

Управление спектральными и когерентными свойствами суперконтинуума с ярко выраженными солитонными структурами в спектре с помощью фазовой модуляции фемтосекундных импульсов накачки

С.М.Кобцев, С.В.Кукарин, С.В.Смирнов, Н.В.Фатеев

Впервые экспериментально установлено существенное влияние начальной фазовой модуляции фемтосекундных импульсов накачки на степень когерентности коротковолнового излучения генерируемого в микроструктурированном волокне суперконтинуума, имеющего хорошо выраженные солитонные структуры в спектре. При этом длинноволновое солитонное излучение при изменении фазовой модуляции импульсов накачки сохраняет полную когерентность, несмотря на значительные вариации несущей частоты солитонов. Наибольшая ширина спектра суперконтинуума и наибольшая степень когерентности его коротковолнового излучения достигаются при небольших положительных значениях параметра фазовой модуляции.

Ключевые слова: суперконтинуум, микроструктурированное волокно, солитон, фемтосекундные импульсы, степень когерентности излучения.

1. Введение

При прохождении фемтосекундных импульсов через микроструктурированное (МС) волокно может наблюдаться генерация широкополосного излучения – суперконтинуума (СК), спектр которого способен перекрыть диапазон длин волн более одной октавы [1, 2]. Форма спектра, его ширина и другие характеристики СК в значительной степени определяются параметрами импульсов накачки, в том числе их фазовой модуляцией («чирпом» по зарубежной терминологии). К настоящему времени уже проведен ряд экспериментальных и теоретических исследований, посвященных изучению влияния фазовой модуляции (ФМ) фемтосекундных импульсов накачки на параметры СК, генерируемого как в МС [3–13], так и в других волокнах [14, 15] и средах [16]. Показано, что в МС волокнах при фиксированной средней мощности фемтосекундных импульсов накачки наибольшая ширина спектра [3, 4], а также минимальный уровень амплитудных [4, 7] и фазовых [7] шумов СК достигаются при близкой к нулю ФМ. В этих работах исследовался СК с относительно гладкой огибающей спектра. Однако при определенном сочетании параметров МС волокна и импульсов накачки может быть реализован СК с хорошо выраженными солитонными структурами (самосдвинутыми по частоте солитонами [8,9]) в длинноволновом крыле спектра. Этот режим генерации СК имеет свою специфику по сравнению с генерацией СК с гладким спектром. Так, например, при изменении ФМ импульсов накачки для СК в данном случае характерно не только изменение ширины

спектра, но и существенное изменение его формы, особенно в длинноволновом крыле спектра излучения [10, 11].

Ранее нами была экспериментально исследована степень когерентности различных частотных компонент СК, спектр которого содержит хорошо выраженные пики, соответствующие оптическим солитонам [17]. Было выявлено заметное различие степени когерентности оптических солитонов в спектре СК (их излучение, как и излучение накачки, было полностью когерентным) и несолитонного излучения СК с относительно невысокой спектральной плотностью мощности в коротковолновом крыле (степень когерентности излучения различных компонент этого крыла спектра составляла 0.25–0.57).

В настоящей работе, являющейся логическим продолжением наших предыдущих исследований [17], впервые изучается влияние ФМ фемтосекундных импульсов накачки на степень когерентности различных спектральных компонент СК, характеризующегося наличием нескольких слабо перекрывающихся солитонных пиков в длинноволновой области спектра и присутствием широкого коротковолнового крыла излучения, перекрывающего диапазон длин волн в несколько сотен нанометров.

2. Методика эксперимента

В экспериментах использовалось кварцевое МС волокно длиной 30 см, сердцевина которого имеет форму, близкую к эллипсу с осями 1.4 и 1.9 мкм (рис.1). Расчетное значение длины волны λ_0 , соответствующей нулевой дисперсии волокна, составляет ~ 750 нм. Схема экспериментальной установки представлена на рис.2. Титан-сапфировый лазер генерирует последовательность импульсов с частотой 100 МГц, длительностью 80 фс и средней мощностью 350 мВт на длине волны 795 нм. Для изменения ФМ выходных импульсов титан-сапфирового лазера использовался регулируемый двухпроходный двух-

С.М.Кобцев, С.В.Кукарин, С.В.Смирнов, Н.В.Фатеев. Новосибирский государственный университет, Россия, 630090 Новосибирск, ул. Пирогова, 2; e-mail: kobtsev@lab.nsu.ru

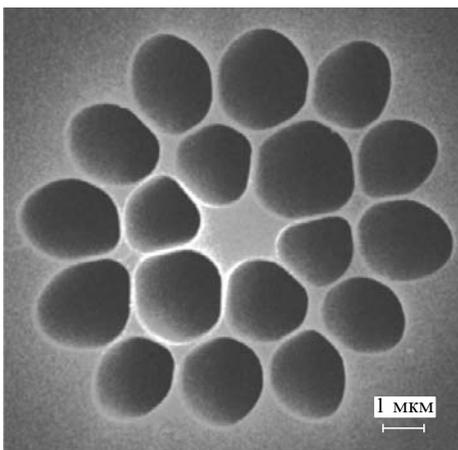


Рис.1. Фотография торца используемого МС волокна.

призмный компрессор, а также плоскопараллельные кварцевые пластины разной толщины, устанавливаемые на пути пучка лазера. После компрессора и фарадеевского изолятора небольшая часть излучения (~1 %) направлялась в интерференционный сканирующий автокоррелятор, в то время как основная часть излучения вводилась микрообъективом в сердцевину МС волокна. Совмещение плоскости поляризации излучения накачки с малой осью эллиптической сердцевины МС волокна проводилось полуволновой фазовой пластинкой, размещенной перед микрообъективом. Контроль совмещения осуществлялся по достижению максимума ширины спектра СК в соответствии с методикой, используемой в [18]. Выходящее из МС волокна излучение коллимировалось микрообъективом и направлялось в интерферометр Майкельсона, разность длин плеч которого составляла ~3 м, что позволяло наблюдать интерференцию излучения двух последовательных импульсов СК. Картина интерференции излучения определенных спектральных составляющих СК выделялась с помощью дифракционной решетки и регистрировалась CCD-камерой с временем усреднения несколько миллисекунд. Видность регистрируемой интерференционной картины для выделенной длины волны излучения СК определялась как $V(\lambda) = (I_{\max} -$

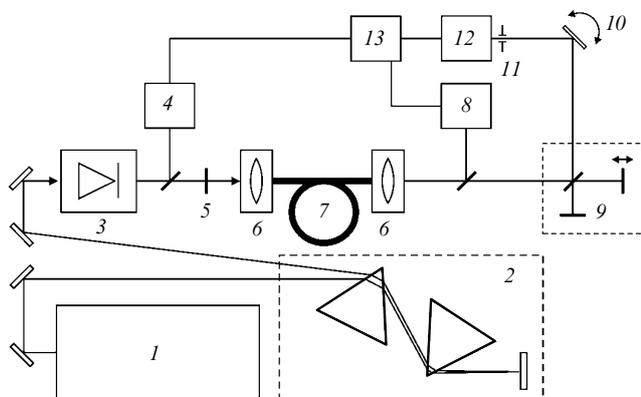


Рис.2. Схема экспериментальной установки: 1 – фемтосекундный титан-сапфировый лазер; 2 – призмный компрессор; 3 – фарадеевский изолятор; 4 – интерферометрический сканирующий автокоррелятор; 5 – полуволновая фазовая пластинка; 6 – микрообъектив; 7 – МС волокно; 8 – оптический анализатор спектра; 9 – интерферометр Майкельсона; 10 – дифракционная решетка; 11 – диафрагма; 12 – CCD-камера; 13 – компьютер.

$I_{\min}) / (I_{\max} + I_{\min})$, где I_{\max} и I_{\min} – максимальная и минимальная интенсивности интерференционного сигнала. Из результатов проведенных измерений определялась степень межимпульсной когерентности первого порядка $\gamma(\lambda, t_1 - t_2)$ [19].

Параметр начальной фазовой модуляции C и длительность импульсов накачки определялись с использованием управляемого компьютером интерференционного автокоррелятора на основе сканирующего интерферометра Майкельсона и нелинейного фотоприемника.

3. Результаты эксперимента и обсуждение

На рис.3 представлены спектры СК, генерируемого в МС волокне при различных параметрах ФМ импульсов накачки и фиксированной (75 мВт) средней мощности излучения на выходе из МС волокна. При ФМ импульсов, близкой к минимальной, СК имеет наиболее широкий спектр, число солитонов в котором достигает четырех. Увеличение параметра ФМ по модулю в сторону как положительных, так и отрицательных значений приводит к сужению спектра СК и уменьшению числа генерируемых солитонов. Таким образом, наблюдаемый нами характер изменения спектра СК при вариациях ФМ импульсов накачки (рис.4) в целом коррелирует с результатами работ [8, 9]. Однако необходимо отметить, что наибольшая ширина спектра СК достигалась в наших экспериментах при небольших положительных значениях параметра ФМ ($C = 0.2 - 0.3$), что вполне можно объяснить оптимальной начальной компрессией импульсов с такой фазовой модуляцией в МС волокне, имеющем аномальную дисперсию на длине волны накачки.

Для измерения степени когерентности излучения СК нами был выбран такой режим его генерации, когда в коротковолновом крыле спектра преобладающую интенсивность имела одна компонента (излучение СК было определенного цвета), а в длинноволновой области присутствовали ярко выраженные пики, соответствующие оптическим солитонам. Этот режим достигался уменьшением мощности излучения накачки до значения, при котором средняя мощность СК на выходе из МС волокна составляла 30 мВт. Максимум спектральной мощности в коротковолновой части спектра СК наблюдался на длине волны 510 нм и отстоял почти на октаву от спектраль-

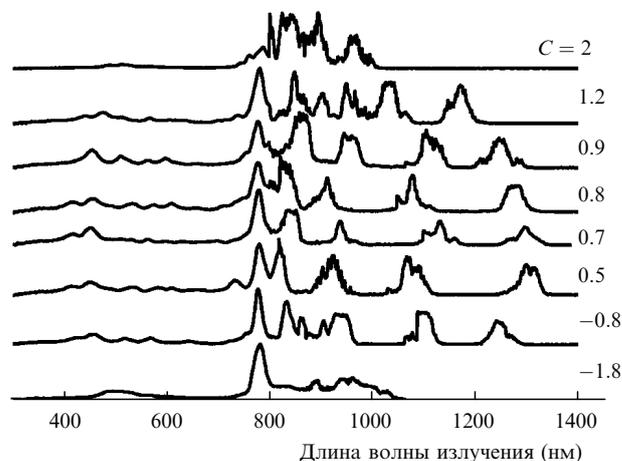


Рис.3. Спектры генерации излучения в МС при различных параметрах «чирпа» импульсов накачки C для средней мощности выходного излучения 75 мВт.

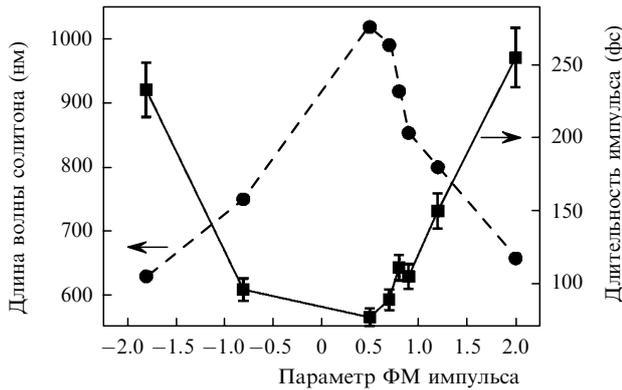


Рис.4. Зависимости спектрального положения длинноволнового солитонного пика и длительности импульсов накачки от параметра ФМ импульса накачки при средней мощности излучения СК 75 мВт.

ного максимума, соответствующего наиболее длинноволновому солитону. Выбранный режим генерации СК интересен для его использования в метрологии, в частности в оптических часах [20], однако для понимания перспектив его применения необходимо выяснить возможность увеличения степени когерентности коротковолнового излучения при изменении ФМ импульсов накачки, а также выявить влияние этого изменения на когерентность излучения наиболее длинноволнового солитона.

В результате наших экспериментов была установлена сильная зависимость степени когерентности излучения СК на длине волны 510 нм от параметра ФМ импульсов накачки (рис.5). Степень когерентности изменялась от 0.3 до 0.65 при изменении параметра ФМ от -1.8 до 2. Полученная зависимость имеет несимметричную форму – степень когерентности в области отрицательных значений параметра ФМ уменьшается быстрее, чем в области его положительных значений. Наибольшая степень когерентности (0.65) была получена для импульсов накачки с небольшим положительным значением параметра ФМ, равным 0.1.

В то же время, как показывают наши эксперименты, излучение солитонов остается полностью когерентным при любых используемых вариациях ФМ импульсов накачки.

На рис.5 серой кривой представлена расчетная зависимость от параметра ФМ длительности импульсов на-

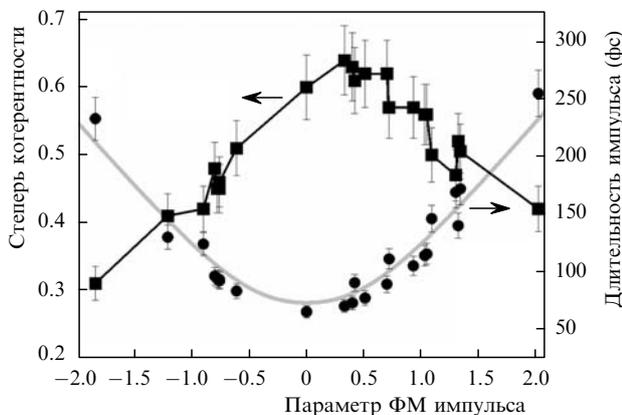


Рис.5. Зависимости степени когерентности излучения СК на длине волны 510 нм и длительности импульсов накачки от параметра их ФМ при средней мощности излучения СК 30 мВт; серая кривая соответствует расчетным данным.

качки с огибающей вида $\text{sech}^2 x$. Длительность спектрально-ограниченных импульсов, принятая при построении теоретической кривой и обеспечивающая наилучшее согласие с экспериментом, составляет 90 фс. Небольшое несовпадение результатов расчетов и эксперимента свидетельствует, по-видимому, о необходимости использования более точной теоретической модели при определении длительности и параметра ФМ по регистрируемой в эксперименте автокорреляционной функции.

4. Применение частично когерентного излучения

Как уже отмечалось выше, рассматриваемый режим генерации СК, характеризующийся значительной (порядка октавы) шириной спектра и высокой спектральной плотностью мощности в солитонных пиках, может представлять практический интерес для его использования в метрологии. Поскольку одной из ключевых характеристик излучения является отношение сигнал-шум, в контексте настоящей работы закономерно возникает вопрос о применимости излучения СК с отличной от единицы степенью когерентности для оптических часов. Отметим, что помимо рассматриваемой в данной работе ФМ импульсов накачки существует также целый ряд других параметров, существенно влияющих на степень когерентности излучения СК. Как показано в работе [21], когерентность излучения СК увеличивается при накачке МС волокна излучением, длина волны которого попадает в область нормальной дисперсии волокна, а также при использовании более коротких входных импульсов. Однако спектральное уширение (ширина спектра СК) при этом оказывается меньше и может быть недостаточным для метрологических применений. В режиме аномальной дисперсии ширина спектров обычно существенно больше и может достигать двух октав [1], а когерентность излучения может быть увеличена при фиксированной ширине спектра за счет уменьшения длительности и увеличения энергии импульсов накачки [20].

Степень когерентности излучения СК в окрестности заданной длины волны определяется амплитудными шумами и фазовыми флуктуациями частот излучения импульсов СК в заданной спектральной области. Для выяснения вопроса о влиянии шумов и флуктуаций на генерируемый в волокне эквидистантный набор спектральных линий (так называемый спектральный комб) нами была рассмотрена последовательность из N импульсов, поле E которых можно представить в виде

$$E(t) = \sum_{n=1}^N f_n(t - nT), \quad (1)$$

где t – время; T – средний период следования импульсов. Фурье-преобразование выражения (1) дает

$$E(\omega) = \sum_{n=1}^N f_n(\omega) \exp(in\omega T) \\ \equiv \sum_{n=1}^N a_n(\omega) \exp[i\phi_n(\omega) + in\omega T]. \quad (2)$$

Предполагая, что амплитуда a_n и фаза ϕ_n спектральной функции каждого импульса являются случайными вели-

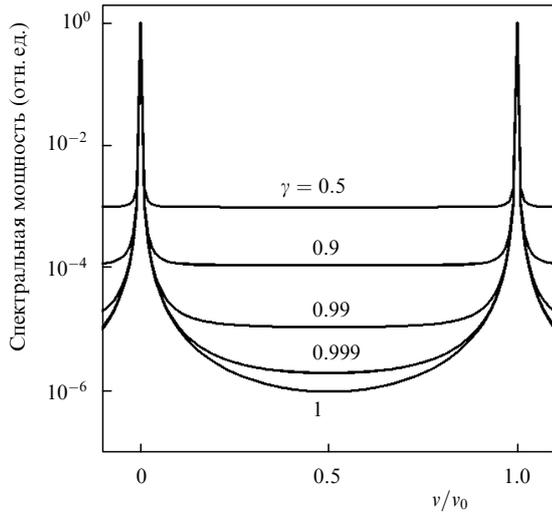


Рис.6. Усредненные по ансамблю огибающие спектров последовательностей импульсов, следующих с частотой повторения $\nu_0 = 1/T$, построенные с использованием формулы (4) для различных степеней когерентности γ .

чинами, не зависящими ни друг от друга*, ни от амплитуды и фазы других импульсов в последовательности, а также что функции распределения величин a_n и ϕ_n не зависят от n , получаем для степени когерентности выражение

$$\gamma(\omega) = \frac{|\langle f_i(\omega)f_j(\omega) \rangle_{ij}|}{[\langle |f_i(\omega)|^2 \rangle \langle |f_j(\omega)|^2 \rangle]^{1/2}} = \frac{|\zeta|^2}{1 - \sigma_a^2 / \langle a \rangle^2}, \quad i \neq j. \quad (3)$$

Здесь и далее угловые скобки означают усреднение по ансамблю; $\sigma_a^2 = \langle (a - \langle a \rangle)^2 \rangle$ – дисперсия флуктуаций спектральной амплитуды импульсов; $\zeta = \langle \exp(i\phi) \rangle$. Пользуясь сделанными предположениями, можно получить также выражение для спектральной мощности излучения:

$$\langle |E(\omega)|^2 \rangle = \langle a \rangle^2 |\zeta|^2 \left\{ \left[\frac{\sin(\omega TN/2)}{\sin(\omega T/2)} \right]^2 + N \left[\frac{1}{\gamma(\omega)} - 1 \right] \right\}. \quad (4)$$

На рис. 6 приведены нормированные на единицу огибающие спектров последовательностей из $N = 1000$ импульсов. Кривые построены с использованием выражения (4) для различных степеней когерентности γ . Видно, что уменьшение степени когерентности приводит к росту шума между линиями комба. В соответствии с (4) отношение интенсивности шума между линиями к интенсивности сигнала в центре линий задается выражением

$$\left\langle \frac{I_{\text{noise}}}{I_{\text{sign}}} \right\rangle = \frac{1}{N} \left(\frac{1}{\gamma} - 1 \right). \quad (5)$$

Важной особенностью выражения (5) является то, что отношение шум-сигнал зависит не только от степени когерентности γ , но также от числа N импульсов в последовательности (от времени усреднения τ_{av} регистрирующей

* Данное упрощающее предположение основано на том, что в используемой модели не рассматриваются амплитудные флуктуации импульсов на входе в волокно (накачка предполагается стабилизированной), поэтому флуктуации в излучении СК обусловлены исключительно усиленным шумом – спонтанно испущенными фотонами со случайной фазой.

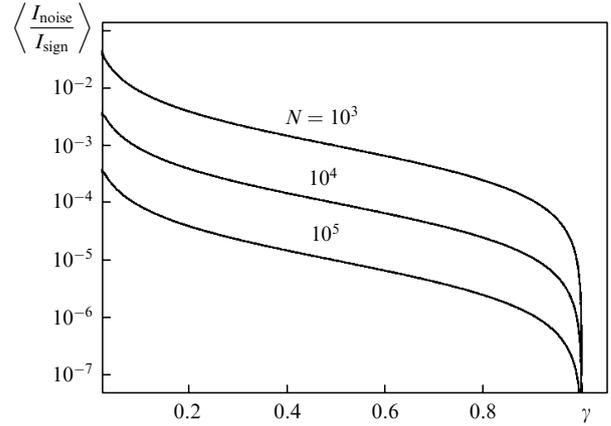


Рис.7. Зависимость отношения шум-сигнал от степени когерентности γ для различного числа N импульсов в последовательности.

системы). На рис.7 приведены три кривые для $N = 10^3, 10^4$ и 10^5 (при частоте следования импульсов 100 МГц соответствующие времена усреднения будут составлять $10^{-5}, 10^{-4}$ и 10^{-3} с). Хотя относительный уровень шума и может быть уменьшен за счет увеличения времени усреднения, в приложениях, связанных со стабилизацией оптических частот, τ_{av} должно оставаться много меньше обратной максимальной частоты технических шумов, составляющей обычно $10^3 - 10^4 \text{ с}^{-1}$. При полученной в данной работе максимальной степени когерентности коротковолнового излучения $\gamma \sim 0.6$ это соответствует отношению шум-сигнал $-30 \dots -40$ дБ, что вполне достаточно для приложений.

5. Заключение

В результате проведенных экспериментов выявлена возможность управления степенью когерентности коротковолнового излучения СК, имеющего хорошо выраженные солитонные структуры в спектре, с помощью ФМ фемтосекундных импульсов накачки. При этом длинноволновое солитонное излучение сохраняет полную когерентность при изменении ФМ импульсов накачки, несмотря на значительные сопутствующие вариации несущей частоты солитонов. Наибольшая ширина спектра СК и наибольшая степень когерентности коротковолнового излучения СК достигаются при небольших положительных значениях параметра ФМ. Отметим, что в численных расчетах, проведенных в работе [5] для СК с гладкой огибающей спектра, также предсказывается увеличение среднего фазового шума излучения СК при отклонениях параметра ФМ импульсов накачки от оптимальной величины, имеющей небольшое положительное значение.

Проанализирован вопрос о применимости излучения СК с отличной от единицы степенью когерентности для оптических часов. Показано, что при степени когерентности $\gamma \sim 0.6$ и малых временах усреднения ($10^{-5} - 10^{-4}$ с) отношение шум-сигнал не превышает $-30 \dots -40$ дБ, что является приемлемым для рассматриваемых метрологических приложений.

Данная работа частично поддержана грантом ФЦП «Исследования и разработки по приоритетным направлениям развития научно-технологического комплекса России на 2007–2012 годы», а также грантом INTAS № 03-51-5288.

1. Ranka J.K., Windeler R.S., Stentz A.J. *Opt. Lett.*, **25**, 25 (2000).
2. Желтиков А.М. *УФН*, **174**, 73 (2004).
3. Arolonsky A., Povazay B., Unterhuber A., Drexler W., Wadsworth W.J., Knight J.C., Russell P.St.J. *J. Opt. Soc. Am. B*, **19**, 2165 (2002).
4. Corwin K.L., Newbury N.R., Dudley J.M., Coen S., Diddams S.A., Weber K., Windeler R.S. *Phys. Rev. Lett.*, **90**, 113904 (2003).
5. Fedotov A.B., Zhou P., Kondrat'ev Yu.N., Konorov S.O., Vlasova E.A., Sidorov-Biryukov D.A., Shevandin V.S., Dukel'skii K.V., Khokhlov A.V., Bagayev S.N., Smirnov V.B., Tarasevitch A.P., Linde D., Zheltikov A.M. *Laser Phys.*, **13**, 816 (2003).
6. Konorov S.O., Bugar I., Sidorov-Biryukov D.A., Chorvat D., Kondrat'ev Yu.N., Shevandin V.S., Dukel'skii K.V., Khokhlov A.V., Fedotov A.B., Uherek F., Morozov V.B., Makarov V.A., Chorvat D., Zheltikov A.M. *Laser Phys.*, **14**, 772 (2004).
7. Washburn B.R., Newbury N.R. *Opt. Express*, **12**, 2166 (2004).
8. Головченко Е.А., Дианов Е.М., Прохоров А.М., Серкин В.Н. *Письма в ЖЭТФ*, **42**, 74 (1985).
9. Mitschke F.M., Mollenauer L.F. *Opt. Lett.*, **11**, 659 (1986).
10. Cormack I.G., Reid D.T., Wadsworth W.J., Knight J.C., Russell P.St.J. *Electron. Lett.*, **38**, 167 (2002).
11. Zhu Z., Brown T.G. *Opt. Express*, **12**, 689 (2004).
12. Tianprateep M., Tada J., Yamazaki T., Kannari F. *Jap. J. Appl. Phys.*, **43**, 8059 (2004).
13. Gui L., Fu X., Wen S., Qian L. *Proc. SPIE Int. Soc. Opt. Eng.*, **5627**, 442 (2005).
14. Wu Y., Lou C.Y., Han M., Wang T., Gao Y.Z. *Chinese Phys.*, **11**, 578 (2002).
15. Türke D., Wohlleben W., Teipel J., Motzkus M., Kibler B., Dudley J., Giessen H. *Appl. Phys. B*, **83**, 37 (2006).
16. Голубцов И.С., Кандидов В.П., Косарева О.Г. *Квантовая электроника*, **33**, 525 (2003).
17. Kobtsev S.M., Kukarin S.V., Fateev N.V., Smirnov S.V. *Appl. Phys. B*, **81**, 263 (2005).
18. Кобцев С.М., Кукарин С.В., Фатеев Н.В. *Квантовая электроника*, **33**, 1085 (2003).
19. Mandel L., Wolf E. *Optical Coherence and Quantum Optics* (Cambridge, UK: Cambridge University Press, 1995).
20. Kobtsev S.M., Smirnov S.V. *Opt. Express*, **14**, 3968 (2006).
21. Dudley J.M., Coen S. *Opt. Lett.*, **27**, 1180 (2002).