

# Преобразование частоты излучения фемтосекундного лазера на хром-форстерите в перетянном волокне

Д.А.Акимов, А.А.Иванов, М.В.Алфимов, А.Б.Федотов, Т.А.Биркс, У.Дж.Уодсуорт, Ф.Ст.Дж.Расселл, О.А.Колеватова, С.О.Коноров, А.А.Подшивалов, А.Н.Петров, Д.А.Сидоров-Бирюков, А.М.Жёлтиков

*Экспериментально продемонстрирована возможность использования перетянутых волокон для преобразования частоты излучения фемтосекундного лазера на хром-форстерите. Реализован режим синхронной генерации третьей гармоники импульсами лазера на хром-форстерите длительностью около 30 фс. Показано, что распространение фемтосекундных импульсов излучения лазера на хром-форстерите с энергией 10–200 нДж и длительностью 75 фс в перетянном волокне в режиме аномальной дисперсии сопровождается каскадными нелинейно-оптическими процессами четырехволнового взаимодействия, приводящими к генерации новых спектральных компонент, а также значительным уширением спектра излучения в диапазоне длин волн 1300–1600 нм.*

**Ключевые слова:** сверхкороткие импульсы, нелинейная оптика, преобразование частоты излучения.

## 1. Введение

Перетянутые волокна все шире используются для нелинейно-оптического преобразования спектра коротких лазерных импульсов и генерации широкополосного излучения. Возможность использования подобных волокон для повышения эффективности нелинейно-оптических взаимодействий была экспериментально продемонстрирована еще в начале 90-х годов [1]. Выполненные в последние годы экспериментальные исследования [2–4] показали, что перетянутые волокна позволяют радикально повысить эффективность генерации суперконтинуума, приводя к значительному спектральному уширению фемтосекундных лазерных импульсов (до одной-двух октав) уже при энергиях излучения порядка нескольких наноджоулей. Генерация суперконтинуума в перетянутых волокнах, наряду со спектральным сверхуширением в микроструктурированных волокнах [5, 6], приводит к революционным изменениям в области оптической метрологии [7–9] и открывает новые возможности в спектроскопии [10], оптике сверхкоротких импульсов [6] и биомедицинской оптике [11, 12].

Рабочая область (область перетяжки) перетянутых волокон характеризуется значительной разностью показателей преломления сердцевин (состоящей, как правило, из кварца) и оболочки (воздух), что обеспечивает высокую степень локализации излучения в сердцевине волокна. Изменением диаметра перетяжки удается перестраивать точку нулевой дисперсии групповой скорости

Д.А.Акимов, А.Б.Федотов, О.А.Колеватова, С.О.Коноров, А.М.Жёлтиков. Московский государственный университет им. М.В.Ломоносова, физический факультет, Россия, 119992 Москва, Воробьевы горы  
Д.А.Акимов, А.Б.Федотов, А.А.Подшивалов, Д.А.Сидоров-Бирюков, А.М.Жёлтиков. Международный учебно-научный лазерный центр, МГУ им. М.В. Ломоносова, Россия, 119992 Москва, Воробьевы горы  
А.А.Иванов, М.В.Алфимов, А.Н.Петров. Центр фотохимии РАН, Россия, 117421 Москва, ул. Новаторов, 7а  
Т.А. Birks, W.J. Wadsworth, P.St.J. Russell. Department of Physics, University of Bath, Bath BA2 7AY, United Kingdom

Поступила в редакцию 12 ноября 2002 г.

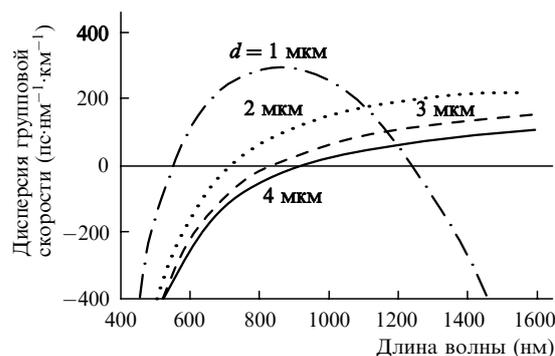


Рис.1. Спектральная зависимость дисперсии групповой скорости для перетянутых участков волокон с различными диаметрами перетяжки  $d$ .

$v_{gr}$  практически во всей видимой области спектра (рис.1). Вторая точка нуля дисперсии групповой скорости [13], возникающая при достаточно малых значениях диаметра перетяжки волокна (рис.1), представляет значительный интерес для повышения эффективности нелинейно-оптических взаимодействий и получения лазерной генерации.

Многие приложения сверхкоротких лазерных импульсов в области спектроскопии, когерентного и квантового контроля, измерения абсолютной фазы сверхкоротких импульсов, а также биомедицины требуют преобразования частоты сверхкоротких лазерных импульсов в изолированные спектральные области. В настоящей работе мы покажем, что перетянутые волокна позволяют решить эту задачу.

## 2. Лазерная система и экспериментальная техника

Лазерная система (рис.2,а) состояла из задающего лазера на кристалле хром-форстерита, стретчера, узла оптической развязки, регенеративного усилителя и компрессора. Для накачки задающего лазера использовался

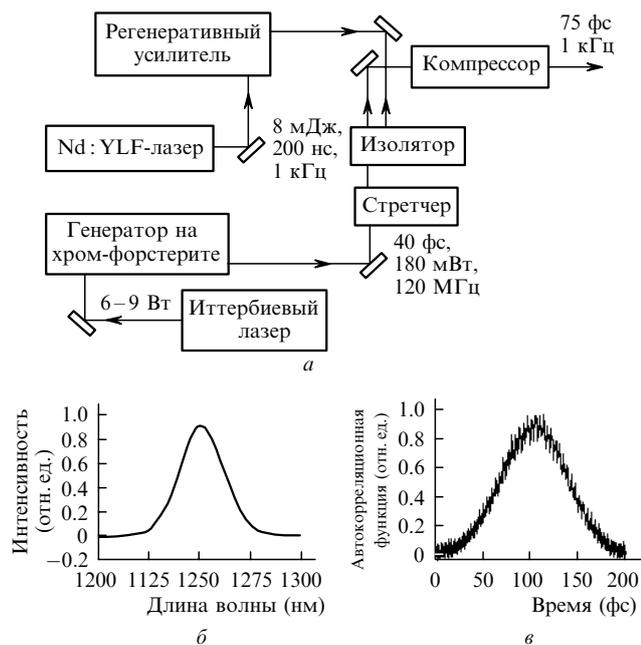


Рис.2. Фемтосекундная лазерная система на хром-форстерите с регенеративным усилителем (а), спектр (б) и автокорреляционная функция фемтосекундного импульса на выходе лазерного генератора (в).

волоконный иттербиевый лазер PUL-10 LP (НТО ИРЭ-Полус). Задающий лазер генерировал импульсы с характерной длительностью 30–50 фс и частотой повторения 120 МГц. Центральная длина волны этих импульсов была равна 1250 нм при спектральной ширине 26 нм (рис.2,б). Средняя мощность излучения лазера составляла около 180 мВт.

Фемтосекундные импульсы длительностью 30–50 фс с горизонтальной поляризацией поступали на вход решеточного стретчера, где их длительность увеличивалась до 700 пс, затем проходили через изолятор Фарадея. С его помощью и с помощью пластинки  $\lambda/4$  поляризация изменялась на вертикальную. Импульсы с вертикальной поляризацией подавались на вход регенеративного усилителя через широкополосный поляризатор таким образом, что момент инжекции совпадал по времени с максимумом инверсии населенности, частота появления которого определялась частотой следования импульсов накачки (1 кГц). С помощью затвора поляризация инжекционных импульсов изменялась на перпендикулярную, и в резонаторе усилителя распространялись импульсы с горизонтальной поляризацией. В момент времени, соответствующий оптимальному усилению, срабатывание затвора выводило усиленный импульс с энергией 100 мкДж из усилителя по тому же пути, меняя его поляризацию на вертикальную. Далее импульс возвращался в изолятор. Обратный проход импульсов по изолятору не приводил к изменению поляризации благодаря тому, что повороты поляризации, вызываемые пластинкой  $\lambda/4$  и изолятором Фарадея, компенсировали друг друга. Затем импульсы выводились из изолятора с помощью широкополосного поляризатора на решеточный компрессор, перед которым стояла пластинка  $\lambda/2$ , и сжимались до 75 фс с потерей примерно половины энергии.

Генерируемое форстеритовой лазерной системой излучение заводилось в перетянутый волновод, который был изготовлен из стандартного телекоммуникационно-го волокна (Corning SMF-28) с диаметром сердцевины

около 9 мкм, длиной волны отсечки 1250 нм и числовой апертурой 0.1. Процедура перетяжки волокна, подробно описанная в [2], заключалась в вытягивании нагретого волокна, в результате чего уменьшалась площадь поперечного сечения световода. Благодаря малому диаметру волокна в перетяжке и большой разнице в показателях преломления кварца и воздуха достигалась высокая степень локализации лазерного излучения в перетяжке волокна, приводившая к увеличению эффективности нелинейно-оптических процессов. Участок перетянутого волокна был вмонтирован в пыленепроницаемый короб из прозрачной пластмассы. Длина перетяжки составляла 90 мм, длины конусных переходных участков – 35 мм; диаметр перетяжки был равен 2 мкм. Дисперсия групповой скорости, рассчитанная для перетянутых участков волокон с разными диаметрами, представлена на рис.1. Видно, что излучение основной частоты хром-форстеритового лазера попадает в область аномальной дисперсии  $v_{gr}$  волокна с диаметром перетяжки 2 мкм.

Излучение накачки заводилось через короткий отрезок волокна длиной примерно 1 см. Для этой цели усиленное излучение лазера на хром-форстерите фокусировалось на торец волокна объективом с восьмикратным увеличением и с числовой апертурой 0.2. Имелась возможность изменять мощность излучения накачки в широких пределах, используя комбинацию поляризатора и анализатора. С помощью измерителя мощности контролировалась средняя мощность излучения непосредственно перед волокном и после него. В волокно заводилось до 50 % мощности лазерного излучения.

Линза с фокусным расстоянием 10 мм коллимировала пучок, выходящий из волокна. Далее излучение пропусклось через спектрометр, после которого его спектр регистрировался оптическим многоканальным анализатором. Считываемый с анализатора сигнал обрабатывался компьютером.

### 3. Результаты и обсуждение

Параметры перетянутого волокна, использованного в наших экспериментах, выбирались таким образом, чтобы обеспечить условия фазового согласования для генерации третьей гармоники (ГТГ) в одной из высших волноводных мод. Теоретический анализ фазового синхронизма для ГТГ в перетянутых и микроструктурированных волокнах с учетом эффектов групповой задержки коротких световых импульсов был выполнен ранее в работах [14–16]. На рис.3 приведены зависимости фазовых расстройек от длины волны для ГТГ излучения хром-форстеритового лазера с длиной волны 1.25 мкм в различных модах перетянутого волокна. Приведенные данные указывают на возможность достижения обобщенного фазового согласования (с учетом эффектов группового запаздывания [15, 16]) для ГТГ в высших волноводных модах перетянутых волокон. При рассматриваемых условиях фазовый синхронизм не может быть достигнут для ГТГ в основной моде рассматриваемого волокна. Фазовая расстройка для этого процесса показана на рис.3 штрих-пунктирной линией. Фазовое согласование также не достигается для ГТГ в волноводной моде  $HE_{12}$  основной модой импульса накачки (штриховая линия). В волноводной моде  $HE_{13}$  в поле основной моды излучения ГТГ может происходить в синхронном режиме (сплошная линия). Вследствие группового разбе-

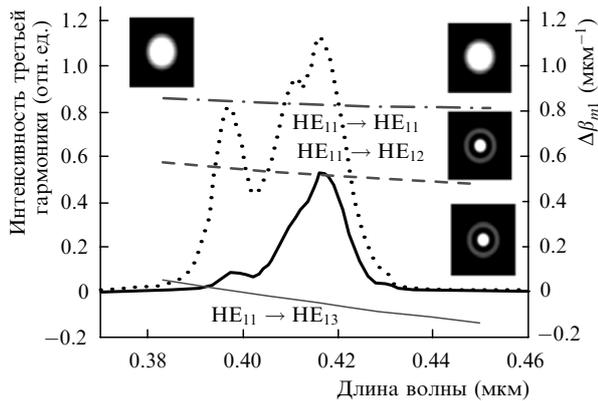


Рис.3. Спектры излучения третьей гармоники, генерируемого в перетянтом волокне импульсами излучения хром-форстеритового лазера с длительностью 30 фс и длиной волны 1.25 мкм, при энергии импульсов накачки 0.24 (толстая черная линия) и 0.32 нДж (пунктир), а также расстройки постоянных распространения  $\Delta\beta_{m1}$  для моды  $HE_{11}$  излучения накачки и моды  $HE_{1m}$  третьей гармоники (расчитаны для волокна, состоящего из кварцевой сердцевины с диаметром 2.6 мкм и воздушной оболочки) при  $m = 1$  (штрих-пунктирная линия), 2, (штриховая линия) и 3 (тонкая черная линия). На вставках показаны поперечные распределения интенсивности основного излучения и излучения в модах  $HE_{1m}$  ( $m = 1, 2, 3$ ) перетянутого волокна, иллюстрирующие преобразование пространственных мод  $HE_{11} \rightarrow HE_{1m}$  при ГТГ.

гания импульсов накачки и третьей гармоники условия синхронного взаимодействия не могут быть выполнены для всего спектра импульса накачки. Данное обстоятельство приводит к генерации спектрально асимметричного импульса третьей гармоники, наблюдавшегося в условиях экспериментов с микроструктурированными [17, 18] и перетянными [16] волокнами.

В соответствии с результатами расчетов распространение фемтосекундных импульсов хром-форстеритового лазера через перетянутое волокно сопровождалось ГТГ, которая характеризовалась достаточно высокой эффективностью даже при использовании неусиленных импульсов длительностью около 30 фс. Спектр сигнала третьей гармоники имел характерную асимметрию (рис.3), связанную с эффектами групповой задержки. Данный результат находится в согласии с нашими теоретическими предсказаниями (анимация процесса формирования асимметричного спектра третьей гармоники в условиях влияния эффектов групповой задержки представлена в работе [14]).

Эффективность ГТГ, определенная как отношение энергии сигнала третьей гармоники на выходе волокна к энергии излучения накачки, заводимого в волокно, составила 0.05 % в условиях наших экспериментов при использовании неусиленных импульсов хром-форстеритового лазера. Однако реальная эффективность ГТГ в волокне была существенно выше даже в условиях использования фемтосекундных импульсов с низкими энергиями. Подчеркнем, что задача настоящего исследования заключалась в создании волокон, обеспечивающих каскадную генерацию целого ряда новых спектральных компонент. В нашу задачу не входило обеспечение оптимальных условий для вывода излучения третьей гармоники из волокна, в связи с чем значительная часть его энергии терялась из-за близости частоты моды  $HE_{13}$  третьей гармоники к частоте отсечки и из-за сильной связи мод в переходных конусах волокна.

Излучение третьей гармоники, однако, играло существенную роль в каскадных нелинейно-оптических процессах, сопровождающих распространение фемтосекундных импульсов в перетянтом волокне. Для наблюдения этих процессов использовались усиленные импульсы хром-форстеритовой лазерной системы длительностью 75 фс с энергией 10–200 нДж. На рис.4 представлен характерный спектр излучения на выходе волокна, измеренный в видимой области спектра. Помимо интенсивной спектральной компоненты, которая соответствует третьей гармонике излучения накачки, в спектре наблюдаются ярко выраженные максимумы на длинах волн 550 и 720 нм, возникающие в результате каскадных нелинейно-оптических процессов. Появление сигнала с длиной волны 720 нм в наших экспериментах качественно согласуется с результатами выполненного в работе [19] численного анализа каскадных процессов четырехволнового взаимодействия, которые происходят при распространении короткого импульса накачки (с длиной волны, лежащей в области аномальной дисперсии  $v_{gr}$ ) в перетянутых и микроструктурированных волокнах. Спектральная компонента с длиной волны 550 нм также возникает в результате каскадного параметрического взаимодействия, ее частота  $\omega_2$  удовлетворяет соотношению  $\omega_2 + \omega_1 = \omega_0 + 3\omega_0$  ( $\omega_0$  – частота излучения накачки,  $\omega_1$  – частота спектральной компоненты с длиной волны 720 нм).

Анализ дисперсии волокна показывает, что данный параметрический процесс происходит в режиме синхронного взаимодействия световых волн. Генерация сигнала с длиной волны 550 нм, таким образом, также является результатом каскадных четырехволновых процессов, в которых существенную роль играет излучение третьей гармоники. Как видно из приведенного на рис.4 спектра

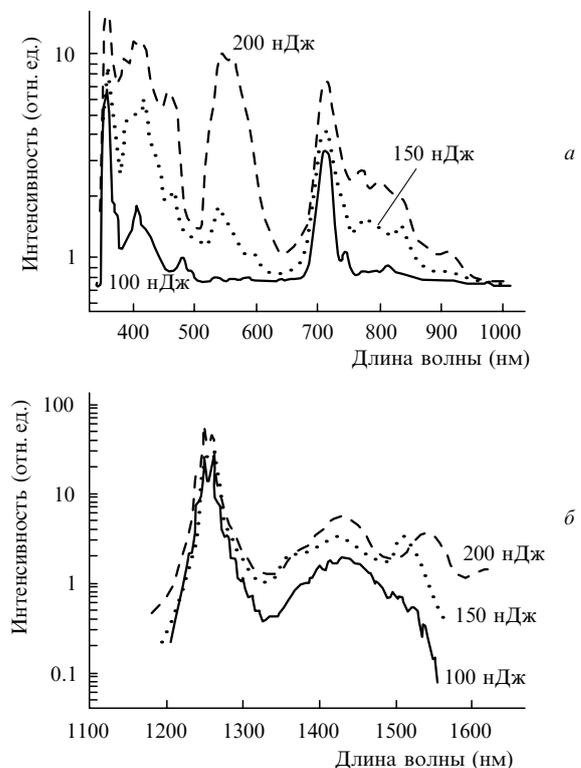


Рис.4. Спектры излучения на выходе перетянутого волокна с диаметром перетяжки 2 мкм, измеренные в области 350–950 (а) и 1200–1600 нм (б). В волокно заводились импульсы хром-форстеритового лазера длительностью 75 фс с разной энергией.

выходного излучения, спектральные компоненты с длинами волн 550 и 720 нм характеризуются интенсивностями, сравнимыми с интенсивностью сигнала третьей гармоники. Максимальная эффективность преобразования энергии излучения накачки в энергию этих спектральных компонент при использовании импульсов накачки длительностью 75 фс с энергией 200 нДж составляет 4 %.

Распространение фемтосекундных импульсов с энергиями 10–200 нДж в перетянтом волокне также сопровождается существенными изменениями длинноволнового крыла спектра лазерного излучения (рис.4,б). Увеличение энергии лазерных импульсов приводит к росту интенсивности длинноволновых спектральных компонент за счет вынужденного комбинационного рассеяния и солитонных сдвигов частоты [19–21]. Из результатов экспериментальных исследований видно, что спектр выходного излучения в ИК диапазоне простирается в область длин волн, превышающих 1600 нм, а это позволит с помощью устройств для трансформации спектра на основе перетянутых волокон существенно расширить возможности применения фемтосекундных хром-форстеритовых лазеров в ИК спектроскопии, в области телекоммуникационных и биомедицинских приложений.

#### 4. Заключение

Представленные в настоящей работе экспериментальные данные свидетельствуют о высокой эффективности прямых и каскадных четырехволновых взаимодействий, сопровождающих распространение фемтосекундных импульсов хром-форстеритного лазера в перетянтом волокне. В частности, нами реализован режим синхронной ГТГ неусиленными импульсами лазера на хром-форстерите длительностью около 30 фс. Распространение фемтосекундных импульсов излучения длительностью 75 фс с энергией 10–200 нДж в перетянтом волокне в режиме аномальной дисперсии  $v_{gr}$  сопровождается каскадными нелинейно-оптическими процессами четырехволнового взаимодействия, приводящими к генерации набора новых спектральных компонент. Оптические элементы для преобразования частоты на основе перетянутых волокон, таким образом, позволяют существенно расширить возможности фемтосекундных хром-форстеритовых лазеров, позволяя использовать сверхкороткие импульсы лазеров данного типа для решения широкого класса задач фундаментального и прикладного характера в области спектроскопии, телекоммуникационных технологий, когерентного и квантового контроля, измерения абсолютной фазы сверхкоротких импульсов и биомедицины.

Работа выполнена при поддержке гранта № 00-15-99304 Президента Российской Федерации, грантов РФФИ № 00-02-17567 и 02-02-17098, а также грантов Volkswagen Foundation I/76 869 и European Research Office of the US Army (контракт № N62558-02-M-6023).

1. Dumais P., Gonthier F., Lacroix S., Bures J., Villeneuve A., Wigley P.G.R., Stegeman G.I. *Opt. Lett.*, **18**, 1993 (1996).
2. Birks T.A., Wadsworth W.J., Russell P.St.J. *Opt. Lett.*, **25**, 1415 (2000).
3. Акимов Д.А., Федотов А.Б., Подшивалов А.А., Желтиков А.М., Иванов А.А., Алфимов М.В., Багаев С.Н., Пивцов В.С., Биркс Т.А., Уодсуорт У.Д., Расселл П.Ст.Д. *Письма в ЖЭТФ*, **74**, 460 (2001).
4. Akimov D.A., Ivanov A.A., Alfimov M.V., Bagayev S.N., Birks T.A., Wadsworth W.J., Russell P.St.J., Fedotov A.B., Pivtsov V.S., Podshivalov A.A., Zheltikov A.M. *Appl. Phys. B*, **74**, 307 (2002).
5. Ranka J.K., Windeler R.S., Stentz A.J. *Opt. Lett.*, **25**, 25 (2000).
6. *J. Opt. Soc. Am., Special issue B*, **19** (9) (2002).
7. Jones D.J., Diddams S.A., Ranka J.K., Stentz A., Windeler R.S., Hall J.L., Cundiff S.T. *Science*, **288**, 635 (2000).
8. Holzwarth R., Udem T., Hänsch T.W., Knight J.C., Wadsworth W.J., Russell P.St.J. *Phys. Rev. Lett.*, **85**, 2264 (2000).
9. Bagayev S.N., Dmitriyev A.K., Chepurov S.V., Dychkov A.S., Klementyev V.M., Kolker D.B., Kuznetsov S.A., Matyugin Yu.A., Okhapkin M.V., Pivtsov V.S., Skvortsov M.N., Zakharyash V.F., Birks T.A., Wadsworth W.J., Russell P.St.J., Zheltikov A.M. *Laser Phys.*, **11**, 1270 (2001).
10. Fedotov A.B., Ping Zhou, Tarasevitch A.P., Dukel'skii K.V., Kondrat'ev Yu.N., Shevandin V.S., Smirnov V.B., von der Linde D., Zheltikov A.M. *J. Raman Spectrosc.*, **33** (11/12), 888 (2002).
11. Hartl I., Li X.D., Chudoba C., Rhanta R.K., Ko T.H., Fujimoto J.G., Ranka J.K., Windeler R.S. *Opt. Lett.*, **26**, 608 (2001).
12. Hartl I., Hsuing P., Ko T.H., Fujimoto J.G., Birks T.A., Wadsworth W.J., Bunting U., Kopf D. *Conf. on Lasers and Electro-Optics (CLEO'2002)* (Long Beach, CA, 2002, p. 474).
13. Harbold J., Wise F.W., Wadsworth W., Birks T.A. *Conf. on Lasers and Electro-Optics (CLEO'2002)* (Long Beach, CA, 2002, CTU6).
14. Naumov A.N., Zheltikov A.M. *Opt. Express*, **10**, 122 (2002).
15. Kolevatova O.A., Naumov A.N., Zheltikov A.M. *Laser Phys.* (2003, in press).
16. Akimov D.A., Ivanov A.A., Naumov A.N., Kolevatova O.A., Alfimov M.V., Birks T.A., Wadsworth W.J., Russell P.St.J., Podshivalov A.A., Zheltikov A.M. *Appl. Phys. B*, **74** (4/5), 307 (2002).
17. Fedotov A.B., Yakovlev V.V., Zheltikov A.M. *Laser Phys.*, **12**, 268 (2002).
18. Naumov A.N., Fedotov A.B., Zheltikov A.M., Yakovlev V.V., Mel'nikov L.A., Beloglazov V.I., Skibina N.B., Shcherbakov A.V. *J. Opt. Soc. Am. B*, **19**, 2183 (2002).
19. Husakou A.V., Herrmann J. *J. Opt. Soc. Am. B*, **19**, 2171 (2002).
20. Coen S., Hing Lun Chau A., Leonhardt R., Harvey J.D., Knight J.C., Wadsworth W.J., Russell P.St.J. *J. Opt. Soc. Am. B*, **19**, 753 (2002).
21. Herrmann J., Griebner U., Zhavoronkov N., Husakou A., Nickel D., Knight J.C., Wadsworth W.J., Russell P.St.J., Korn G. *Phys. Rev. Lett.*, **88**, 173901 (2002).