

Фотонно-кристаллические волокна, образованные воздушными каналами с гофрированной границей

А.В. Шилов¹, С.С. Михеев¹, А.Б. Сотский¹, М.М. Назаров², Л.И. Сотская³,
К.А. Бжеумихов⁴, З.Ч. Маргушев⁴

¹Могилевский государственный университет имени А.А. Кулешова, ул. Космонавтов, д. 1, Могилев, Беларусь, 212022

²Национальный исследовательский центр «Курчатовский институт», пл. Академика Курчатова, д. 1, Москва, Россия, 123182

³Белорусско-Российский университет, пр-т Мира, д. 43, Могилев, Беларусь, 212024

⁴Институт информатики и проблем регионального управления РАН, ул. Арманд, 37А, Нальчик, Россия, 360000

Аннотация. Анализируется проблема оптимизации конфигурации фотонно-кристаллических волокон с поллой сердцевинной, предназначенных для передачи широкополосных терагерцовых импульсов. С использованием техники локальных мод показано, что минимизации затухания и дисперсии групповой скорости терагерцового излучения могут быть достигнуты за счет использования волноводного канала с гофрированной границей.

1. Введение

Интерес к излучению терагерцового (ТГц) диапазона частот в настоящее время значительно возрос, так как этот диапазон оказался перспективным для ряда приложений в системах безопасности и в медицине. Создание волокон для транспортировки ТГц излучения осложнено тем, что это излучение сильно поглощается всеми известными материалами, за исключением сухого воздуха. Поэтому наиболее перспективны волокна, передающие ТГц сигнал по поллой сердцевине [1]. Среди таких волокон выделяются метало - диэлектрические капилляры [2-5], для которых в настоящее время получено рекордное (около 1дБ/м) затухание мод. Однако данные волокна сложны в изготовлении и обычно работают в многомодовом режиме, что затрудняет их использование в схемах терагерцовой спектроскопии и в сенсорах. Альтернативный вариант представляют более технологичные диэлектрические волокна с поллой сердцевинной [1]. Простейшим из таких волокон является капиллярная трубка с гладкими стенками [6, 7]. Недостаток данного волокна состоит в существенном влиянии окружающей среды на передаваемое по его сердцевине ТГц поле. Устранение этого дефекта возможно за счет создания фотонно - кристаллической структуры в оболочке волокна, которая изолирует излучение, передаваемое по поллой сердцевине волокна от окружающей среды за счет эффекта брэгговского отражения [1]. В настоящей работе представлены результаты теоретических и экспериментальных исследований фотонно-кристаллических волокон, образованных циркулярными системами капилляров, окружающих полую сердцевину и фотонно-

кристаллических волокон с полый сердцевинной и периодической гофрированной в продольном вдоль оси волокна направлении оболочкой. Расчеты модовых характеристик волокон выполнены методом функций Грина, в котором используются локальные моды оболочки [8]. Этот метод позволяет рассчитать поля и дисперсионные характеристики мод в рамках строго поставленной электродинамической задачи, которая не предполагает использование искусственных экранов для моделирования открытого пространства при описании эффекта вытекания излучения из сердцевинной волокна.

2. Описание методов

Поперечные сечения исследованных капиллярных волокон и расчетные поля их основных мод представлены на рисунке 1. Здесь и далее в качестве материала волокна рассматривается полипропилен. Его диэлектрическая проницаемость, измеренная нами заранее методом терагерцовой спектроскопии во временной области, является с высокой точностью постоянной в диапазоне частот от 0.1 до 3 ТГц и равной $\epsilon=2.247-i0.0036$. Под оптической плотностью моды (светлые пятна в центральной области рисунков 1а - в) понимается нормированное на максимум в рассматриваемой области распределение квадрата модуля магнитного поля моды, а под угловой диаграммой излучения поля моды (многолепестковые структуры) - нормированное на максимум угловое распределение поперечной компоненты вектора Пойнтинга, рассчитанное на внешнем периметре сечения волокна.

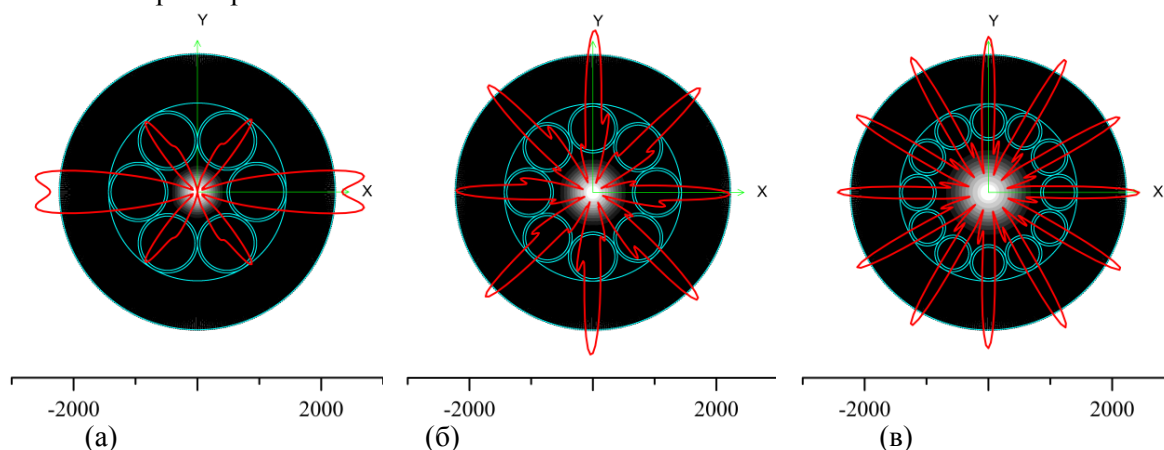


Рисунок 1. Оптические плотности и угловые диаграммы излучения полей основных мод фотонно-кристаллических волокон с полый сердцевинной и оболочкой, образованной циркулярными системами различного числа полипропиленовых капилляров с толщиной стенки 40.7 мкм (а - 6 капилляров, б - 8 капилляров, в – 12 капилляров) на частоте 2,1ТГц. Оцифровка шкал дана в мкм.

На рисунке 2 приведены экспериментальные данные для временных и частотных характеристик ТГц импульсов на входе восьмикapиллярного (рисунок 1б) волокна. Внешний диаметр этого волокна, как и на рисунке 1, составляет 4.5 мм. Однако вследствие технологических ограничений толщина стенки капилляра существенно превышает рассмотренное выше значение и равна 170мкм. Теоретические и экспериментальные результаты для дисперсионных характеристик данного волокна сопоставлены на рисунке 3. Здесь β - безразмерная постоянная распространения моды.

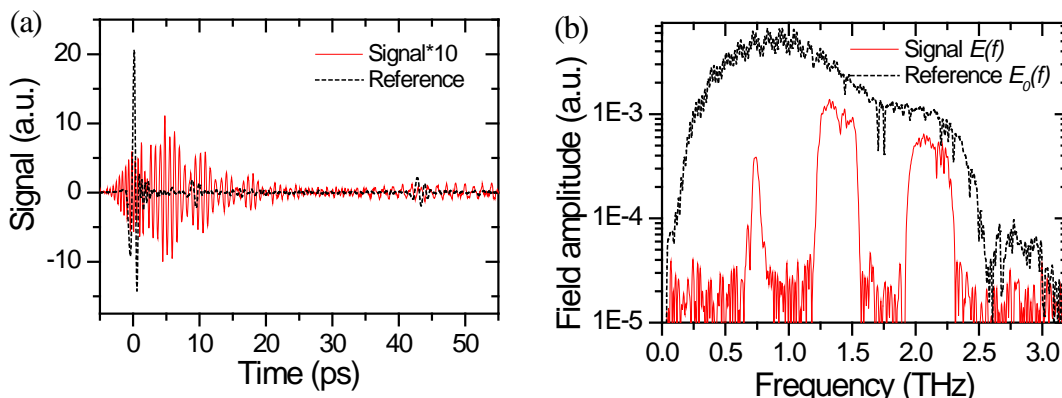


Рисунок 2. Измеренные параметры ТГц импульса (временное (а) и частотное (б) представления). Штриховые и сплошные кривые соответствуют импульсу на входе и выходе отрезка восьмикапиллярного волокна длиной 20 см.

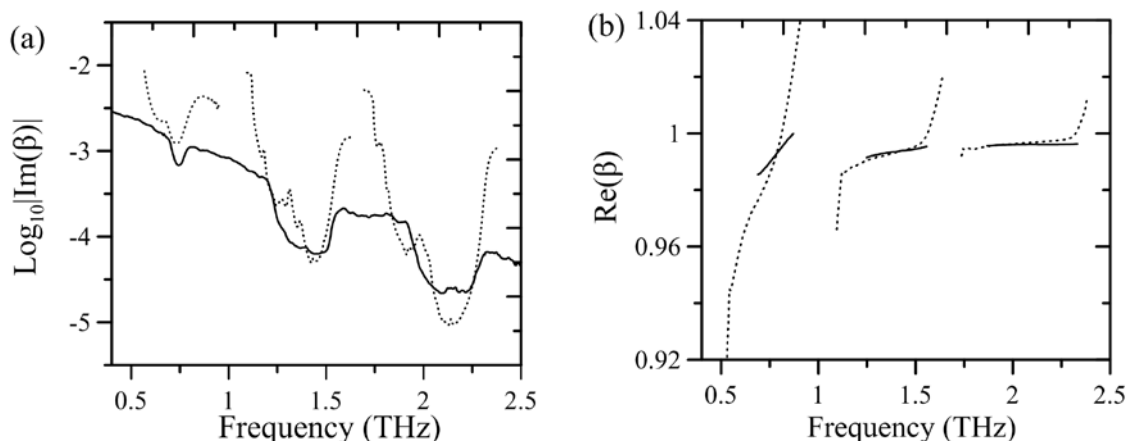


Рисунок 3. Теоретические (сплошные кривые) и экспериментальные (точечные кривые) дисперсионные зависимости основной моды восьмикапиллярного волокна.

Согласно рисунку 2, теория и эксперимент находятся в удовлетворительном согласии, что, в частности, свидетельствует об одномодовом режиме работы волокна. Вместе с тем, затухание основной моды волокна достаточно велико (его минимум в третьем окне прозрачности составляет 7.1 дБ/м на частоте 2.15 ТГц).

Качественные предпосылки для оптимизации структуры волокна с позиций минимизации затухания передаваемого ТГц сигнала следуют из рисунка 1. Представленные на нем диаграммы излучения энергии ТГц поля свидетельствуют, что излучение выносится из сердцевины волокна лучами, идущими через центры капилляров, встречая на своем пути границы раздела сред, близкие к плоскопараллельным слоям и практически не выходит из волокна через узкие места в окрестности точек касания соседних капилляров. Это наводит на мысль о целесообразности снижения в поперечном сечении волокна «веса» участков с плоскопараллельными для меридиональных лучей границами раздела сред. Выполнить такую функцию позволяет оболочка с продольным гофром.

Поперечные сечения соответствующих волокон представлены на рисунке 4. Снаружи полипропиленовой оболочки находится воздух. Отнесенная к длине волны толщина оболочки на плоскопараллельных участках выбирается из соотношения

$$d / \lambda = (0.5k + 0.25) / \sqrt{\epsilon - 1} \quad (k=0,1,\dots), \tag{1}$$

обеспечивающего интерференционные минимумы отражательной способности этих участков для скользящих лучей [9]. При расчетах использовано значение $d=67.65\mu\text{м}$, относящееся к $k=0$

в (1). На рисунках 4б и 4г представлены фрагменты оптической плотности мод в окрестности оболочки волокон, изображенных на рис.4а и 4в, соответственно. Видно, что максимумы оптической плотности мод в материале оболочки наблюдаются в окрестности ребер, обращенных в сторону сердцевины волокон. Снижение величины этих максимумов и, соответственно, материального поглощения энергии моды, может быть достигнуто за счет оптимизации формы гофра.

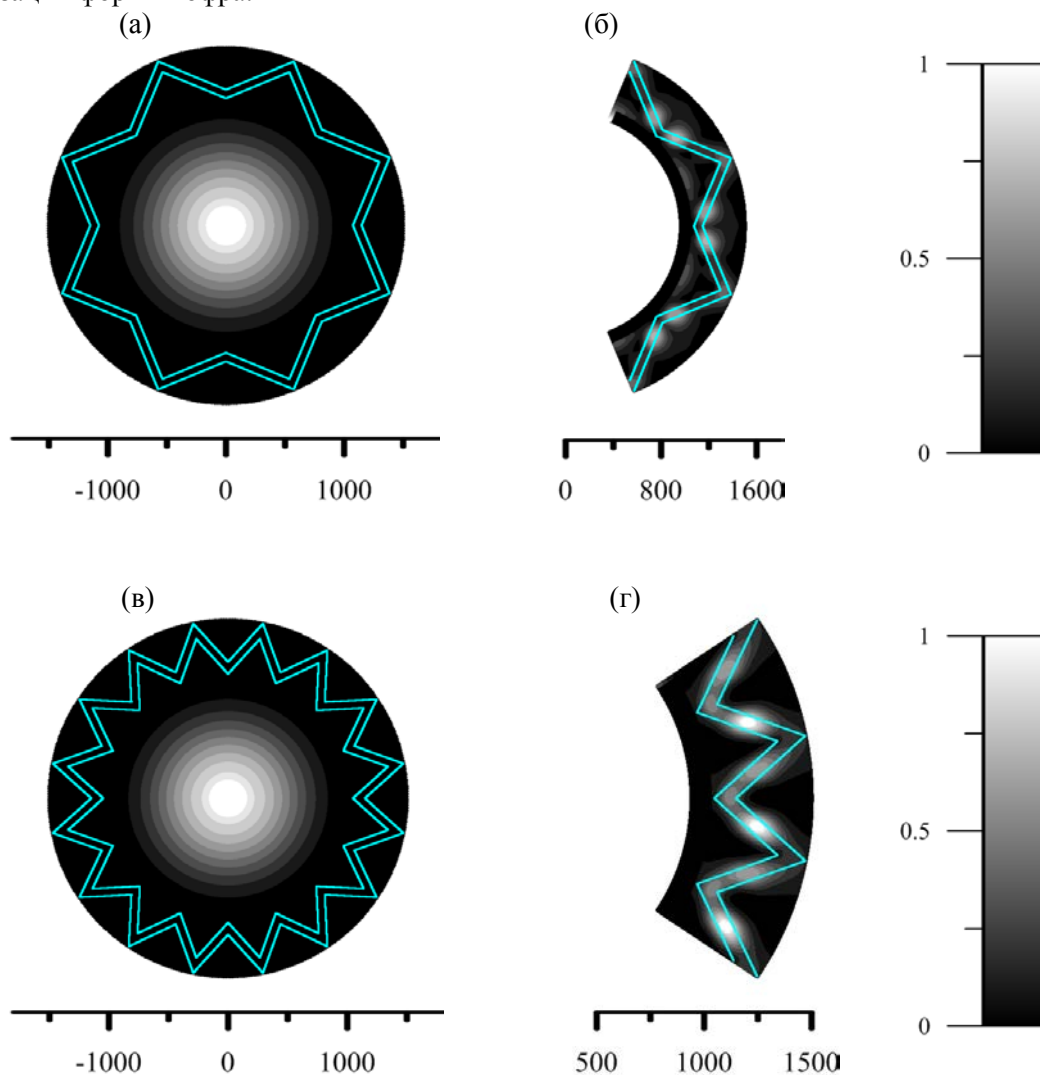


Рисунок 4. Оптические плотности основных мод полых фотонно-кристаллических волокон с гофрированной оболочкой, содержащей 8 (а, б) и 16 (в, г) периодов на частоте 1.12 терагерц.

Рисунки 5 и 6 иллюстрируют дисперсионные характеристики волокон с гофрированной оболочкой.

Согласно рисунку 5, в определенных частотных интервалах затухание мод данных волокон оказывается ниже затухания мод капиллярной трубки такого же внешнего диаметра (3мм). Особенно отчетливо этот эффект выражен для волокна с 16 периодами (рис.5б). Например, для частоты в районе 1,1 ТГц рассчитанное затухание основной моды такого волокна составляет 1,3 дБ/м, что в несколько раз меньше, чем затухание моды полипропиленового капилляра (около 8 дБ/м для 1 ТГц). Вместе с тем гофрирование оболочки усложняет дисперсионные зависимости мод по сравнению с аналогичной зависимостью для капиллярной трубки с гладкими стенками. Интересно отметить, что на рис. 5 области аномальной дисперсии

вещественной части постоянных распространения мод приходится на максимумы затухания мод. Этот дифракционный эффект проявляется аналогично электронному механизму дисперсии сред. Отметим также низкую дисперсию групповой скорости мод на интервалах частот, отвечающих минимумам зависимостей Im от частоты (рисунок 6).

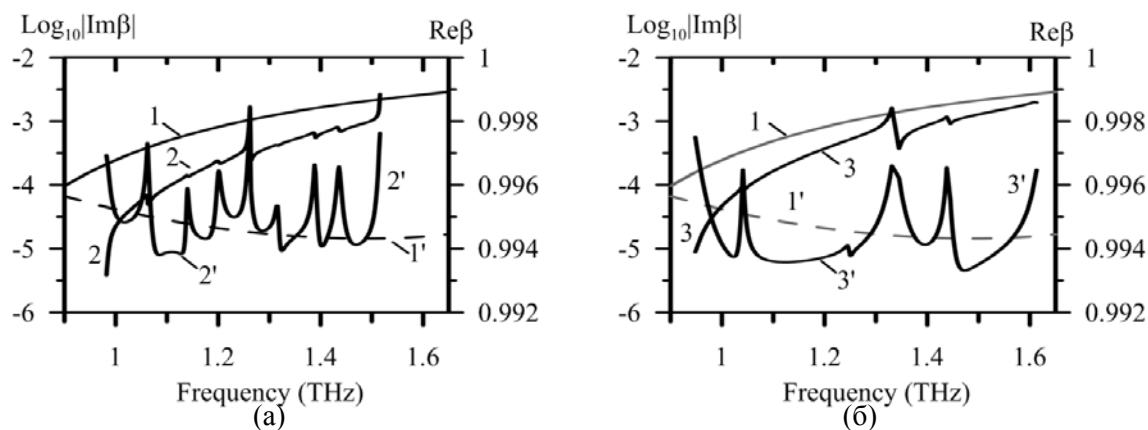


Рисунок 5. Дисперсионные зависимости основных мод капиллярной трубки с гладкими стенками (1, 1') и полых фотонно-кристаллических волокон с гофрированной оболочкой, содержащей 8 (2, 2') и 16 (3, 3') периодов. Кривые 1, 2, 3 относятся к вещественной, кривые 1', 2', 3' - к мнимой части постоянных распространения мод.

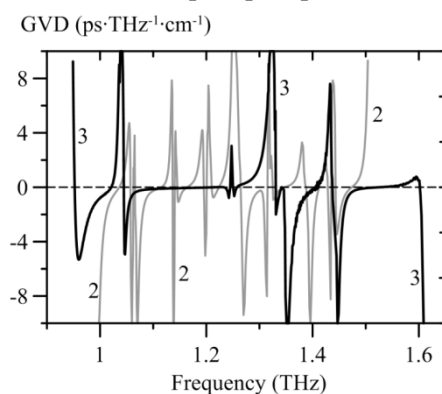


Рисунок 6. Дисперсия групповой скорости основных мод полых фотонно-кристаллических волокон с гофрированной оболочкой, содержащей 8 (зависимость 2) и 16 (зависимость 3) периодов.

В настоящее время мы отрабатываем технологию вытяжки гофрированных полипропиленовых ТГц волокон. На рисунке 7 приведена фотография срезов предварительно полученных на этом пути образцов.

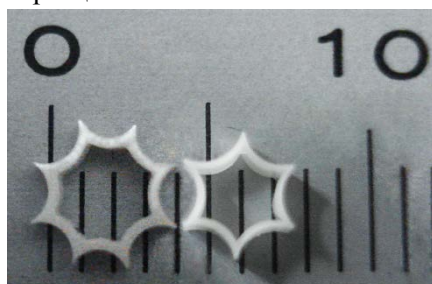


Рисунок 7. Срезы экспериментальных образцов полипропиленовых ТГц волокон с гофрированной оболочкой. Цена деления шкалы – 1 мм.

3. Благодарности

Работа выполнена при поддержке Белорусского республиканского фонда фундаментальных исследований (грант Ф16Р-138) и Российского фонда фундаментальных исследований (грант №16-52-00222).

4. Литература

- [1] Atakaramians, Sh. Terahertz dielectric waveguides / Sh. Atakaramians, Sh.V. Afshar, T.M. Monro, D. Abbott // *Advances in Optics and Photonics*. – 2013. – Vol. 5. – P. 169-215.
- [2] Harrington, J.A. Hollow polycarbonate waveguides with inner Cu coatings for delivery of terahertz radiation / J.A. Harrington, R. George, P. Pedersen // *Optics Express*. – 2004. – Vol. 12(21). – P. 5263-5268.
- [3] Matsuura, Y. Hollow optical fibers loaded with an inner dielectric film for terahertz broadband spectroscopy / Y. Matsuura, E. Takeda // *Journal of the Optical Society of America B*. – 2008. – Vol. 25(12). – P. 1949-1954.
- [4] Ito, K. Analysis of transmission properties of terahertz hollow core optical fiber by using time-domain spectroscopy and application for remote spectroscopy / K. Ito, T. Katagiri, Y. Matsuura // *Journal of the Optical Society of America B*. – 2017. – Vol. 34(1). – P. 60-65.
- [5] Сотский, А.Б. Распространение терагерцовых импульсов в капиллярных волноводах с металлизированной границей / А.Б. Сотский, А.В. Шилов, Л.И. Сотская // *Компьютерная оптика (принята к печати)*.
- [6] Daru, C. Property of Terahertz Polymer Tube / C. Daru // *Journal of lightwave technology*. – 2010. – Vol. 28(18). – P. 2708-2713.
- [7] Hualong, B. Dielectric tube waveguides with absorptive cladding for broadband, low-dispersion and low loss THz guiding / B. Hualong, K. Nielsen, O. Bang, P. Jepsen // *Scientific reports*. – Vol. 5(7620). – P.1-9. DOI: 10.1038/srep07620.
- [8] Сотский, А.Б. Теория оптических волноводных элементов / А.Б. Сотский. - Могилев: МГУ им. А.А. Кулешова, 2011. – 456 с.
- [9] Nazarov, M.S. Investigations of Capillary Polymer Terahertz Fibers / M.M. Nazarov, M.S. Kitai, V.I. Sokolov, K.A. Bzheumihov, Z.Ch. Margushev, A.B. Sotsky, A.V. Shilov, L.I. Sotskaya, A.M. Goncharenko, G.V. Sinitsyn // *ЖПС*. – 2016. – Т. 83, Спецвыпуск 6-16, ч. 4. – С. 565-566.

Photonic crystal fibers formed by air cannel with a corrugated boundary

A.V. Shilov¹, S.S. Miheev¹, A.B. Sotsky¹, M.M. Nazarov², L.I. Sotskaya³,
K.A. Bzheumikhov⁴, Z.Ch. Margushev⁴

¹State Institution of Higher Education “Mogilev A.A. Kuleshov State University”,
Kosmonavtov street, 1, Mogilev, Republic of Belarus, 212022

²Kurchatov Institute National Research Center, Akademika Kurchatova pl. 1, Moscow, Russia,
123182

³State Institution of Higher Professional Education “Belarusian-Russian University”, Prospect
Mira, 43, Mogilev, Republic of Belarus, 212024

⁴Institute of Computer Science and Problems of Regional Management of the Kabardino-
Balkarian Scientific Center of the RAS, Nalchik, KBR, Russia, 360000

Abstract. The problem of optimizing the configuration of photonic-crystal fibers with a hollow core for transmission of broad band terahertz pulses is analyzed. Using local modes of a dielectric corrugated surface, it is shown that minimization of attenuation and dispersion distortion of a pulse can be achieved by using air channels with a corrugated boundary.

Keywords: photonic-crystal fibers, hollowcore waveguide, corrugated surface.