

Спектрально-временная структура и нелинейно-оптическое преобразование излучения суперконтинуума с энергией свыше 1 мкДж, генерируемого в микроструктурированных волокнах с большой площадью сердцевин

А. В. Митрофанов⁺, А. А. Иванов^{*∇}, А. А. Подшивалов[∇], М. В. Алфимов^{*}, А. М. Желтиков^{+∇}

⁺ Физический факультет, МГУ им. М.В. Ломоносова, 119992 Москва, Россия

^{*} Центр фотохимии РАН, 117421 Москва, Россия

[∇] Международный лазерный центр, МГУ им. М.В. Ломоносова, 119992 Москва, Россия

Поступила в редакцию 17 января 2007 г.

Нелинейно-оптическая трансформация промодулированных по фазе фемтосекундных импульсов хром-форстеритового лазера в микроструктурированных волокнах с большой площадью сердцевин приводит к генерации широкополосного излучения (излучения суперконтинуума) в ближнем ИК диапазоне с энергией свыше 1 мкДж. На основе нелинейно-оптического преобразования частоты излучения суперконтинуума в процессах генерации второй гармоники и суммарной частоты реализован широкополосный источник излучения с возможностью перестройки длины волны в области 550–1800 нм.

PACS: 42.65.Wi, 42.81.Qb

Микроструктурированные (МС) световоды [1–3] находят все более широкое применение для нелинейно-оптического преобразования лазерного излучения, формирования сверхкоротких световых импульсов и управления их параметрами [4–8]. Ключевые преимущества МС световодов для нелинейно-оптического преобразования сверхкоротких световых импульсов связаны с возможностью активного формирования частотного профиля дисперсии [9] и пространственного профиля электромагнитного поля [1, 2] волноводных мод путем изменения структуры волокна. МС световоды [1–3] позволяют реализовать сложные частотные профили дисперсии, которые не могут быть сформированы для стандартных оптических волокон [9, 10]. Как следствие, в МС волокнах наблюдаются новые нелинейно-оптические явления и новые режимы спектрально-временного преобразования сверхкоротких лазерных импульсов [10, 11]. Высокоэффективные волоконно-оптические преобразователи частоты сверхкоротких импульсов [8] и источники излучения с широким непрерывным спектром (суперконтинуума) [2, 12–14], разработанные на основе МС световодов, позволяют решать фундаментальные задачи в области оптической метрологии [15] и оптики сверхкоротких лазерных импульсов [16], а также активно используются для целей лазерной биомедицины [17], нелинейной спектроскопии [18] и микроскопии [19].

Высокая эффективность нелинейно-оптических взаимодействий в МС световодах обеспечивается за счет локализации электромагнитного излучения в сердцевине волокна с характерным размером порядка микрона [2, 8]. При этом даже для лазерных импульсов малой энергии (порядка наноджоулей или сотен пикоджоулей) достигается высокая плотность мощности, приводящая к высоким эффективностям нелинейно-оптических процессов. В случае МС световодов с малым размером сердцевин также удается путем изменения структуры волокна в широких диапазонах варьировать параметры дисперсии волноводных мод [9].

Задача создания световодов для нелинейно-оптического преобразования импульсов высокой пиковой мощности оказывается значительно более сложной. При плотностях энергии порядка нескольких джоулей через квадратный сантиметр импульсы длительностью порядка сотен фемтосекунд приводят к возникновению оптического пробоя в объеме кварцевого волокна [20]. Увеличение диаметра сердцевин волокна также приводит к уменьшению влияния структуры оболочки на частотный профиль дисперсии, что затрудняет активное формирование профиля дисперсии путем изменения структуры волокна. В частности, волокна с большим радиусом сердцевин, как правило, не позволяют обеспечить режим аномальной дисперсии для излучения лазера на титанате сапфира (центральная длина волны 800 нм). Вследствие

этого не могут быть реализованы солитонные режимы спектрально-временного преобразования сверхкоротких световых импульсов, позволяющие достичь [2] высоких эффективностей генерации суперконтинуума и преобразования частоты.

В настоящей работе задача генерации мощного излучения суперконтинуума решается на основе использования МС световодов с большим радиусом сердцевины [20, 21] и фемтосекундного лазера на хром-форстерите [22] в качестве источника оптической накачки. В результате спектрального уширения фемтосекундных лазерных импульсов на начальной стадии распространения излучения в волокне обеспечивается генерация спектральных компонент, лежащих в области аномальной дисперсии световода. Реализующиеся при этих условиях солитонные механизмы спектрально-временного преобразования светового импульса приводят к эффективной генерации суперконтинуума в ближнем ИК диапазоне с энергией свыше 1 мкДж. На основе нелинейно-оптического преобразования частоты излучения суперконтинуума в процессах генерации второй гармоники (ГВГ) и суммарной частоты реализован широкополосный источник излучения с перестройкой длины волны в области 550–1800 нм.

Использувавшиеся в экспериментах МС световоды изготавливались путем вытяжки из заготовки, набранной из кварцевых капилляров со сплошным кварцевым стержнем в центре. Для целей преобразования мощных фемтосекундных лазерных импульсов было изготовлено семейство МС световодов с гексагональной системой воздушных отверстий в оболочке (рис.1), характеризующейся различными диаметрами воздушных отверстий d и расстояниями Λ между центрами отверстий. Наилучшие результаты были получены для МС световодов с $d/\Lambda \approx 0.36$ и диаметром сердцевины, приблизительно равным 22 мкм, что соответствует эффективной площади основной волноводной моды около 380 мкм². МС световоды с таким отношением d/Λ не являются одномодовыми, однако число мод, поддерживаемых такими волноводами, значительно меньше числа мод в световоде с таким же диаметром сердцевины и сплошной оболочкой. Расстройка постоянных распространения соседних мод МС волновода значительно превышает аналогичный параметр для световодов со сплошной сердцевиной, что позволяет обеспечивать устойчивость изолированных волноводных мод и уменьшает эффективность нелинейно-оптического обмена энергией излучения между модами.

Лазерная система, использовавшаяся в экспериментах (рис.2), состояла из задающего лазера на

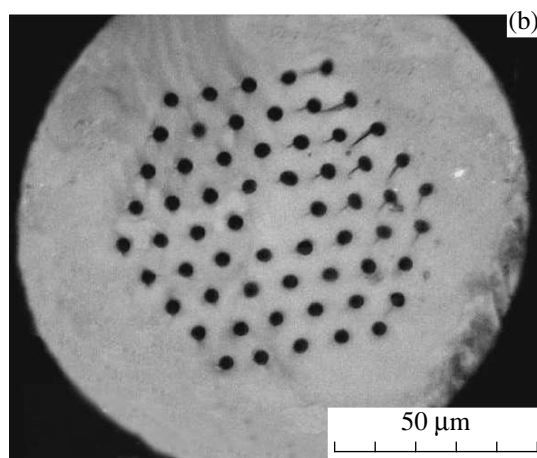
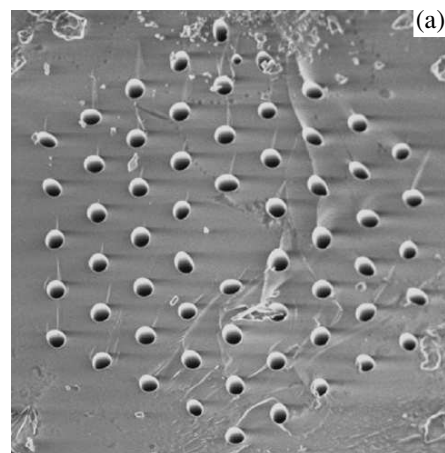


Рис.1. Изображения поперечного сечения микроструктурированного волокна с большой площадью сердцевины, полученные (а) методом сканирующей электронной микроскопии и (б) с помощью стандартного оптического микроскопа

кристалле Cr^{4+} : форстерит, стретчера, узла оптической развязки, регенеративного усилителя, компрессора и кристалла для удвоения частоты. Для накачки задающего лазера использовался волоконный итербиевый лазер. Задающий лазер генерировал импульсы с характерной длительностью 30–60 фс и частотой повторения 120 МГц [22]. Центральная длина волны этих импульсов составляла 1250 нм. Средняя мощность излучения лазера составляла ~ 180 мВт. Усиление фемтосекундных импульсов, формируемых задающим генератором, производилось при помощи регенеративного усилителя, накачиваемого излучением Nd:YLF-лазера. Сжатие лазерных импульсов, усиленных до энергии ~ 100 мкДж, производилось в решеточном компрессоре, позволявшем получать импульсы с минимальной длительностью 90 фс. Одна-

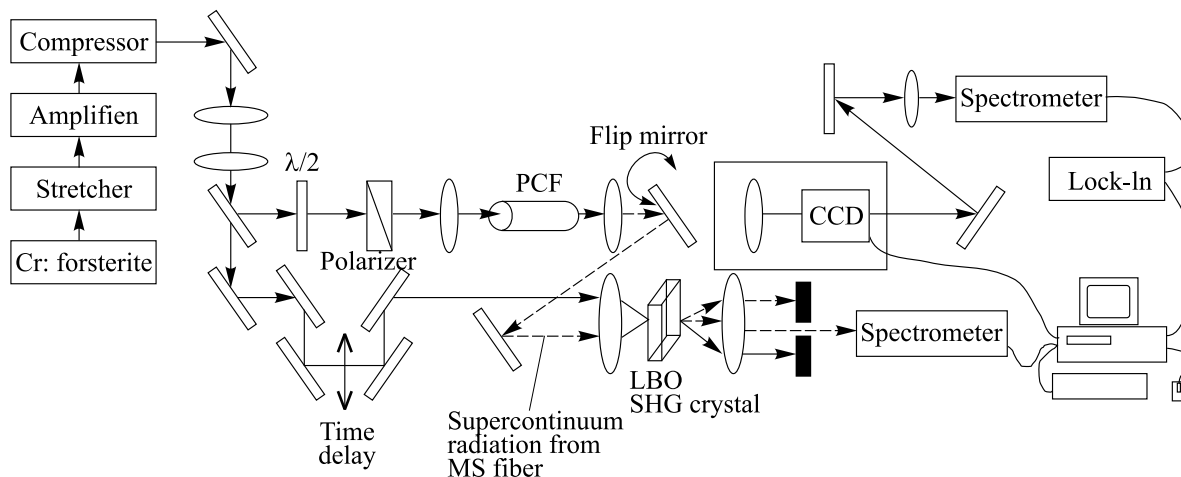


Рис.2. Схема экспериментальной установки для исследования свойств излучения суперконтинуума, формируемого в МС волокне с большой площадью сердцевины

ко для достижения наибольшей энергии излучения суперконтинуума на выходе МС световода, компрессор настраивался таким образом, чтобы обеспечить формирование импульсов с не полностью скомпенсированным линейным чирпом и длительностью около 300 фс. Использование подобных растянутых во времени импульсов позволяло избежать оптического пробоя волокна в результате самофокусировки лазерного излучения.

Характерные спектры излучения, регистрируемые на выходе МС волокна с диаметром сердцевины 22 мкм и длиной 20 см для различных энергий лазерного импульса на входе в волокно, представлены на рис.3. При относительно невысоких начальных энергиях лазерного импульса в выходных спектрах наблюдается генерация стоксовых и антистоксовых составляющих (кривая 1 на рис.3), лежащих соответственно в областях аномальной и нормальной дисперсии. Генерация стоксовых и антистоксовых компонент указывает на существенную роль процессов параметрического четырехволнового взаимодействия, приводящих к генерации смещенных по частоте спектральных составляющих в результате модуляционной неустойчивости поля накачки (лазерного импульса). Фазовый синхронизм для такого параметрического процесса автоматически выполняется в случае, когда длина волны поля накачки близка к точке нуля дисперсии групповой скорости [23]. Именно это условие, являющееся ключевым для эффективного преобразования частоты, было выполнено в условиях наших экспериментов.

При увеличении энергии лазерного импульса на входе в волокно стоксова и антистоксова компоненты

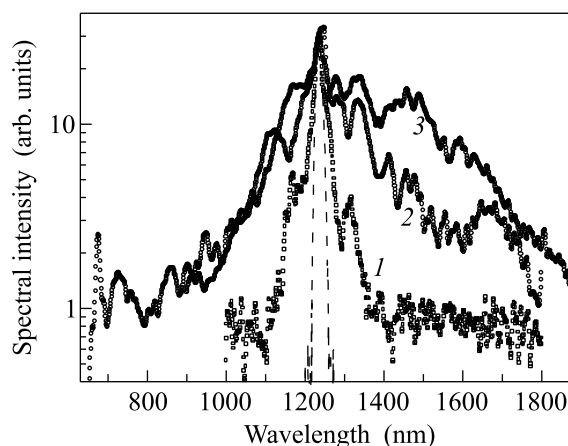


Рис.3. Спектры излучения, регистрируемые на выходе МС волокна с эффективной площадью моды 380 мкм² и длиной 20 см. Начальная длительность лазерного импульса составляет 300 фс. Энергия лазерного импульса на входе в волокно составляет: (1) 0.15 мкДж, (2) 0.98 мкДж, (3) 1.3 мкДж. Штриховой линией показан спектр лазерного импульса на входе в волокно

испытывают уширение и образуют спектр широкополосного излучения на выходе волокна. При использовании лазерного импульса с начальной энергией ~ 1.30 мкДж спектр широкополосного сигнала, формируемого на выходе МС волокна длиной 20 см, как следует из экспериментальных результатов, представленных на рис.3, простирается от 700 до 1800 нм. Полная энергия этого сигнала в условиях описываемых экспериментов составляла 1.15 мкДж.

Мощное низкочастотное крыло спектра выходного излучения в этом режиме (кривая 3 на рис.3)

обусловлено солитонными механизмами нелинейно-оптической трансформации лазерных импульсов [2, 14, 24]. Об этом свидетельствуют результаты экспериментального исследования спектрально-временной эволюции импульса в МС волокне, выполненного с помощью кросскорреляционной методики оптического стробирования с разрешением по частоте (XFROG) [25, 26]. Информация о спектральной и временной структуре светового поля на выходе МС волокна, включая частотную и временную зависимости фазы поля, получается путем измерения интенсивности сигнала суммарной частоты, генерируемого в кристалле LBO импульсом излучения, формируемого на выходе МС волокна, и импульсом основного излучения хром-форстеритового лазера как функции времени задержки τ между этими двумя импульсами. Временная огибающая интенсивности и временная зависимость фазы поля (чирп) на выходе МС световода, полученные на основе измерений, выполненных с использованием этого метода, представлены на рис.4. Солитонные явления

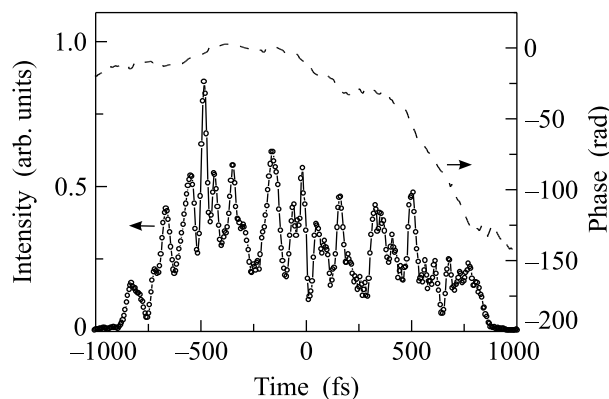


Рис.4. Временная огибающая интенсивности (сплошная линия) и чирп (штриховая линия) излучения на выходе МС волокна с эффективной площадью моды 380 мкм^2 и длиной 20 см

проявляются в формировании пиковой структуры временной огибающей интенсивности импульса на выходе МС волокна (сплошная линия на рис.4). Характер временной зависимости фазы поля на выходе световода (штриховая линия на рис.4) показывает, что для данных экспериментальных условий не существует технически простого решения для компрессии излучения суперконтинуума, формируемого в МС волокне, до предельной длительности импульса, определяемой шириной спектра выходного излучения (рис.3). Однако полученная в результате выполненных измерений информация о фазе поля на выходе МС световода может быть использована для

построения схемы компрессии на основе компенсации сложного профиля фазы выходного импульса с помощью пространственного модулятора света. Такой метод компрессии спектрально уширенных в МС волокнах световых импульсов был ранее реализован в работах [27, 28].

Для широкого круга приложений источников широкополосного излучения для решения задач биомедицинской оптики, нелинейной спектроскопии и микроскопии, разработки сверхвысокомощных лазерных систем требуется поиск путей эффективного нелинейно-оптического преобразования частоты и оптического параметрического усиления широкополосного сигнала. На рис.5 и 6 представлены результаты экспериментального исследования про-

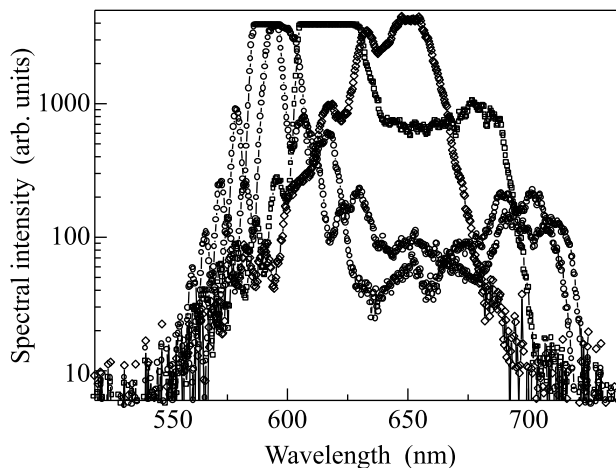


Рис.5. Спектр сигнала второй гармоники, генерируемого излучением суперконтинуума в кристалле LBO

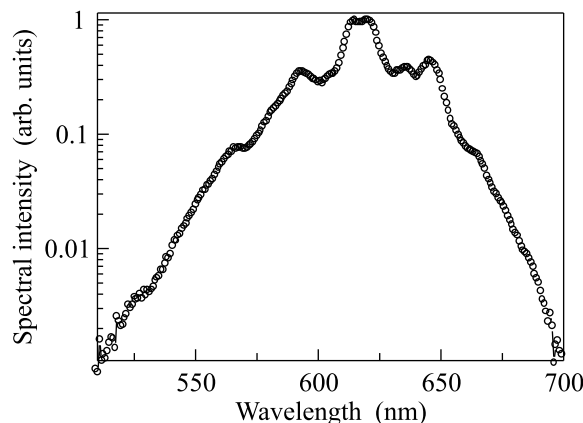


Рис.6. Спектр сигнала суммарной частоты, генерируемого в кристалле LBO излучением суперконтинуума и излучением основной частоты хром-форстеритового лазера

цессов удвоения частоты излучения суперконтинуума и сложения частоты сигнала, формируемого в МС волокне, с излучением основной частоты хром-форстеритового лазера. Максимумы в спектре сигнала второй гармоники на рис.5 соответствуют направлению фазового синхронизма для процесса ГВГ в нелинейном кристалле. Перестройка спектра второй гармоники в этих условиях может осуществляться, как также показано на рис.5, путем поворота нелинейного кристалла. Максимальная интегральная по спектру сигнала эффективность процесса ГВГ в условиях наших экспериментов составила несколько процентов. В спектре сигнала суммарной частоты (рис.6) воспроизводятся особенности спектра излучения суперконтинуума. В частности, максимум, наблюдаемый в спектре сигнала суммарной частоты в области 615–625 нм, соответствует сложению частоты основного излучения хром-форстеритового лазера со спектральными компонентами излучения суперконтинуума в области пика остаточного излучения накачки (см. рис.3). Как видно из результатов, представленных на рис.3, 5, 6, широкополосный источник излучения, реализованный на основе генерации суперконтинуума в МС волокне и преобразования спектра суперконтинуума в процессах генерации второй гармоники и суммарной частоты, обеспечивает возможность перестройки длины волны выходного сигнала в области от 550 до 1800 нм.

Таким образом, в настоящей работе экспериментально продемонстрирована возможность эффективной генерации излучения суперконтинуума в ближнем ИК диапазоне с энергией свыше 1 мкДж в результате нелинейно-оптической трансформации промодулированных по фазе и растянутых во времени фемтосекундных импульсов хром-форстеритового лазера в МС световодах с большой площадью сердцевинны. На основе нелинейно-оптического преобразования частоты излучения суперконтинуума в процессах генерации второй гармоники и суммарной частоты реализован широкополосный источник излучения с перестройкой длины волны в области 550–1800 нм.

Авторы признательны А.Б. Федотову, И.В. Федотову и В.П. Митрохину за помощь при проведении экспериментов, а также В.И. Белоглазову, К.В. Дукельскому, Ю.Н. Кондратьеву, Н.Б. Скибиной, А.В. Хохлову, В.С. Шевандину, А.В. Щербакову за изготовление образцов микроструктурированных волокон. Работа выполнена при поддержке грантов Российского фонда фундаментальных исследований # 03-02-16929 и # 05-02-90566-ННС, грантов ИНТАС # 03-51-5037 и # 03-51-5288, а также гранта

Американского фонда гражданских исследований и разработок (CRDF, проект RUP2-2695).

1. J. C. Knight, J. Broeng, T. A. Birks, and P. St. J. Russell, *Science* **282**, 1476 (1998).
2. P. St. J. Russell, *Science* **299**, 358 (2003).
3. J. C. Knight, *Nature* **424**, 847 (2003).
4. А. М. Желтиков, *Оптика микроструктурированных волокон*, М.: Наука, 2004.
5. F. Benabid, J. C. Knight, G. Antonopoulos, and P. St. J. Russell, *Science* **298**, 399 (2002).
6. F. Benabid, F. Couny, J. C. Knight et al., *Nature* **434**, 488 (2005).
7. A. M. Zheltikov, *Nature Materials* **4**, 267 (2005).
8. А. М. Желтиков, *УФН* **174**, 73 (2004).
9. W. H. Reeves, D. V. Skryabin, F. Biancalana et al., *Nature* **424**, 511 (2003).
10. D. V. Skryabin, F. Luan, J. C. Knight, and P. St. J. Russell, *Science* **301**, 1705 (2003).
11. A. M. Zheltikov, *Phys. Rev. A* **72**, 043812 (2005).
12. J. K. Ranka, R. S. Windeler, and A. J. Stentz, *Opt. Lett.* **25**, 796 (2000).
13. *Supercontinuum Generation*, Special issue of *Applied Physics B* **77**, nos. 2/3 (2003), Ed. A. M. Zheltikov.
14. А. М. Желтиков, *УФН* **176**, 623 (2006).
15. Th. Udem, R. Holzwarth, and T. W. Hänsch, *Nature* **416**, 233 (2002).
16. E. E. Serebryannikov, A. M. Zheltikov, N. Ishü et al., *Phys. Rev. E* **72**, 056603 (2005).
17. I. Hartl, X. D. Li, C. Chudoba et al., *Opt. Lett.* **26**, 608 (2001).
18. S. O. Konorov, D. A. Akimov, E. E. Serebryannikov et al., *Phys. Rev. E* **70**, 057601 (2004).
19. H. N. Paulsen, K. M. Hilligsoe, J. Thogersen et al., *Opt. Lett.* **28**, 1123 (2003); M. Lenzner, J. Krüger, S. Sartania et al., *Phys. Rev. Lett.* **80**, 4076 (1998).
20. J. C. Knight, T. A. Birks, R. F. Cregan et al., *Electron. Lett.* **34**, 1347 (1998).
21. K. Furusawa, A. Malinowski, J. Price et al., *Opt. Express* **9**, 714 (2001).
22. А. А. Иванов, М. В. Алфимов, А. М. Желтиков, *Успехи физических наук* **174**, 743 (2004).
23. G. P. Agrawal, *Nonlinear Fiber Optics*, Academic, San Diego, 2001.
24. J. Herrmann, U. Griebner, N. Zhavoronkov et al., *Phys. Rev. Lett.* **88**, 173901 (2002).
25. S. Linden, J. Kuhl, and H. Giessen, *Opt. Lett.* **24**, 569 (1999).
26. X. Gu, L. Xu, M. Kimmel et al., *Opt. Lett.* **27**, 1174 (2002).
27. B. Schenkel, R. Paschotta, and U. Keller, *J. Opt. Soc. Am. B* **22**, 687 (2005).
28. B. von Vacano, W. Wohlleben, and M. Motzkus, *Opt. Lett.* **31**, 413 (2006).