеличенной высотой квазиступенчатого профиля показателя преломления

Fig. 9. Block-Scheme of DMD Measurement Setup for Testing of Pilot FMF 11/125 Sample with Improved Quasi-Step Refractive Index Profile Height

Результаты измерения карты ДМЗ опытного образца кировального FMF 11/125 протяженностью 50 м с наведенной закруткой 66 об/м и увеличенной высотой квазиступенчатого профиля показателя преломления представлены на рисунке 11. Несмотря на достаточно короткую длину тестируемого ОВ, наблюдается существенное проявление эффекта ДМЗ, что частично объясняется наличием двух дополнительных высших мод  $LP_{12}$  и  $LP_{31}$  (помимо четырех базовых – основной  $LP_{01}$  и трех высших –  $LP_{11}$ ,  $LP_{02}$  и  $LP_{21}$ ) в модовом составе оптического сигнала на оптической несущей  $\lambda = 1310$  нм. При этом в пределах осевого смещения  $d = 0 \dots 6$  мкм значение ДМЗ составляет порядка 550 пс, в то время как при вводе зондирующего оптического сигнала ближе к границе раздела сердцевина/оболочка ДМЗ увеличивается уже до 1,05 нс и более.

На рисунке 12 приведены результаты оценки среднеквадратической длительности (RMS, *аббр. от англ. Root Mean Square*) зарегистрированных на выходе тестируемого FMF импульсных откликов в зависимости от введенного смещения ввода опорного

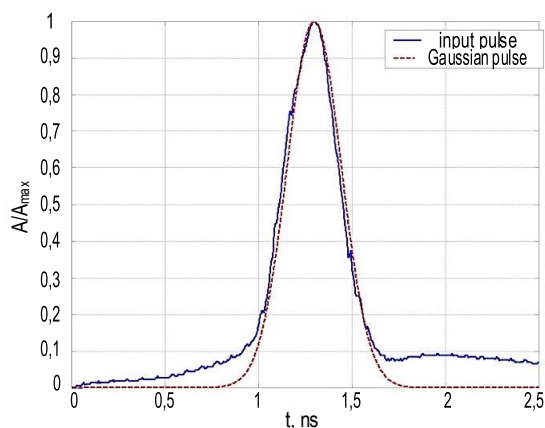
зондирующего оптического сигнала. Расчет RMS выполнялся в соответствии с известной методикой анализа импульсов произвольной формы, подробно изложенной в [21]. Данный параметр варьируется в диапазоне  $RMS = 650...780$  пс в исследуемом интервале значений смещения на входе  $d = 0...9$  мкм.

Для проведения следующей серии тестов, схема (см. рисунок 9) была модифицирована катушкой длины многомодового ОВ 50/125 длиной порядка 500 м первого поколения (Кат. ISO/IEC OM2 [16]), отличающаяся сильным проявлением эффекта ДМЗ, во многом обусловленном наличием характерного технологического дефекта градиентного профиля показателя преломления в виде габаритного провала в центре сердцевины ОВ.

Одна из описанных модификаций схемы приведена на рисунке 13. Здесь указанная длина многомодового ОВ «11», оконцованная с одной стороны многомодовым пигтейлом FC/PC «4», подключается к источнику передающего модуля анализатора R2D2 «1», в то время как второй конец этой 500 м длины ОВ «11» с помощью сварочного аппарата Ericsson



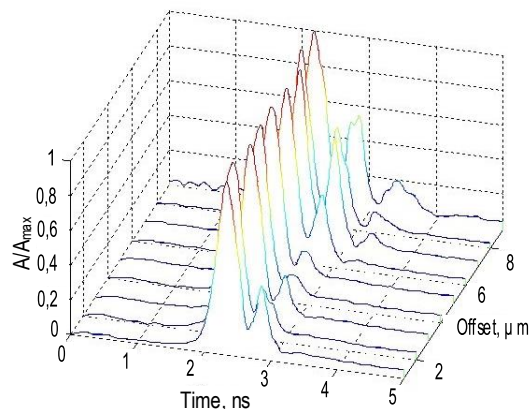
FSU-975 «5» соединяется с 50-метровым тестируемым опытным образцом FMF 11/125 «6» также центрированно и далее с введенным заданным прецизионным осевым смещением. Вторая модификация схемы, соответственно, предполагала включение катушки многомодового ОВ «11» на приемной, а исследуемого FMF 11/125 – на передающей стороне.



**Рис. 10. Опорный зондирующий импульс анализатора ДМЗ R2D2 (квазигауссова форма, длительность 340 пс, длина волны  $\lambda = 1310$  нм)**

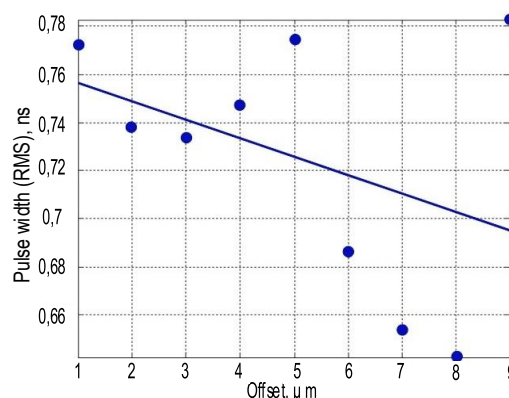
Fig. 10. Reference Optical Impulse of DMD Analyzer R2D2 (Quasi-Gaussian Pulse Shape form, Pulse Width FWHM = 340 ps, Wavelength  $\lambda = 1310$  nm)

Таким образом, в данном случае ввод опорного зондирующего сигнала уже осуществлялся через 50-метровую длину FMF, которое рассматривалось как согласующее устройство «лазер – многомодовое ОВ». Результаты измерения карты ДМЗ для обеих описанных модификаций структурной схемы измерения приведены на рисунке 14. В первом случае (включение FMF на приемной стороне) был реализован диапазон осевого смещения на стыке многомодового ОВ и FMF  $11/125\ d = 0...12$  мкм, во втором случае – FMF со стороны источника оптического излучения –  $d = 0...16$  мкм. Сопоставление полученных в результате измерения карт ДМЗ демонстрирует существенное отличие от характера и степени



**Рис. 11. Результаты измерения карты ДМЗ опытного образца FMF 11/125 протяженностью 50 м**

*Fig. 11. Results of DMD Map Measurements of Pilot FMF 11/125  
Sample with Length 50 m*



**Рис. 12. Диаграмма динамики изменения RMS длительности оптического импульса при увеличении осевого смещения на вводе**

Fig. 12. Diagram of RMS under Offset Launching Condition Variation

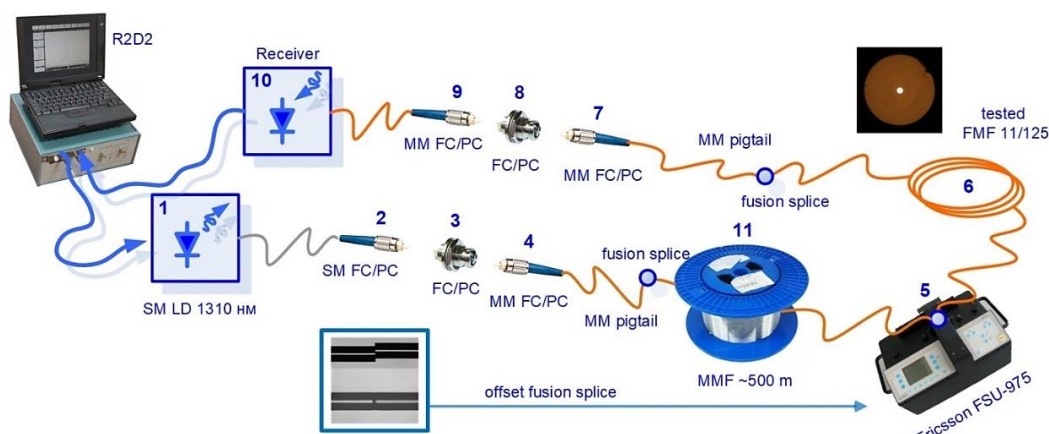


Рис. 13. Модификация схемы для измерения карты ДМЗ опытного образца кирального FMF 11/125 с увеличенной высотой квазиступенчатого профиля показателя преломления, дополненная на передающей стороне многомодовым ОВ 50/125 первого поколения (Кат. ISO/IEC OM2) длиной 500 м

Fig 13. Modification of Block-Scheme for DMD Map Measurement of Pilot FMF 11/125 Sample with Improved Quasi-Step Refractive Index Profile Height, Upgraded by the First Generation Multimode Optical Fiber 50/125 (Cat. ISO/IEC OM2) with Length 500 m, Installed at the Transmitter End



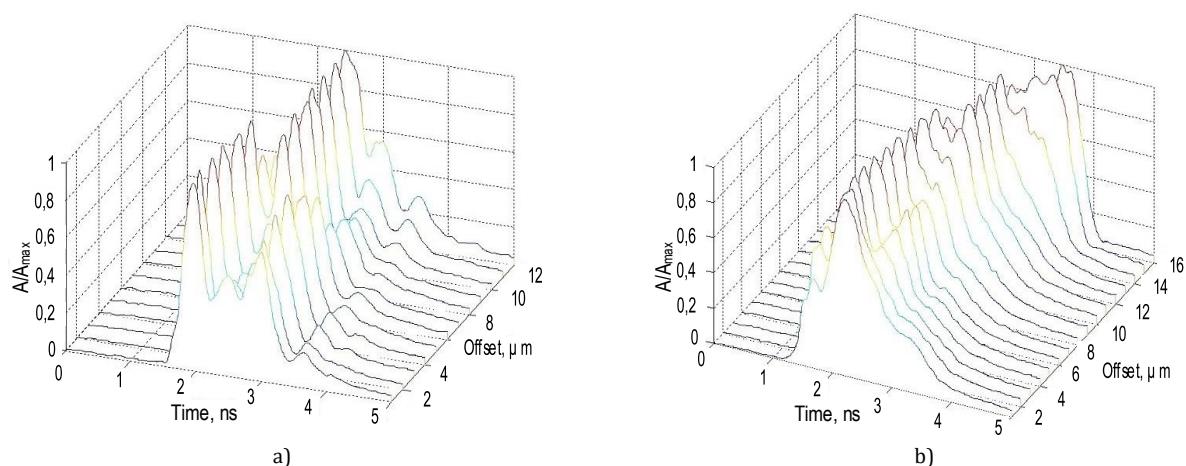


Рис. 14. Результаты измерения карты ДМЗ при подключении FMF 11/125 к многомодовому ОВ: приемная (а) и передающая (б) сторона

Fig. 14. Results of DMD Map Measurements under FMF 11/125 Connection to Multimode Optical Fiber: Receiver (a) and Transmitter (b) End

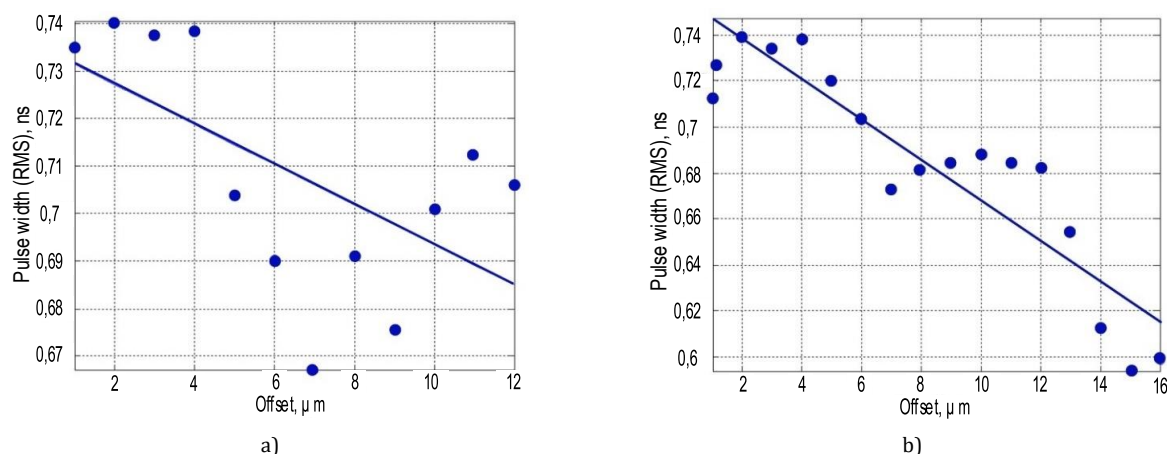


Рис. 15. Диаграмма динамики изменения RMS длительности оптического импульса при увеличении осевого смещения на вводе: FMF на приемной (а) и передающей (б) стороне

Fig. 15. Diagram of RMD Dynamics under Offset Launching Condition Variation: FMF Installed at the Receiver (a) and Transmitter (b) End

На рисунке 15 приведены результаты оценки RMS-длительности импульсных откликов, полученных в ходе измерения карты ДМЗ. Анализ и сопоставление построенных диаграмм динамики RMS-длительности при изменении внесенного прецизионного осевого рассогласования на стыке многомодового ОВ и FMF, в зависимости от последовательности включения волокон описанной комбинированной макетной линии, показывает, что ход диаграмм, в целом, отличается, вместе с тем верхняя граница RMS для обоих случаев достигает 0,74 нс при центрированном соединении и малых смещениях. В свою очередь, при включении FMF на приемной стороне, значение RMS составляет не менее 0,67 нс, а на передающей – может снижаться до 0,60 нс и менее.

### Заключение

Работа посвящена разработке, практической реализации, а также экспериментальным и теоретическим исследованиям характеристик киральных FMF 11/125 с наведенной закруткой и увеличенной

высотой квазиступенчатого профиля показателя преломления, поддерживающего четырехмодовый режим функционирования в «С»-диапазоне длин волн.

На основании проведенного моделирования указанной конструкции ОВ, сделан выбор и обоснование технологических параметров FMF: диаметр сердцевины 11 мкм, диаметр оболочки 125 мкм, числовая апертура  $NA = 0,22$ .

Приведено описание успешно реализованного технологического процесса наведения киральности в процессе вытяжки волоконного световода за счет вращения преформы, что потребовало проведение соответствующей модернизации блока подачи вытяжной башни.

Представлено описание изготовленного опытного образца FMF 11/125 с закруткой 10 и 66 об/м, приведены результаты измерения профиля пучка лазерного источника оптического излучения ( $\lambda = 1550$  нм) в ближнем поле, а также спектраль-

ной характеристики коэффициента затухания, значение которого в «С»- и «О»-диапазонах длин волн, ожидаемо составило 7...8 дБ/км, что объясняется в целях упрощения технологического процесса и расхода реактивов отказом от проведения «традиционной» корректирующей операции добавления фтора F при записи преформы в области сердцевинки для снижения негативного влияния диоксида германия GeO<sub>2</sub> на увеличение затухания.

Представлены результаты теоретического расчета FMF 11/125 с увеличенной высотой квазиступенчатого профиля показателя преломления, восстановленного по данным протокола измерения. Определен модовый состав, удовлетворяющий условию отсечки для «С»- и «О»-диапазонов длин волн.

Построены спектральные характеристики дисперсионных параметров указанного модового состава – модовой задержки и коэффициента хроматической дисперсии. Анализ кривых модовой задержки показал, что в области длины волны  $\lambda = 1300$  нм ДМЗ достигает 18,35 нс/км, в то время как для оптической несущей  $\lambda = 1550$  нм, значение ДМЗ составило 14,93 нс/км.

С точки зрения сопоставления спектральных характеристик коэффициента хроматической дис-

персии основной и высших мод, полученные кривые в целом напоминают графики коэффициента хроматической дисперсии для стандартных одномодовых ОВ рек. ITU-T G.652: длина волны нулевой дисперсии основной моды и мод высших порядков находится в диапазоне 1300...1350 нм.

Проведены измерения карт ДМЗ, выполненные в соответствии с общим подходом ратифицированных стандартов TIA-455-220-A/FOTP-220 и IEC 60793-2-10, которые предполагают поэтапное снятие (сканирование) полигона импульсных откликов маломодового оптического сигнала, вводимого в торец тестируемого ОВ через одномодовый согласующий световод сначала центрированно и далее с заданным прецизионным радиальным смещением относительно центра сердцевинки.

Полученные результаты измерений карт ДМЗ, проведенных как отдельно для опытного образца кирального FMF 11/125, так и в комбинации с многомодовым ОВ 50/125 первого поколения, отличающегося сильным проявлением эффекта ДМЗ, показывают потенциальную возможность применения разработанного волоконного световода для задач управления дисперсионными параметрами селективного модового состава для ряда приложений телекоммуникационных и сенсорных сетей.

#### ИСТОЧНИК ФИНАНСИРОВАНИЯ

Работа подготовлена при финансовой поддержке РФФИ, DST, NSFC и NRF в рамках научного проекта № 19-57-80016 БРИКС\_т.

#### Список используемых источников

1. Barlow A.J., Ramkov-Hansen J.J., Payne D.N. Birefringence and polarization mode dispersion in spun single-mode fibers // Applied Optics. 1981. Vol. 20. PP. 2962–2968. DOI:10.1364/AO.20.002962
2. Hart A.C. Jr., Huff R.G., Walker K.L. Method of making a fiber having low polarization mode dispersion due to a permanent spin. U.S. Patent, no. 5298047, 29.03.1994.
3. Blaszyk P.E., Christoff W.R., Gallagher D.E., Hawk R.M., Kiefer W.J. Method and apparatus for introducing controlled spin in optical fibers. U.S. Patent, no. 6324872 B1, 04.12.2001.
4. Li M.-J., Chen X., Nolan D.A. Fiber spinning for reducing polarization mode dispersion in single-mode fibers: theory and applications // Proceedings of SPIE. 2003. Vol. 5247. PP. 97–110. DOI:10.1117/12.512063
5. DiGiovanni D.J., Golowich S.E., Jones S.L., Reed W.A. Method of making an improved multimode optical fiber and fiber made by method. Patent U.S., no. 2001019652A1, 06.09.2001.
6. DiGiovanni D.J., DiMarcello F.V., Jiang X.L., Oulundsen G.E., Pandit S.P. Multimode optical fiber with increased bandwidth. Patent U.S., no. 2004228590A1, 18.11.2004.
7. Гатчин Ю.А., Демидов В.В., Дукельский К.В., Тер-Нерсисянц Е.В. Квазиедномодовые световоды с увеличенным размером сердцевинки на основе микроструктур негексагонального типа // Труды учебных заведений связи. 2017. Т. 3. № 3. С. 37–42. DOI:10.31854/1813-324X-2017-3-3-37-42
8. Демидов В.В., Дукельский К.В., Леонов С.О., Матросова А.С. Нелинейно-оптические преобразования пикосекундных лазерных импульсов в многомодовых микроструктурированных световодах с умеренной нелинейностью // Труды учебных заведений связи. 2018. Т. 4. № 1. С. 61–66. DOI:10.31854/1813-324X-2018-1-61-66
9. Ананьев В.А., Демидов В.В., Леонов С.О., Никоноров Н.В. Полые антирезонансные световоды с большой эффективной площадью модового поля для работы в ближней и средней ИК-областях спектра // Труды учебных заведений связи. 2019. Т. 5. № 1. С. 6–14. DOI:10.31854/1813-324X-2019-5-1-6-14
10. Agrawal G.P. Nonlinear fiber optics. Burlington: Academic Press, 2012. 648 p.
11. Olszewski J., Szpulak M., Urbanczyk W. Effect of coupling between fundamental and cladding modes on bending losses in photonic crystal fibers. Optics Express. 2005. Vol. 13. Iss. 16. PP. 6015–6022. DOI:10.1364/optex.13.006015
12. Bourdine A.V. Modeling and simulation of piecewise regular multimode fiber links operating in a few-mode regime // Advances in Optical Technologies. 2013. Vol. 2013. DOI:10.1155/2013/469389

13. Bourdine, A.V., Delmukhametov, O.R. Calculation of transmission parameters of the launched higher-order modes based on the combination of a modified Gaussian approximation and a finite element method // *Telecommunications and Radio Engineering*. 2013. Vol. 72. Iss. 2. PP. 111–123. DOI:10.1615/TelecomRadEng.v72.i2.30
14. Адамс М. Введение в теорию оптических волноводов. Пер. с англ. М.: Мир, 1984. 512 с.
15. Снайдер А., Лав Дж. Теория оптических волноводов. Пер. с англ. М.: Радио и связь, 1987. 656.
16. Листвин А.В., Листвин В.Н., Швырков Д.В. Оптические волокна для линий связи. М.: ЛЕСАРП, 2003. 288 с.
17. Бурдин А.В. Дифференциальная модовая задержка кварцевых многомодовых оптических волокон разных поколений // *Фотон-Экспресс*. 2008. № 5-6(69-70). С. 20–22.
18. Бурдин А.В. О диагностике дифференциальной модовой задержки многомодовых оптических волокон // *Инфокоммуникационные технологии*. 2008. Т. 6. № 4. С. 33–38.
19. Bourdine A.V., Prokopyev V.I., Dmitriev E.V., Yablochkin K.A. Results of conventional field-test equipment application for identification of multimode optical fibers with high DMD // *Proceedings of Optical Technologies for Telecommunications (Kazan, Russian Federation, 25–27 November 2008)*. 2009. Vol. 7374. PP. 73740J-01–73740J-07. DOI:10.1117/12.829038
20. Ericsson FSU-975. Руководство пользователя. Пер. с англ. Ericsson, 2001. 76 с.
21. Гауэр Дж. Оптические системы связи. Пер. с англ. М.: Радио и связь, 1989. 504 с.

\* \* \*

## Researches of Parameters of Chiral Few-Mode Optical Fiber Pilot Sample with Improved Height of Step Refractive Index Profile

**A. Bourdine<sup>1, 2, 3, 4</sup>, A. Barashkin<sup>1</sup>, V. Burdin<sup>1</sup>, M. Dashkov<sup>1</sup>, V. Demidov<sup>2</sup>,  
A. Khokhlov<sup>2</sup>, E. Ter-Nersesyants<sup>2</sup>, A. Matrosova<sup>2, 5</sup>, G. Pchelkin<sup>2, 6</sup>, K. Dukel'skii<sup>2, 4, 5</sup>,  
A. Evtushenko<sup>1</sup>, E. Zaitseva<sup>1</sup>, Ya. Ismail<sup>7</sup>, Ju. Yin<sup>8</sup>, A. Kuznetsov<sup>9</sup>, O. Morozov<sup>9</sup>,  
A. Sakhabutdinov<sup>9</sup>, F. Petruccione<sup>7</sup>, G. Singh<sup>10</sup>, M. Tiwari<sup>10</sup>, V. Janyani<sup>10</sup>**

<sup>1</sup>Povolzhskiy State University of Telecommunications & Informatics,  
Samara, 443010, Russian Federation

<sup>2</sup>Research and Production Association S.I. Vavilov State Optical Institute,  
St. Petersburg, 192171, Russian Federation

<sup>3</sup>OptoFiber Lab, LLC,  
Skolkovo Innovation Center, Moscow, 143026, Russian Federation

<sup>4</sup>The Bonch-Bruевич Saint-Petersburg State University of Telecommunications,  
St. Petersburg, 193232, Russian Federation

<sup>5</sup>ITMO University,  
St. Petersburg, 197101, Russian Federation

<sup>6</sup>Peter the Great Saint Petersburg Polytechnic University,  
St. Petersburg, 194064, Russian Federation

<sup>7</sup>University of KwaZulu-Natal,  
Durban, 4001, South Africa

<sup>8</sup>University of Science and Technology of China,  
Shanghai, China

<sup>9</sup>Kazan National Research Technical University named after A.N. Tupolev – KAI,  
Kazan, 420111, Republic of Tatarstan, Russian Federation

<sup>10</sup>Malaviya National Institute of Technology,  
Jaipur, 302017, Republic of India

### Article info

DOI:10.31854/1813-324X-2021-7-1-6-19

Received 24th February 2021

Accepted 15th March 2021

**For citation:** Bourdine A., Barashkin A., Burdin V., Dashkov M., Demidov V., Khokhlov A., Ter-Nersesyants E., Matrosova A., Pchelkin G., Dukelskii K., Evtushenko A., Zaitseva E., Ismail Ya., Yin Ju., Kuznetsov A., Morozov O., Sakhabutdinov A., Petruccione F., Singh G., Tiwari M., Janyani V. Researches of Parameters of Chiral Few-Mode Optical Fiber Pilot Sample with Improved Height of Step Refractive Index Profile. *Proc. of Telecom. Universities*. 2021;7(1):6–19. (in Russ.) DOI:10.31854/1813-324X-2021-7-1-6-19

**Abstract:** This work presents results of researches of fabricated pilot sample of chiral few-mode optical fiber (FMF) with induced twisting of 10 and 66 revolutions per meter, core diameter  $11\ \mu\text{m}$  (that almost corresponds to standard singlemode optical fibers), typical "telecommunication" cladding diameter  $125\ \mu\text{m}$  and improved height of step refractive index profile. Proposed few-mode optical fiber supports 4 guided modes over "C"-band. We considered design and selection of desired technological parameters, based on results of computations, performed by both rigorous and approximation methods. Spectral curves of dispersion parameters are represented as well as results of experimental measurements near-field laser beam profile and spectral and pulse responses of laser-excited optical signals.

**Keywords:** few-mode optical fiber, step refractive index profile, refractive index profile height, few-mode regime, chirality, differential mode delay.

#### FUNDING

This research was funded by RFBR, DST, NSFC and NRF according to the research project 19-57-80016 BRICS\_t.


#### References

1. Barlow A.J., Ramskov-Hansen J.J., Payne D.N. Birefringence and polarization mode dispersion in spun single-mode fibers. *Applied Optics*. 1981;20:2962–2968. DOI:10.1364/AO.20.002962
2. Hart A.C. Jr., Huff R.G., Walker K.L. *Method of making a fiber having low polarization mode dispersion due to a permanent spin*. U.S. Patent, no. 5298047, 29th March 1994.
3. Blaszyk P.E., Christoff W.R., Gallagher D.E., Hawk R.M., Kiefer W.J. *Method and apparatus for introducing controlled spin in optical fibers*. U.S. Patent, no. 6324872 B1, 4th December 2001.
4. Li M.-J., Chen X., Nolan D.A. Fiber spinning for reducing polarization mode dispersion in single-mode fibers: theory and applications. *Proceedings of SPIE*. 2003;5247:97–110. DOI:10.1117/12.512063
5. DiGiovanni D.J., Golowich S.E., Jones S.L., Reed W.A. *Method of making an improved multimode optical fiber and fiber made by method*. Patent U.S., no. 2001019652A1, 06.09.2001.
6. DiGiovanni D.J., DiMarcello F.V., Jiang X.L.; Oulundsen G.E., Pandit S.P. *Multimode optical fiber with increased bandwidth*. Patent U.S., no. 2004228590A1, 18.11.2004.
7. Gatchin Y., Demidov V., Dukelskii K., Ter-Nersesyants E. Quasi-Single-Mode Fibers with Increased Core Size Based on Non-Hexagonal Type Microstructures. *Proc. of Telecom. Universities*. 2017;3(3):37–42 (In Russ.) DOI:10.31854/1813-324X-2017-3-3-37-42
8. Demidov V., Dukelskii K., Leonov S., Matrosova A. Nonlinear Optical Transformation of Picosecond Laser Pulses in Multimode Microstructured Fibers with Limited Nonlinearity. *Proc. of Telecom. Universities*. 2018;4(1):61–66. (In Russ.) DOI:10.31854/1813-324X-2018-1-61-66
9. Ananyev V., Demidov V., Leonov S., Nikonorov N. Hollow-Core Antiresonant Fibers with a Large Effective Mode Area for Operation in the Near- and Mid-IR Spectral Regions. *Proc. of Telecom. Universities*. 2019;5(1):6–14. (In Russ.) DOI:10.31854/1813-324X-2019-5-1-6-14
10. Agrawal G.P. *Nonlinear fiber optics*. Burlington: Academic Press; 2012. 648 p.
11. Olszewski J., Szpulak M., Urbanczyk W. Effect of coupling between fundamental and cladding modes on bending losses in photonic crystal fibers. *Optics Express*. 2005;13(16):6015–6022. DOI:10.1364/oe.13.006015
12. Bourdine A.V. Modeling and simulation of piecewise regular multimode fiber links operating in a few-mode regime. *Advances in Optical Technologies*. 2013;2013. DOI:10.1155/2013/469389
13. Bourdine A.V., Delmukhametov, O.R. Calculation of transmission parameters of the launched higher-order modes based on the combination of a modified Gaussian approximation and a finite element method. *Telecommunications and Radio Engineering*. 2013;72(2):111–123. DOI:10.1615/TelecomRadEng.v72.i2.30
14. Adams M. *Introduction to the Theory of Optical Waveguides*. Moscow: Mir Publ.; 1984. 512 p. (in Russ.)
15. Snyder A., Love J. *Optical Waveguide Theory*. Moscow: Radio i sviaz Publ.; 1987. 656 p. (in Russ.)
16. Listvin A.V., Listvin V.N., Shvyrkov D.V. *Optical fibers for communication lines*. Moscow: LESARart Publ.; 2003. 288 p. (in Russ.)
17. Bourdin A.V. Differential Mode Delay of Different Generations of Quartz Multimode Optical Fibers. *Foton-Ekspress*. 2008;5-6(69-70):20–22. (in Russ.)
18. Bourdin A.V. About Multimode Optical Fiber Differential Mode Delay Diagnostics. *Infokommunikacionnye tehnologii*. 2008;6(4):33–38. (in Russ.)
19. Bourdine A.V., Prokopyev V.I., Dmitriev E.V., Yablochkin K.A. Results of conventional field-test equipment application for identification of multimode optical fibers with high DMD. *Proceedings of Optical Technologies for Telecommunications*, 25–27 November 2008, Kazan, Russian Federation. 2009. vol.7374. p.73740J-01–73740J-07. DOI:10.1117/12.829038
20. *User's manual for the FSU 975 single fiber fusion splicer by Ericsson*. Available from: [https://issuu.com/fusionsplacers\\_org/docs/ericsson\\_fsu975\\_man\\_20110823\\_201414](https://issuu.com/fusionsplacers_org/docs/ericsson_fsu975_man_20110823_201414) [Accessed 02nd March 2021]
21. Gower J. *Optical Communication Systems*. Moscow: Radio i sviaz Publ.; 1989. 504 p. (in Russ.)



## Сведения об авторах:


**БУРДИН**  
Антон Владимирович

доктор технических наук, заместитель генерального директора по научной работе и развитию Научно-производственного объединения «Государственный оптический институт им. С.И. Вавилова», профессор кафедры линий связи и измерений в технике связи Поволжского государственного университета телекоммуникаций и информатики, профессор кафедры фотоники и линий связи Санкт-Петербургского государственного университета телекоммуникаций им. проф. М.А. Бонч-Бруевича,  
[bourdine@yandex.ru](mailto:bourdine@yandex.ru)  
 <https://orcid.org/0000-0001-8737-5486>


**БАРАШКИН**  
Алексей Юрьевич

аспирант кафедры линий связи и измерений в технике связи Поволжского государственного университета телекоммуникаций и информатики,  
[aleksej.barashkin@bk.ru](mailto:aleksej.barashkin@bk.ru)


**БУРДИН**  
Владимир Александрович

доктор технических наук, заведующий кафедрой линий связи и измерений в технике связи Поволжского государственного университета телекоммуникаций и информатики, [burdin@psati.ru](mailto:burdin@psati.ru)  
 <https://orcid.org/0000-0003-1723-9168>

**ДАШКОВ**  
Михаил Викторович

кандидат технических наук, доцент кафедры линий связи и измерений в технике связи Поволжского государственного университета телекоммуникаций и информатики, [mvd.srttc@gmail.com](mailto:mvd.srttc@gmail.com)  
 <https://orcid.org/0000-0002-3919-4151>

**ДЕМИДОВ**  
Владимир Витальевич

начальник Научного отделения № 6 «Волокно» Научно-производственного объединения «Государственный оптический институт им. С.И. Вавилова», [demidov@goi.ru](mailto:demidov@goi.ru)  
 <https://orcid.org/0000-0003-2545-2487>


**ХОХЛОВ**  
Александр Вадимович

ведущий инженер Научного отделения № 6 «Волокно» Научно-производственного объединения «Государственный оптический институт им. С.И. Вавилова», [khokhlov@goi.ru](mailto:khokhlov@goi.ru)

**ТЕР-НЕРСЕСЯНЦ**  
Егише Вавикович

кандидат технических наук, старший научный сотрудник, начальник лаборатории Научного отделения № 6 «Волокно» Научно-производственного объединения «Государственный оптический институт им. С.И. Вавилова», [ter@goi.ru](mailto:ter@goi.ru)


**МАТРОСОВА**  
Александра Сергеевна







младший научный сотрудник Научного отделения № 6 «Волокно» Научно-производственного объединения «Государственный оптический институт им. С.И. Вавилова», аспирант факультета Фотоники и оптоинформатики Национально-исследовательского университета ИТМО,  
[a.pasishnik@gmail.com](mailto:a.pasishnik@gmail.com)  
 <https://orcid.org/0000-0001-8594-741X>

**ПЧЕЛКИН**  
Григорий Александрович

техник Научного отделения №6 «Волокно» Научно-производственного объединения «Государственный оптический институт им. С.И. Вавилова»  
[beegrig@mail.ru](mailto:beegrig@mail.ru)

**ДУКЕЛЬСКИЙ**  
Константин Владимирович

кандидат технических наук, генеральный директор Научно-производственного объединения «Государственный оптический институт им. С.И. Вавилова», доцент кафедры проектирования и безопасности компьютерных систем Национально-исследовательского университета ИТМО, заведующий кафедрой Инновационных телекоммуникационных технологий Санкт-Петербургского государственного университета телекоммуникаций им. проф. М.А. Бонч-Бруевича, [kdukel@goi.ru](mailto:kdukel@goi.ru)  
 <https://orcid.org/0000-0002-1627-7499>

<b>ЕВТУШЕНКО</b> Александр Сергеевич	аспирант кафедры линий связи и измерений в технике связи Поволжского государственного университета телекоммуникаций и информатики, <a href="mailto:alex2194ru@yandex.com">alex2194ru@yandex.com</a>
<b>ЗАЙЦЕВА</b> Елена Сергеевна	аспирант кафедры линий связи и измерений в технике связи Поволжского государственного университета телекоммуникаций и информатики, <a href="mailto:zaytsewa@inbox.ru">zaytsewa@inbox.ru</a>
<b>ИСМАИЛ</b> Ясира	PhD, профессор Школы химии и физики университета Квазулу-Натал (ЮАР), <a href="mailto:ismaily@ukzn.ac.za">ismaily@ukzn.ac.za</a>  <a href="https://orcid.org/0000-0002-5580-0035">https://orcid.org/0000-0002-5580-0035</a>
<b>ИНЬ</b> Юань	PhD, профессор кафедры экспериментальной физики Научно-технического университета Китая, <a href="mailto:vinjuan@ustc.edu.cn">vinjuan@ustc.edu.cn</a>
<b>КУЗНЕЦОВ</b> Артем Анатольевич	кандидат технических наук, доцент кафедры радиотоники и микроволновых технологий Казанского национального исследовательского технического университета им. А.Н. Туполева – КАИ, <a href="mailto:serius_91@mail.ru">serius_91@mail.ru</a>  <a href="https://orcid.org/0000-0003-0276-0874">https://orcid.org/0000-0003-0276-0874</a>
<b>МОРОЗОВ</b> Олег Геннадьевич	доктор технических наук, заведующий кафедрой радиотоники и микроволновых технологий Казанского национального исследовательского технического университета им. А.Н. Туполева – КАИ, <a href="mailto:microoil@mail.ru">microoil@mail.ru</a>  <a href="https://orcid.org/0000-0003-4779-4656">https://orcid.org/0000-0003-4779-4656</a>
<b>САХАБУТДИНОВ</b> Айрат Жавдатович	доктор технических наук, профессор кафедры радиотоники и микроволновых технологий Казанского национального исследовательского технического университета им. А.Н. Туполева – КАИ, <a href="mailto:azhsakhabutdinov@kai.ru">azhsakhabutdinov@kai.ru</a>  <a href="https://orcid.org/0000-0002-0713-7806">https://orcid.org/0000-0002-0713-7806</a>
<b>ПЕТРУЧЧИОНЕ</b> Франческо	доктор естественных наук, профессор кафедры теоретической физики университета Квазулу-Натал (ЮАР), <a href="mailto:petruccione@ukzn.ac.za">petruccione@ukzn.ac.za</a>  <a href="http://orcid.org/0000-0002-8604-0913">http://orcid.org/0000-0002-8604-0913</a>
<b>СИНГХ</b> Ганшьям	PhD, профессор кафедры электроники и техники связи Национального технологического института Малавии (Республика Индия), <a href="mailto:gsingh.ece@mnit.ac.in">gsingh.ece@mnit.ac.in</a>  <a href="https://orcid.org/0000-0002-0833-6815">https://orcid.org/0000-0002-0833-6815</a>
<b>ТИВАРИ</b> Маниш	PhD, профессор кафедры электроники и техники связи Национального технологического института Малавии (Республика Индия), <a href="mailto:manish.tiwari@jaipur.manipal.edu">manish.tiwari@jaipur.manipal.edu</a>
<b>ДЖАНЬЯНИ</b> Виджай	PhD, заведующий кафедрой электроники и техники связи Национального технологического института Малавии (Республика Индия), <a href="mailto:vinjuan@ustc.edu.cn">vinjuan@ustc.edu.cn</a>  <a href="https://orcid.org/0000-0001-7498-5525">https://orcid.org/0000-0001-7498-5525</a>