

УШИРЕНИЕ СПЕКТРА ФЕМТОСЕКУНДНЫХ ЛАЗЕРНЫХ ИМПУЛЬСОВ В ВОЛНОВОДАХ С ФОТОННОКРИСТАЛЛИЧЕСКОЙ ОБОЛОЧКОЙ

А.Б.Федотов, А.М.Желтиков¹⁾, Л.А.Мельников⁺, А.П.Тарасевич^{* 2)},
Д. фон дер Линде^{* 2)}

Международный лазерный центр, физический факультет МГУ им. М.В.Ломоносова
119899 Москва, Россия

⁺ Саратовский государственный университет, 410026 Саратов, Россия

^{*} Institut für Laser- und Plasmaphysik, Universität Essen
D-45117 Essen, Germany

Поступила в редакцию 26 января 2000 г.

Экспериментально исследованы изменения в спектре фемтосекундных лазерных импульсов, вызванные распространением через волновод с оболочкой, имеющей структуру двумерного фотонного кристалла. Показано, что использование волноводных свойств дефектных мод фотонных кристаллов позволяет существенно увеличить эффективность уширения спектра коротких импульсов по сравнению с обычными волноводами.

PACS: 42.65.Wi, 42.70.Qs

Оптические волокна с фотоннокристаллической оболочкой [1–4] представляют собой новый тип оптических волноводов, уникальные свойства которых привлекают повышенный интерес в связи с возможностями решения многих актуальных задач современной оптики. Оболочка волноводов данного типа имеет структуру двумерного (2D) фотонного кристалла (ФК), то есть представляет собой 2D периодический набор плотно упакованных полых стеклянных волокон. Благодаря периодическому расположению воздушных отверстий в стекле спектр пропускания подобной структуры для определенных направлений характеризуется наличием фотонных запрещенных зон – областей частот, в которых излучение не может проникать в оболочку волновода. Сердцевина волновода изготавливается из волокна без отверстия и может рассматриваться по отношению к оболочке как дефект решетки 2D фотонного кристалла. Подобные волноводы представляются перспективными для практической реализации в оптическом диапазоне идей, высказанных в последнее время в области физики фотонных кристаллов [5–7].

Впервые об изготовлении подобных ФК-волноводов (названных позже “дырчатыми”) и исследовании их свойств сообщалось в работе [1]. Авторами этой работы было показано, что волноводы с ФК-оболочкой поддерживают одномодовый режим распространения излучения в широком диапазоне длин волн и позволяют свести к минимуму потери энергии излучения в одномодовом режиме и существенно увеличить при этом эффективную площадь волноводной моды. Данные свойства ФК-волноводов представляются чрезвычайно перспективными для увеличения

¹⁾ e-mail: zheltikov@nls1.ilc.msu.su

²⁾ A.P.Tarasevitch, D. von der Linde.

эффективности нелинейно-оптических взаимодействий. Некоторые из нелинейно-оптических приложений подобных волноводов обсуждались в работе [4].

В данном сообщении представлены результаты экспериментов, посвященных исследованию распространения фемтосекундных лазерных импульсов в волноводах с ФК-оболочкой. Выполненные исследования показывают, что использование ФК-волноводов позволяет существенно увеличить уширение спектра фемтосекундных импульсов по сравнению с обычными волноводами. Данный результат представляется важным в связи с задачами компрессии световых импульсов и создания источников широкополосного излучения, а также является экспериментальным подтверждением возможности увеличения эффективности нелинейно-оптических взаимодействий сверхкоротких световых импульсов в дефектных модах ФК-структур.

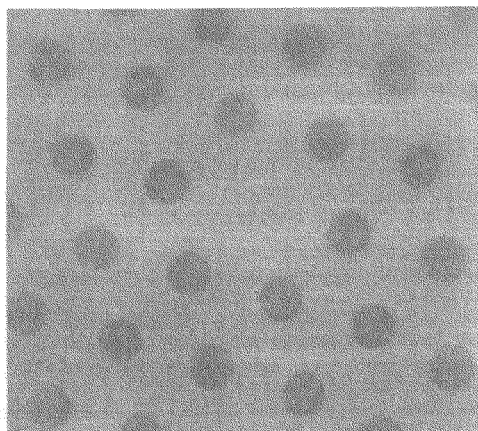


Рис.1. Изображение среза волновода с ФК-оболочкой, построенное с помощью микроскопа. Период структуры – $32 \mu\text{m}$

Процедура изготовления волноводов, использовавшихся в наших экспериментах, была аналогична процедуре разработанной авторами работ [1, 2], и заключалась в следующем. Тонкие стеклянные капилляры плотно укладывались в периодическую структуру и вытягивались при высокой температуре. Получившиеся в результате волокна вновь плотно укладывались в периодическую структуру, и операция повторялась вновь. Начальный внутренний диаметр капилляров составлял около 1mm . С помощью описанной выше процедуры получались оптические волокна с оболочкой, имеющей форму 2D фотонного кристалла со строго периодически расположенными воздушными отверстиями. За счет изменения условий технологического процесса имелась возможность изготовления образцов с внутренним диаметром воздушных отверстий в ФК-оболочке, изменяющимся в диапазоне от 0.56 до $12.8 \mu\text{m}$. Для внесения дефекта в 2D ФК-решетку один из капилляров заменялся обычным волноводом, изготовленным из стекла другой марки. Данное волокно служило сердцевинной в ФК-волноводе (рис.1). В экспериментах использовались волноводы с периодами ФК-структуры в оболочке от 1.4 до $32 \mu\text{m}$.

Идея увеличения эффективности нелинейно-оптических взаимодействий и, следовательно, эффективности уширения спектра и генерации суперконтинуума в ФК-волноводах по сравнению с обычными волноводами основана на экспериментально продемонстрированной авторами [1, 2] возможности реализации устойчивого волноводного режима распространения лазерного излучения в ФК-волноводах, характери-

зующегося низкими потерями, а также на эффекте локального увеличения поля в дефектных модах ФК-структур [6–8]. Длина волны излучения, используемого в описываемых экспериментах, была достаточно далека от фотонной запрещенной зоны ФК-оболочки волновода. Однако, как показывают результаты проведенных экспериментов, эффекты ограничения светового поля в сердцевине волновода приводят к существенному увеличению эффективности спектрального уширения коротких лазерных импульсов по сравнению с обычным волокном.

Эксперименты по исследованию спектрального уширения проводились с использованием лазерной системы, состоящей из лазера на сапфире с титаном, восьмипроходного предусилителя и четырехпроходного оконечного усилителя. Длительность лазерных импульсов, генерируемых с частотой 10 Hz, составляла 150 fs. Максимальная энергия лазерных импульсов достигала 100 мДж. В описываемых экспериментах энергия лазерного излучения варьировалась в диапазоне от 1 до 15 $\mu\text{Дж}$. Контраст фемтосекундных импульсов, измеренный для времени задержки относительно максимума импульса, равной 1 ps, составлял 10^{-4} .

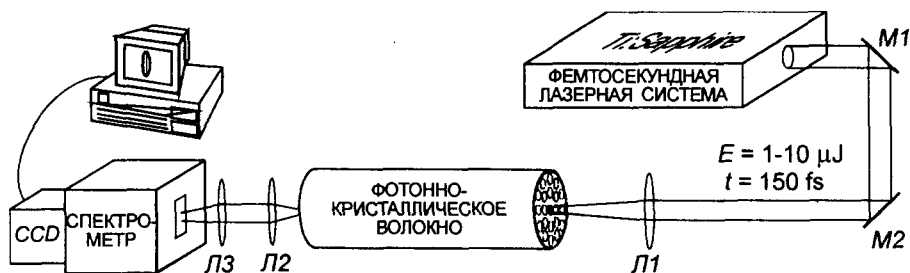


Рис.2. Схема экспериментальной установки для исследования уширения спектра фемтосекундных импульсов в ФК-волноводах: $L1 - L3$ – линзы, $M1, M2$ – зеркала.

Излучение лазера фокусировалось линзой $L1$ на входную грань ФК-волокна (рис.2). Эксперименты выполнялись с линзами, имеющими различные фокусные расстояния. Для того чтобы иметь возможность сравнения результатов измерений, выполняемых с ФК-волноводами, и результатов экспериментов с обычными волокнами, используемыми для генерации суперконтинуума, измерения проводились также с использованием линзы $L1$ с фокусным расстоянием 10 см. Размер сфокусированного пучка при этом составлял 100 $\mu\text{м}$. Для ФК-волноводов с диаметром сердцевины волокна, изменяющимся в диапазоне от 0.56 до 1.28 $\mu\text{м}$, подобная фокусировка соответствовала возбуждению волноводной моды практически плоской падающей волной (для дефектных мод фотонных кристаллов данный режим возбуждения был теоретически исследован в работах [8]). При этих условиях лишь небольшая часть энергии вводилась в волновод. Значительные потери энергии при вводе излучения в ФК-волновод были вызваны также рассеянием излучения из-за недостаточно тщательной полировки входной грани волокна. Спектр лазерных импульсов на выходе волновода анализировался при помощи монохроматора и CCD-камеры, использовавшейся для построения изображения выходной щели монохроматора (рис.2).

Анализ спектров излучения на выходе волновода указывает на существенное уширение спектра фемтосекундных импульсов. В условиях, когда в волновод вводились спектрально ограниченные импульсы длительностью 150 fs и энергией 1.5 $\mu\text{Дж}$ (рис.3а), ширина спектра импульса на выходе волновода, измеренная на уровне 0.3

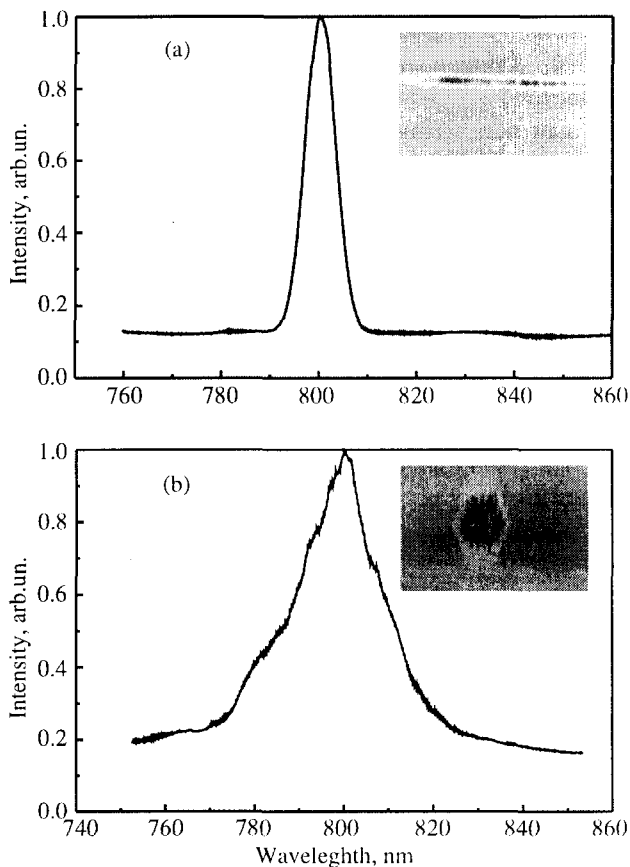


Рис.3. Уширение спектра фемтосекундного импульса на выходе ФК-волновода: а) спектр исходного импульса излучения лазера на сапфире с титаном длительностью 150 fs; б) уширенный спектр импульса на выходе волновода с периодом ФК-структуры в оболочке, равным 1.7 мкм. На вставках показаны изображения лазерного пучка, построенные с помощью CCD-камеры. Горизонтальное направление соответствует пространственному профилю пучка, а вертикальное – спектральному профилю

от максимума интенсивности, составляла примерно 40 нм. При этом значительная часть энергии излучения содержалась также в крыльях спектра (рис.3б). На вставках к рис. 3а и 3б показаны изображения лазерного пучка на выходе монохроматора, построенные с помощью CCD-камеры. Горизонтальное направление на этих изображениях соответствует пространственному профилю пучка, а вертикальное – профилю спектра лазерного импульса. Спектральное уширение фемтосекундного импульса на выходе ФК-структуры проявляется в виде увеличения размера изображения в вертикальном направлении. Изображение на вставке к рис.3б позволяет обнаружить также наличие нерегулярной модуляции в спектре импульса на выходе ФК-волновода.

Основные свойства наблюдаемого уширения спектра фемтосекундных импульсов были аналогичны свойствам, характерным для этого явления в обычных оптических волокнах. Данные свойства хорошо изучены ранее и подробно описаны в литературе [9]. Важно отметить, что даже в условиях наличия значительных потерь на рассеяние при вводе излучения в ФК-волновод спектральное уширение, получаемое при помощи ФК-волновода, в наших экспериментах значительно превышало уширение спектра аналогичных импульсов в обычном световоде с существенно более высоким качеством входной грани.

Результаты выполненных экспериментов позволяют заключить, что, в соответствии с нашими ожиданиями, ФК-структуры с дефектом кристаллической решетки

позволяют существенно повысить эффективность нелинейно-оптических взаимодействий. Для практических приложений важным является экспериментально продемонстрированная возможность использования волноводов с ФК-оболочкой для увеличения эффективности генерации суперконтинуума. Генераторы суперконтинуума в последнее время все шире используются для различных спектроскопических приложений [10]. Однако в связи с тем, что генерация суперконтинуума происходит за счет нелинейно-оптических процессов, использование данного подхода для получения широкополосного излучения с достаточной спектральной яркостью обычно требует достаточно высоких интенсивностей падающего излучения. Результаты описанных выше экспериментов показывают, что применение ФК-волноводов, обеспечивающих большие длины нелинейного взаимодействия за счет устойчивого волноводного режима в достаточно широком диапазоне длин волн, позволяет снизить требования к интенсивности падающего излучения в схемах генерации суперконтинуума.

Таким образом, результаты экспериментов, представленные в настоящем сообщении, свидетельствуют о том, что импульсы лазера на сапфире с титаном длительностью 150 fs испытывают значительное спектральное уширение в волноводах с ФК-оболочкой. Данный эффект может быть использован как в схемах компрессии световых импульсов, так и для создания новых источников широкополосного излучения. Проведенные эксперименты указывают на возможность использования ФК-волноводов для увеличения эффективности и других нелинейно-оптических взаимодействий. Дальнейшее увеличение эффективности нелинейно-оптических взаимодействий в подобных волноводах может быть достигнуто в диапазоне длин волн, лежащем ближе к области фотонной запрещенной зоны ФК-оболочки. Эффективность нелинейно-оптических процессов может быть также существенно повышена за счет использования материалов с более высокими оптическими нелинейностями, а также за счет улучшения условий фазового согласования путем управления различными компонентами дисперсии волноводных ФК-структур [11].

Авторы искренне признательны В.И.Белоглазову и Ю.С.Скибиной за изготовление композитных волокон, а также А.Н.Наумову, Д.А.Сидорову-Бирюкову и А.В.Тарасишину за полезные дискуссии. Работа выполнена при поддержке INTAS (грант #97-0369), Российского фонда фундаментальных исследований (грант #00-02-17567), гранта Президента РФ (#00-15-99304).

-
1. J.C.Knight, T.A.Birks, P.St.J.Russell, and D.M.Atkin, *Opt. Lett.* **21**, 1547 (1996).
 2. J.C.Knight, T.A.Birks, R.F.Cregan et al., *Optical Materials* **11**, 143 (1999).
 3. P.J.Bennett, T.M.Monro, and D.J.Richardson, *Opt. Lett.* **24**, 1203 (1999).
 4. N.G.R.Broderick, T.M.Monro, P.J.Bennett, and D.J.Richardson, *Opt. Lett.* **24**, 1395 (1999).
 5. E.Yablonovitch, *J. Opt. Soc. Am.* **B10**, 283 (1993).
 6. J.Joannopoulos, R.Meade, and J.Winn, *Photonic Crystals*, Princeton Univ., Princeton, 1995; *Photonic Band Gaps and Localization*, Ed. C.M.Soukoulis, Plenum, New York, 1993.
 7. N.I.Koroteev, S.A.Magnitskii, A.V.Tarasishin, and A.M.Zheltikov, *Opt. Commun.* **159**, 191 (1999); А.М.Желтиков, С.А.Магницкий, А.В.Тарасишин, *ЖЭТФ*, в печати (2000); А.М.Желтиков, Сб. лекций УНЦ "Фундаментальная оптика и спектроскопия", вып.2, 79 (1999).
 8. А.М.Желтиков, С.А.Магницкий, А.В.Тарасишин, *Письма в ЖЭТФ* **70**, 323 (1999); S.A.Magnitskii, A.V.Tarasishin, and A.M.Zheltikov, *Appl. Phys.* **B69**, December (1999).
 9. F.Salin, J.Watson, J.F.Cormier et al., *Ultrafast Phenomena VIII*, Springer Ser. Chem. Phys., **55**, Springer, Berlin, 1992, p. 306.
 10. *Femtosecond Laser Pulses*, Ed. C.Rulliere, Springer, Berlin, 1998.
 11. А.М.Желтиков, Н.И.Коротеев, А.Н.Наумов, *ЖЭТФ* **115**, 1561 (1999).