

7. Lance G.N., Williams W.T. A general theory of classificatory sorting strategies. I. Hierarchical systems. *The Computer Journal*, 1967, vol. 4, no. 9, pp. 373–380. doi:10.1093/comjnl/9.4.373
8. Ushanev K.V. Simulation models of queuing systems of type Pa/M/1, H2/M/1 and research on the basis of their quality of service traffic with a complicated structure. *Sistemy upravlenija, svyazi i bezopasnosti*, 2015, no. 4, pp. 217-251. Available at: <http://sccs.intelgr.com/archive/2015-04/14-Ushanev.pdf> (accessed 20.12.2015) (In Russian).
9. Ushanev K.V., Makarenko S.I. The timeliness indicators of traffic service in queue systems pa/m/1 based on approximation of imitating modeling results. *Sistemy upravlenija, svyazi i bezopasnosti*, 2016, no. 1, pp. 42-65. Available at: <http://sccs.intelgr.com/archive/2016-01/03-Ushanev.pdf> (accessed 20.12.2015) (In Russian).
10. Recommendation ITU-T E.360.1. *Framework for QoS routing and related traffic engineering methods for IP-, ATM-, and TDM-based multiservice networks*. Switzerland, Geneva, 2002. 50 p. Available at: <http://T-REC-E.360.1-200205-I!!PDF-E.pdf> (accessed 20.12.2015).
11. Recommendation ITU-T E.800. *Terms and definitions related to quality of service and network performance including dependability*. Switzerland, Geneva, 2008. 26 p. Available at: <http://T-REC-E.800-200809-I!!PDF-E.pdf> (accessed 20.12.2015).

Received 15.02.2016

УДК 535.015; 535.016

ХАРАКТЕРНЫЕ ОСОБЕННОСТИ УДЕРЖАНИЯ И РАСПРОСТРАНЕНИЯ СВЕТОВОГО ИЗЛУЧЕНИЯ В РСФ-ВОЛОКНАХ

Афанасьев Е.Н.

Самарский государственный национальный исследовательский университет

им. акад. С.П. Королева, Самара, РФ

Email: karentans@mail.ru

В статье рассмотрены механизмы удержания и распространения света в РСФ-волокне, описаны классификация по принципу действия и виды конструкций волокон, включая скрученные фотонно-кристаллические волокна, рассмотрены фотонные запрещенные зоны и кристаллы, за счет которых происходит отражение света, а также геометрическое описание эффекта полного внутреннего отражения на основе закона Снеллиуса. Отмечено влияние температуры на состояние заполняющего вещества и, как следствие, на показатель преломления в РСФ-волокне, дана характеристика перспективам использования подобных волокон.

Ключевые слова: фотонно-кристаллическое волокно, оптика, полное внутреннее отражение, оптические волноводы, фотонные запрещенные зоны, кристаллы.

Введение

На сегодняшний день в мире разработано большое число видов оптических волноводов, используемых для передачи большого объема информации на дальние расстояния [1]. Все эти волокна имеют между собой множество различий исходя из целей их применения. Среди всего этого разнообразия оптических волноводов было разработано так называемое дырчатое фотонно-кристаллическое волокно (ФКВ), показанное на рис. 1.

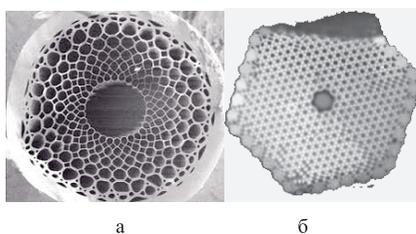


Рис. 1. Два вида ФКВ: с полый сердцевиной (а) и со сплошной сердцевиной (б) [2]

Рассмотрим строение ФКВ, имеющего ряд преимуществ над стандартными волокнами. Рассматриваемое волокно – именуемое также РСФ-волокном (photonic crystal-fiber) – в сечении имеет округлую геометрическую форму, состоит из сердцевины и внешней оболочки. Для того чтобы изготовить подобное волокно, в качестве основного материала обычно используют кварц, стекло, пластик или, иногда, комбинацию этих двух материалов. Материал сердцевины – очищенное стекло, в некоторых случаях пластик. В структуре такого волокна делают отверстия, которые заполняются воздухом, газом или другими видами веществ. Выбор вещества зависит от целей его использования. Оболочка волновода изготавливается с использованием метода легирования. Делается это для того, чтобы обеспечить меньшее значение показателя преломления относительно сердцевины. Это условие является обязательным

для обеспечения эффекта полного внутреннего отражения.

По механизму удержания света ФКВ делятся на РСФ, использующие принцип передачи света, основанный на эффекте полного внутреннего отражения от границы внутренней и внешней оболочек, и РСФ, где используются свойства фотонных кристаллов, обладающих запрещенными зонами. При этом сердцевина таких РСФ-волокон может быть как полый, так и сплошной.

Скрученные и чирпированные фотонно-кристаллические волокна

Примером специализированных ФКВ являются так называемые скрученные ФКВ (см. рис. 2), обладающие свойством подавления оптических длин волн, поскольку в результате продольного скручивания микроструктурированные волокна преобразуются в оптические фильтры. Чем сильнее закрутка волокна, тем лучше будут распространяться в нем сигналы с большей длиной волны. При этом наблюдаются «провалы» сигнала на коротких длинах волн – например, в окнах прозрачности порядка 850 нм. К такому выводу пришли исследователи из Института наук о свете общества Макса Планка (г. Эрланген, ФРГ), детально изучившие этот эффект в ФКВ и разработавшие теорию этого эффекта [4].

Результаты данного исследования позволяют продвинуться вперед в области оптических коммуникаций, а также конструирования лазеров, сенсоров и усилителей света. ФКВ с чирпированной оболочкой было разработано и исследовано в 2008 г.

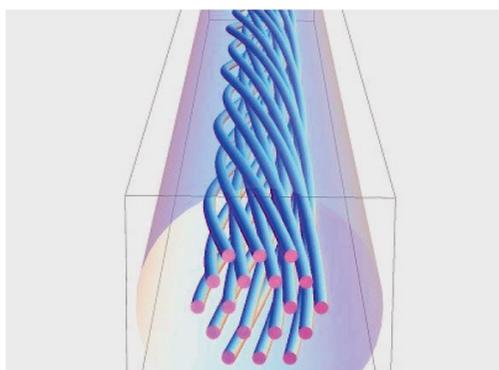


Рис. 2. Поперечный разрез скрученного фотонно-кристаллического волокна [3]

По сути, это обычный волновод с полый сердцевинной, но, в отличие от ФКВ с подобным видом сердцевины, у него структурная оболочка образована слоями отверстий, которые располагаются по определенному закону – см. рис. 3а.

Естественно, при таком построении отражающей оболочки излучение на различной длине волны будет отражаться от разных слоев фотонно-кристаллической структуры – рис. 3б.

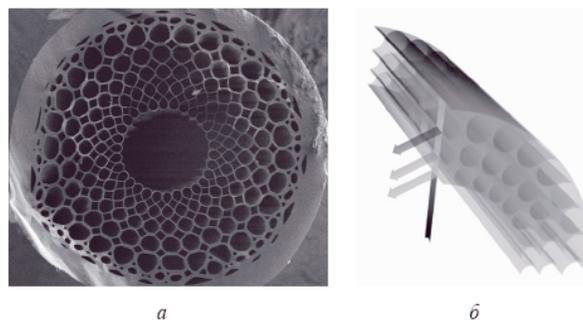


Рис. 3. Поперечное сечение ФКВ с чирпированной оболочкой (а) и схема отражения от чирпированной оболочки волновода (б) [6]

Чтобы доказать эффективность использования чирпированного волновода, в его полую сердцевину при помощи лазера ввели импульс длительностью 13 фс с энергией 4,3 нДж; длина образца составляла 1 м, диаметр полый сердцевины был равен 53 мкм [5]. При этом длительность выходного импульса имела значение 26 фс при коэффициенте пропускания 21%. Для сравнения – в обычном (среднестатистическом, коммерческом) ФКВ с полый сердцевинной диаметром 9,5 мкм тот же входной импульс уширяется до 3,5 пс при коэффициенте пропускания 47%. Делая вывод, можно сказать, что чирпирование ФКВ открывает новые возможности для передачи импульсов фемтосекундной длительности на дальние расстояния с наименьшими потерями и искажениями формы импульса, что необходимо для решения многих практических задач в области инфокоммуникаций, биофотоники, медицины и т.д.

Механизм и характер удержания и распространения света в ФКВ

Рассмотрим эффект удержания света за счет запрещенных зон. Фотонные кристаллы (ФК) образуют так называемую запрещенную зону; сам же ФК – это, по сути, «сверхрешетка» [7]. Особенность подобного строения волокна позволяет удерживать свет внутри себя благодаря фотонным запрещенным зонам.

Каждый фотон обладает энергией; причем если эта энергия совпадает с энергией запрещенной зоны, то фотон отражается от кристалла и, таким образом, остается в сердцевине волокна. И наоборот – если энергия фотона будет совпадать с энергией разрешенной зоны кристалла, то та-

кой фотон пройдет через него. В природе существуют разные виды и типы фотонных кристаллов: одномерные, двумерные, трехмерные [8; 10].

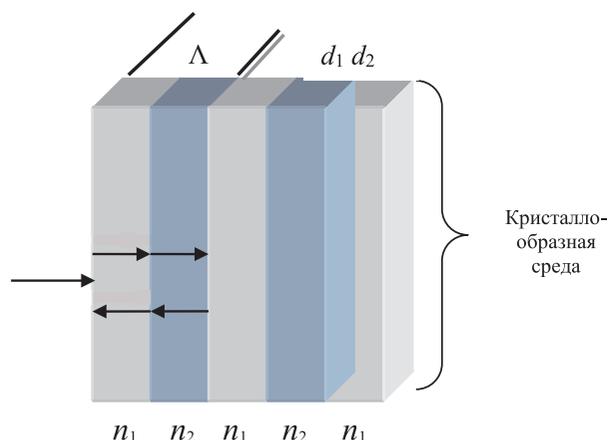


Рис. 4. Пример одномерного ФК, обладающего разными значениями показателя преломления

Различаются они по способности изменять коэффициент преломления в одном, двух и трех пространственных направлениях соответственно – как это показано на рис. 4. В данном случае n_1 и n_2 – показатели преломления различных кристаллообразных сред, d_1 и d_2 – толщина слоев, Λ – совокупность первых двух слоев. Очевидно, что коэффициент преломления в такой решетке изменяется только в одном направлении. Подобные кристаллы состоят из параллельно уложенных материалов разной природы – см. рис. 5.

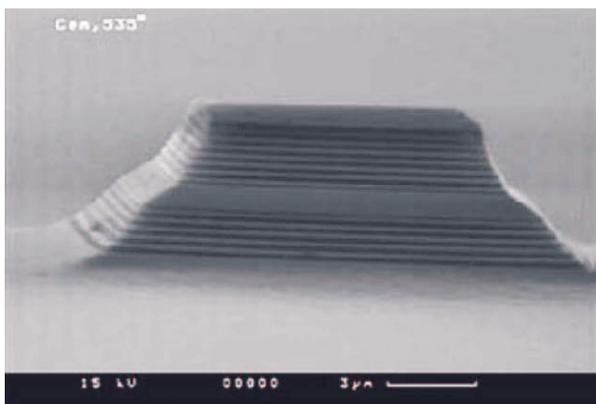


Рис. 5. Электронный снимок одномерного ФК, применяемого в лазерах как зеркало Брэгга [9]

Фотонная запрещенная зона возникает вследствие интерференции волн, которые отражаются от участков кристалла с разным показателем преломления; волны, отраженные от пары слоев, будут усиливаться в результа-

те интерференции при выполнении условия Брэгга-Вульфа [10] – см. рис. 6.

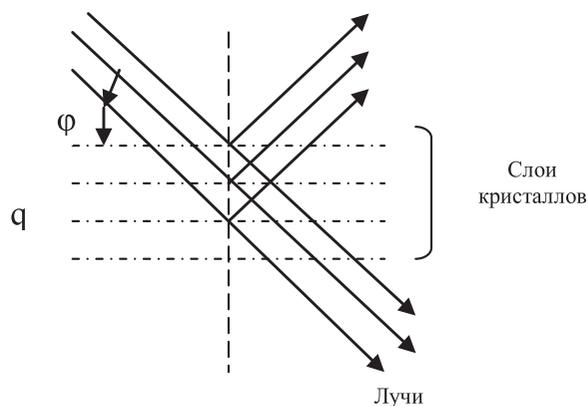


Рис. 6. Интерпретация последовательного отражения света от разных слоев кристалла

Волны, взаимно накладываясь, усиливают друг друга в одних точках пространства и ослабляют в других. По мере роста энергии волны ее длина приближается к значению кратному периоду кристаллической решетки кристалла. В результате этого процесса волна испытывает возмущение, поскольку близка к полному зеркальному отражению по условию Брэгга. Результатом наложения прямой и обратной волн есть стоячая волна, то есть распространение в идеализированном кристалле становится невозможным, происходит их отражение. Так в спектре энергий образуются пространства – запрещенные зоны.

Условие Брэгга-Вульфа для параллельных кристаллографических плоскостей имеет вид:

$$2q \sin \varphi = m\lambda, \quad (1)$$

где q – межплоскостное расстояние; φ – угол скольжения; λ – длина волны, m – порядок отражения.

Эффект полного внутреннего отражения

Кратко остановимся на особенностях полного внутреннего отражения света в ФКВ. Закон Снеллиуса [11]

$$n_1 \sin \alpha = n_2 \sin \beta \quad (2)$$

связывает углы падения α и преломления β с показателями преломления сред n_1 и n_2 , причем если $n_1 > n_2$, то существует критический угол α , при котором преломленный луч будет отсутствовать, что имеет место при $\beta \rightarrow \pi/2$. Угол, дополняющий указанный критический

угол до $\pi/2$, называется числовой апертурой волокна [12].

Потери в ФКВ зависят от его параметров и длины волны проходящего лазерного излучения: согласно [12-13] они изменяются в диапазоне от $0,02^{-1}$ м до $0,14^{-1}$ м. Абсолютные потери энергии в ряде случаев превышают 200 нДж при длине волновода 0,25 м и входной энергии 300 нДж. Подобные потери энергии лазерного пучка влекут за собой увеличение температуры ФКВ, включая внутренние стенки и газовую среду, заполняющую сердцевину волновода (например атмосферный воздух).

Причинами изменения температуры можно считать поглощение излучения на внутренней структурированной стенке ФКВ и рассеяние на молекулах газовой среды. Известно [14] следующее выражение для коэффициента рассеяния в газах (в соответствии с теорией молекулярного рассеяния света Рэлея):

$$\alpha_m(\lambda) = \frac{8\pi^3(n^2 - 1)}{3N\lambda^4} \cdot \frac{6 + 3\delta}{6 - 7\delta}, \quad (3)$$

где N – число молекул в единице объема, n – показатель преломления среды, λ – длина волны излучения, $\delta \approx 0,035$ – фактор деполаризации рассеянного излучения [14]. Рост температуры газа T приводит и к изменению его показателя преломления: согласно [15] имеет место

$$n = 1 + (n' - 1)/(1 + \alpha_m T), \quad (4)$$

где $n' = 1,000292$ при $T = 0^\circ\text{C}$; $\alpha_m = 1/273$.

При $T = 100^\circ\text{C}$, оценка по этой формуле приводит к величине $n = 1,000214$.

Заключение

Особенности строения ФКВ позволяют моделировать распространение света, в том числе эффект его удержания, основываясь на зонной теории, которая учитывает изменение показателя преломления на протяжении всей длины волокна. Наличие полой сердцевины в ФКВ дает возможность вводить и передавать по волокну излучения с низкой временной когерентностью, создавать на его основе генераторы суперконтинуума.

Литература

1. Андреев В.А. Направляющие системы электросвязи: учеб. для вузов. Т.1: Теория передачи и влияния М.: Горячая линия – Телеком, 2010. – 424 с.
2. Fibers portal. URL: <http://www.tikp.co.uk> (д.о. 10.02.2016).
3. Photonics media. URL: <http://www.photonics.com> (д.о. 11.02.2016)
4. Институт М. Планка по науке света в Эрлангене. URL: <http://www.mpg.de/research/filter-photonic-crystal-fibres> (д.о. 7.01.2016)
5. Skibina J.S., Piiew R., Bethge J., Bock M., Fischer D., Beloglasov V.I., Wedell R., Steinmeyer G. Nature Photonics, 2, 679 (2008). doi:10.1038/nphoton.2008.203
6. Fibers portal. URL: <http://www.tikp.co.uk> (д.о. 10.02.2016)
7. Войтова Т.А. Фотонные кристаллы. М.: МГУ им. М.В. Ломоносова, 2008. – 17 с.
8. Ивченко Е.Л., Поддубный А.Н. Резонансные трехмерные фотонные кристаллы // Физика твердого тела. Т.48. Вып. 3, 2006. – С. 540-547.
9. Кинтехлаб. URL: <http://fdtd.kintechlab.com> (д.о. 20.01.2016)
10. Головкина М.В. Физические основы нанотехнологий фотоники и оптоинформатики. Самара: ИУНЛ ПГУТИ, 2014. – 196 с.
11. Физика: конспект лекций. URL: http://physics.psuti.ru/file/lek_optika.pdf (д.о. 12.01.2016).
12. Шумакова Д.Б., Левченко А.Е. Специальные волоконные световоды. Пермь: Изд-во ПНИПУ, 2011. – 178 с.
13. Желтиков А.М. Микроструктурированные световоды в оптических технологиях. М.: Физматлит, 2009. – 192 с.
14. Казаков Л.Я., Ломакин А.Н. Неоднородности коэффициента преломления воздуха в тропосфере. М.: Наука, 1976. – 165 с.
15. Физический практикум. Электричество и оптика. Под ред. В.И. Ивероновой. М. Наука, 1968. – 816 с.

Получено 14.04.2016

Афанасьев Евгений Николаевич, инженер Самарского национального исследовательского университета им. акад. С.П. Королева. Тел. +7 908 415-44-33. E-mail: karentans@mail.ru

CHARACTERISTIC FEATURES OF LIGHT CONFINEMENT AND PROPAGATION OVER PHOTONIC CRYSTAL FIBERS

Afanasiev E.N.

Samara University, Samara, Russian Federation

E-mail: karentans@mail.ru

This work is concerned with features of light confinement and propagation over photonic crystal fibers (PCFs), which are classified on operating principles and geometry. Photonic band gaps and photonic crystals are considered, as well as the most interesting types of PCFs, their structure and applications are overviewed. The present paper deals with application of twisted PCF as a fiber op-tic wavelength filter that is able to be used for signal transmission at various wavelengths or signal sample transmission at certain wavelength depending on twist parameters. Here light reflection effect in PCF structure is described in terms of geometry optics in the basis of Snell's law. The work represents overview of temperature influence on filling material condition and thus on refractive index value in PCF structure as well as perspectives of PCF using in various applications of fiber optics and photonics.

Keywords: photonic crystal fiber, optics, total internal reflection, optical waveguides, photonic band gaps, crystals

DOI: 10.18469/ikt.2016.14.2.06

Afanasiev Evgeny Nikolaevich, Samara University, 34, Moskovskoye Shosse, Samara, 443011, Russian Federation, category 1 engineer. Tel.: +79084154433; E-mail: karentans@mail.ru

References

1. Andreev V.A. *Napravliaiushchie sistemy elektrosviazi: ucheb. dlia vuzov: T. 1: Teoriia peredachi i vliianiia* [Electric communication systems. Textbook for high schools. Vol. 1: Combinations theory and influences]. Moscow, Goryachaya liniya – Telekom Publ., 2010. 424 p.
2. Fibers portal. Available at: <http://www.tikp.co.uk> (accessed 10.02.2016).
3. Photonics media. Available at: <http://www.photonics.com> (accessed 11.02.2016).
4. Max Planck Institute for the Science of Light in Erlangene. Available at: <http://www.mpg.de/research/filter-photonic-crystal-fibres> (accessed 12.02.2016) (in Russian).
5. Skibina J.S., et. al. A chirped photonic-crystal fibre. *Nature Photonics*, 2008, 2, pp. 679-683. doi:10.1038/nphoton.2008.203.
6. Fibers portal. Available at: <http://www.tikp.co.uk> (accessed 10.02.2016).
7. Voytova T.A. *Fotonnye kristally* [Photonic crystals]. Moscow, Lomonosov Moscow State University Publ., 2008, 17 p.
8. Ivchenko E.L., Poddubny A.N. Rezonansnye trekhmernye fotonnye kristally [Resonant three-dimensional photonic crystals]. *Fizika tverdogo tela*, 2006, vol. 48, no. 3, pp. 540-547.
9. Kintechlab. Available at: <http://fdtd.kintechlab.com> (accessed 20.01.2016).
10. Golovkina M.V. *Fizicheskie osnovy nanotekhnologii fotoniki i optoinformatiki: konspekt lektsii* [Physical fundamentals of nanotechnology of photonics and optoinformatics]. Samara, PSUTI Publ., 2014, 196 p.
11. Physics: Lecture notes. Available at: http://physics.psuti.ru/file/lek_optika.pdf (accessed 12.01.2016) (in Russian).
12. Shumakova D.B., Levchenko A.E. *Spetsial'nye volokonnye svetovody: uchebnoe posobie* [Special optical fibers: schoolbook]. Perm, PNRPU, 2011. 178 p.
13. Zheltikov A.M. *Mikrostrukturirovannye svetovody v opticheskikh tekhnologiiakh* [Microstructured optical fibers in optical technologies]. Moscow, Fizmatlit Publ., 2009. 192 p.
14. Kazakov L.Ja, Lomakin A.N. *Neodnorodnosti koefitsienta prelomleniia vozdukha v troposfere* [Discontinuity of the coefficient of refraction of air in the troposphere]. Moscow, Nauka Publ., 1976. 165p.
15. Ivernova V.I. *Fizicheskii praktikum. Elektrichestvo i optika*. [Physical practical. Electricity and optics. V.I. Iveronova (Ed.)]. Moscow, Nauka Publ., 1968. 816 p.

Received 14.04.2016