

ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ОТКЛОНЕНИЯ ГЕОМЕТРИИ ПРОМЫШЛЕННЫХ ОБРАЗЦОВ ОТ ОПТИМАЛЬНОЙ ФОРМЫ НА ДЕГРАДАЦИЮ СПЕКТРАЛЬНОЙ ХАРАКТЕРИСТИКИ ДМЗ

*А.В. Бурдин¹,
Х.А. Жуманов²,
М.С. Хаджаев²,
М.А. Болбеков²*

*¹Санкт-Петербургский государственный
университет телекоммуникаций
имени М.А. Бонч-Бруевича*

*²Самаркандский филиал
Ташкентского университета
информационных технологий имени
Мухаммада ал-Хоразми*

Аннотация. В работе представлены результаты расчета схемы прецизионного пространственного позиционирования каналов системы модового мультиплексирования (MDM) на торце кварцевых маломодовых оптических волокон (FMF) с увеличенным диаметром сердцевины. Рассматривались ранее предложенные 16-LP-модовые FMF с диаметром сердцевины 42 мкм и оптимизированной специальной формой градиентного профиля показателя преломления, обеспечивающего снижение дифференциальной модовой задержки (ДМЗ) менее 120 пс/км по всему модовому составу в «С»-диапазоне длин волн. Данные характеристики достигаются в случае идеальной геометрии сердцевины FMF – круглого поперечного сечения и симметричного, полностью соответствующего искомой оптимальной, формой градиентного профиля показателя преломления. Вместе с тем, в силу технологических особенностей промышленного производства кварцевых волоконных световодов, «реальные» FMF будут отличаться

наведенной несимметричной эллиптичностью поперечного сечения и геометрии сердцевины в целом, а также локальными отклонениями профиля показателя преломления от оптимальной формы.

Annotatsiya. Ishda pretsizion sxemaning hisoblash natijalari keltirilgan o'zak diametri kattalashtirilgan kvarsli kam modli optik tolalar (FMF) uchidagi modali multipleksorlash tizimi (MDM) kanallarini fazoviy pozitsiyalash. Yuqorida taklif qilingan o'zak diametri 42 mkm va differensial sindirish ko'rsatkichining pasayishini ta'minlaydigan maxsus optimallashtirilgan gradiyent profilining shakli bo'lgan 16-LP-mod FMFlari ko'rib chiqilgan "C"-diapazonidagi barcha modalar tarkibi bo'yicha 120 ps/km dan kam bo'lgan modalar ushlanib qolishi (DMD) to'lqin uzunliklari. Ushbu xarakteristikalar FMF yadrosining ideal geometriyasi - dumaloq ko'ndalang kesimi va simmetrik, to'liq sindirish ko'rsatkichining izlanayotgan optimal, gradiyent profilining shakliga mos keladigan. Shu bilan birga, sanoat ishlab chiqarishining texnologik xususiyatlari tufayli kvars tolali yorug'lik o'tkazgichlarni ishlab chiqarishda "real" FMF ko'ndalang kesimining nosimmetrik elliptikligi va umuman o'zak geometriyasi, shuningdek, sindirish ko'rsatkichi profilining optimal shaklidan lokal og'ishi bilan ajralib turadi.

Ключевые слова: мультиплексирование с разделением режимов, маломодовые оптические волокна, маломодовый режим передачи оптического сигнала, волоконно-оптических линий передачи.

Kalit so'zlar: rejimga bo'linish multipleksatsiyasi, kam rejimli optik tolalar, bir necha rejimli optik signal uzatish rejimi, optik tolali uzatish liniyalarining.

Введение

На сегодняшний день переход от традиционных одномодовых оптических волокон (ОВ) в линейном тракте волоконно-оптических линий передачи (ВОЛП) к маломодовым световодам (FMF – Few Mode Fibers) с экстремально увеличенным, по сравнению с упомянутыми одномодовыми ОВ действующих рекомендаций ITU-T [1] и коммерческими FMF [2], диаметром сердцевины

рассматривается как одно из перспективных решений задачи преодоления нелинейного предела Шеннона для оптических сетей связи нового поколения, ориентированных на сверхвысокие скорости передачи информации [3 – 6]. Увеличение диаметра сердцевины FMF непосредственно приводит к повышению модовой площади эффективного сечения, что, в свою очередь, неизбежно снижает нелинейность самого ОВ. Именно поэтому в настоящее время ВОЛП на базе FMF с сильно увеличенным диаметром сердцевины и практически нивелированной, с точки зрения вводимых мощностей групповых сигналов волоконно-оптических систем последнего поколения, в сочетании с технологиями модового мультиплексирования (MDM – Mode Division Multiplexing) и MIMO (Multiple Input Multiple Output – множественные входы/множественные выходы), ассоциируются с экстремально высокой пропускной способностью, ориентированной на сверхвысокие скорости передачи данных, достигающих десятки Тбит/с [7 – 13].

Очевидно, что существенное увеличение диаметра сердцевины FMF, необходимое для существенного снижения нелинейности ОВ, неизбежно приводит к появлению еще большего числа новых модовых составляющих высших порядков, удовлетворяющих условию отсечки рассматриваемого световода. Это требует проведения дополнительных мероприятий по уменьшению дифференциальной модовой задержкой (ДМЗ) [14], которая, в общем случае, является основным негативным линейным фактором искажения оптического сигнала при распространении по ОВ в маломодовом режиме [3 – 15]. И в этом смысле при разработке конструкций FMF ключевой проблемой является поиск компромисса между модовой эффективной площадью сечения ОВ, непосредственно связанной с диаметром сердцевины, который, в том числе, определяет модовый состав волоконного световода, и минимизацией

ДМЗ на заданной оптической несущей или в определенном выделенном диапазоне длин волн [7 – 13].

1.1 Моделирование «искажений» геометрии сердцевины, соответствующих промышленным образцам волоконных световодов

На первом этапе было проанализировано более 20 протоколов измерений профиля показателя преломления [16, 18] промышленных образцов многомодовых ОВ как первого поколения категории TIA/ISO OM2 [1], так и многомодовых ОВ, оптимизированных для совместной работы с когерентными источниками оптического излучения (LOMF – Laser Optimized

Multimode Fibers) категории TIA/ISO OM2+/OM3 [1]. Данные измерения были выполнены сертифицированным лабораторным оборудованием – «анализатором волоконных световодов» [16, 18], реализующего метод отраженного ближнего поля [19] и обеспечивает возможность вывода распределения значений показателя преломления по радиальной координате поперечного сечения исследуемого ОВ в двух условных плоскостях «X» и «Y» с достаточно высоким пространственным разрешением – менее 0.5 мкм по радиальной координате и менее 0.001 по абсолютной разности локального значения показателя преломления ОВ и чистого кварца (см. спецификации [20] и др.).

Анализ полученных результатов измерений продемонстрировал, что даже в случае LOMF, отличающихся более строгими требованиями к воспроизведению искомого градиентного профиля ОВ, наблюдаются существенные локальные флуктуации показателя преломления. В результате статического анализа указанных выше протоколов измерений было выявлено, что данные флуктуации хорошо описываются с помощью нормального закона распределения: здесь локальное математическое ожидание соответствует непосредственно локальному значению показателя преломления, в то время как дисперсия не превышает $5 \cdot 10^{-5}$. Поэтому далее такие флуктуации рассматривались как «нормальные». В свою очередь, для имитации аномально сильных «искажений» профиля дисперсия была увеличена в 3 раза – непосредственно до $15 \cdot 10^{-5}$.

Кроме того, было выявлено, что промышленные образцы ОВ отличаются от модельных наличием несимметричной эллиптичностью поперечного сечения как самого ОВ по внешнему диаметру оболочки, так и непосредственно по сердцевине. Анализ более 20 упомянутых протоколов измерений профиля показателя преломления [16, 18] промышленных образцов многомодовых ОВ позволил выделить «наихудший» случай разброса значений радиусов сердцевины полу сечений ОВ для LOMF категории OM2+/OM3, которые далее использовались для моделирования «искажений» геометрии исследуемого FMF.

Очевидно, что внесенная асимметричная эллиптичность поперечного сечения сердцевины в сочетании с сильными локальными искажениям профиля показателя преломления существенно усложняют геометрию исследуемого FMF. Поэтому на следующем этапе для расчета дисперсионных параметров модового состава такого FMF было предложено использовать ранее разработанную модификацию строгого метода смешанных конечных элементов (МСКЭ) [21], адаптированную на случай анализа ОВ с увеличенным диаметром сердцевины [22, 23]. При этом формирование 3D-структуры исследуемого FMF для последующего анализа МСКЭ осуществляется с помощью предложенной методики восстановления 3D-структуры промышленного образца ОВ на основе штатных протоколов измерения профиля показателя преломления, которая подробно описана в опубликованных работах [24, 25].

1.2. Результаты исследования влияния «искажений» геометрии сердцевины на деградацию DMD модового состава 16-LP-модового FMF с диаметром сердцевины 42 мкм

Представленный метод моделирования «искажений» геометрии сердцевины «промышленного образца» ОВ предложено апробировать на примере ранее полученного модельного образца градиентного профиля показателя преломления 16-LP-модового кварцевого FMF с сердцевиной 42 мкм [26, 27]. Данный профиль обеспечивает теоретическое снижение DMD по

всему составу 16 направляемых мод этого модельного FMF с идеальным круглым поперечным сечением до 120 пс/кс и менее в «С»-диапазоне длин волн. Таким образом, согласно предыдущему разделу, в рассматриваемый оптимизированный профиль показателя преломления были внесены флуктуации: здесь также использовался нормальный закон распределения, при этом локальным математическим ожиданием являлось локальное значение показателя преломления n_k , в то время как дисперсия выбиралась равной $5 \cdot 10^{-5}$ в случае «нормальных» искажений и $15 \cdot 10^{-5}$ – в случае «аномально сильных» искажений. Градиентный профиль показателя преломления исследуемого 16-LP-модового FMF с внесенными искажениями приведен на рисунке 1(а).

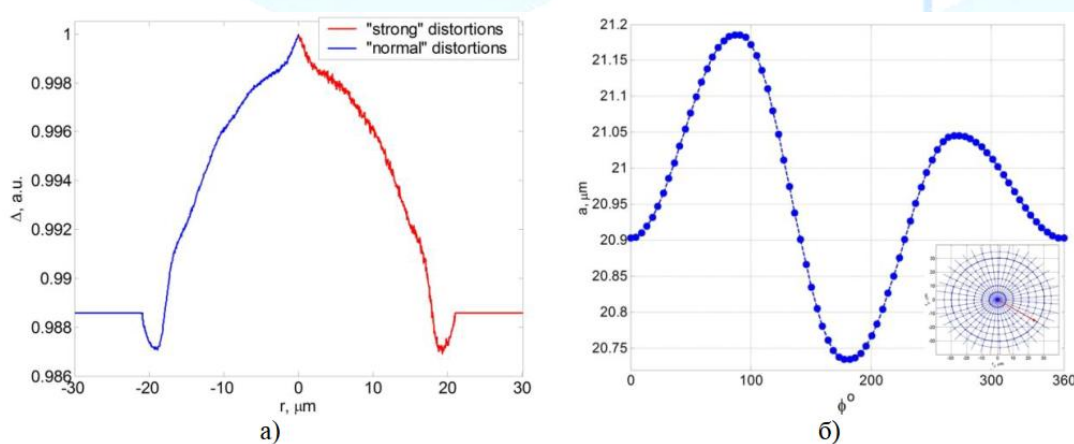


Рис. 1. Моделирование искажений геометрии сердцевины исследуемого 16-LP-модового FMF, обусловленные особенностями технологического процесса производства ОВ промышленными способами:

(а) градиентный профиль 16-LP-модового FMF с наложением «нормальных» и «аномально сильных» локальных флуктуаций показателя преломления;

(б) асимметричная эллиптичность поперечного сечения сердцевины FMF: распределение вариаций радиуса сердцевины FMF по значениям полярного угла $\phi = 0^\circ \dots 360^\circ$.

Далее с помощью разработанной оригинальной методики, подробно изложенной в [24, 25], была проведена реконструкция 3D-структуры исследуемого FMF для случая «аномально сильных» локальных флуктуаций

показателя преломления и наведенной асимметричной эллиптичности геометрии сердцевины. Здесь вариации радиуса сердцевины относительно

значений полярного угла выбирались также в соответствии с протоколами измерения профилей промышленных образцов LOMF, пропорционально масштабированным на усредненный («номинальный») радиус сердцевины FMF 21 мкм, которые в данном случае достигали до 0.47.

Полученная в результате реконструкции зависимость значения радиуса сердцевины от полярного угла $\varphi=0^\circ \dots 360^\circ$ для рассматриваемого ОВ представлена на рисунке 1(б). Затем для восстановленной 3D-структуры FMF была выполнена известная процедура формирования переменной адаптивной треугольной сетки представления анализируемого ОВ и проведен последующий расчет нормированной постоянной распространения, а также полей направляемых мод с помощью указанного выше строгого метода МСКЭ [22, 23].

Результаты расчета диаграммы ДМЗ направляемых мод для оптимизированного профиля модельного FMF, профиля с внесенными «аномально сильными» искажениями при идеально круглом поперечном сечении сердцевины и исследуемого FMF с описанной наведенной асимметричной эллиптичностью сердцевины при одновременно «аномально сильных» искажениях профиля показателя преломления представлены на рисунке 2. Как и ожидалось, асимметричная эллиптичность геометрии сердцевины достаточно сильно деформирует поля направляемых высших мод, особенно последних радиальных порядков, что негативно сказывается на увеличении DMD, принимающему неприемлемо большие значения. Так, например, для моды LP_{04} этот параметр достигает более 750 пс/км в области верхней границы «С»-диапазона длин волн (рисунок 2(б), 3). Напротив, поля направляемых мод низшего (первого) радиального порядка по-прежнему хорошо описываются в базисе функций Лагерра-Гаусса в рамках приближения Гаусса [28] (рисунок 3), при этом их DMD по основной моде в среднем составляет порядка 11 пс/км (рисунок 2(а)).

Анализ полученных результатов требует проведения дополнительных мероприятий по фильтрации/подавлению соответствующих мод высших порядков.

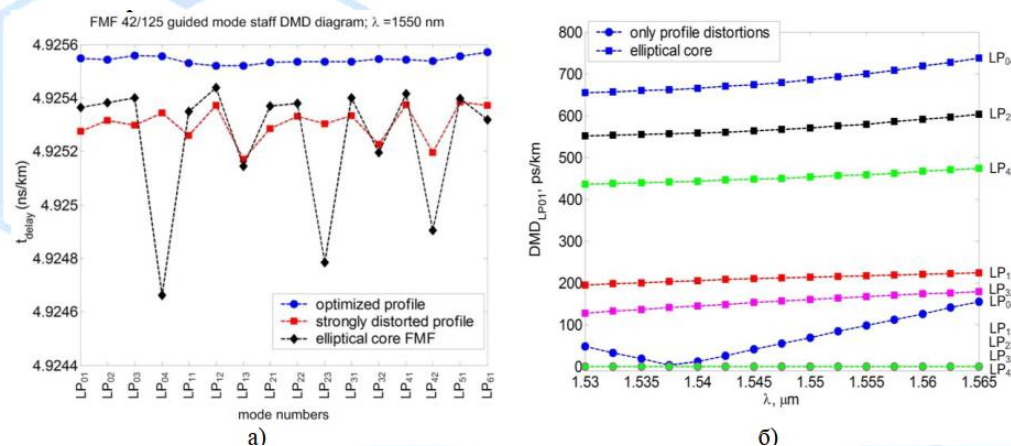


Рис. 2. Влияние наведенного искажения геометрии сердцевины исследуемого 16-LP-модового FMF с диаметром сердцевины 42 мкм на деградацию DMD:

(а) диаграммы DMD FMF для разной степени отклонения геометрии сердцевины от оптимальной формы;

(б) DMD направляемых мод высших радиальных порядков по основной моде LP_{01} для разной степени отклонения геометрии сердцевины FMF от оптимальной формы.

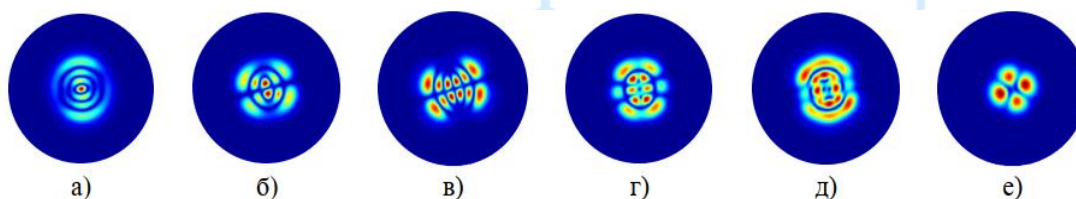


Рис. 3. Поля мод высших порядков FMF с асимметричной эллиптичностью геометрии сердцевины и «аномально сильными» искажениями профиля показателя преломления:

(а) LP_{04} ; (б) LP_{13} ; (в) LP_{23} ; (г) LP_{32} ; (д) LP_{42} ; (е) направляемая высшая мода низшего (первого) радиального порядка LP_{21} – поле хорошо описывается в рамках приближения Гаусса (базис функций Лагерра-Гаусса).

Заключение

Предложен простой подход для моделирования «искажений» геометрии FMF, обусловленных технологическими особенностями процессов этапов производства кварцевых ОВ. Представлены результаты его апробации на примере ранее полученного модельного образца градиентного профиля показателя преломления 16-LP-модового кварцевого FMF с сердцевинной 42 мкм, обеспечивающего теоретическое снижение DMD по всему модовому составу менее чем 120 пс/км в «С»-диапазоне длин волн, и анализ деградации спектральной характеристики DMD из-за наведенных «искажений» геометрии сердцевины.

Литературы

- [1] Optical Fibres, Cables and Systems (ITU-T Manual). – Geneva, 2009. – 300 p.
- [2] OFS. Few mode optical fiber series. OFS Fitel LLC. Product catalog [Electronic resource]. –Access mode: <http://fiber-optic-catalog.ofsoptics.com/viewitems/few-mode-optical-fiber-series/few-mode-optical-fiber-series1?> (01.12.2018).
- [3] Hirano, M. Future of transmission fiber // IEEE Photonics Journal. – 2011. – Vol. 3(2). – P. 316-319. DOI: IEEE Photonics Journal 3(2):316-319.
- [4] Essiambre, R.-J. Capacity trends and limits of optical communication networks / R.-J. Essiambre, R.W. Tkach // Proceedings of IEEE. – 2012. – Vol 100(5). – P. 1035-1055. DOI: 10.1109/JPROC.2012.2182970.
- [5] Ellis, D. The nonlinear Shannon limit and the need for new fibres // Proceedings of SPIE. – 2012. – Vol. 8434. – P. 84340H-1-11. DOI: 10.1117/12.928093.
- [6] Richardson, D.J. Space-division multiplexing in optical fibers / D.J. Richardson, J.M. Fini, L.E. Nelson // Nature Photonics. – 2013. – Vol. 7(5). – P. 354-362. DOI: 10.1038/nphoton.2013.94.
- [7] Ferreira, F.M. Design of few-mode fibers with M-modes and low differential mode delay / F.M. Ferreira, D. Fonseca, H.J.A. da Silva // IEEE Journal of Lightwave Technology. – 2014. – Vol. 32(3). – P. 353-360. DOI: 10.1109/JLT.2013.2293066.

- [8] Mizuno, T. Dense space-division multiplexed transmission systems using multi-core and multi-mode fiber / T. Mizuno, H. Takara, A. Sano, Yu. Miyamoto // *IEEE Journal of Lightwave Technologies*. – 2016. – Vol. 34(2). – P. 582-592. DOI: 10.1109/JLT.2015.2482901.
- [9] Sillard, P. 50 multimode fibers for mode division multiplexing / P. Sillard, D. Molin, M. Bigot-Astruc, A. Amezcua-Correa, K. de Jongh, F. Achten // *IEEE Journal of Lightwave Technologies*. – 2016. – Vol. 34(8). – P. 1672-1677. DOI: 10.1109/JLT.2015.2507442.
- [10] Mori, T. Few-mode fiber technology for mode division multiplexing / T. Mori, T. Sakamoto, M. Wada, T. Yamamoto, K. Nakajima // *Optical Fiber technology*. – 2017. – Vol. 35(2). – P. 37-45. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.yofte.2016.07.011>.
- [11] Ferreira, F. On the feasibility of mode-division multiplexed transmission over few-mode fibres / F. Ferreira, Ch. Sánchez, St. Sygletos, A.D. Ellis // *Proceedings of International Microwave and Optoelectronics Conference (IMOC)*. – 2017. – P. 1-5. DOI: 10.1109/IMOC.2017.8121160.
- [12] Shariati, B. Spectrally and spatially flexible optical networks: recent developments and findings / B. Shariati, D. Klonidis, J. Comellas, L. Velasco, I. Tomkos // *Proceedings of International Conference on Transparent Optical Networks (ICTON)*. – 2018. – P. We.C1.1-1–We.C1.1-4 . DOI: 10.1109/ICTON.2018.8473868.
- [13] Chebaane, S. Trenched raised cosine FMF for differential mode delay management in next generation optical networks / S. Chebaane, H. Fathallah, H. Seleem, M. Machhout // *Optics Communications*. – 2018. – Vol. 408. – P. 15-20. DOI: 10.1016/j.optcom.2017.08.050.
- [14] Bottacchi, S. Multi-Gigabit transmission over multimode optical fibre. Theory and design methods for 10GbE systems. – West Sussex: John Wiley & Sons Ltd., 2006. – 654 p.
- [15] An, H. Characterization of surface crystallization in Ge doped graded-index silica glass / H. An, Yi. Tang, P. McNamara, S. Fleming // *Optics Express*. – 2004. – Vol. 12(6). – P. 1055-1060. DOI: 10.1364/OPEX.12.001055.

- [16] Bourdine, A.V. Investigation of defects of refractive index profile of silica graded-index multimode fibers / A.V. Bourdine, D.E. Praporshchikov, K.A. Yablochkin // Proceedings of SPIE. – 2011. – Vol. 7992. – P. 799206-1-8. DOI: 10.1117/12.887258.
- [17] Demidov, V.V. Methods and technique of manufacturing silica graded-index fibers with a large central defect of the refractive index profile for fiber-optic sensors based on few-mode effects // V.V. Demidov, E.V. Ter-Nersesyants, A.V. Bourdine, V.A. Burdin, A.Yu. Minaeva, A.S. Matrosova, A.V. Khokhlov, A.V. Komarov, S.V. Ustinov, E.V. Golyeva, K.V. Dukelskii // Proceedings of SPIE. – 2017. – Vol. 10342. – P. 103420X-1. DOI: 10.1117/12.2270784.
- [18] Бурдин, А.В. Исследование дефектов профиля показателя преломления многомодовых оптических волокон кабелей связи / А.В. Бурдин, К.А. Яблочкин // Инфокоммуникационные технологии. – 2010. – № 2. – С. 22-27.
- [19] TIA/EIA-455-44B (FOTP-44B). Refractive Index Profile, Refracted Ray Method. IEC 60793 and ITU Recommendation G.651.
- [20] EXFO NR-9200 Optical Fiber Analyzer. Datasheet. EXFO, 1999 – 5 p.
- [21] Koshiba, M. A vector finite element method with the high-order mixed interpolation-type triangular elements for optical waveguiding problems / M. Koshiba, S. Maruyama, K. Hirayama // Journal of Lightwave Technology. – 1994. – Vol. 12(3). – P. 495-502. DOI: 10.1109/50.285332.
- [22] Бурдин, А.В. Расчет параметров передачи направляемых мод высших порядков на основе комбинации модифицированного приближения Гаусса и метода конечных элементов / А.В. Бурдин, О.Р. Дельмухаметов // Телекоммуникации. – 2010. – № 9. – С. 33-40.
- [23] Bourdine, A.V. Calculation of transmission parameters of the launched higher-order modes based on the combination of a modified Gaussian approximation and a finite element method / A.V. Bourdine, O.R. Delmukhametov // Telecommunications and Radio Engineering. – 2013. – Vol. 72(2). – P. 111-123. DOI: 10.1615/TelecomRadEng.v72.i2.30.

- [24] Бурдин, А.В. Расчет параметров передачи модового состава промышленных образцов кварцевых оптических волокон с увеличенным диаметром сердцевины / А.В. Бурдин, В.А. Бурдин, О.Р. Дельмухаметов // Инфокоммуникационные Технологии. – 2018. – Т. 16(1). – Р. 39-48.
- [25] Bourdine, A.V. Method for analysis of real commercially available optical fibers with large core diameter /A.V. Bourdine, V.A. Burdin, O.R. Delmukhametov // Proceedings of SPIE. – 2018. – Vol. 10774. – P. 10774-08-01-11. DOI: 10.1117/12.2317799.
- [26] Андреев, В.А. Моделирование градиентного профиля показателя преломления кварцевых оптических волокон с диаметром сердцевины 42 мкм и уменьшенной дифференциальной модовой задержкой / В.А. Андреев, А.В. Бурдин, В.А. Бурдин, Е.В. Дмитриев, А.С. Евтушенко, Н.Л. Севрук, Р.Х. Халиков // Инфокоммуникационные технологии. – 2016. – № 3. – С. 238-247.
- [27] Bourdine, A.V. Design of low DMD few-mode optical fibers with extremely enlarged core diameter providing nonlinearity suppression for operating over "C"-band central region / V.A. Andreev, A.V. Bourdine, V.A. Burdin, A.S. Evtushenko, R.H. Khalikov // Proceedings of SPIE. – 2017. – Vol. 10342. – P. 1034207-1-8. DOI: 10.1117/12.2270555.
- [28] Snyder, A.W. Optical waveguide theory / A.W. Snyder, J. Love. – London: Chapman & Hall, 1983. – 738 p.