

# Импульсный волоконный висмутовый лазер с внутрирезонаторной компенсацией дисперсии групповых скоростей

А.А.Крылов, П.Г.Крюков, Е.М.Дианов, О.Г.Охотников, М.Гуина

*В лазере на основе активированного висмутом волоконного световода реализован режим пассивной синхронизации мод с помощью насыщающегося поглотителя SESAM, оптимизированного для работы в спектральном диапазоне 1100–1200 нм. Накачка осуществлялась непрерывным иттербиевым волоконным лазером на длине волны 1075 нм с максимальной мощностью 2 Вт. Исследована генерация лазера с внутрирезонаторным компенсатором дисперсии групповых скоростей (ДГС) на основе пары дифракционных решеток. Получена генерация лазерных импульсов минимальной длительностью около 5 пс.*

**Ключевые слова:** висмутовый волоконный лазер, синхронизация мод, SESAM, компенсация ДГС.

## 1. Введение

Интерес к исследованию волоконных световодов, активированных висмутом, определяется стремлением расширить спектральный диапазон работы волоконных лазеров и усилителей в область длин волн второго окна прозрачности световодов на основе кварцевого стекла ( $\sim 1.3$  мкм). В настоящее время реализована непрерывная генерация висмутовых лазеров, работающих в полосах 1140–1215 нм [1–4] при накачке излучением иттербиевого волоконного лазера и 1.3–1.5 мкм [5] при накачке либо волоконным ВКР-лазером с длиной волны генерации  $\lambda_g = 1230$  нм, либо висмутовым волоконным лазером с  $\lambda_g = 1205$  нм. При этом эффективность лазерной генерации на длине волны 1160 нм достигает 50 % при температуре 77 К и 30 % при 300 К [6], что помимо прочего позволяет надеяться на возможность создания мощного лазера для генерации узкополосного излучения «желтого» диапазона, необходимого для создания «искусственной звезды», которая используется в астрономии для корректировки адаптивной оптики больших телескопов [7]. Спектральный диапазон 1.3–1.5 мкм представляет интерес для телекоммуникационных применений [8].

Широкий спектр люминесценции висмутовых активных центров в световодах даёт основания рассчитывать на возможность генерации ультракоротких импульсов длительностью вплоть до субпикосекунд при осуществлении режима синхронизации мод. Однако у таких световодов имеется существенный недостаток, который заключается в невысокой концентрации активных висмутовых центров, что приводит к необходимости работать с большими длинами световода, достигающими десят-

ков метров. Для сравнения укажем, что в широко распространённых эрбиевых и иттербиевых волоконных лазерах УКИ длины активных световодов не превышают десятков сантиметров. Работа с многометровыми световодами создает значительные трудности при разработке висмутовых лазеров УКИ.

Нами впервые была продемонстрирована непрерывная генерация висмутового лазера с длиной волны излучения  $\sim 1160$  нм в режиме пассивной синхронизации мод [9], который инициировался и поддерживался с помощью полупроводникового зеркала с насыщающимся поглощением (SESAM) [10, 11]. При этом были получены импульсы длительностью 50 пс на  $\lambda = 1161.6$  нм. В дальнейшем были проведены исследования особенностей генерации лазера в зависимости от параметров резонатора, в результате чего были получены импульсы длительностью от 50 пс до 3.5 нс в зависимости от типа выходного зеркала резонатора [12]. Главным препятствием к получению более коротких лазерных импульсов является необходимость иметь дело со значительной положительной дисперсией групповых скоростей (ДГС) длинного висмутового световода, которую необходимо компенсировать внутрирезонаторными методами. Существуют стандартные методы управления ДГС, основанные на использовании призм, дифракционных решеток [13] и специальных световодов с аномальной ДГС [14, 15]. В настоящей работе исследован лазер на основе световода, активированного висмутом, с внутрирезонаторным управлением ДГС с помощью отражательных дифракционных решеток, применение которых в нашем случае представляется наиболее оптимальным.

## 2. Эксперимент

В работе использовался изотропный волоконный световод на основе кварцевого стекла с сердцевиной, легированной алюминием и висмутом (молярные концентрации  $\text{Al}_2\text{O}_3$  3 % и  $\text{SiO}_2$  97 %,  $\text{NA} \approx 0.13$ ), с диаметром поля основной моды  $7.5 \pm 0.2$  мкм и дисперсией второго порядка  $\beta_2 \approx +1.43 \times 10^{-2}$  пс<sup>2</sup>·м<sup>-1</sup> (всё на  $\lambda = 1160$  нм). Преформа для вытяжки световода была изготовлена

А.А.Крылов, П.Г.Крюков, Е.М.Дианов. Научный центр волоконной оптики РАН, Россия, 119333 Москва, ул. Вавилова, 38; e-mail: krylov@fo.gpi.ru

О.Г.Охотников, М.Гуина. Optoelectronics Research Center, Tampere University of Technology, Korkeakoulunkatu 3, Tampere, 33720 Finland; RaifeKron Ltd. Ikmiehenkatu 17D 18, Tampere, 33710 Finland

Поступила в редакцию 28 июля 2008 г., после доработки – 6 октября 2008 г.

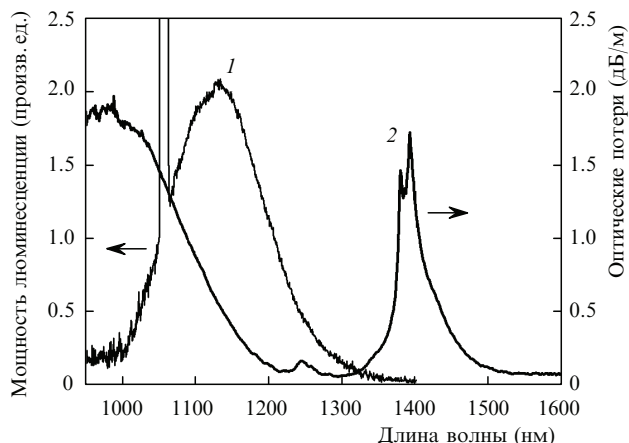


Рис.1. Спектры люминесценции (кривая 1) и поглощения (кривая 2) алюмосиликатного висмутового волоконного световода. Полоса поглощения с центром на  $\lambda = 1000$  нм обусловлена висмутом, полоса с центром на  $\lambda = 1385$  нм – ОН-группами.

SPCVD-методом в лаборатории плазмохимических технологий НЦВО РАН [16]. Атомная концентрация висмута, определенная методом рентгеноструктурного микроанализа, составляла  $3 \times 10^{18}$  см $^{-3}$ . При столь малой концентрации висмута довольно малы коэффициенты поглощения излучения накачки (поглощение на длине волны  $\lambda_p = 1075$  нм равно 1.2 дБ/м) и усиления излучения, распространяющегося по световоду (коэффициент усиления при полном насыщении менее 0.5 дБ/м на  $\lambda = 1160$  нм). Спектры поглощения и люминесценции в данном световоде приведены на рис.1.

Экспериментальная схема висмутового волоконного лазера приведена на рис.2. Все пассивные волоконные элементы резонатора лазера были изготовлены на основе одномодового световода типа Flexcore с диаметром поля основной моды  $7.3 \pm 0.1$  мкм и  $\beta_2 \approx +1.69 \times 10^{-2}$  пс $^2$ ·м $^{-1}$  на  $\lambda = 1160$  нм. Потери на стыковку активного висмутового и пассивного световодов не превышали 0.2 дБ.

Одним из зеркал лазерного резонатора Фабри–Перо служил SESAM на основе GaInNAs-структуры. Он был

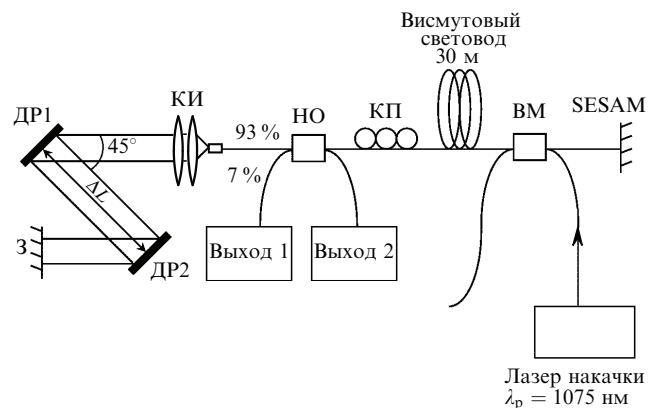


Рис.2. Схема висмутового волоконного лазера с внутрирезонаторным компенсатором ДГС.

ВМ – волоконный мультиплексор; КП – контроллер поляризации на основе пассивного изотропного световода Flexcore; НО – направленный ответвитель с коэффициентом деления 7/93 на длине волны  $\lambda = 1160$  нм для вывода излучения из резонатора; ДР1 и ДР2 – отражательные дифракционные решетки (600 штрих./мм); З – зеркало с коэффициентом отражения около 100% в полосе 1140–1250 нм; КИ – коллиматор излучения на основе двухлинзового объектива.

изготовлен методом молекулярно-лучевой эпитаксии на подложке GaAs и оптимизирован для работы в спектральном диапазоне 1100–1200 нм [10, 11]. SESAM функционировал в режиме, близком к резонансному, с высоким контрастом насыщающихся потерь излучения в нем, так как только в этом случае возможен самозапуск синхронизации мод в лазере с положительной ДГС резонатора [10, 11]. Торцевой волоконный световод, сколотый под прямым углом, непосредственно подводился к поверхности SESAM, либо использовалась фокусирующая система между торцом световода, сколотого под углом  $87^\circ$  к его оси, и поверхностью SESAM, состоящая из просветленного и исправленного двухлинзового объектива из высокопреломляющего стекла ТБФ-10.

Вторым зеркалом резонатора служил компенсатор ДГС на основе пары отражательных дифракционных решеток (600 штрих./мм) с золотым покрытием. Излучение из выходного торца световода коллимировалось в пучок диаметром около 1 мм. Максимальная эффективность дифракции излучения с  $\lambda = 1160$  нм на каждой решетке составляла  $\sim 55\%$ , причем она зависела от состояния поляризации излучения. Состояние поляризации управлялось с помощью волоконного контроллера поляризации. Суммарные потери компенсатора ДГС, с учетом обратного ввода излучения в световод, после его оптимальной юстировки составили  $\sim 10.4$  дБ ( $\lambda = 1160$  нм). Для компенсации усилением этих потерь и потерь в других элементах резонатора приходилось использовать висмутый активный световод длиной 30 м. Суммарная длина волоконной части резонатора составила 40 м, что соответствует суммарной ДГС примерно  $+0.6$  пс $^2$ , тогда как аномальная ДГС решеточного компенсатора  $\beta_2 \approx -1$  пс $^2$ ·м $^{-1}$ . Решетки устанавливались на расстояния 37 и 55 см друг от друга, что соответствовало аномальной ДГС  $-0.37$  и  $-0.55$  пс $^2$  за один проход соответственно. Условия эксперимента не позволили использовать большее расстояние, которое требовалось бы для полной компенсации ДГС световода. Таким образом, суммарная ДГС оставалась нормальной и составляла  $+0.23$  и  $+0.05$  пс $^2$  соответственно.

Излучение лазера выводилось с помощью 7%-ного направленного ответвителя ( $\lambda = 1160$  нм), при этом для измерений лазерных параметров использовались оба его свободных порта. Выходная средняя мощность и спектр излучения регистрировались на выходе 1, а на выходе 2 анализировалась автокорреляционная функция импульсов.

Накачка осуществлялась излучением специально изготовленного нами для этой цели непрерывного итербиевого волоконного лазера ( $\lambda_p = 1075$  нм) через изолятор (потери и изоляция которого составляют 1.5 и 25 дБ соответственно на  $\lambda_p = 1075$  нм) и волоконный мультиплексор с эффективным объединением излучения с  $\lambda = 1075$  и 1160 нм. В лазере накачки использовался активированный ионами итербия световод длиной 7 м с двумя волоконными брэгговскими решетками в качестве зеркал резонатора, имеющими коэффициенты отражения излучения 100% и 5% на  $\lambda = 1075$  нм. Ширина спектра генерации лазера составляла  $\sim 0.05$  нм, максимальная выходная мощность 2 Вт. Накачка итербиевого световода осуществлялась лазерным диодом с  $\lambda \approx 975$  нм и многомодовым волоконным выходом. Все пассивные волоконные компоненты итербиевого лазера накачки были изготовлены на основе одномодового световода типа Flex-

сое с диаметром поля основной моды  $7.0 \pm 0.1$  мкм на  $\lambda = 1075$  нм.

Временные характеристики лазерных импульсов измерялись аналоговым осциллографом TEKTRONIX 7104 с полосой 5 ГГц и германиевым фотоприемником с собственной функцией отклика длительностью 700 пс, а также автокоррелятором INRAD 5-14LDA, работающим в режиме неколлинеарного синхронизма в кристалле ниобата лития. Спектральные измерения проводились спектроанализатором ANDO AQ6317B с максимальным разрешением 0.01 нм. Средняя мощность излучения измерялась прибором Coherent FieldMaxII с полупроводниковым сенсором.

### 3. Результаты

Исследование лазера, изображенного на рис.2, дало следующие результаты. В режиме пассивной синхронизации мод резонатора получена генерация импульсов с частотой повторения 2.4 МГц. Пороговая мощность излучения накачки, при которой возникает генерация,  $P_{th} = 500$  мВт. На рис.3 изображены автокорреляционные функции интенсивности импульсов, соответствующие различным параметрам лазерного резонатора. Соответствующие спектры излучения показаны на рис.4.

Ширина автокорреляционной функции, полученной при расстоянии между дифракционными решетками  $\Delta L = 37$  см, и, следовательно, длительность лазерных импульсов превышали пределы измеряемого диапазона автокоррелятора (170 пс) и практически не реагировали на изменение состояния поляризации излучения в резонаторе. В то же время выходная средняя мощность была весьма чувствительна к таким изменениям. Узкий пик в центре автокорреляционной функции (кривая 1 на рис.3) свидетельствует о наличии нестабильной внутренней модуляции импульсов, при этом ширина пика соответствует времени когерентности импульса. Анализ сигнала на осциллографе также показал наличие флуктуаций мощности импульсов, что влекло за собой амплитудную модуля-

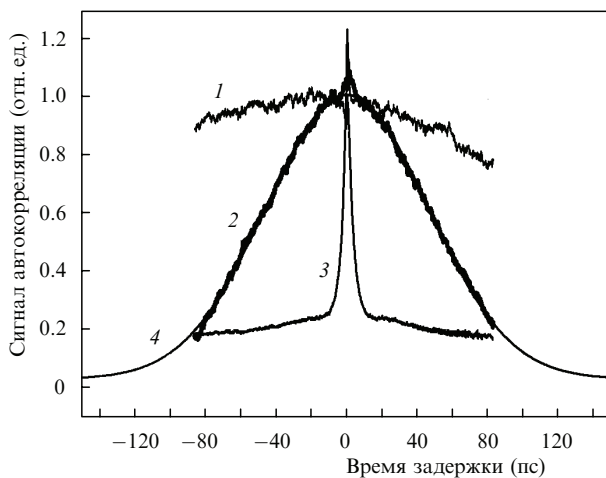


Рис.3. Автокорреляционные функции интенсивности импульсов, генерируемых висмутовым волоконным лазером, при различных параметрах резонатора: расстояние между решетками  $\Delta L = 37$  см, средняя выходная мощность  $P_1 = 1.3$  мВт, ширина автокорреляционной функции и длительность импульсов  $\tau_a, \tau_p \gg 100$  пс (кривая 1);  $\Delta L = 55$  см,  $P_2 = 0.15$  мВт,  $\tau_a = 130$  пс,  $\tau_p \approx 92$  пс (кривая 2);  $\Delta L = 55$  см,  $P_3 = 0.56$  мВт,  $\tau_a = 7$  пс,  $\tau_p \approx 5$  пс (кривая 3); а также аппроксимация функцией Гаусса (кривая 4).

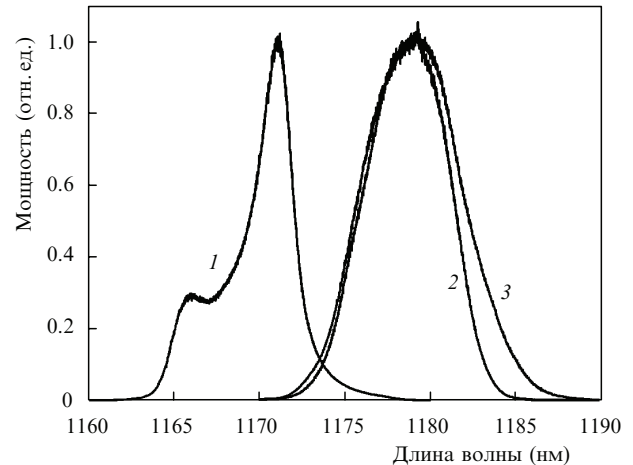


Рис.4. Спектры излучения висмутового волоконного лазера при различных параметрах резонатора: расстояние между решетками  $\Delta L = 37$  см, средняя выходная мощность  $P_1 = 1.3$  мВт, ширина спектра  $\Delta\lambda_{FWHM} \approx 2.5$  нм (кривая 1);  $\Delta L = 55$  см,  $P_2 = 0.15$  мВт,  $\Delta\lambda_{FWHM} \approx 6$  нм (кривая 2);  $\Delta L = 55$  см,  $P_3 = 0.56$  мВт,  $\Delta\lambda_{FWHM} \approx 6.5$  нм (кривая 3).

цию всего пуга. Это, в основном, связано с нестабильностью параметров импульсов при распространении в длинном резонаторе со значительными потерями и усилением.

Увеличение расстояния между дифракционными решетками до 55 см и, следовательно, уменьшение внутрирезонаторной ДГС до  $+0.05$  пс<sup>2</sup> приводили к генерации более коротких импульсов (кривые 2 и 3 на рис.3). Отличие этих автокорреляционных функций друг от друга заключается в том, что они получены при варьировании состояния поляризации и средней мощности излучения в резонаторе.

Самый стабильный пуг импульсов с амплитудной модуляцией менее 10 % соответствовал кривой 2 на рис.3. При этом длительность импульсов составляла 92 пс при средней выходной мощности 0.15 мВт (мощность излучения накачки 600 мВт). Отметим, что уменьшение мощности излучения накачки приводило к незначительному сужению автокорреляционной функции импульсов.

Кривая 3 на рис.3 соответствовала минимальной ширине автокорреляционной функции 7 пс. При переходе лазера в этот режим генерации абсолютный сигнал автокорреляции, как и мощность импульса, регистрируемого на широкополосном осциллографе, существенно возрастали, что означало увеличение интенсивности излучения, то есть сужение импульсов. Таким образом, удалось получить генерацию импульсов с минимальной длительностью, составляющей по оценке 5 пс.

При такой малой длительности возрастает роль нелинейных эффектов, в частности фазовой самомодуляции (ФСМ) [17]. Наличие пьедестала в автокорреляционной функции, по-видимому, обусловлено тем, что положительная частотная модуляция импульса за счет ДГС и ФСМ в волоконной части резонатора компенсируется отрицательной линейной частотной модуляцией в решеточном компенсаторе только в центральной части импульса, то есть там, где она является практически линейной. Это может быть связано с тем, что нелинейная частотная модуляция за счет ФСМ в волоконной части резонатора намного превышает линейную частотную модуляцию за счет ДГС световода. В нашем случае оценка

нелинейной и дисперсионной длин для импульсов длительностью 10 и 100 пс показывает, что  $L_D(100 \text{ пс}) \approx 500 \text{ км}$ ,  $L_D(10 \text{ пс}) \approx 5 \text{ км}$ ,  $L_{NL}(100 \text{ пс}) \approx 10 \text{ м}$  и  $L_{NL}(10 \text{ пс}) \approx 1 \text{ м}$  (средняя мощность излучения внутри резонатора составляет 7.9 мВт, нелинейный показатель преломления кварца  $n_2 = 3.2 \times 10^{-20} \text{ м}^2/\text{Вт}$ ) [17], то есть  $L_{NL} \ll L_D$  и, таким образом, ФСМ действительно превалирует над ДГС. Значительное влияние ФСМ также проявляется в уширении лазерных спектров, соответствующих импульсам длительностью менее 100 пс (кривые 2 и 3 на рис.4). Переход лазера в такой режим генерации может быть обусловлен влиянием нелинейной эволюции состояния поляризации излучения вследствие наведенного нелинейного двулучепреломления волоконного световода (поскольку этот нелинейный нерезонансный эффект относится к керровскому типу и за него также ответственен нелинейный показатель преломления  $n_2$ , оценки нелинейной длины для него, сделанные выше, являются справедливыми) [18–20]. Действительно, данный режим наблюдался лишь при тщательной настройке контроллера поляризации и был принципиально возможен благодаря наличию в резонаторе поляризатора в виде решеточного компенсатора ДГС, потери в котором существенно зависят от состояния поляризации излучения, как упоминалось выше [21]. Фактически, данный лазер представляет собой совокупность источника и волоконно-решеточного компрессора импульсов, параметры которого не являются оптимальными, что и приводит к неполному сжатию импульса и появлению пьедестала [17].

Следует также отметить, что варьирование диаметра пучка, сфокусированного на SESAM, не привело к существенному изменению режима генерации лазера, при этом оптимальные условия генерации соответствуют случаю прижатого к его поверхности торца световода.

#### 4. Заключение

Проведено исследование лазера на основе активированного висмутом волоконного световода с целью сокращения длительности импульсов путем регулирования внутрирезонаторной ДГС. Получена лазерная генерация с внутрирезонаторным компенсатором ДГС на основе пары объемных отражательных дифракционных решеток в режиме пассивной синхронизации мод, который инициировался и поддерживался с помощью насыщающегося поглотителя SESAM. Установлено, что при генерации импульсов длительностью менее 100 пс в резонаторе с частичной компенсацией ДГС режим пассивной синхронизации мод чрезвычайно чувствителен к изменению состояния поляризации лазерного излучения, что, возможно, связано с влиянием нелинейной эволюции состояния поляризации излучения вследствие наведенного нелинейного двулучепреломления в условиях доминирования ФСМ над ДГС в волоконной части резонатора. В висмутовом волоконном лазере, насколько нам известно, впервые получены импульсы с минимальной дли-

тельностью 5 пс и частотой повторения  $\sim 2.4 \text{ МГц}$  в диапазоне длин волн 1160–1185 нм. В дальнейшем ожидается, что благодаря оптимизации расстояния между дифракционными решетками компенсатора ДГС (это позволит более качественно скомпенсировать частотную модуляцию вследствие ДГС и ФСМ длинного световода) удастся получить еще более короткие лазерные импульсы.

Авторы выражают благодарность К.М.Голанту и А.В.Холодкову, изготовившим висмутовый волоконный световод, И.А.Буфетову за предоставленные спектры люминесценции и поглощения в висмутовом световоде, А.Е.Левченко, измерившему ДГС волоконного световода, Б.Л.Давыдову за изготовление волоконного ответвителя и объективов, использованных в работе, а также А.В.Таусеневу, предоставившему дифракционные решетки для компенсации ДГС в резонаторе. Работа выполнена в рамках Программы Президиума РАН «Фемтосекундная оптика и новые оптические материалы».

1. Дианов Е.М., Двойрин В.В., Машинский В.М., Умников А.А., Яшков М.В., Гурьянов А.Н. *Квантовая электроника*, **35** (12), 1083 (2005).
2. Razdobreev I., Bigot L., Pureur V., Favre A., Bouwmans G., Douay M. *Appl. Phys. Lett.*, **90**, 031103 (2007).
3. Rulkov A.B., Ferin A.A., Popov S.V., Taylor J.R., Razdobreev I., Bigot L., Bouwmans G. *Opt. Express*, **15**, 5473 (2007).
4. Dianov E.M., Shubin A.V., Melkumov M.A., Medvedkov O.I., Bufetov I.A. *J. Opt. Soc. Am. B*, **24**, 1749 (2007).
5. Дианов Е.М., Фирстов С.В., Хопин В.Ф., Гурьянов А.Н., Буфетов И.А. *Квантовая электроника*, **38** (7), 615 (2008).
6. Mashinsky V.M., Dvoyrin V.V., Dianov E.M. *OFC/NFOEC Conf.* (San Diego, 2008, paper OThN1).
7. Max C.E., Olivier S.S., Friedman H.W., An J., Avicola K., Beeman B.V., Bissinger H.D., Brase J.M., Erbert G.V., Gavel D.T., Kanz K., Liu M.C., Macintosh B., Neeb K.P., Patience J., Waltjen K.E. *Science*, **277**, 1649 (1977).
8. Desurvire E. in *Proc. 31st Europ. Conf. Opt. Commun. ECOC* (Glasgow, 2005, Vol. 1, p. 5).
9. Krylov A.A., Dianov E.M., Dvoyrin V.V., Kryukov P.G., Mashinsky V.M., Okhotnikov O.G., Guina M. *J. Opt. Soc. Am. B*, **24**, 1807 (2007).
10. Okhotnikov O., Pessa M. *J. Phys.: Condens. Matter*, **16**, S3108 (2004).
11. Okhotnikov O., Grudinin A., Pessa M. *New J. Phys.*, **6**, 177 (2004).
12. Крылов А.А., Двойрин В.В., Машинский В.М., Крюков П.Г., Охотников О.Г., Гуина М. *Квантовая электроника*, **38** (3), 233 (2008).
13. Diels J.-C., Rudolph W. *Ultrashort laser pulse phenomena* (NY: Academic Press, 1996).
14. Lim H., Wise F.W. *Opt. Express*, **12**, 2231 (2004).
15. Isomaki A., Okhotnikov O.G. *Opt. Express*, **14**, 4368 (2006).
16. Bufetov I.A., Golant K.M., Firstov S.V., Kholodkov A.V., Shubin A.V., Dianov E.M. *Appl. Opt.*, **47**, 4940 (2008).
17. Агравал Г. *Нелинейная волоконная оптика* (М.: Мир, 1991).
18. Maker P.D., Terhune B.W., Savage S.M. *Phys. Rev. Lett.*, **12**, 507 (1964).
19. Шен И.П. *Принципы нелинейной оптики* (М.: Наука, 1989).
20. Haus H.A., Ippen E.P., Tamura K. *IEEE J. Quantum Electron.*, **30**, 200 (1994).
21. Okhotnikov O.G., Gomes L., Xiang N., Jouhti T., Grudinin A.B. *Opt. Lett.*, **28**, 1522 (2003).