

УДК 681.7.068

О.Н. Егорова¹, М.С. Астапович¹, С.Л. Семенов¹, М.Ю. Салганский²

¹ Научный центр волоконной оптики РАН, Москва, Россия

² Институт химии высокочистых веществ им. Г.Г. Девярых РАН,
Нижний Новгород, Россия

МНОГОСЕРДЦЕВИННЫЙ ВОЛОКОННЫЙ СВЕТОВОД С ПРЯМОУГОЛЬНЫМ ПОПЕРЕЧНЫМ СЕЧЕНИЕМ

В работе показано, что, в отличие от гетерогенных многосердцевинных световодов круглого поперечного сечения, световоды с прямоугольным поперечным сечением и сердцевинами, расположенными в один ряд, обладают устойчивостью к возрастанию перекрестных оптических помех при изгибе.

Ключевые слова: многосердцевинное оптическое волокно, перекрестные помехи.

O.N. Egorova¹, M.S. Astapovich¹, S.L. Semenov¹, M.Iu. Salganskii²

¹ Fiber Optics Research Center of the Russian Academy of Sciences,
Moscow, Russian Federation

² G.G. Deviatykh Institute of Chemistry of High-Purity Substances
of the Russian Academy of Sciences, Nizhniy Novgorod, Russian Federation

MULTICORE OPTICAL FIBER WITH RECTANGULAR CROSS-SECTION

This work demonstrates that in contrast with heterogeneous multicore fiber with circular cross-section, heterogeneous multicore fiber with rectangular cross-section and core arrangement in a line keeps much lower level of cross-talk between cores at bending with different radii.

Keywords: multicore optical fiber, cross-talk.

Пространственное уплотнение каналов с использованием многосердцевинных волоконных световодов позволяет увеличить скорость передачи информации, снизить габариты и вес оптических кабелей как в длинных линиях связи, так и в локальных сетях доступа, трактах передачи сигнала в центрах обработки и хранения данных, бортовых системах связи, суперкомпьютерах и т.п. В последнее время большое количество публикаций посвящено разработке и созданию многосердцевинных световодов с малой величиной перекрестных оптических

помех с круглым поперечным сечением и различной геометрией расположения сердцевин [1, 2]. При использовании многосердцевинного световода с 12 сердцевинами недавно был установлен рекорд скорости передачи информации по одному световоду – 1 Пбит/с [3], а в световоде с 22 сердцевинами была получена скорость 2,15 Пбит/с [4]. Также многосердцевинные световоды являются перспективными для использования в локальные сети доступа [5, 6] и для передачи сигнала в центрах хранения и обработки данных и суперкомпьютерах [7, 8].

Недавно в ряде работ теоретически было предложено использовать многосердцевинные световоды для задач радиофотоники, а именно – создания многоканальной линии задержки [9] и многорезонаторных оптоэлектронных генераторов [10]. Использование многосердцевинного световода вместо набора отдельных односердцевинных световодов в этом случае предпочтительно с точки зрения снижения влияния внешних факторов, например пространственного расположения световода (изгибов) и перепада температур, на параметры устройств, в частности групповую задержку.

Одним из вариантов создания многосердцевинных световодов являются световоды с прямоугольным поперечным сечением и сердцевинами, расположенными в один ряд. Преимуществами данной структуры являются, во-первых, возможность непосредственной стыковки такого световода с линейкой передающих или приемных устройств, поскольку геометрия расположения сердцевин повторяет геометрию расположения источников и приемников сигнала. Во-вторых, в отличие от световода круглого поперечного сечения, диаметр которого необходимо увеличивать при возрастании числа сердцевин, число сердцевин и размеры световода в прямоугольном световоде увеличиваются только в одном направлении, и световод, за счет сохранения малого размера в другом направлении, при этом не теряет гибкость и прочность.

Кроме того, в случае гетерогенных многосердцевинных световодов конструкция световода с прямоугольным поперечным сечением позволяет снизить перекрестные оптические помехи по сравнению со световодом круглого сечения. Гетерогенными многосердцевинными световодами называются световоды с различными параметрами соседних сердцевин. Схема расположения сердцевин в гетерогенном световоде прямоугольного поперечного сечения приведена на рис. 1, б.

Световод содержит расположенные попеременно сердцевинки двух типов – А и В, параметры двух типов сердцевин различны. Как известно, уменьшить перекрестную связь между сердцевинками возможно путем фазового рассогласования между модами соседних сердцевин, т.е. использованием сердцевин с различными постоянными распространения (индексами) мод [11]. Сделать это можно, например, если две соседние сердцевинки имеют различный диаметр. Однако на величину фазового рассогласования между модами соседних сердцевин оказывают влияние изгибы, которые всегда присутствуют в световоде и имеют неконтролируемый характер. При этом если в световоде с различными параметрами соседних сердцевин в прямом состоянии наблюдается малое значение перекрестных помех за счет значительной разницы постоянных распространения мод соседних сердцевин, то в изогнутом состоянии перекрестные помехи могут возрастать за счет сближения постоянных

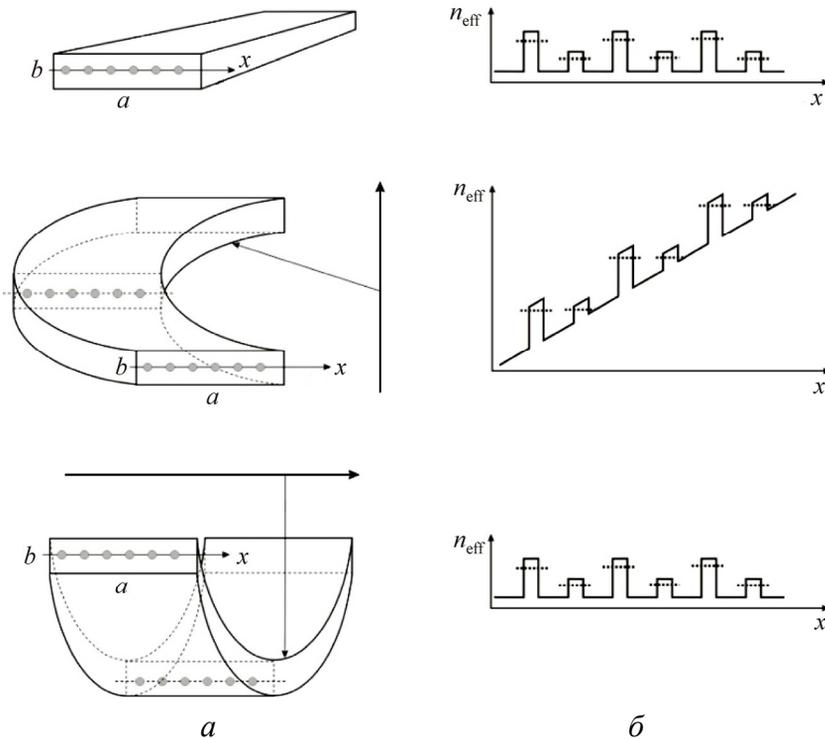


Рис. 1. Световод с прямоугольным поперечным сечением, изогнутый в различных направлениях, (а); соответствующий эквивалентный профиль показателя преломления (б) (профиль показателя преломления прямого световода, который по своим оптическим свойствам эквивалентен изогнутому световоду)

распространения мод вплоть до наступления условия фазового согласования и резкого роста перекрестных помех. Поскольку изменение величины перекрестных помех, связанной с изменением разницы постоянных распространения мод за счет изгиба, трудно контролировать, использование фазового рассогласования мод соседних сердцевин может оказаться неэффективным с точки зрения снижения перекрестных помех в световодах с круглым поперечным сечением. Однако ситуация изменяется в случае гетерогенного световода с прямоугольным поперечным сечением.

На рис. 1, *а* изображен многосердцевинный световод с прямоугольным поперечным сечением, прямой и изогнутый в различных направлениях. На рис. 1, *б* представлены соответствующие профили показателей преломления прямого световода, эквивалентного по своим оптическим свойствам изогнутому. Пунктиром на рис. 1, *б* показаны эффективные индексы мод сердцевин. При достаточно большом отношении длин сторон поперечного сечения a/b световод будет изгибаться только вокруг оси, параллельной длинной стороне поперечного сечения, как показано на рис. 1, *а*. При таком изгибе, как показано на рис. 1, *б* внизу справа, не будет происходить сближения постоянных распространения (эффективных индексов) мод соседних сердцевин и условия фазового рассогласования мод не изменятся. Поэтому, в отличие от гетерогенного световода с круглым поперечным сечением, в гетерогенном световоде с прямоугольным поперечным сечением и сердцевинами, расположенными в один ряд, не будет происходить возрастания перекрестных помех при изгибе. Возможность снижения перекрестных оптических помех в таких световодах впервые отмечена в работе [12], в этой же работе впервые реализован гетерогенный многосердцевинный световод с прямоугольным поперечным сечением. Однако вследствие большого расстояния между сердцевинами и малой длины полученного световода в работе [12] нам не удалось исследовать влияние изгиба световода на величину перекрестных оптических помех. Поэтому настоящая работа посвящена изготовлению и исследованию световода прямоугольного поперечного сечения с малым расстоянием между центрами соседних сердцевин, что позволяет изучить изменение перекрестных помех под действием изгиба, а также провести сравнение полученных результатов с результатами для многосердцевинных световодов круглого поперечного сечения.

Фотография торца изготовленного световода представлена на рис. 2, *а*. Изготовление световода проводилось методом сверления. Как видно, в процессе вытяжки световода не произошло существенной деформации формы поперечного сечения световода, форма сердцевин также сохранила форму круга. Размеры поперечного сечения световода составляют 300×110 мкм.

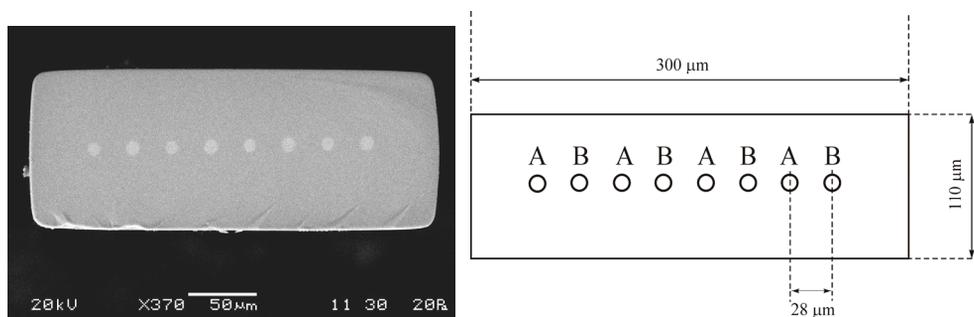


Рис. 2. Фотография торца многосердцевинного световода прямоугольного поперечного сечения, полученная на электронном микроскопе (*а*); схема расположения сердцевин типа А и В (*б*)

Для сравнения перекрестных оптических помех в многосердцевинных световодах прямоугольного и круглого поперечного сечения параметры сердцевин исследуемого световода были выбраны такими же, как и в работе [13] (световод «В»), в которой проводилось исследование влияния изгибов на перекрестные помехи в световодах круглого поперечного сечения. Диаметры сердцевин типа А и В (рис. 2, *б*) полученного световода с прямоугольным поперечным сечением составили 8,2 мкм и 9,45 мкм при разнице показателей преломления сердцевины и оболочки 0,055. Расстояние между центрами сердцевин составило 28,3 мкм. Расчетный критический диаметр изгиба, т.е. диаметр изгиба, при котором должно происходить фазовое согласование мод соседних сердцевин (в случае, если световод изгибался бы так, как показано на рис. 1), составляет около 15 см.

В полученном световоде длиной 50 м проводилось измерение перекрестных оптических помех при различных диаметрах изгиба световода. Для этого лазерное излучение на длине волны 1550 нм вводилось сначала в подводящий одномодовый односердцевинный световод. Затем излучение из подводящего световода вводилось в одну из сердце-

вин исследуемого световода с помощью стыковки торцов. На выходе исследуемого световода мощность излучения, выходящая из различных сердцевин, измерялась с помощью стыковки торца исследуемого многосердцевинного световода с торцом одномодового односердцевинного световода, соединенного с противоположной стороны с фотоприемником. Величина перекрестных оптических помех определялась как отношение мощности сигнала в одной из сердцевин к мощности в сердцевине, в которую вводилось излучение на входе.

В работе [13] в световоде круглого сечения с близкими параметрами сердцевин и расстоянием между центрами сердцевин расчетный критический диаметр изгиба составлял 13 см. При этом при намотке 2 м световода с различными диаметрами в этой работе наблюдалось возрастание перекрестных оптических помех на величину порядка 20 дБ при приближении радиуса изгиба световода к критическому значению.

Исследование, проведенное в настоящей работе, показало, что, в отличие от световода круглого поперечного сечения с такими же параметрами, исследованного в работе [13], в световоде прямоугольного поперечного сечения с сердцевинами, расположенными в один ряд, не наблюдается роста перекрестных оптических помех при приближении радиуса изгиба световода к критическому. С использованием длины световода 50 м проводилось исследование перекрестных помех при намотке световода с диаметрами 9, 13, 16, 19, 24, 30 см, при этом расчетный критический диаметр изгиба составлял 15 см. На рис. 3 представлены значения величины перекрестных оптических помех между соседними сердцевинами, полученные при вводе излучения в одну из сердцевин многосердцевинного световода прямоугольного поперечного сечения. При вводе излучения в другие сердцевинны были получены аналогичные результаты. Для всех сердцевин величина перекрестных помех между соседними сердцевинами (А–В, см. рис. 2) не изменялась в зависимости от радиуса намотки световода и находилась в диапазоне –60...–50 дБ. Значения величин перекрестных помех между сердцевинами, расположенных через одну или более сердцевин, составляют порядка –60...–65 дБ и также не зависят от радиуса изгиба световода.

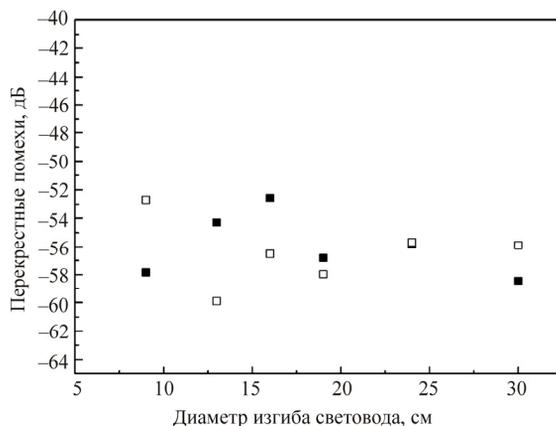


Рис. 3. Значения величины перекрестных оптических помех между соседними сердцевинами, полученные при вводе излучения в одну из сердцевинок многосердцевинного световода прямоугольного поперечного сечения. Заполненные и незаполненные квадраты – значения перекрестных помех с сердцевиной, расположенной с одной и с другой стороны соответственно

Таким образом, проведенные исследования показывают, что, в отличие от гетерогенных многосердцевинных световодов круглого поперечного сечения, световоды с прямоугольным поперечным сечением и сердцевинами, расположенными в один ряд, обладают устойчивостью к возрастанию перекрестных оптических помех при изгибе. Это происходит благодаря тому, что световод прямоугольного поперечного сечения изгибается преимущественно вокруг оси, параллельной длинной стороне поперечного сечения (см. рис. 1), что не приводит к изменению фазового рассогласования между модами соседних сердцевинок.

Работа выполнена при поддержке гранта РФФИ № 14-29-08183.

Список литературы

1. Design and fabrication of ultra-low crosstalk and low-loss multi-core fiber / T. Hayashi [et al.] // Opt. Express. – 2011. – Vol. 19. – P. 16576–16592.
2. Design and analysis of large-effective-area heterogeneous trench-assisted multi-core fiber / J. Tu [et al.] // Opt. Express. – 2012. – Vol. 20, no. 14. – P. 15157–15170.

3. 1.01-Pb/s (12 SDM/222 WDM/456 Gb/s) crosstalk-managed transmission with 91.4-b/s/Hz aggregate spectral efficiency / H. Takara [et al.] // Proc. European Conference of Optical Communications. – 2012. – P Th.3.C.1.

4. 2.15 Pb/s Transmission Using a 22 Core Homogeneous Single-Mode Multi-Core Fiber and Wideband Optical Comb / B.J. Puttnam, R.S. Luis, W. Klaus, J. Sakaguchi, J.-M.D. Mendinueta, Y. Awaji, N. Wada, Y. Tamura, T. Hayashi, M. Hirano, J. Marcianti // ECOC'2015. – PDP 3.1.

5. Multichannel Transmission of a Multicore Fiber Coupled with Vertical-Cavity Surface-Emitting Lasers / B. Rosinski [et al.] // J. Lightwave Technol. – 1999. – Vol. 17, no. 5. – P. 807–810.

6. Seven-core multicore fiber transmissions for passive optical network / B. Zhu, T.F. Taunay, M.F. Yan, J.M. Fini, M. Fishteyn, E.M. Monberg, F.V. Dimarcello // Optics Express. – 2010. – Vol. 18, no. 11. – P. 11117–11122.

7. Berthold J. Optical Networking for Data Centers Across Wide Area Networks // Proc. Optical Fiber Communication Conference. – 2012. – P. OW1J.1.

8. François V., Laramée F. Multicore Fiber Optimization for Application to Chip-to-Chip Optical Interconnects // J. Lightwave Technol. – 2013. – Vol. 31. – P. 4022–4028.

9. Gasulla I., Capmany J. Microwave Photonics Applications of Multicore Fibers // IEEE Photonics Journal. – 2012. – Vol. 4, no. 3. – P. 877–888.

10. Garcia S., Gasulla I. Multi-cavity optoelectronic oscillators using multicore fibers // Optics Express. – 2015. – Vol. 23, no. 3. – P. 2403–2415.

11. LeNoanne. US Patent 5519810 (1996).

12. Multicore fiber with rectangular cross-section / O.N. Egorova, S.L. Semjonov, A.K. Senatorov, M.Y. Salganskii, A.V. Koklyushkin, V.N. Nazarov, A.E. Korolev, D.V. Kuksenkov, M.-J. Li, E.M. Dianov // Optics Letters. – 2014. – Vol. 39, no. 7. – P. 2168–2170.

13. Crosstalk Variation of Multi-Core Fibre due to Fibre Bend / T. Hayashi, T. Nagashima, O. Shimakawa, T. Sasaki, E. Sasaoka // Proc. European Conference of Optical Communications. – 2010. – P. We.8.F.6.

References

1. Hayashi T. [et al.] Design and fabrication of ultra-low crosstalk and low-loss multi-core fiber. *Opt. Express*, 2011, vol. 19, pp. 16576-16592.
2. Tu J. [et al.] Design and analysis of large-effective-area heterogeneous trench-assisted multi-core fiber. *Opt. Express*, 2012, vol. 20, no. 14, pp. 15157-15170.
3. Takara H. [et al.] 1.01-Pb/s (12 SDM/222 WDM/456 Gb/s) crosstalk-managed transmission with 91.4-b/s/Hz aggregate spectral efficiency. *Proc. European Conference of Optical Communications*. 2012. P Th.3.C.1.
4. Puttnam B.J., Luis R.S., Klaus W., Sakaguchi J., Mendinuetta J.-M.D., Awaji Y., Wada N., Tamura Y., Hayashi T., Hirano M., Marcianite J. 2.15 Pb/s Transmission Using a 22 Core Homogeneous Single-Mode Multi-Core Fiber and Wideband Optical Comb. *ECOC'2015*, PDP 3.1.
5. Rosinski B. [et al.] Multichannel Transmission of a Multicore Fiber Coupled with Vertical-Cavity Surface-Emitting Lasers. *J. Lightwave Technol.*, 1999, vol. 17, no. 5, pp. 807-810.
6. Zhu B., Taunay T.F., Yan M.F., Fini J.M., Fishteyn M., Monberg E.M., Dimarcello F.V. Seven-core multicore fiber transmissions for passive optical network. *Optics Express*, 2010, vol. 18, no. 11, pp. 11117-11122.
7. Berthold J. Optical Networking for Data Centers Across Wide Area Networks. *Proc. Optical Fiber Communication Conference*. 2012. P. OW1J.1.
8. François V., Laramée F. Multicore Fiber Optimization for Application to Chip-to-Chip Optical Interconnects. *J. Lightwave Technol.*, 2013, vol. 31, pp. 4022-4028.
9. Gasulla I., Capmany J. Microwave Photonics Applications of Multicore Fibers. *IEEE Photonics Journal*. 2012, vol. 4, no. 3, pp. 877-888.
10. Garcia S., Gasulla I. Multi-cavity optoelectronic oscillators using multicore fibers. *Optics Express*, 2015, vol. 23, no. 3, pp. 2403-2415.
11. LeNoanne. US Patent 5519810 (1996).
12. Egorova O.N., Semjonov S.L., Senatorov A.K., Salganskii M.Y., Koklyushkin A.V., Nazarov V.N., Korolev A.E., Kuksenkov D.V., Li M.-J., Dianov E.M. Multicore fiber with rectangular cross-section. *Optics Letters*, 2014, vol. 39, no. 7, pp. 2168-2170.
13. Hayashi T., Nagashima T., Shimakawa O., Sasaki T., Sasaoka E. Crosstalk Variation of Multi-Core Fibre due to Fibre Bend. *Proc. European Conference of Optical Communications*. 2010. P. We.8.F.6.