

Генерация второй гармоники спектрально-уширенного в газонаполненном капилляре излучения фемтосекундного иттербиевого лазера

Н.В.Диденко, А.В.Конященко, П.В.Кострюков, Л.Л.Лосев, С.Ю.Теняков

С использованием уширения спектра излучения в капилляре, заполненном ксеноном, и генерации второй гармоники в кристалле KDP 300-фемтосекундный импульс излучения иттербиевого лазера с длиной волны 1030 нм и энергией 150 мкДж преобразован в импульс длительностью 15 фс с длиной волны 515 нм. Энергетическая эффективность преобразования составила 30%.

Ключевые слова: фемтосекундные импульсы, вторая гармоника, капилляр, компрессия импульсов.

1. Введение

Фемтосекундные лазеры с активными элементами, легированными ионами иттербия (иттербиевые лазеры), получили широкое распространение благодаря сочетанию высокой средней мощности и эффективности, реализуемой при диодной накачке [1, 2]. Однако в иттербиевых лазерных системах, построенных по схеме генератор–усилитель и работающих в диапазоне энергий 10^{-2} –1 мДж, получить импульсы излучения с длительностью менее 185 фс не удается [3, 4]. Для сокращения длительности импульса используется уширение его спектра при распространении импульса в газонаполненном капилляре и последующая временная компрессия [5]. Таким способом в нашей предыдущей работе [6] 290-фемтосекундный лазерный импульс был сжат до 27 фс при энергетической эффективности более 50%.

На основе ГВГ излучения иттербиевого лазера может быть создан мощный источник фемтосекундных световых импульсов видимого диапазона с центральной длиной волны 515 нм. Такие световые импульсы с длительностью 10–50 фс и энергией ~100 мкДж могут найти широкое применение (например, в качестве источника накачки плавно перестраиваемых по частоте параметрических генераторов фемтосекундного диапазона). Следовательно, задача создания эффективного генератора второй гармоники излучения фемтосекундного иттербиевого лазера с капиллярным компрессором представляется довольно актуальной. В такой системе возможны две схемы ГВГ. Первая: иттербиевый лазер – газонаполненный капилляр –

компрессор – кристалл удвоителя частоты. И вторая: иттербиевый лазер – газонаполненный капилляр – кристалл удвоителя частоты – компрессор.

Первая схема является стандартной и позволяет получать в режиме эффективного преобразования световые импульсы второй гармоники с длительностью, близкой к длительности импульса на основной частоте.

Вторая схема дает возможность получения в два раза более короткого импульса второй гармоники, чем первая. Это связано с уширением спектра фазово-модулированного импульса при ГВГ. Изначально фазовая модуляция импульса (частотный чирп) возникает при нелинейном распространении импульса в газонаполненном капилляре. Рассмотрим для примера спектрально-ограниченный импульс гауссовой формы длительностью τ , который подается на вход капилляра. Выберем условия, при которых длительность импульса вследствие дисперсии увеличивается незначительно, а уширение спектра $K = \Delta\nu_{\text{ch}}/\Delta\nu$ ($\Delta\nu_{\text{ch}}$ – ширина спектра чирпированного импульса на выходе капилляра и $\Delta\nu$ – ширина спектра исходного спектрально-ограниченного импульса) вызывается фазовой самомодуляцией. При этом амплитуда световой волны E_ω чирпированного импульса описывается выражением

$$E_\omega(t) = A_0 \exp\left\{-\left(\frac{t}{\tau}\right)^2 + i\left[\omega_0 t + a\left(\frac{t}{\tau}\right)^2\right]\right\},$$

где A_0 – пиковая амплитуда; ω_0 – центральная частота; a – частотный чирп. Связь частотного чирпа и уширения спектра для гауссова импульса определяется как $a = \sqrt{K^2 - 1}$ [7].

Поле второй гармоники после преобразования с высокой эффективностью, когда пиковые амплитуды полей второй гармоники и излучения на основной частоте близки, может быть представлено в виде [7]

$$E_{2\omega}(t) \approx A_0 \exp\left\{-\left(\frac{t}{\tau}\right)^2 + 2i\left[\omega_0 t + a\left(\frac{t}{\tau}\right)^2\right]\right\}.$$

Из приведенного выражения следует, что чирп импульса второй гармоники в два раза больше чирпа импульса на основной частоте. Принимая во внимание то, что шири-

Н.В.Диденко, П.В.Кострюков, С.Ю.Теняков. ООО «Авеста-Проект», Россия, Московская обл., 142190 Троицк, территория ФИАН, КРФ-2; e-mail: tenyakov@avesta.ru.

А.В.Конященко. Физический институт им. П.Н.Лебедева РАН, Россия, Москва, Ленинский просп., 53; ООО «Авеста-Проект», Россия, Московская обл., 142190 Троицк, территория ФИАН, КРФ-2; e-mail: fs@avesta.ru

Л.Л.Лосев. Физический институт им. П.Н.Лебедева РАН, Россия, Москва, Ленинский просп., 53; e-mail: losev@pluton.lpi.troitsk.ru

Поступила в редакцию 22 апреля 2011 г., после доработки – 18 июля 2011 г.

на спектра и частотный чирп для гауссова импульса связаны как $\Delta\nu \sim \sqrt{1+a^2}$ [7], а также учитывая связь частотного чирпа и уширения спектра, получим следующее отношение ширины спектров chirпированных импульсов второй гармоники $\Delta\nu_{2\omega}$ и основного излучения:

$$\frac{\Delta\nu_{2\omega}}{\Delta\nu_{ch}} = \sqrt{\frac{1+4a^2}{1+a^2}} = \sqrt{\frac{4K^2-3}{K^2}}.$$

Таким образом, спектр chirпированного импульса второй гармоники при эффективном преобразовании может быть уширен примерно вдвое при довольно незначительном уширении спектра исходного импульса основной частоты ($K \geq 2$), вызванном фазовой самомодуляцией в капилляре. Соответственно после временной компрессии длительность импульса второй гармоники будет в два раза меньше длительности сжатого импульса на основной частоте. Эффект уширения спектра и компрессии импульса второй гармоники при фазовой модуляции основного излучения был продемонстрирован нами экспериментально в [9], где фазовая модуляция обеспечивалась посредством пропускания импульса основного излучения через дисперсионный элемент. Компрессия импульса второй гармоники при нелинейном процессе фазовой самомодуляции импульса основной частоты до настоящего времени не исследовалась.

Целью настоящей работы было экспериментальное исследование описанных выше схем преобразования во вторую гармонику излучения фемтосекундного иттербиевого лазера.

2. Экспериментальная установка

Оптическая схема экспериментальной установки показана на рис.1. Фемтосекундный иттербиевый лазер ТЕТА-10 (Авеста-Проект) построен по схеме генератор – регенеративный усилитель. В качестве генератора использовался волоконный лазер. В усилителе активной средой являлся кристалл, легированный иттербием, накачка которого осуществлялась лазерными диодами. Chirпированные импульсы усиливались и затем сжимались. Длительность спектрально-ограниченного импульса после компрессии составляла 300 фс. Автокорреляционная функция выходного импульса показана на вставке рис.1. Частота следования импульсов равнялась 10 кГц, средняя мощность выходного излучения достигала 1.5 Вт, центральная длина волны излучения была равна 1030 нм.

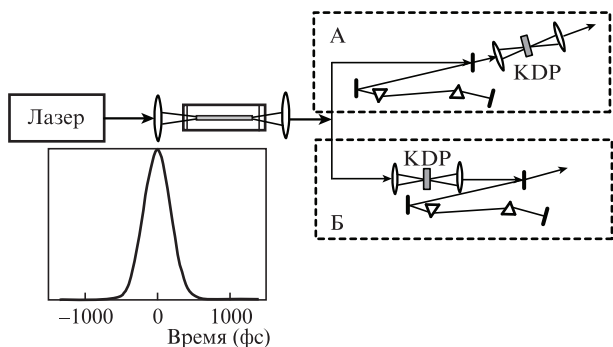


Рис.1. Оптическая схема экспериментальной установки с двумя схемами компрессии импульсов. На вставке – автокорреляционная функция интенсивности импульса излучения иттербиевого лазера, соответствующая импульсу длительностью 300 фс.

Расходимость светового пучка с гауссовым распределением интенсивности не превышала $1.05 M^2$.

Излучение иттербиевого лазера фокусировалось на вход стеклянного капилляра длиной 20 см с внутренним диаметром 140 мкм, помещенного в кювету из нержавеющей стали. Пропускание капилляра при оптимальной фокусировке составляло 60%. Кювета заполнялась сжатым ксеноном.

Вышедший из капилляра световой пучок коллимировался и направлялся в генератор второй гармоники и компрессор. Исследовались две оптические схемы (рис.1): схема А, в которой chirпированный в капилляре импульс вначале сжимался, а затем попадал на нелинейный кристалл для генерации второй гармоники, и схема Б, в которой осуществлялась компрессия импульса второй гармоники. Генерация второй гармоники по синхронизму I типа осуществлялась в кристалле KDP толщиной 2 мм. Спектральная полоса синхронизма для такого кристалла составляет $\sim 1500 \text{ см}^{-1}$ [10]. Кристалл KDP размещался в фокальной плоскости линзы, фокусирующей излучение основной частоты.

Сжатие chirпированных импульсов как на основной частоте (схема А), так и на частоте второй гармоники (схема Б) проводилось с использованием призматического компрессора, призмы которого были изготовлены из плавленого кварца. Расстояние между призмами составляло ~ 2 м при компрессии импульса с $\lambda = 1030$ нм и ~ 1 м для импульса с $\lambda = 515$ нм.

Длительность импульсов измерялась с помощью автокоррелятора ASF-20, спектр регистрировался спектрометром ASP-100M (оба – Авеста-Проект).

3. Экспериментальные результаты и их обсуждение

На рис.2,а показаны спектры излучения иттербиевого лазера на входе и на выходе капилляра. Спектр на выходе капилляра снят при давлении ксенона 4 атм. Он имеет резкую структуру, характерную для спектров, уширенных в процессе фазовой самомодуляции [5]. Измерения показали, что ширина спектра пропорциональна давлению газа. При давлении ксенона свыше 4 атм наблюдалось резкое падение пропускания капилляра и изменение профиля интенсивности выходного излучения, вызванное возбуждением в капилляре мод излучения высших порядков [11]. В режиме возбуждения основной моды капилляра EH_{11} максимальная достигнутая ширина спектра излучения на выходе капилляра превышала ширину спектра входного излучения примерно в десять раз.

На первом этапе исследовался процесс ГВГ сжатого импульса на основной частоте (схема А). На рис.2,б представлена автокорреляционная функция интенсивности сжатого импульса с центральной длиной волны 1030 нм (его спектр показан на рис.2,а). В предположении формы импульса sech^2 (считалось, что импульс имеет такую форму и во всех последующих измерениях с использованием автокоррелятора) длительность импульса составила 34 фс.

Излучение второй гармоники генерировалось при фокусировке излучения основной частоты в кристалл KDP, который размещался в области фокальной перетяжки. Варьирование интенсивности лазерного излучения в кристалле осуществлялось посредством изменения фокусного расстояния линзы. На рис.3,а и б показаны спектры и автокорреляционная функция импульса второй гармоники

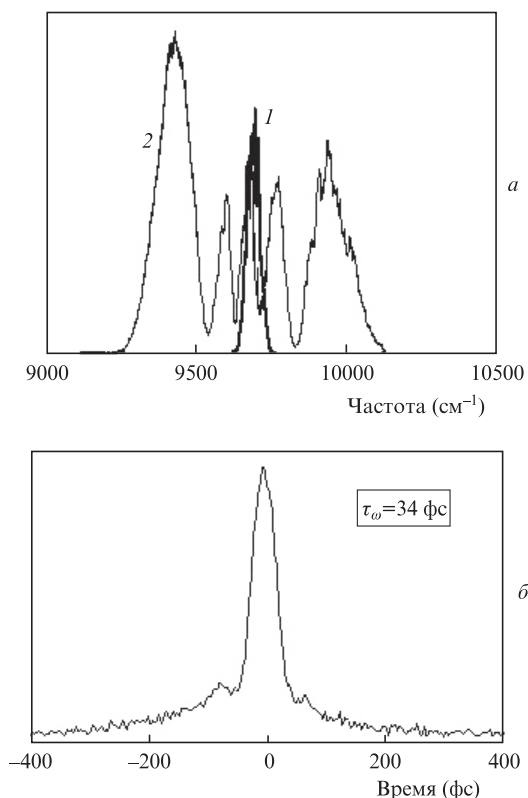


Рис.2. Спектры импульса на выходе иттербиевого лазера (1) и на выходе капилляра (2) (а), а также автокорреляционная функция интенсивности сжатого импульса с длиной волны 1030 нм (б). Давление ксенона в капилляре 4 атм.

ки при пиковой интенсивности основного излучения на поверхности кристалла $I_{\omega} \sim 0.3 \text{ ТВт/см}^2$. При длительности импульса основного излучения $\tau_{\omega} = 34 \text{ фс}$ длительность импульса второй гармоники уменьшилась до 31 фс (рис.3,б). Как видно из сравнения автокорреляционных функций импульсов основной частоты и второй гармони-

ки, в результате нелинейного преобразования удаляется низкоинтенсивная составляющая импульса с длительностью $\sim 100 \text{ фс}$, что повышает контраст импульса [12]. Соответственно спектр импульса излучения второй гармоники становится более однородным по сравнению со спектром импульса основного излучения. Ширины спектров излучения примерно совпадают. Эффективность преобразования во вторую гармонику в данном случае составляет 25%: энергия импульса основной частоты равна 40 мкДж, а импульса второй гармоники – 10 мкДж. При повышении интенсивности излучения на поверхности кристалла наблюдалось увеличение эффективности преобразования. Результаты измерений при пиковой интенсивности излучения основной частоты $\sim 1 \text{ ТВт/см}^2$ представлены на рис.3,в и г. Эффективность преобразование при такой интенсивности достигала 45%, однако при этом наблюдалось уширение спектра (рис.3,в) и увеличение длительности импульса второй гармоники с разбиением его на несколько субимпульсов (рис.3,г). По-видимому, данный эффект связан с временной формой компрессированного импульса на основной частоте – это короткий интенсивный пик на низкоинтенсивном пьедестале (рис.2,б). При эффективном преобразовании низкоинтенсивной части импульса интенсивность пиковой составляющей становится достаточной для возникновения конкурирующих нелинейных эффектов – фазовой самомодуляции и обратного преобразования второй гармоники в основное излучение. Увеличение длительности и искажение формы импульса второй гармоники в результате этих процессов могут существенно ограничить область применения генератора второй гармоники.

Результаты экспериментов по преобразованию chirпированного лазерного импульса во вторую гармонику по схеме Б представлены на рис.4. Снимались спектры и измерялись автокорреляционные функции сжатых импульсов излучения второй гармоники при различных давлениях ксенона в капилляре. Спектр импульса второй гармоники оказался примерно в два раза шире спектра

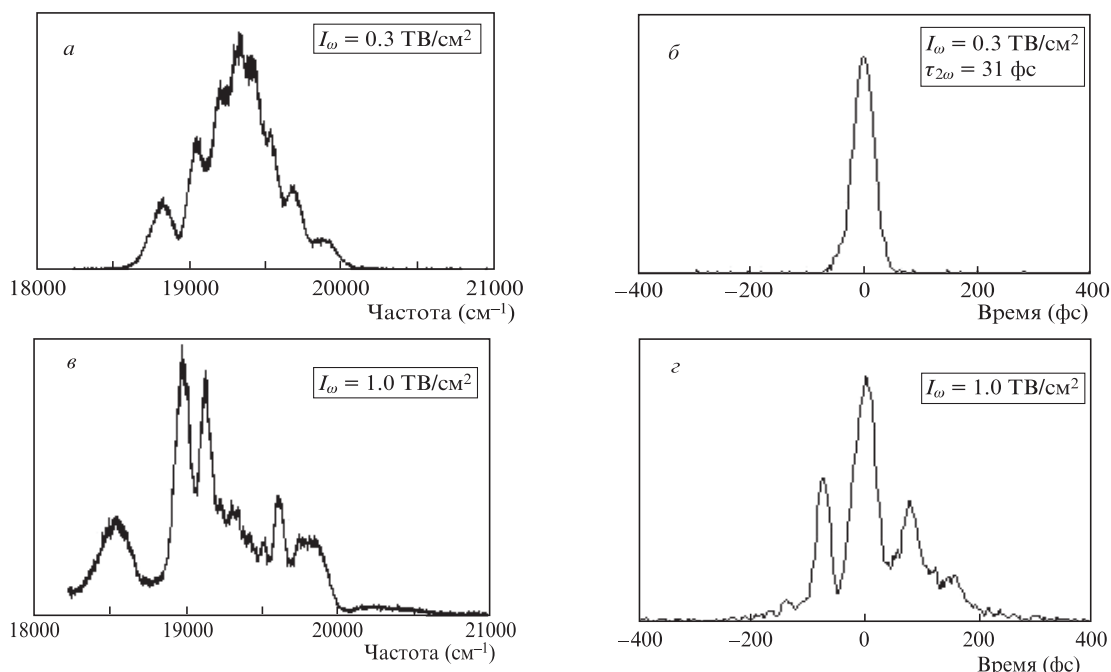


Рис.3. Спектры (а, в) и автокорреляционные функции интенсивности импульса второй гармоники (б, г) при интенсивности излучения импульса основной частоты на поверхности кристалла KDP 0.3 и 1 ТВт/см².

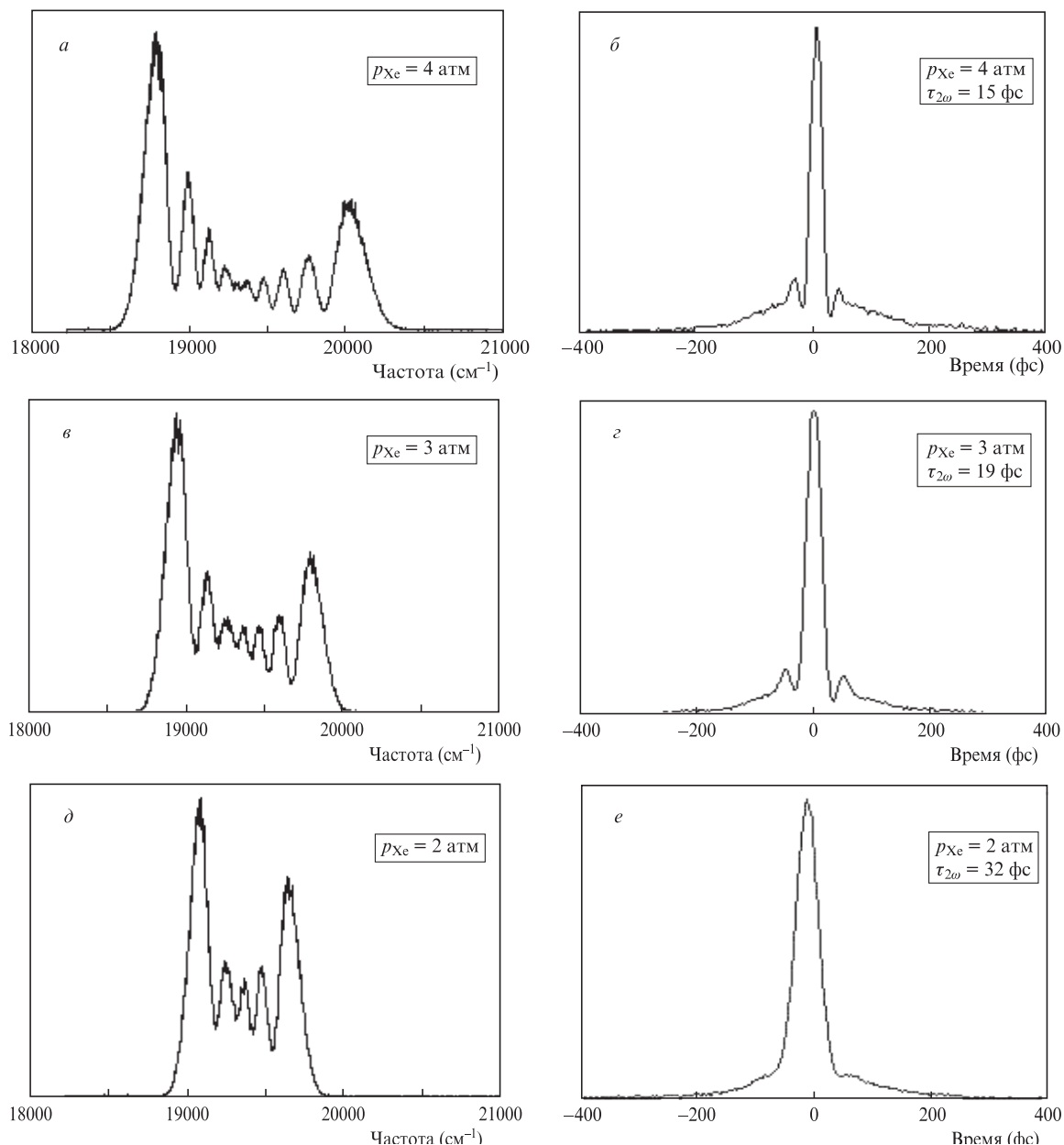


Рис.4. Спектры (*a, в, д*) и автокорреляционные функции интенсивности сжатого импульса второй гармоники (*б, з, е*) при давлении ксенона в капилляре 4, 3 и 2 атм.

импульса основной частоты (ср. спектры на рис.2,*a* и 4,*a*), причем ширины этих спектров были прямо пропорциональны давлению ксенона в капилляре. Формы спектров импульсов второй гармоники и основной частоты также достаточно хорошо согласуются. Все это подтверждает справедливость изложенного во Введении механизма уширения спектра второй гармоники.

Минимальная длительность импульса второй гармоники после компрессии составила 15 фс (рис.4,*б*). Наблюдалась обратно пропорциональная зависимость длительности импульса от давления ксенона в капилляре.

Эффективность преобразования во вторую гармонику в этой схеме не зависела от ширины спектра chirпированного импульса основного излучения (давления ксенона в капилляре) и равнялась ~50%. Интенсивность излучения I_{ω} на поверхности кристалла KDP составляла ~0.6 ТВт/см² и, в отличие от схемы А, при такой интенсивности не наблюдалось искажения формы сжатого импульса

и спектра второй гармоники. Это связано с тем, что временная форма импульса на основной частоте, близкая к форме импульса на входе в капилляр и имеющая длительность ~300 фс, не содержит выбросов интенсивности.

Отметим также, что использование просветленной оптики позволяет довести энергетическую эффективность преобразования во вторую гармонику в схеме с газонаполненным капилляром до 30% от выходной энергии иттербиевого лазера. Ограничение эффективности преобразования обусловлено потерями при распространении излучения в капилляре (пропускание капилляра ~60%) и собственно эффективностью ГВГ в кристалле (~50%). Поскольку длительность импульса второй гармоники может быть примерно в 20 раз меньше длительности импульса на основной частоте, то можно достичь шестикратного увеличения пиковой мощности импульса второй гармоники по сравнению с выходной пиковой мощностью импульса излучения иттербиевого лазера.

4. Заключение

Исследованы две схемы генерации второй гармоники спектрально-уширенного в газонаполненном капилляре импульса излучения иттербиевого лазера с длительностью 300 фс и длиной волны 1030 нм.

Показано, что предварительное сжатие импульса на основной частоте до ~30 фс позволяет получить контрастные импульсы второй гармоники примерно той же длительности при эффективности преобразования 25% (первая схема).

Генерация второй гармоники спектрально-уширенного chirпированного импульса длительностью ~300 фс и последующая компрессия импульса второй гармоники позволяют двукратно увеличить степень сжатия и получить импульсы второй гармоники длительностью 15 фс при эффективности преобразования по энергии 50% (вторая схема).

1. Gapontsev V.P., Fomin V., Ount A., Samartsev I.E. *Proc. SPIE Int. Soc. Opt. Eng.*, **3613**, 49 (1999).
2. Jeong Y., Sahu J., Payme D., Nilson J. *Opt. Express*, **12**, 6088 (2004).
3. Buenting U., Sayinc H., Wandt D., Morgner U., Kracht D. *Opt. Express*, **17**, 8046 (2009).
4. Larionov M., Butze F., Nickel D., Giesen A. *Opt. Lett.*, **32**, 494 (2007).
5. Nisoli M., De Silvestri S., Svelto O. *Appl. Phys. Lett.*, **68**, 2793 (1996).
6. Конященко А.В., Лосев Л.Л., Теняков С.Ю. *Квантовая электроника*, **41** (7), 606 (2011).
7. Diels J.-C., Rudolph W. *Ultrashort Laser Pulse Phenomena* (New York: Acad. Press, 1996).
8. Цернике Ф., Мидвинтер Дж. *Прикладная нелинейная оптика* (М.: Мир, 1976).
9. Didenko N.V., Konyashchenko A.V., Losev L.L., Pazyuk V.S., Tenyakov S.Yu. *Opt. Commun.*, **282**, 997 (2009).
10. Гурзаян Г.Г., Дмитриев В.Г., Никогосян Д.Н. *Нелинейно-оптические кристаллы* (М.: Радио и связь, 1990).
11. Xia J., Altucci C., Amoroso S., Bruzzese R., Velotta R., Wang X. *Opt. Express*, **16**, 3527 (2008).
12. Price D.F., More R.M., Walling R.S., Guethlein G., Shepherd R.L., Stewart R.E., White W.E. *Phys. Rev. Lett.*, **75**, 252 (1995).