

Эволюция огибающей и фазы фемтосекундных импульсов в полых фотонно-кристаллических волокнах

С.О.Коноров, А.Б.Федотов, В.И.Белоглазов, Н.Б.Скибина, А.В.Щербаков, А.М.Жёлтиков

Экспериментально исследованы изменения формы огибающей, а также эволюция спектрального и временного распределения фазы фемтосекундных импульсов, распространяющихся в полых волокнах с фотонно-кристаллической оболочкой. Показано, что степень искажения огибающей и распределение фазы сверхкоротких импульсов, передаваемых через полое фотонно-кристаллическое волокно, определяются отстройкой несущей частоты лазерного излучения от центральной частоты пика пропускания волокна. Вблизи границ пика пропускания, связанных с границами фотонной запрещенной зоны оболочки волокна, передача сверхкоротких световых импульсов через полое фотонно-кристаллическое волокно сопровождается значительным искажением формы световых импульсов, а также неоднородными по спектру и временной координате набегами фазы.

Ключевые слова: микроструктурированные волокна, сверхкороткие импульсы

1. Введение

Полые волокна с оболочкой в виде двумерно-периодической микроструктуры (двумерного фотонного кристалла (ФК)) [1, 2] – новый перспективный класс оптических волокон. Подобные волокна представляют значительный интерес для телекоммуникационных технологий [1], увеличения эффективности нелинейно-оптических взаимодействий [3, 4] и лазерного управления частицами малых размеров [5]. Полая сердцевина ФК волокон позволяет уменьшить влияние эффектов, связанных с материальной составляющей дисперсии, и повысить порог оптического пробоя по сравнению с обычными волокнами, имеющими диэлектрическую сердцевину. Благодаря этому полые ФК волокна открывают новые пути решения задачи транспортировки сверхкоротких лазерных импульсов, в том числе коротких импульсов сверхмощных лазерных систем и лазеров технологического назначения [6].

Фотонная запрещенная зона, возникающая в спектре пропускания двумерной периодической оболочки волокон данного типа, обеспечивает высокий коэффициент отражения для излучения, распространяющегося вдоль полой сердцевины, позволяя реализовать особый режим волноводного распространения [1, 2]. Спектр пропускания подобных волокон характеризуется наличием полос прозрачности (пики пропускания), соответствующих фотонным запрещенным зонам ФК оболочки. Наличие подобных пиков пропускания обеспечивает уникальную

возможность передачи лазерного излучения через полые волокна с радиусом сердцевины, равным нескольким микронам, и позволяет существенно увеличивать эффективность нелинейно-оптических взаимодействий сверхкоротких лазерных импульсов [3, 4, 7].

Эволюция формы огибающей и фазы сверхкоротких лазерных импульсов, передаваемых через волокно, существенным образом влияет на режим распространения и эффективность нелинейно-оптических взаимодействий сверхкоротких импульсов, а также определяет возможности дальнейшего спектрального и временного преобразования лазерных импульсов. В настоящей работе исследуются изменения формы огибающей и эволюция спектрального и временного распределения фазы фемтосекундных импульсов, распространяющихся в полых волокнах с фотонно-кристаллической оболочкой. Показано, что передача сверхкоротких световых импульсов через подобные волокна может сопровождаться формированием неоднородного спектрального распределения фазы и увеличением чирпа, а также может приводить к значительному искажению формы световых импульсов.

2. Экспериментальная техника

Для исследования эволюции формы огибающей и распределения фазы сверхкоротких импульсов использовались полые ФК волокна с периодом структуры оболочки порядка 5 мкм и диаметром сердцевины около 13 мкм (вставка на рис.1). Технология изготовления полых ФК волокон подробно описана в работе [8]. Спектр пропускания полых ФК волноводов характеризуется наличием ярко выраженных максимумов (рис.1). Природа этих пиков связана с тем, что периодически структурированная оболочка волокна характеризуется высокой отражательной способностью вблизи фотонных запрещенных зон, что приводит к значительному уменьшению потерь волноводных мод в узких спектральных областях [1, 2]. Излучение с длинами волн, лежащими вдали от запрещенных зон, может приводить лишь к

С.О.Коноров, А.Б.Федотов, А.М. Жёлтиков. Московский государственный университет им. М.В.Ломоносова, физический факультет, Россия, 119992 Москва, Воробьевы горы; Международный учебно-научный лазерный центр МГУ им. М.В. Ломоносова, Россия, 119992 Москва, Воробьевы горы; e-mail: zheltikov@top.phys.msu.ru
В.И.Белоглазов, Н.Б.Скибина, А.В.Щербаков. Институт технологии и обработки стеклянных структур, Россия, 410044 Саратов, просп. Строителей, 1

Поступила в редакцию 25 марта 2003 г., после доработки – 17 сентября 2003 г.

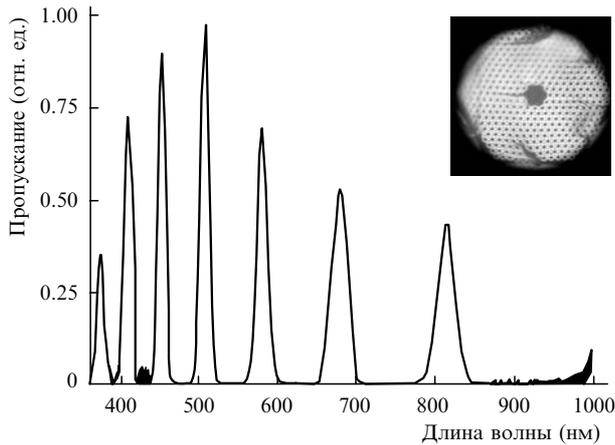


Рис.1. Спектр пропускания полого фотонно-кристаллического волокна с периодом структуры около 5 мкм и диаметром сердцевинки около 13 мкм. На вставке изображено поперечное сечение этого волокна.

возбуждению вытекающих мод полого волновода. Такие моды характеризуются значительными потерями и не дают заметного вклада в сигнал на выходе волокна. Перестройка спектра пропускания полых ФК волокон достигается путем изменения структуры оболочки [8]. Для передачи фемтосекундных импульсов титан-сапфирового лазера были спроектированы и изготовлены ФК волокна, обеспечивающие низкий уровень потерь в области длин волн около 800 нм (рис.1). Длина ФК волокна варьировалась от 3 до 10 см.

В качестве источника фемтосекундных импульсов в наших экспериментах использовался лазер на титанате сапфира, накачиваемый аргоновым лазером и генерировавший импульсы длительностью 50–80 фс в области длин волн 790–810 нм. Энергия фемтосекундных импульсов, использовавшихся в наших экспериментах, составляла 1–3 нДж. Лазерное излучение заводилось в полое ФК волокно (рис.2), установленное на прецизионном трехкоординатном микрометрическом столике. Форма огибающей, спектр, а также спектральное и временное распределение фазы лазерных импульсов на выходе ФК волокна измерялись с помощью техники прямого вос-

становления электрического поля методом спектральной фазовой интерферометрии (SPIDER) [9]. Длительность импульса и форма огибающей лазерных импульсов также контролировались с помощью стандартного автокоррелятора.

3. Результаты и их обсуждение

Принцип измерения характеристик сверхкоротких импульсов, передаваемых через ФК волокно, с помощью метода SPIDER [9] иллюстрируется на рис.2. Две реплики выходящего из ФК волокна светового импульса со спектром поля $E(\omega)$ и спектральной фазой $\varphi(\omega)$, формируемые с помощью эталона и устройства для поворота плоскости поляризации, поступают в нелинейный кристалл. В нелинейном кристалле происходит смешение частоты каждой из двух реплик светового импульса и chirпированного импульса, формируемого при помощи стретчера и оптической линии задержки. Вследствие наличия временной задержки τ между репликами импульса генерация суммарной частоты в нелинейном кристалле приводит к формированию импульсов $E(\omega)$ и $E(\omega + \delta\omega)$ с относительным сдвигом частоты $\delta\omega$, определяемым временем задержки τ и chirпом промодулированного по фазе импульса. Интерферограмма этих двух смещенных по частоте импульсов,

$$S(\omega_c) = |E(\omega_c)|^2 + |E(\omega_c + \delta\omega)|^2 + 2|E(\omega_c)E(\omega_c + \delta\omega)| \cos[\varphi(\omega_c + \delta\omega) - \varphi(\omega_c) + \omega_c\tau],$$

где ω_c – центральная частота полосы пропускания спектрометра, регистрируется с помощью спектрометра. Фаза осциллирующего слагаемого в выражении, описывающем формирующуюся интерферограмму, извлекается с помощью одномерного преобразования Фурье. Линейная фаза $\omega_c\tau$ измеряется независимо и вычитается из результата, полученного при фурье-преобразовании. Временная огибающая импульса и chirп рассчитываются с использованием полученной описанным выше методом спектральной фазы и независимо измеряемого спектра основного импульса.

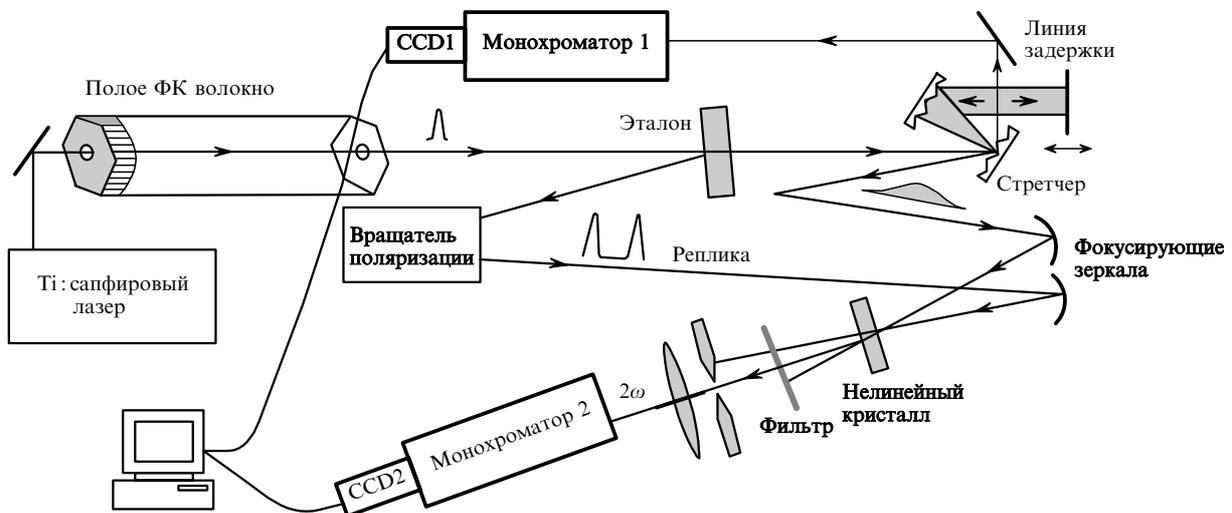


Рис.2. Схема экспериментальной установки для исследования эволюции огибающей и фазы фемтосекундных импульсов в полых фотонно-кристаллических волокнах.

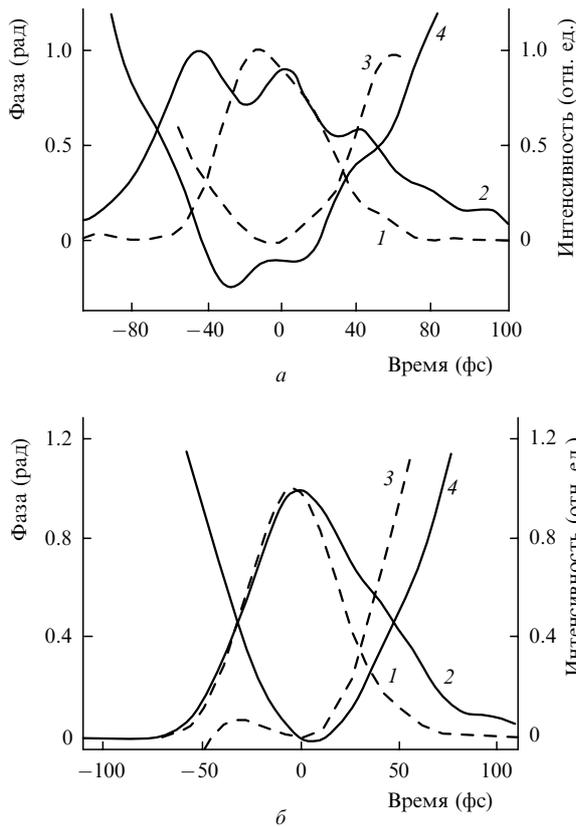


Рис.3. Огибающая импульса (1, 2) и временное распределение фазы (3, 4) для импульса титан-сапфирового лазера, прошедшего через полое фотонно-кристаллическое волокно длиной 3 см (2, 4), и выходного импульса титан-сапфирового лазера (1, 3). Длины волн лазерного излучения 797 нм (а) и 812 нм (б).

Степень искажения огибающей фемтосекундного импульса на выходе ФК волокна, как видно из экспериментальных данных, представленных на рис.3–5, существенно зависит от отстройки несущей частоты фемтосекундного импульса от центральной частоты пика пропускания. В общем случае, когда центральная длина волны не совпадает с центром пика пропускания, распространение фемтосекундного импульса через ФК волокно сопровождается заметным изменением его огибающей и существенными сдвигами фазы. Эта ситуация иллюстрируется на рис.3,а, 4,а и 5,а. Начальная длительность импульса, передаваемого через ФК волокно, составляет примерно 70 фс, центральная длина волны лазерного излучения – 797 нм. Начальное распределение фазы представлено на рис.3,а кривой 3. Форма импульса на выходе ФК волокна длиной 3 см (кривая 2 на рис.3,а) заметно отличается от начальной формы импульса (кривая 1 на рис.3,а). Временное и спектральное распределения фазы импульса, прошедшего через ФК волокно (рис.3,а, 4,а), свидетельствуют о значительных групповых задержках и большой дисперсии групповой скорости. Существенно изменяется также длительность импульса, что следует из сравнения автокорреляционных функций, измеренных для переданных через ФК волокно импульсов (рис.5,б) и импульсов на выходе лазера (рис.5,а).

Искажения формы импульса и распределений фазы существенно уменьшались в условиях, когда центральная длина волны фемтосекундного импульса выбиралась близкой к центральной длине волны пика пропускания в спектре волокна. Этот режим передачи сверхкоротких

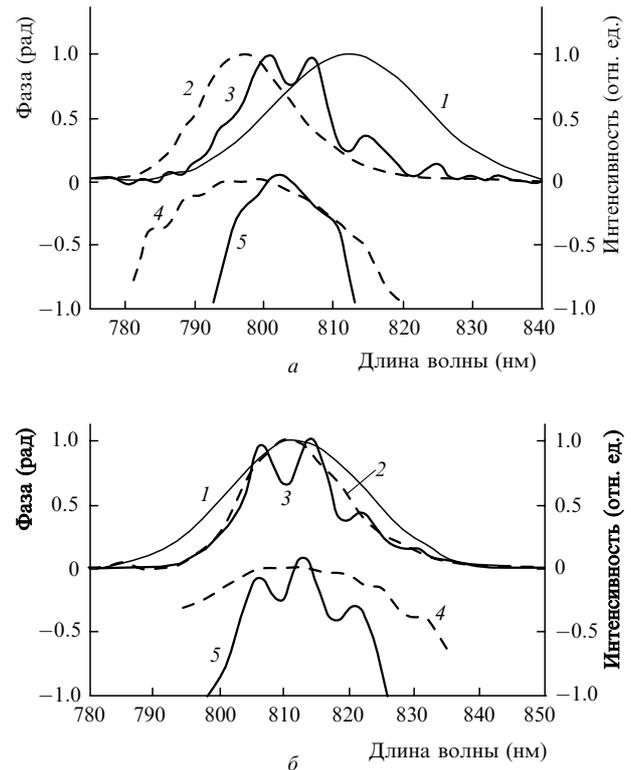


Рис.4. Эволюция спектрального распределения амплитуды и фазы импульса титан-сапфирового лазера, передаваемого через полое фотонно-кристаллическое волокно – пик пропускания ФК волокна (1); начальный спектр импульса (2), спектр импульса, прошедшего через полое ФК волокно длиной 3 см (3); начальная фаза импульса (4); фаза импульса, прошедшего через полое ФК волокно длиной 3 см (5). Длины волн лазерного излучения 797 нм (а) и 812 нм (б).

импульсов через ФК волокно иллюстрируется на рис.3,б, 4,б и 5,б. Длина волны лазерного излучения при этом составляет 812 нм, начальная длительность импульсов – около 50 фс. Начальное распределение фазы представлено на рис.3,б кривой 3. Длительность импульса излучения на выходе из ФК волокна составляет примерно 75 фс (кривая 2 на рис.3,б). Искажения огибающей импульса (кривая 2 на рис.3,б), а также фазовые набеги и групповые задержки (кривая 4 на рис.3,б и кривая 5 на рис.4,б) в этом режиме волноводного распространения импульсов в ФК волокне значительно меньше аналогичных изменений характеристик импульсов в условиях, когда несущая частота импульса существенно отличается от центральной частоты пика пропускания в спектре ФК волокна. Этот вывод подтверждается сравнением автокорреляционных функций, измеренных для передаваемых через ФК волокно импульсов (рис.5,з) и импульсов на выходе лазерного источника (рис.5,в).

Выполненные измерения позволяют сделать важные выводы относительно свойств собственных мод, формирующихся в полых сердцевине ФК волокна. В частности, измеренная спектральная фаза сверхкоротких импульсов на выходе ФК волокна (рис.4,а, б) позволяет рассчитать фазовую расстройку для нелинейно-оптических процессов в полых ФК волокнах и определить оптимальные условия для наиболее эффективной генерации нелинейного сигнала в направляемых модах волокон этого класса. Полученные в настоящей работе данные о спектральном профиле фазы сверхкоротких импульсов на выходе ФК волокон позволили достичь многократного увеличения

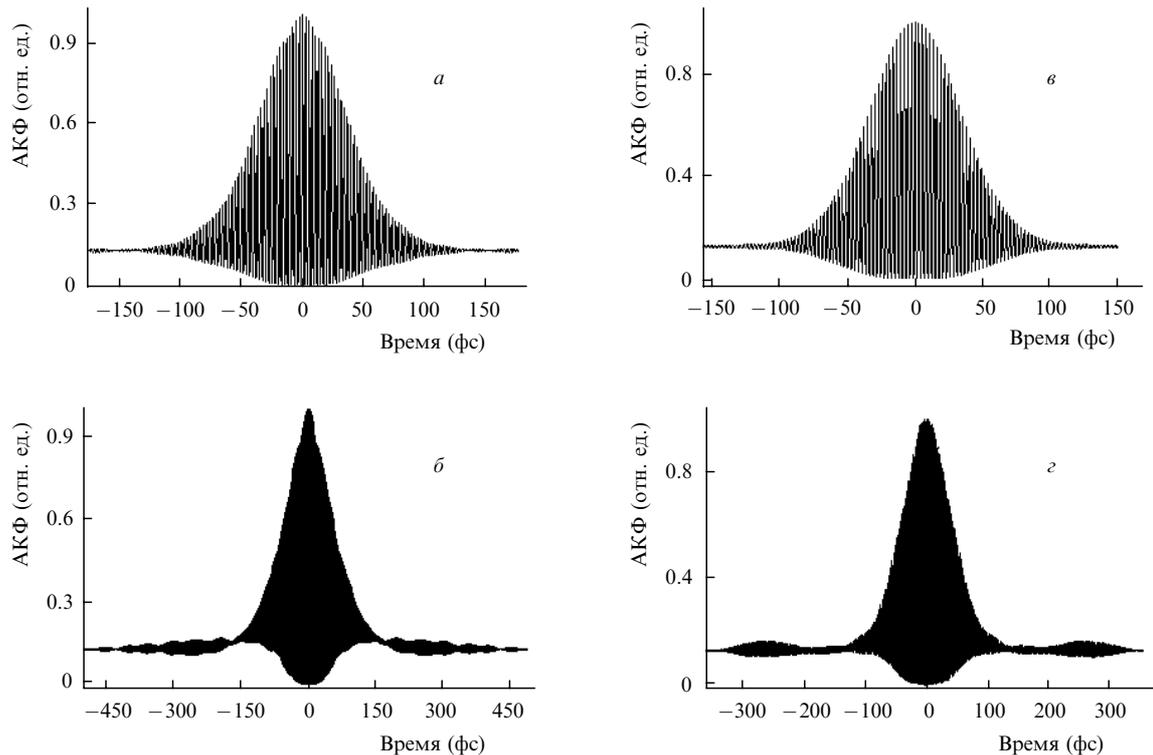


Рис. 5. Автокорреляционные функции (АКФ) для импульсов, генерируемых титан-сапфировым лазером (*а, в*), и импульсов, передаваемых через ФК волокно (*б, г*). Длины волн лазерного излучения 797 нм (*а, б*) и 812 нм (*в, г*).

эффективности процесса четырехволнового взаимодействия в полой ФК волокне [4] и продемонстрировать возможность радикального повышения чувствительности обнаружения и анализа газовых сред методом нелинейной спектроскопии [10].

Анализ экспериментальных данных, представленных на рис. 3–5, показывает, что изменение формы огибающей и распределения фазы фемтосекундных импульсов при передаче через ФК волокно является не только следствием ограничения спектра сверхкоротких импульсов в результате фильтрующего действия спектра пропускания ФК волокна. Результаты выполненных экспериментов указывают на значительное влияние волноводной дисперсии на режим распространения и эволюцию амплитудных и фазовых характеристик сверхкоротких лазерных импульсов. С физической точки зрения сильная дисперсия волноводных мод в ФК волокнах связана с механизмом формирования таких мод за счет отражения от периодической структуры оболочки волокна. Эффекты сильной дисперсии периодических структур широко обсуждались ранее в связи с исследованиями в области физики фотонных кристаллов (см., напр., [11, 12]). Сильная дисперсия волноводных мод в полых ФК волокнах имеет по сути ту же физическую природу, что и дисперсия компрессоров на основе чирпированных зеркал [13, 14], а также дисперсионных элементов [12] и линий задержки [11] на основе фотонных кристаллов. Результаты наших экспериментальных исследований согласуются также с данными выполненных ранее расчетов дисперсии полых ФК волокон [15] и коаксиальных брэгговских волноводов [8, 16, 17]. На основании этих расчетов было установлено, что вдали от границ фотонных запрещенных зон периодической оболочки волокна частотная зависимость дисперсии групповой скорости волноводных мод полой сердцевины ФК волокна аналогична подобной зависимо-

сти для полого металлического волновода [16]. При этих условиях полые ФК волокна обеспечивают оптимальные условия для передачи сверхкоротких импульсов, т. к. материальная составляющая дисперсии, связанная с дисперсией газа, заполняющего волновод, намного меньше, чем в случае стандартных волокон. Однако по мере приближения к границам фотонных запрещенных зон эффекты, связанные с волноводной составляющей дисперсии, начинают играть все более существенную роль (см. рис. 3–5), приводя, как было показано в настоящей работе, к значительным искажениям формы, а также спектрального и временного распределений фазы сверхкороткого светового импульса.

4. Заключение

Выполненные в настоящей работе экспериментальные исследования позволяют понять закономерности изменения формы огибающей, а также эволюции спектрального и временного распределений фазы фемтосекундных импульсов, распространяющихся в полых волокнах с фотонно-кристаллической оболочкой. Полученные результаты свидетельствуют о том, что степень искажения огибающей и распределения фазы сверхкоротких импульсов, передаваемых через полое фотонно-кристаллическое волокно, определяется отстройкой несущей частоты лазерного излучения от центральной частоты пика пропускания волокна. Вблизи границ пика пропускания, связанных с границами фотонной запрещенной зоны оболочки волокна, передача сверхкоротких световых импульсов через полое фотонно-кристаллическое волокно сопровождается значительным искажением формы световых импульсов, а также неоднородными по спектру и временной координате набегами фазы. Таким образом, вдали от границ фотонных запрещенных зон

периодической оболочки полые ФК волокна обеспечивают оптимальные условия для передачи сверхкоротких импульсов. Однако по мере приближения к границам фотонных запрещенных зон эффекты, связанные с волновой составляющей дисперсии, начинают играть все более существенную роль, приводя к значительным искажениям формы, а также спектрального и временного распределений фазы сверхкороткого светового импульса.

Авторы признательны Е.Е.Серебрянникову за полезные обсуждения.

Работа выполнена при поддержке гранта МД-42.2003.02 Президента Российской Федерации, грантов РФФИ № 02-02-17098 и № 03-02-16929, а также грантов Volkswagen Foundation (I/76 869) и European Research Office of the US Army (контракт 62558-03-M-0033).

1. Cregan R.F., Mangan B.J., Knight J.C., Birks T.A., Russell P.St.J., Roberts P.J., Allan D.C. *Science*, **285**, 1537 (1999).
2. Коноров С.О., Федотов А.Б., Колеватова О.А., Белоглазов В.И., Скибина Н.Б., Щербаков А.В., Желтиков А.М. *Письма ЖЭТФ*, **76**, 401 (2002).
3. Benabid F., Knight J.C., Antonopoulos G., Russell P.St.J. *Science*, **298**, 399 (2002).
4. Konorov S.O., Fedotov A.B., Zheltikov A.M. *Opt. Lett.*, **28**, 1448 (2003).
5. Benabid F., Knight J.C., Russell P.St.J. *Opt. Express*, **10**, 1195 (2002).
6. Konorov S.O., Fedotov A.B., Kolevatova O.A., Beloglazov V.I., Skibina N.B., Shcherbakov A.V., Wintner E., Zheltikov A.M. *J. Phys. D*, **36**, 1375 (2003).
7. Наумов А.Н., Желтиков А.М. *Квантовая электроника*, **32**, 129 (2002).
8. Коноров С.О., Колеватова О.А., Федотов А.Б., Серебрянников Е.Е., Сидоров-Бирюков Д.А., Михайлова Ю.М., Наумов А.Н., Белоглазов В.И., Скибина Н.Б., Мельников Л.А., Щербаков А.В., Желтиков А.М. *ЖЭТФ*, **123**, 975 (2003).
9. Iaconis C., Walmsley I.A. *IEEE J. Quantum Electron.*, **35**, 501 (1999).
10. Konorov S.O., Fedotov A.B., Beloglazov V.I., Skibina N.B., Shcherbakov A.V., Zheltikov A.M. *J. Raman Spectrosc.*, **34**, № 9 (2003).
11. Scalora M., Flynn R.J., Reinhardt S.B., Fork R.L., Bloemer M.J., Tocci M.D., Bowden C.M., Ledbetter H., Bendickson J., Dowling J.P., Leavitt R.P. *Phys. Rev. E*, **54**, R1078 (1996).
12. Koroteev N.I., Magnitskii S.A., Tarasishin A.V., Zheltikov A.M. *Opt. Commun.*, **159**, 191 (1999).
13. Cerullo G., Nisoli M., Stagira S., De Silvestri S., Tempea G., Krausz F., Ferencz K. *Opt. Lett.*, **24**, 1529 (1999).
14. Zavelani-Rossi M., Cerullo G., De Silvestri S., Gallmann L., Matuschek N., Steinmeyer G., Keller U., Angelow G., Scheuer V., Tschudi T. *Opt. Lett.*, **26**, 1155 (2001).
15. West J.A., Venkataramam N., Smith C.M., Gallagher M.T. *Proc. ECOC'2001* (Amsterdam, Netherlands, 2001, vol. 4, p. 582, ThA22).
16. Johnson S.G., Ibanescu M., Skorobogatiy M., Weisberg O., Engeness T.D., Soljacic M., Jacobs S.A., Joannopoulos J.D., Fink Y. *Opt. Express*, **9**, 748 (2001).
17. Ouyang G., Yong Xu, Yariv A. *Opt. Express*, **10**, 899 (2002).