

# Локализация света и переключаемая генерация суперконтинуума в модах циклической фотонной молекулы микроструктурированного волокна

А. Б. Федотов, И. Бугар\*<sup>1)</sup>, А. Н. Наумов, Д. Хорват мл.\*<sup>1)</sup>, Д. А. Сидоров-Бирюков, Д. Хорват\*<sup>1)</sup>,  
А. М. Желтиков<sup>2)</sup>

Международный лазерный центр, физический факультет Московского государственного университета им. М. В. Ломоносова,  
119899 Москва, Россия

\*International Laser Center, 81219 Bratislava, Slovak Republic

Поступила в редакцию 21 февраля 2002 г.

Показано, что свойства волноводных мод кольцевой системы связанных волноводов в микроструктурированном волокне подобны свойствам электронных волновых функций двумерной многоатомной циклической молекулы. Модель фотонной молекулы позволяет описать основные свойства дисперсии волноводных мод кольцевой системы связанных волноводов. Высокая степень локализации света в волноводных модах фотонной молекулы обеспечивает высокую эффективность нелинейно-оптических взаимодействий, позволяя достичь спектрального уширения порядка одной октавы для фемтосекундных импульсов умеренных энергий.

PACS: 42.65.Wi, 42.81.Qb

Современные нанотехнологии открывают уникальные возможности создания новых материалов с требуемыми оптическими свойствами [1]. Методы микро- и наноструктурирования позволяют изменять пространственную симметрию оптических характеристик [2], формировать искусственное двулучепреломление [3], а также создавать новые материалы для лазерной физики и нелинейной оптики [1]. Высокие нелинейно-оптические восприимчивости микро- и наноструктурированных материалов достигаются за счет эффектов локального увеличения поля [4], а проблема фазового согласования решается путем целенаправленного формирования дисперсии [1, 3, 5].

Одна из фундаментальных проблем анализа оптических свойств микро- и наноструктур связана с исследованием особенностей мод электромагнитного поля в наноструктурах и микрорезонаторах. Многие из свойств мод электромагнитного излучения, локализованного в подобных структурах, оказываются аналогичны свойствам волновых функций электронов, движение которых ограничено в пространстве в результате действия потенциала атома, молекулы или кристаллической решетки. По аналогии с различными типами электронных волновых функций в оптике наноструктур введены понятия фотонной точ-

ки, фотонного атома, фотонной молекулы [6, 7], а также фотонного кристалла [8]. В частности, свойства мод пары связанных микрорезонаторов, как показано в работе [6], аналогичны свойствам электронных состояний двухатомной молекулы. В настоящей работе мы обобщим понятие фотонной молекулы (ФМ) на случай циклической структуры связанных двумерных микрорезонаторов. Мы покажем, что свойства волноводных мод кольцевой системы связанных волноводов в микроструктурированном (МС) волокне подобны свойствам электронных волновых функций двумерной многоатомной циклической молекулы. Представленные ниже результаты экспериментальных исследований показывают, что высокая степень локализации света в волноводных модах фотонной молекулы обеспечивает высокую эффективность нелинейно-оптических взаимодействий, позволяя достичь спектрального уширения порядка октавы для наноджоулевых фемтосекундных импульсов.

Для целей нашего исследования использовались микроструктурированные волокна [9–11], изготовленные специалистами Института технологии и оборудования для стеклянных структур (г. Саратов). При изготовлении волокон использовалась стандартная технология [9, 12], заключающаяся в наборе заготовки из капилляров с последующим вытягиванием преформы при высоких температурах. При создании исследуемого в настоящей работе МС волокна использовалась преформа с капилляром большого диаметра

<sup>1)</sup>I. Bugar; D. Chorvat, Jr; D. Chorvat.

<sup>2)</sup>e-mail: zheltikov@top.phys.msu.su

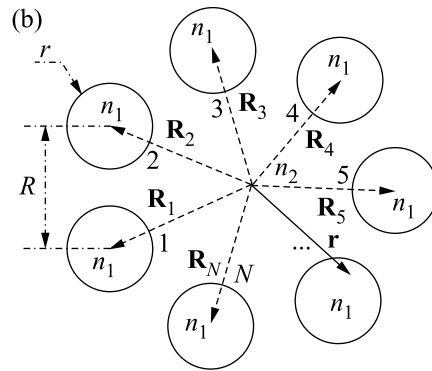


Рис.1. (а) Изображение поперечного сечения микроструктурированного волокна, полученное с помощью микроскопа. Кольцевая система волноводов в центре волокна образует двумерную фотонную молекулу. Радиус отдельного волновода 2 мкм, расстояние между соседними волноводами 7.4 мкм. (б) Модель двумерной фотонной молекулы, состоящей из  $N$  связанных волноводов с показателем преломления  $n_1$ , окруженных материалом оболочки с показателем преломления  $n_2$ . (с) Изображение пространственного распределения интенсивности излучения гелий-неонового лазера на выходе микроструктурированного волокна, соответствующего основной моде фотонной молекулы

в центре, окруженным капиллярами меньшего диаметра. На рис.1а представлено изображение поперечного сечения МС волокна. Кольцевая система волноводов в центре волокна (рис.1а) напоминает по своей структуре многоатомную циклическую молекулу, состоящую из одинаковых атомов (рис.1б). Подобная аналогия, как будет показано ниже, оказывается полезной для анализа дисперсионных свойств и структуры мод рассматриваемой системы волноводов МС волокна со сложной поперечной конфигурацией. С физической точки зрения, аналогия между системой связанных волноводов и двумерной многоатомной молекулой основана на том, что влияние распределения показателя преломления в сечении МС волокна (в плоскости рис.1б) на световое поле аналогично влиянию распределенного в пространстве потенциала многоатомной молекулы на электронную волновую функцию. Математический аспект данной аналогии связан с тем, что уравнения, описывающие поле электромагнитного излучения в системе связанных волноводов в рамках теории связанных мод [13], подобны уравнениям для электронной волновой функции многоатомной молекулы, полученным в рамках теории возмущений.

Система связанных волокон в форме двумерной циклической многоатомной фотонной молекулы обеспечивает высокую степень локализации света в режиме волноводного распространения (рис.1с), обусловленную значительным скачком показателя преломления на границе стекло-воздух. Благодаря этому обстоятельству, рассматриваемый тип МС волокна представляется перспективным для осуществле-

ния высокоэффективных нелинейно-оптических взаимодействий и понижения порога лазерной генерации в микро- и наноструктурированных лазерных материалах.

Пренебрегая на данном этапе эффектами, связанными с поляризацией излучения, рассмотрим свойства светового поля в системе  $N$  циклически связанных одинаковых волноводов, состоящих из материала с показателем преломления  $n_1$ , окруженных материалом с показателем преломления  $n_2$  (рис.1б), воспользовавшись приближением скалярного волнового уравнения [13]. Так как наиболее сильно связаны оказываются моды с одинаковыми постоянными распространения, мы пренебрежем связью мод с различными постоянными распространения и представим моду системы циклически связанных волноводов в виде суперпозиции мод изолированных волноводов:

$$\Psi(\mathbf{r}) = \sum_n A_n f(\mathbf{r} - \mathbf{R}_n). \quad (1)$$

Здесь  $\mathbf{r}$  – радиус-вектор в плоскости поперечного сечения системы волноводов (плоскость рис.1б),  $\mathbf{R}_n$  – координаты  $n$ -ого волновода в той же плоскости,  $A_n$  и  $f(\mathbf{r} - \mathbf{R}_n)$  – соответственно амплитуда и поперечное распределение поля, соответствующие собственной моде  $n$ -ого изолированного волновода. Принимая во внимания, что связанными в нашей структуре являются лишь соседние волноводы, запишем уравнение для амплитуд связанных мод в следующем виде [13]:

$$dA_n/dz - i\beta A_n - i\alpha(A_{L(n)} + A_{R(n)}) = 0, \quad (2)$$

где  $\beta$  – постоянная распространения для собственной моды изолированного волновода,

$$\alpha = \frac{\omega^2}{2\beta c^2} \frac{\int \Delta\varepsilon(\mathbf{r})f(\mathbf{r} - \mathbf{R}_{n'})f^*(\mathbf{r} - \mathbf{R}_n)d\mathbf{r}}{\int |f(\mathbf{r} - \mathbf{R}_n)|^2 d\mathbf{r}} \quad (3)$$

– коэффициент, характеризующий связь между модами  $n$ -ного и  $(n \pm 1)$ -ого волновода в рассматриваемой структуре,

$$L(n) = \begin{cases} n-1, & n > 1, \\ N, & n = 1, \end{cases} \quad R(n) = \begin{cases} n+1, & n < N, \\ 1, & n = N. \end{cases}$$

Собственные значения для постоянных распространения теперь могут быть найдены из характеристического уравнения для системы уравнений (2). В общем случае произвольного числа  $N$ , задача нахождения постоянных распространения и поперечных распределений поля, соответствующих собственным модам рассмотренной структуры, может быть решена численными методами. Однако существуют некоторые простые решения, которые могут быть найдены аналитически. В частности, для любого  $N$  система уравнений (2) имеет решение, соответствующее симметричному распределению поля в структуре:

$$\Psi_1(\mathbf{r}) = A \sum_n f(\mathbf{r} - \mathbf{R}_n), \quad (4)$$

где  $A$  – постоянная. Данная симметричная мода подобна симметричной волновой функции в многоатомной молекуле. Постоянная распространения для такой моды структуры равна

$$B_1 = \beta + 2\alpha. \quad (5)$$

Из этого выражения видно, что связь мод рассматриваемого пучка волноводов приводит к перенормировке постоянных распространения.

Для четных  $N$  существует также антисимметричное решение:

$$\Psi_N(\mathbf{r}) = A \sum_n (-1)^n f(\mathbf{r} - \mathbf{R}_n). \quad (6)$$

Данная антисимметричная мода также имеет аналог среди состояний многоатомной молекулы. Постоянная распространения такой моды равна

$$B_N = \beta - 2\alpha. \quad (7)$$

Определим основную моду рассматриваемой фотонной молекулы как моду с наибольшей постоянной распространения. Наибольшим значением постоянной распространения обладает симметричная мода ФМ волокна, точечная группа симметрии которой в

случае идеализированной системы волноводов, изображенной на рис.1b, совпадает с точечной группой симметрии волноводной структуры (см. рис.1c). Для нумерации мод ФМ волокна, которые обозначим как  $PM_l$  моды, введем индекс  $l$ , который принимает значение  $l = 1$  для основной моды.

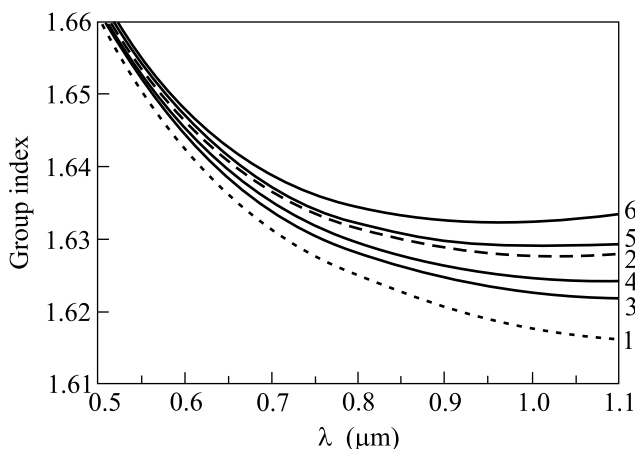


Рис.2. Зависимости группового индекса от длины волны, рассчитанные для материала волокон (1), изолированных волокон, образующих ФМ структуру (2), и для мод  $PM_1$  (3),  $PM_2$  и  $PM_3$  (4),  $PM_4$  и  $PM_5$  (5),  $PM_6$  и  $PM_7$  (6) микроструктурированного волокна. Радиус отдельного волновода – 2 мкм, расстояние между соседними волокнами – 7.4 мкм. На вставках – поперечные распределения интенсивности света для мод  $PM_1$  (a),  $PM_2$  (b),  $PM_3$  (c),  $PM_4$  (d),  $PM_5$  (e),  $PM_6$  (f),  $PM_7$  (g) микроструктурированного волокна

Численный расчет проводился для структуры, состоящей из семи одинаковых стеклянных волноводов с радиусом  $a = 2$  мкм и воздушной оболочки при давлении 1 атм ( $n_2 = 1$ ). Расстояние между соседними волноводами  $R$  считалось равным 7.4 мкм. Для оцен-

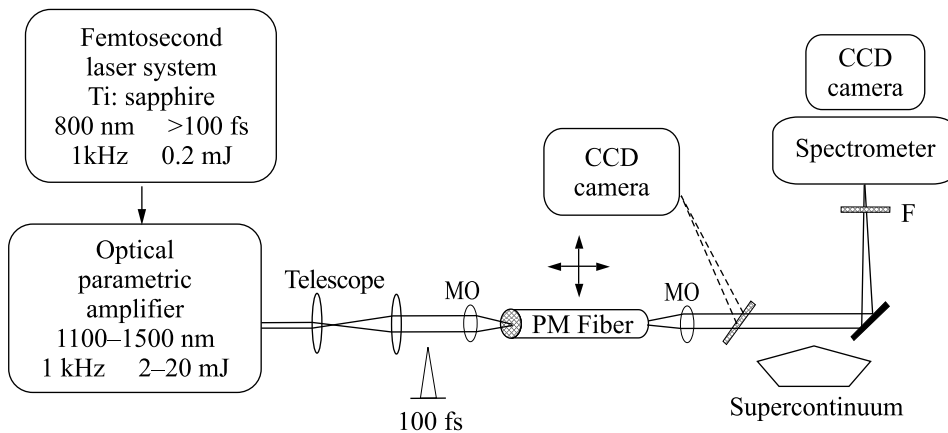


Рис.3. Схема фемтосекундной лазерной системы на основе титан-сапфирового лазера и оптического параметрического усилителя: МО – микрообъективы, Ф – система светофильтров

ки коэффициента связи в выражении (2) мы воспользовались выражением  $\alpha = C\lambda$ , где  $\lambda$  – длина волны, которое следует из модели двух одинаковых связанных плоских волноводов [13]. Параметр  $C$ , исходя из геометрических размеров структуры, был оценен как  $0.016 \text{ мкм}^{-1}$ . При расчете учитывались только основные моды изолированных волноводов, образующих фотонную молекулу. Такой подход позволяет понять основные физические закономерности дисперсионных свойств ФМ волокна. Для более детального анализа дисперсионных свойств ФМ волокна требуется учет всех мод изолированных волокон.

На рис.2 приведены зависимости группового индекса от длины волны, рассчитанные для материала волокон (1), изолированных волокон, образующих ФМ структуру (2), и для мод  $\text{PM}_1 - \text{PM}_7$  МС волокна (3–6). Пространственные распределения интенсивности света, соответствующие этим модам, представлены на вставках (а)–(г). Наименьшим групповым индексом характеризуется основная мода  $\text{PM}_1$ . Высшие моды распространяются с меньшими групповыми скоростями. На основании этого результата следует ожидать, что эти моды должны характеризоваться большими эффективностями нелинейно-оптических взаимодействий.

Данное предположение было подтверждено результатами экспериментов по исследованию спектрального уширения фемтосекундных импульсов в ФМ волокне. В качестве источника фемтосекундных импульсов использовалась лазерная система, состоявшая из задающего генератора на основе сапфира с титаном, многопроходного усилителя и оптического параметрического усилителя на основе кристалла ВВО (рис.3). Лазерная система генерировала импульсы излучения с длиной волны, перестраиваемой

в диапазоне от 1.1 до 1.5 мкм. Длительность импульсов излучения с длиной волны 1.25 мкм составляла 80 фс.

Лазерное излучение заводилось в волокно, помещенное на трехкоординатный столик, при помощи микрообъектива. Визуальный контроль за возбуждением волноводных мод осуществлялся при помощи CCD камеры, на которой строилось изображение пространственного распределения интенсивности излучения на выходе волокна (рис.3). Путем варьирования начальных условий в плоскости входного торца волновода нам удалось возбудить все собственные моды ФМ волокна  $\text{PM}_l$  с  $l = 1, 2, \dots, 7$ . При возбуждении РМ мод МС волокна фемтосекундными импульсами на выходе волновода наблюдалось спектральное уширение излучения и генерация суперконтинуума. Эффективность генерации суперконтинуума в случае возбуждения высших РМ мод существенно превышала эффективность генерации белого света в основной РМ моде. На рис.4 представлены спектры излучения на выходе МС волокна длиной 4 см, полученные в условиях возбуждения  $\text{PM}_1$  и  $\text{PM}_6/\text{PM}_7$  мод (пространственные распределения интенсивности излучения на выходе волокна представлены на вставках к рис.4). Волноводные моды  $\text{PM}_6/\text{PM}_7$ , как видно из сравнения кривых 1 и 2 на рис.4, обеспечивали существенно более эффективную генерацию суперконтинуума. Ширина спектра излучения на выходе волокна достигала примерно одной октавы при возбуждении моды  $\text{PM}_6/\text{PM}_7$  МС волокна импульсами длительности излучения длиной волны 1.3 мкм, длительностью 80 фс и энергией порядка 100 нДж.

Таким образом, выполненное исследование показывает, что свойства волноводных мод кольцевой системы связанных волноводов в микроструктуриро-

Авторы благодарны В. И. Белоглазову, Н. Б. Скибиной и А. В. Щербакову за изготовление микроструктурированных волокон.

Работа выполнена при поддержке гранта # 00-15-99304 Президента Российской Федерации, гранта Российского фонда фундаментальных исследований # 00-02-17567, гранта Volkswagen Foundation # I/76 869, гранта CRDF # RP2-2266, а также гранта Государственной научно-технической программы Российской Федерации “Фундаментальная метрология”.

Рис.4. Спектры излучения суперконтинуума, генерируемого в условиях возбуждения мод  $PM_1$  (1) и  $PM_6/PM_7$  (2) микроструктурированного волокна длиной 4 см импульсами излучения с длиной волны 1.3 мкм начальной длительностью 80 фс и энергией 100 нДж. Радиус отдельного волновода – 2 мкм, расстояние между соседними волокнами – 7.4 мкм. На вставках - изображения поперечного распределения интенсивности излучения суперконтинуума, генерируемого в условиях возбуждения мод  $PM_1$  (а) и  $PM_6/PM_7$  (б)

ванном волокне подобны свойствам электронных волновых функций двумерной многоатомной циклической молекулы. Модель фотонной молекулы позволяет качественно описать основные особенности дисперсии волноводных мод кольцевой системы связанных волноводов. Высокая степень локализации света в волноводных модах фотонной молекулы обеспечивает высокую эффективность нелинейно-оптических взаимодействий, позволяя достичь спектрального уширения порядка одной октавы для фемтосекундных импульсов умеренных энергий.

1. *Nanoscale Linear and Nonlinear Optics*, Eds. M. Bertolotti, C.M. Bowden, and C. Sibilia, New York, Am. Inst. Phys., 2001.
2. A. Fiore, V. Berger, E. Rosencher et al., *Nature* **391**, 463 (1998).
3. L. A. Golovan, V. Yu. Timoshenko, A. B. Fedotov et al., *Appl. Phys.* **B73**, 31 (2001).
4. J. E. Sipe and R. W. Boyd, *Phys. Rev.* **A46**, 1614 (1992).
5. А. М. Желтиков, А. В. Тарасишин, С. А. Магницкий, *ЖЭТФ* **118**, 340 (2000).
6. M. Bayer, T. Gutbrod, J. P. Reithmaier et al., *Phys. Rev. Lett.* **81**, 2582 (1998).
7. T. Mukaiyama, K. Takeda, H. Miyazaki et al., *Phys. Rev. Lett.* **82**, 4623 (1999).
8. J. Joannopoulos, R. Meade, and J. Winn, *Photonic Crystals*, Princeton, Princeton Univ., 1995.
9. J. C. Knight, T. A. Birks, P. St. J. Russell, and D. M. Atkin, *Opt. Lett.* **21**, 1547 (1996).
10. J. C. Knight, J. Broeng, T. A. Birks, and P. St. J. Russell, *Science* **282**, 1476 (1998).
11. А. М. Желтиков, *УФН* **170**, 1203 (2000).
12. А. Б. Федотов, А. М. Желтиков, Л. А. Мельников и др. Письма в *ЖЭТФ* **71**, 407 (2000).
13. A. Yariv and P. Yeh, *Optical Waves in Crystals*, New York, Wiley, 1987.