

Пространственно-спектральная фильтрация излучения суперконтинуума, генерируемого в микроструктурированных волокнах

А.Б.Федотов¹, Пинг Жу², Ю.Н.Кондратьев³, С.Н.Багаев⁴, В.С.Шевандин³, К.В.Дукельский³, А.В.Хохлов³, В.Б.Смирнов⁵, А.П.Тарасевич², Д. фон дер Линде², А.М.Жёлтиков¹

Исследована модовая структура излучения суперконтинуума, генерируемого в микроструктурированном волокне фемтосекундными импульсами излучения титан-сапфирового лазера. Показано, что длинноволновая (720–900 нм) и видимая (400–600 нм) спектральные области суперконтинуума излучаются в пространственно разделенных волноводных модах, которые могут быть выделены и изолированы методами спектральной фильтрации. Пространственное качество выделенных таким образом изолированных волноводных мод обеспечивает высокую эффективность дальнейшего нелинейно-оптического преобразования частоты.

Ключевые слова: микроструктурированные волокна, нелинейная оптика, суперконтинуум.

1. Введение

Генерация суперконтинуума в микроструктурированных волокнах [1–7] находит все более широкое применение для решения задач высокоточных измерений [8–10] и оптической когерентной томографии [11]; она также рассматривается как один из перспективных путей получения сверхкоротких импульсов [12] и создания новых источников излучения для спектроскопических исследований. Вследствие высокой степени локализации светового поля в сердцевине микроструктурированных волокон [13] и благодаря возможности создания таких волокон с заданными дисперсионными свойствами [14] генерация суперконтинуума в них может наблюдаться при использовании фемтосекундных и даже пикосекундных [2] импульсов низкой мощности. Данное обстоятельство открывает возможность создания компактных и практичных источников широкополосного излучения на основе генерации суперконтинуума в микроструктурированных волокнах.

Для эффективного использования излучения суперконтинуума в спектроскопических, томографических и метрологических приложениях необходимо не только добиться воспроизводимости и устойчивости временных параметров и спектрального состава генерируемого широкополосного излучения, но и обеспечить высокое ка-

чество пространственной моды излучения суперконтинуума. Во многих практически важных случаях высокая эффективность генерации суперконтинуума в микроструктурированных волокнах достигается в условиях многомодового фазового согласования процессов четырехволнового взаимодействия (ЧВВ), приводящих к спектральному сужению. Излучение суперконтинуума при этом происходит в многомодовом режиме.

В настоящей работе предложен и экспериментально реализован метод пространственно-спектральной фильтрации излучения суперконтинуума, генерируемого в микроструктурированном волокне. С физической точки зрения возможность подобной фильтрации излучения суперконтинуума основана на том, что расстройка постоянных распространения, характеризующих различные волноводные моды, увеличивается с уменьшением диаметра сердцевины волокна. Это наблюдение приводит нас к идее использования микроструктурированных волокон с малым диаметром сердцевины для генерации суперконтинуума в режиме, когда в каждой спектральной области суперконтинуума (или, по крайней мере, в некоторых из этих областей) условие фазового согласования для процессов ЧВВ выполняется лишь для определенной моды генерируемой в результате ЧВВ частоты.

Нами были изготовлены и исследованы подобные волокна. Представленные в настоящей статье результаты экспериментальных исследований доказывают возможность выделения изолированных волноводных мод излучения суперконтинуума, генерируемого в таких волокнах в различных спектральных диапазонах. Предложенный метод фильтрации одиночных мод суперконтинуума обеспечивает высокое качество пространственного распределения излучения, позволяя достичь большой эффективности дальнейшего нелинейно-оптического преобразования частотных компонент, полученных в микроструктурированном волокне и отселектированных методами частотной фильтрации, путем смешения их в нелинейном кристалле с излучением основной частоты титан-сапфирового лазера.

¹Международный учебно-научный лазерный центр и физический факультет МГУ им. М.В.Ломоносова, Россия, 119992 Москва, Воробьевы горы; e-mail: zheltikov@top.phys.msu.ru

²Institut für Laser- und Plasmaphysik, Universität Essen, D-45117 Essen, Germany

³ВНЦ «ГОИ им. С.И.Вавилова», Россия, 199034 С.-Петербург, Биржевая л., 16

⁴Институт лазерной физики СО РАН, Россия, 630090 Новосибирск, просп. акад. Лаврентьева, 13/3

⁵НИИ «Российский центр лазерной физики С.-Петербургского государственного университета», Россия, 198504 С.-Петербург, Петропавловская, ул. Ульяновская, 1

2. Экспериментальная техника

Для проведения экспериментов по генерации суперконтинуума был создан типоряд микроструктурированных оптических волокон, оболочка которых состоит из одного, двух и более гексагональных циклов воздушных отверстий, а дополнительная локализация светового поля достигается за счет системы вспомогательных воздушных отверстий меньшего диаметра (рис.1). Архитектура микроструктурированных волокон, использовавшихся в настоящих экспериментах для генерации суперконтинуума, является результатом совместной разработки, проводимой в МГУ им. М.В.Ломоносова и Государственном оптическом институте (ГОИ) им. С.И.Вавилова. Волокна были изготовлены в ГОИ с использованием методики, аналогичной описанной в работах [15, 16].

В отличие от стандартной методики, в качестве начальной заготовки использовалась не система одинаковых капилляров, а набор оптических волокон различного диаметра. В частности, для изготовления базового волокна созданного типоряда – с одним гексагональным циклом отверстий вокруг сердцевины (рис.1,*a*) – использовалась преформа, центральная часть которой состояла из волокна наименьшего диаметра, окруженного шестью капиллярами. О создании такого волокна с минимально микроструктурированной оболочкой сообщалось ранее в работе [17].

В процессе изготовления волокон имелась возможность изменения пространственного масштаба структуры. Минимальный диаметр сердцевины изготовленных волокон составил 1 мкм. Воздушные отверстия (рис.1) обеспечивают значительный скачок показателя прелом-

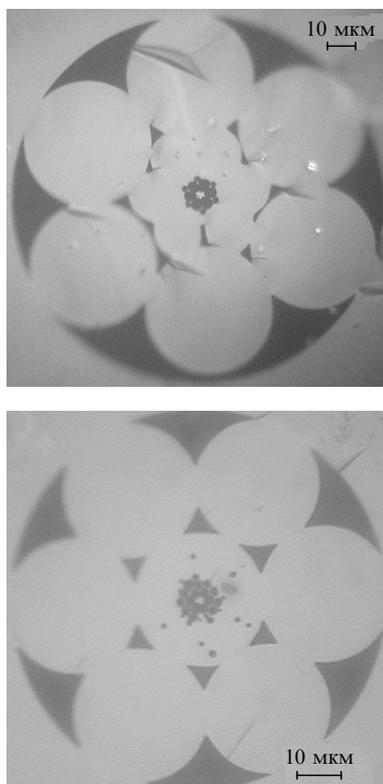


Рис.1. Изображения поперечных сечений микроструктурированных волокон с одним (*a*) и двумя (*б*) гексагональными циклами воздушных отверстий вокруг сердцевины диаметром 2 мкм.



Рис.2. Распределение интенсивности излучения титан-сапфирового лазера на выходе микроструктурированного волокна с одним гексагональным циклом воздушных отверстий вокруг сердцевины диаметром 2 мкм.

ления при переходе от сердцевины к оболочке. Дополнительная локализация светового поля в сердцевине волокна и снижение оптических потерь достигаются за счет системы вспомогательных воздушных отверстий меньшего диаметра, увеличивающих скачок показателя преломления между сердцевинной и оболочкой и ограничивающих проникновение светового поля во внешнюю кварцевую часть оболочки (что видно из распределения интенсивности излучения титан-сапфирового лазера (рис.2), измеренного на выходе волокна данного типа). Волокно с подобной геометрией сердцевины и оболочки является базовым для созданного типоряда волокон, т. к. его оболочка обладает минимальным числом отверстий (один кольцевой цикл основных отверстий и вспомогательные, обеспечивающие дополнительную локализацию светового поля в сердцевине волокна).

Усложнение структуры волокна достигалось путем изменения преформы. На рис.1,*б* представлено микроструктурированное волокно, в котором кварцевая сердцевина окружена двумя гексагональными циклами воздушных отверстий и системой вспомогательных воздушных отверстий меньшего размера, обеспечивающих увеличение локализации светового поля в сердцевине. Увеличение числа циклов воздушных отверстий, окружающих сердцевину волокна, приводит, как показывают результаты измерений, к уменьшению оптических потерь. На основании измерений, выполненных для приблизительно 100-метровых участков микроструктурированных волокон этого типа [18], определены оптические потери, составляющие 2–3 дБ/м для волокон с одним гексагональным циклом отверстий и 0.4–0.5 дБ/м для волокон с двумя циклами отверстий.

Наши эксперименты выполнялись с использованием излучения титан-сапфирового лазера, в состав которого входил задающий генератор и регенеративный усилитель. Длительность импульсов лазерного излучения с длиной волны 800 нм и частотой повторения 1 кГц составляла 40 фс, максимальная энергия фемтосекундных импульсов была равна 0.2 мДж. Длина волокна, используемого для исследования спектрального уширения фемтосекундных импульсов и генерации суперконтинуума, варьировалась от 4 до 200 см. Лазерное излучение за-

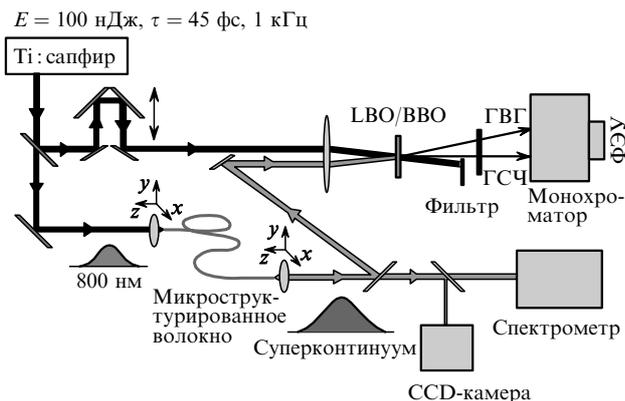


Рис.3. Схема экспериментальной установки для исследования генерации суперконтинуума в микроструктурированном волокне: ГСЧ и ГВГ – сигналы, возникающие в результате генерации суммарной частоты и генерации второй гармоники в нелинейном кристалле.

водилось в волокно при помощи микрообъектива (рис.3). Излучение, прошедшее через волокно, коллимировалось аналогичным микрообъективом. Затем световой пучок проходил через светоделительную пластину, направлявшую одну его часть на спектрограф для анализа спектра, а другую – на CCD-камеру, использовавшуюся для анализа пространственного распределения интенсивности излучения.

3. Модовая структура излучения суперконтинуума

Распространение фемтосекундных импульсов в микроструктурированном волокне сопровождалось их значительным спектральным уширением. При энергиях импульсов титан-сапфирового лазера порядка нескольких наноджоулей наблюдалась генерация суперконтинуума со спектральной шириной, превышающей октаву. На рис.4 представлены характерные спектры излучения суперконтинуума, генерируемого в микроструктурированном волокне с одним циклом отверстий (диаметр сердцевины 3 мкм и длина волокна 1.5 м) импульсами излучения титан-сапфирового лазера с длительностью 40 фс и энергией 2 и 3 нДж.

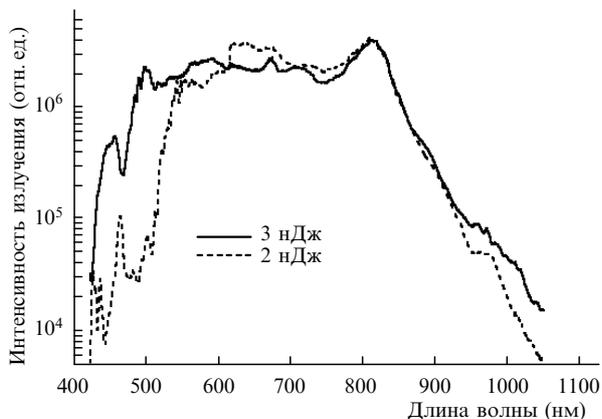


Рис.4. Спектры излучения суперконтинуума, генерируемого в микроструктурированном волокне с одним циклом отверстий (см. рис.1,а) импульсами излучения титан-сапфирового лазера с длительностью 40 фс и энергией 2 и 3 нДж. Диаметр сердцевины волокна 3 мкм, длина 1.5 м.

На рис.2 показано поперечное распределение интенсивности на выходе волокна при малой мощности входного излучения в отсутствие генерации суперконтинуума. Мода излучения накачки характеризуется наличием оси симметрии шестого порядка, присущей также структуре волокна. Излучение суперконтинуума генерировалось в общем случае в многомодовом режиме. Однако использование набора оптических фильтров позволило выделить изолированные пространственные моды излучения для различных спектральных областей суперконтинуума. На рис.5,а, в частности, представлена характерная модовая структура излучения суперконтинуума, генерируемого в микроструктурированном волокне с одним циклом отверстий, зарегистрированная в спектральной области $720-900$ нм. Как видно из представленного на рис.5,а изображения, пространственное распределение интенсивности излучения имеет колоколообразную форму с единственным максимумом на оси пучка. Структура моды излучения суперконтинуума в видимой части спектра ($400-600$ нм) при тех же экспериментальных условиях имеет кольцевую структуру с минимумом на оси пучка (рис.5,б).

При небольшом изменении начальных условий возбуждения волноводной моды происходило преобразование кольцевой моды (рис.5,б) видимой части спектра суперконтинуума в двудольную моду (рис.5,в). Как кольцевая, так и двудольная мода характеризовалась воспроизводимостью и устойчивостью и наблюдалась на выходе микроструктурированных волокон с длинами, варьируемыми в диапазоне $20-200$ см. Из-за меньшего перекрытия распределения поля двудольной моды полем моды накачки интегральный по пространственным модам спектр суперконтинуума в режиме генерации дву-

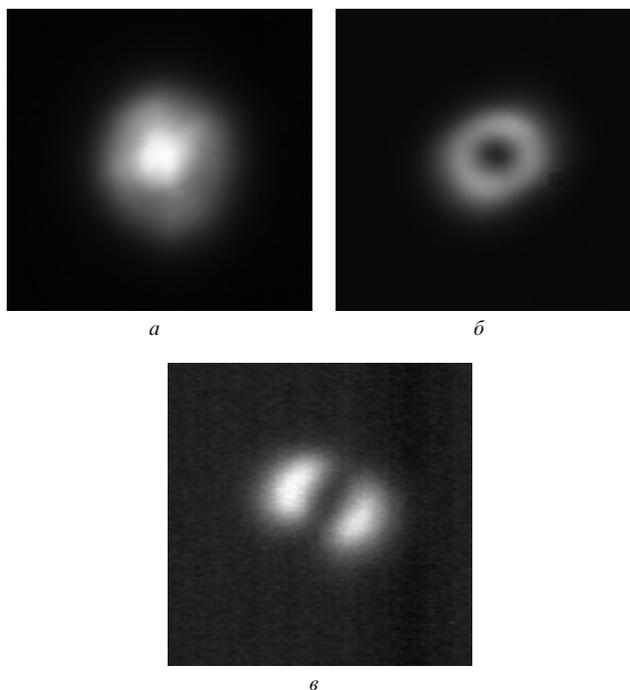


Рис.5. Характерная модовая структура излучения суперконтинуума, генерируемого в микроструктурированном волокне с одним циклом отверстий, зарегистрированная в спектральных областях $720-900$ нм (а) и $400-600$ нм (б, в). Диаметр сердцевины волокна 3 мкм, длина 1.5 м. При изменении начальных условий возбуждения волноводной моды наблюдается преобразование кольцевой моды (б) видимой части спектра суперконтинуума в двудольную моду (в).

дольной моды характеризовался более быстрым спадом в области коротких длин волн, чем в случае генерации кольцевой моды.

Наблюдаемые изменения в характере пространственного распределения интенсивности суперконтинуума в различных спектральных областях свидетельствуют об изменении характера многомодового фазового согласования для процессов ЧВВ, дающих вклад в сверхширокий спектр, в различных спектральных диапазонах. Однако в каждом из исследуемых диапазонов, как следует из результатов измерений, выполненных для микроструктурированных волокон с диаметром сердцевины 3 мкм, преобладает фазовый синхронизм для определенной пространственной моды генерируемого сигнала. Данное обстоятельство позволяет выделить изолированные пространственные моды излучения для различных спектральных областей суперконтинуума.

Необходимо отметить, что процессы ЧВВ, дающие вклад в генерацию суперконтинуума, могут быть связаны с нелинейно-оптическим взаимодействием на кубической нелинейности спектральных компонент частотной гребенки, соответствующей последовательности фемтосекундных импульсов, или происходить с участием новых частотных компонент, возникающих в результате вынужденного комбинационного рассеяния или параметрических процессов. В первом случае режимы многомодового фазового согласования, рассматриваемые в данной работе, не приводят к ухудшению качества суперконтинуума с точки зрения метрологических, спектроскопических и биомедицинских приложений (при этом, разумеется, остается общая для генерации суперконтинуума проблема не всегда контролируемого спектрального распределения фазы). Во втором случае режимы многомодового фазового согласования могут привести к генерации суперконтинуума, непригодного для высокоточных измерений, однако позволяют, как будет показано в настоящей работе, получать излучение суперконтинуума достаточно высокого спектрального и пространственного качества, которое может быть с успехом использовано, например, для спектроскопических приложений.

4. Нелинейно-оптическое преобразование частотных компонент суперконтинуума и кросс-корреляционные измерения

Важным критерием качества пространственных мод суперконтинуума может служить эффективность дальнейшего преобразования частотных компонент его излучения в нелинейной среде. Этот критерий позволяет также судить о пригодности излучения суперконтинуума, генерируемого в микроструктурированных волокнах и селектируемого с использованием описанной выше методики, для реальных спектроскопических исследований и для измерений, выполняемых по схеме накачка – зондирование с помощью суперконтинуума.

Ввиду этого нами экспериментально исследованы процессы генерации суммарной частоты для различных отселектированных с помощью фильтров спектральных областей суперконтинуума, смешиваемых в кристалле LBO толщиной 100 мкм с излучением основной частоты титан-сапфирового лазера. На рис.6 представлены результаты этих измерений, выполненных с использованием длинноволнового крыла излучения суперконтинуума

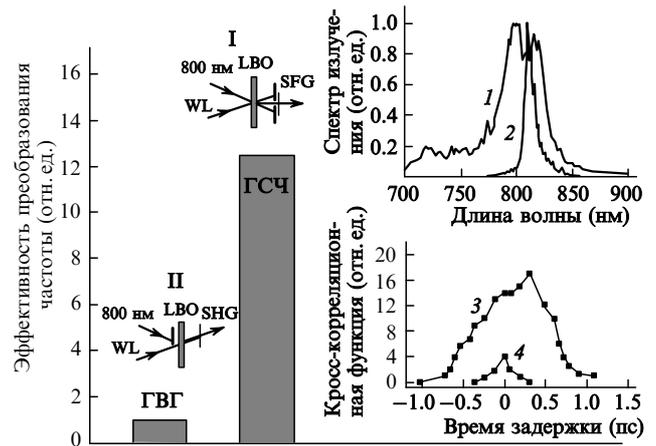


Рис.6. Нелинейно-оптическое преобразование частоты излучения суперконтинуума и кросс-корреляционные измерения. Верхняя вставка: спектр излучения суперконтинуума, генерируемого в микроструктурированном волокне с одним циклом отверстий (диаметр сердцевины 3 мкм и длина 1.5 м), измеренный в спектральной области 720–900 нм (кривая 1), и спектр слабо уширенного излучения титан-сапфирового лазера низкой интенсивности (кривая 2). Нижняя вставка: кросс-корреляционная функция для импульсов излучения суперконтинуума, прошедших через фильтр, отрезающий излучения с длинами волн короче 720 нм (кривая 3), и слабо уширенного излучения титан-сапфирового лазера низкой интенсивности (кривая 4). Диаграмма I показывает схему неколлинеарной генерации суммарной частоты. На диаграмме II представлена схема коллинеарной генерации второй гармоники. Высота столбцов соответствует относительной эффективности генерации суммарной частоты и генерации второй гармоники.

(720–900 нм). Последнее (спектр этого излучения показан кривой 1 на рис.6) смешивалось в кристалле LBO с излучением основной частоты титан-сапфирового лазера в неколлинеарной геометрии трехволнового взаимодействия.

В направлении фазового синхронизма на выходе кристалла (см. диаграмму I на рис.6) наблюдалась генерация широкополосного сигнала суммарной частоты в спектральной области 370–430 нм. Эффективность процесса генерации суммарной частоты составила 0.1 %. Нами наблюдалась также коллинеарная генерация второй гармоники излучения длинноволнового крыла суперконтинуума (диаграмма II на рис.6). Эффективность генерации второй гармоники при этих условиях была более чем на порядок ниже эффективности неколлинеарной генерации суммарной частоты (относительные эффективности генерации суммарной частоты и второй гармоники показаны также на рис.6).

Выполненные эксперименты по генерации суммарной частоты в нелинейном кристалле позволяют также судить о длительности импульсов широкополосного излучения, генерируемого в микроструктурированном волокне в различных спектральных областях. Результаты соответствующих кросс-корреляционных измерений показаны на рис.6. Изменялись зависимости сигнала суммарной частоты от времени задержки между импульсом широкополосного излучения, генерируемого в микроструктурированном волокне и проходящего через систему оптических фильтров, и импульсом основной частоты титан-сапфирового лазера.

Для сравнения измерялись кросс-корреляционные функции для излучения титан-сапфирового лазера малой мощности, испытывающего лишь слабое спектраль-

ное уширение при прохождении через микроструктурированное волокно (спектр этого сигнала показан кривой 2 на рис.6). Длительность кросс-корреляционной функции, построенной для широкополосного сигнала (кривая 3 на рис.6), который был выделен с помощью системы оптических фильтров, существенно превышала длительность кросс-корреляционной функции для сигнала, характеризующегося слабым спектральным уширением (кривая 4 на рис.6). Результаты данных измерений свидетельствуют о том, что различные спектральные компоненты в излучении суперконтинуума на выходе микроструктурированного волокна характеризуются различными временами задержки. Данный эффект обусловлен дисперсионными свойствами волокна и может быть использован для спектральных и времяразрешенных измерений в схеме накачка – зондирование излучением суперконтинуума.

5. Заключение

Таким образом, нами предложен и экспериментально реализован метод пространственно-спектральной фильтрации излучения суперконтинуума, генерируемого в микроструктурированном волокне. Ключевой физической эффект, позволяющий реализовать подобный метод фильтрации излучения суперконтинуума, заключается в увеличении расстройки постоянных распространения для соседних волноводных мод с уменьшением диаметра сердцевины волокна. Достаточно малые размеры сердцевины волокна могут быть обеспечены за счет использования микроструктурированных волокон. Генерация суперконтинуума в подобных волокнах может происходить в режиме, когда для каждой спектральной области суперконтинуума (или, по крайней мере, для некоторых областей) условие фазового согласования для процессов четырехволнового взаимодействия выполняется лишь для определенной моды, генерируемой в результате ЧВВ. Представленные результаты экспериментальных исследований доказывают возможность выделения в этом случае изолированных волноводных мод излучения суперконтинуума в различных спектральных диапазонах. Предложенный метод фильтрации одиночных мод суперконтинуума обеспечивает высокое качество пространственного распределения излучения. Это позволяет достичь большой эффективности дальнейшего нелинейно-оптического преобразования полученных в микроструктурированном волокне и спектрально отселектированных частотных компонент путем смещения их с излучением основной частоты титан-сапфирового лазера в нелинейном кристалле.

Разработанный и экспериментально реализованный в настоящей работе метод пространственно-спектральной фильтрации излучения суперконтинуума, генерируемого в микроструктурированных волокнах, позволяет повы-

сить эффективность использования излучения суперконтинуума для спектроскопических приложений, времяразрешенных измерений, оптической метрологии и когерентной томографии, а также открывает новые пути синтеза сверхкоротких световых импульсов.

Работа выполнена при поддержке гранта № 00-15-99304 Президента Российской Федерации, гранта РФФИ № 00-02-17567, гранта Volkswagen Foundation I/76 869, гранта CRDF № RP2-2266, а также гранта Государственной научно-технической программы Российской Федерации «Фундаментальная метрология».

1. Ranka J.K., Windeler R.S., Stentz A.J. *Opt. Lett.*, **25**, 25 (2000).
2. Coen St., Chau A.H.L., Leonhardt R., Harvey J.D., Knight J.C., Wadsworth W.J., Russell Ph.St.J. *Opt. Lett.*, **26**, 1356 (2001).
3. Birks T.A., Wadsworth W.J., Russell P.St.J. *Opt. Lett.*, **25**, 1415 (2000).
4. Holzwarth R., Zimmermann M., Udem Th., Hänsch T.W., Russbuldt P., Gabel K., Poprawe R., Knight J.C., Wadsworth W.J., Russell P.St.J. *Opt. Lett.*, **17**, 1376 (2001).
5. 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).
6. 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**, 173901-1 (2002).
7. Wadsworth W.J., Ortigosa-Blanch A., Knight J.C., Birks T.A., Mann T.P.M., Russell P.St.J. *J. Opt. Soc. Am. B*, **19**, № 9 (2002).
8. Diddams S.A., Jones D.J., Jun Ye, Cundiff S.T., Hall J.L., Ranka J.K., Windeler R.S., Holzwarth R., Udem T., Hänsch T. W. *Phys. Rev. Lett.*, **84**, 5102 (2000).
9. Holzwarth R., Udem T., Hänsch T.W., Knight J.C., Wadsworth W.J., Russell P.St.J. *Phys. Rev. Lett.*, **85**, 2264 (2000).
10. Bagayev S.N., Dmitriyev A.K., Chepurov S.V., Dychkov A.S., Klementyev V.M., Kolker D.B., Kuznetsov S.A., Matyugin Yu.A., Okhupkin 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).
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. Husakou A.V., Herrmann J. *Phys. Rev. Lett.*, **87**, 203901-1 (2001).
13. Fedotov A.B., Zheltikov A.M., Tarasevitch A.P., von der Linde D. *Appl. Phys. B*, **73**, 181 (2001).
14. Knight J.C., Arriaga J., Birks T.A., Ortigosa-Blanch A., Wadsworth W.J., Russell P.St.J. *IEEE Phot. Technol. Lett.*, **12**, 807 (2000).
15. Knight J.C., Birks T.A., Russell P.St.J., Atkin D.M. *Opt. Lett.*, **21**, 1547 (1996).
16. Fedotov A.B., Alfimov M.V., Ivanov A.A., Tarasishin A.V., Beloglazov V.I., Tarasevitch A.P., von der Linde D., Kirillov B.A., Magnitskii S.A., Chorvat D., Chorvat D. Jr., Naumov A.N., Vlasova E.A., Sidorov-Biryukov D.A., Podshivalov A.A., Kolevatova O.A., Mel'nikov L.A., Akimov D.A., Makarov V.A., Skibina Yu.S., Zheltikov A.M. *Laser Phys.*, **11**, 138 (2001).
17. Жёлтиков А.М., Пинг Жу, Темнов В.В., Кондратьев Ю.Н., Багаев С.Н., Шевандин В.С., Дукельский К.В., Хохлов А.В., Смирнов В.Б., Тарасевич А.П., фон дер Линде Д. *Квантовая электроника*, **32**, 542 (2002).
18. Fedotov A.B., Konorov S.O., Kondrat'ev Yu.N., Bagayev S.N., Shevandin V.S., Dukel'skii K.V., Sidorov-Biryukov D.A., Khokhlov A.V., Smirnov V.B., Zheltikov A.M. *Laser Phys.* (2002) (in press).