

Фемтосекундный комбинационный лазер с частотой следования импульсов 1 кГц

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

Проведено экспериментальное исследование фемтосекундного комбинационного лазера на сжатом водороде с накачкой излучением лазера на сапфире с титаном, работающего с частотой следования импульсов 1 кГц. В режиме двухимпульсной накачки определены условия, соответствующие минимальной дисперсии энергии стоксовых импульсов. Реализована оптическая схема, позволяющая достичь долговременной стабильности средней мощности первой стоксовой компоненты с относительной вариацией менее 2%. Получены импульсы стоксова излучения с длительностью 60 фс и энергией 0.26 мДж при эффективности преобразования 14%.

Ключевые слова: вынужденное комбинационное рассеяние, фемтосекундный лазер, частота следования импульсов, стабильность мощности.

1. Введение

Преобразование излучения фемтосекундных лазеров по частоте на основе процесса вынужденного комбинационного рассеяния (ВКР) является альтернативой использованию параметрических преобразователей на кристаллах. В [1, 2] была разработана методика генерации фемтосекундных импульсов при ВКР на основе процесса синхронизации комбинационных компонент при бигармонической накачке. В таких схемах генерируется последовательность фемтосекундных импульсов с низкой энергией, следующих с интервалом ~ 10 фс, который определяется стоксовым сдвигом в активной среде. Для получения мощных одиночных импульсов стоксова излучения была предложена схема ВКР-преобразования фемтосекундных импульсов излучения, заключающаяся в первоначальном увеличении длительности импульса чирпированием по частоте, а также в ВКР-преобразовании чирпированного импульса и последующей его компрессии [3]. Данная методика позволяет подавить конкурирующие нелинейные эффекты [4], такие как самофокусировка и фазовая самомодуляция. В дальнейшем эта методика была усовершенствована введением двухимпульсной накачки, что позволяет избежать сужения спектра стоксова излучения по сравнению со спектром импульса исходного лазерного излучения и, соответственно, после компрессии получить стоксов импульс с длительностью, близкой к длительности лазерного импульса [5].

В схеме преобразования чирпированных импульсов были исследованы фемтосекундные комбинационные ла-

зеры на сжатых газах [6, 7] и кристаллах [4, 8, 9]. Длительность наиболее короткого импульса первой стоксовой компоненты составила 40 фс при ВКР в сжатом водороде излучения лазера на сапфире с титаном [7]. Максимальная энергия импульса первой стоксовой компоненты (3 мДж) с длительностью 115 фс была достигнута при ВКР в кристалле нитрата бария [9] и частоте следования импульсов 10 Гц.

В экспериментальных исследованиях и в ряде прикладных задач комбинационные лазеры могут служить преобразователями частоты излучения широко используемых фемтосекундных лазерных систем. В частности, комбинационный лазер на сжатом водороде позволяет сдвинуть по частоте излучение лазера на сапфире с титаном в область длин волн 1.2 мкм, в которой эффективно осуществляется генерация терагерцевого излучения в органических кристаллах [10]. При ВКР в водороде излучения фемтосекундного лазера на хром-форстерите возникает возможность продвижения в область среднего ИК диапазона (~ 2.5 мкм), перспективную с точки зрения генерации аттосекундных световых импульсов [11]. При этом к ВКР-преобразователям предъявляются достаточно жесткие требования. Наряду с высокой эффективностью преобразования, они должны обеспечивать стабильный режим работы при средней мощности выходного излучения ~ 1 Вт, пиковой мощности 1–10 ГВт и частоте следования импульсов ~ 1 кГц. В настоящее время максимальная средняя мощность выходного излучения фемтосекундного комбинационного лазера достигнута в [9] и составляет ~ 30 мВт. При этом экспериментальные данные о стабильности работы фемтосекундных комбинационных лазеров отсутствуют.

В нашей работе представлены результаты экспериментального исследования фемтосекундного комбинационного лазера на сжатом водороде с частотой следования импульсов 1 кГц. Цель исследований – выбор оптической схемы и оптимальных параметров ВКР-преобразователя, необходимых для достижения максимальной стабильности работы при высокой средней мощности.

Н.В.Диденко, А.В.Конященко, П.В.Кострюков, Л.Л.Лосев, В.С.Пазюк. Физический институт им. П.Н.Лебедева РАН, Россия, 119991 Москва, Ленинский просп., 53; e-mail: dk_nick@mail.ru, llosev@mail.ru, fs@avesta.ru

С.Ю.Теняков. ООО «Авеста-Проект», Россия, 142190 Москва, Троицк, ул. Физическая, 11; e-mail: tenyakov@avesta.ru

Поступила в редакцию 24 декабря 2015 г., после доработки – 31 мая 2016 г.

2. Экспериментальная установка

Оптическая схема экспериментальной установки показана на рис.1. Фемтосекундная лазерная система на сапфире с титаном (REUS-40F1K), включающая в себя задающий генератор и регенеративный усилитель, работала в режиме усиления chirпированного импульса с его последующим временным сжатием в решеточном компрессоре. Длительность импульса после компрессии составляла 35 фс, ширина спектра – 27 нм, центральная длина волны – 795 нм, энергия импульса – 2 мДж, диаметр светового пучка с гауссовым распределением интенсивности по уровню e^{-2} был равен 8 мм. Частота следования импульсов могла варьироваться от 100 до 1000 Гц. Поскольку для накачки комбинационного лазера требуются chirпированные импульсы пикосекундной длительности, была предусмотрена возможность плавного изменения длительности импульса выходного излучения путем изменения параметров решеточного компрессора. С этой целью решетка компрессора устанавливалась на столик, перемещаемый с помощью шагового двигателя. Перемещение решетки на 0–1.5 см позволяло плавно менять длительность импульса от 35 фс до 5 пс.

В наших предыдущих работах [5–8] для формирования двух последовательных импульсов с ортогональными линейными поляризациями, требуемых для накачки фемтосекундного комбинационного лазера, использовались оптические системы, включающие в себя пленочные поляризаторы и зеркала. Так как накачка комбинационного лазера осуществляется сфокусированными световыми пучками с расходимостью $\sim 10^{-4}$ рад, то для обеспечения пространственного перекрытия световых пучков с ортогональными поляризациями в области фокальной перетяжки параллельность оптических осей пучков должна составлять $\sim 10^{-5}$. При такой высокой точности небольшие изменения внешних условий (колебания температуры, механические возмущения и т.д.) могут приводить к заметным вариациям выходных параметров фемтосекундного комбинационного лазера и снижать его временную стабильность его работы.

С целью повышения стабильности нами была выбрана схема формирования двух ортогонально поляризованных импульсов на основе двулучепреломляющих кристаллов. Для увеличения временного интервала между импульсами перед кюветой с газообразным водородом были установлены два идентичных кристалла кальцита толщиной 1 см с просветленными гранями. Главные оптические оси кристаллов были параллельны и лежали в плоскостях, параллельных входным граням. Данные кристаллы позволяли получать два ортогонально поляризованных импульса с задержкой между ними около 10 пс. Соотношение энергий импульсов менялось вращением полуволновой фазовой пластины, установленной перед кристаллами.

Лазерное излучение фокусировалось зеркалом с фокусным расстоянием 2.5 м в кювету из нержавеющей стали, заполненную сжатым водородом. Длина кюветы составляла 1.2 м, внутренний диаметр был равен 1 см.

На выходе из кюветы импульсы с ортогональными поляризациями разделялись с помощью поляризационной призмы Рошона. В дальнейшем световой пучок коллимировался линзой, отражался от дихроичных зеркал, для того чтобы выделить излучение первой стоксовой компоненты, и направлялся во временной компрессор.

Для повышения энергетической эффективности компрессора была выбрана схема на основе компрессии отрицательно chirпированного импульса при его распространении в среде с нормальной дисперсией. Дисперсионной средой в нашем случае служили блоки стекла ТФ-5. Использовалась двухпроходная схема с общей длиной среды 69 см. В таком компрессоре с просветленными торцами оптических блоков возможно достижение высокой эффективности компрессии. Незначительные потери определяются рассеянием и поглощением в оптическом стекле, а также неидеальностью просветляющего покрытия.

Измерение длительности компрессированного импульса осуществлялось модернизированной под излучение с длиной волны 1.25 мкм системой SPIDER (SP-120) на основе интерферометрического метода измерения напряженности электрического поля. Статистические ха-

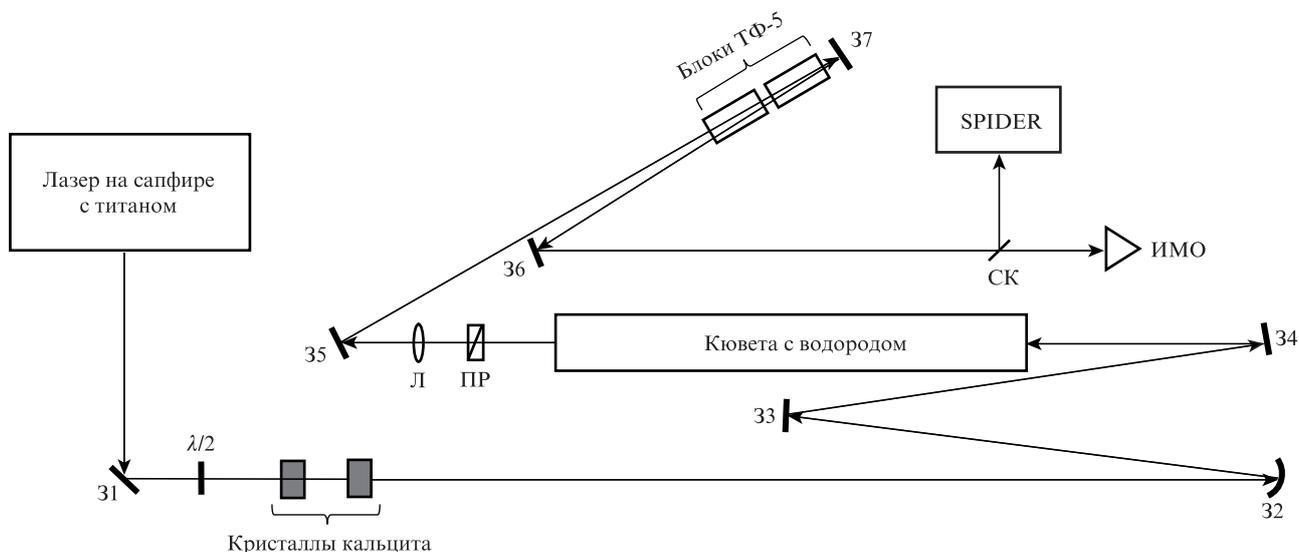


Рис.1. Оптическая схема экспериментальной установки:

31, 33, 34 – плоские зеркала (коэффициент отражения 100% на $\lambda = 800$ нм); 32 – зеркало с радиусом кривизны 5 м (100% на $\lambda = 800$ нм); 35 – 37 – дихроичные зеркала (100% на $\lambda = 1200$ нм и 20% на 800 нм); СК – стеклянный клин; $\lambda/2$ – полуволновая фазовая пластина; Л – линза с фокусом 1 м; ПП – поляризационная призма Рошона; ИМО – измеритель мощности.

характеристики выходного излучения комбинационного лазера определялись измерителем мощности (Ophir Vega) с пироэлектрическим приемником.

3. Обсуждение экспериментальных результатов

Эксперименты проводились при длительности отрицательно chirпированного импульса на выходе лазерной системы, равной 5 пс. Для этого в выходном компрессоре лазера сдвигом решетки на 13 мм относительно положения, соответствующего максимальной компрессии импульса на выходе регенеративного усилителя, была введена дополнительная отрицательная дисперсия – 63000 фс². Выбор длительности импульса (5 пс) был обусловлен необходимостью максимального снижения мощности лазерного импульса для исключения нежелательных нелинейных эффектов (самофокусировка, фазовая самомодуляция), подавляющих процесс ВКР, и для одновременного обеспечения полного разделения во времени импульсов с ортогональными поляризациями при задержке между ними в 10 пс.

Исходя из известного нелинейного показателя преломления для водорода [12], критическая мощность самофокусировки P_c [ГВт] = $12/p$ [атм], где p – давление водорода. Так как максимальная мощность накачки в эксперименте не превышала 0.4 ГВт (вся энергия была сосредоточена в одном импульсе с энергией 2 мДж и длительностью 5 пс), то при давлениях водорода менее 30 атм самофокусировка на процессе ВКР не сказывалась.

В режиме нестационарного ВКР для достижения высокого пространственного качества светового пучка первой стоксовой компоненты (для воспроизведения волнового фронта накачки) энергия импульса накачки не должна превышать пороговую энергию более чем в 1.5 раза [13]. Проведенные измерения зависимости энергии первой стоксовой компоненты от давления водорода позволили определить давление водорода, соответствующее порогу ВКР. При энергии импульса накачки 1.9 мДж и его длительности 5 пс пороговое давление водорода составило 12 атм. Поскольку при нестационарном ВКР в водороде с давлением выше 10 атм пороговая энергия ВКР обратно пропорциональна давлению водорода [14], то при его давлении 18 атм энергия импульса 1.9 мДж будет превышать пороговую энергию в 1.5 раза. Действительно, при таком давлении водорода стоксов световой пучок имел гладкое распределение интенсивности по своему поперечному сечению. При увеличении давления до 25 атм в распределении интенсивности возникла мелко-масштабная модуляция, а эффективность преобразования в первую стоксовую компоненту не менялась.

На рис.2 представлена зависимость энергии задержанного импульса первой стоксовой компоненты от энергии задержанного импульса накачки. Видно, что в диапазоне 600 – 1800 мкДж энергия стоксова импульса практически не меняется и составляет ~250 мкДж, что соответствует эффективности преобразования 14%. В этом диапазоне энергия первого импульса накачки не превышает 1200 мкДж, что ниже порогового значения, и вся энергия стоксова излучения сосредоточивается в задержанном импульсе. При энергии задержанного импульса менее 600 мкДж (энергия первого импульса 1200 мкДж) стоксова компонента возникает и в первом импульсе накачки. Отметим, что суммарная энергия первой стоксо-

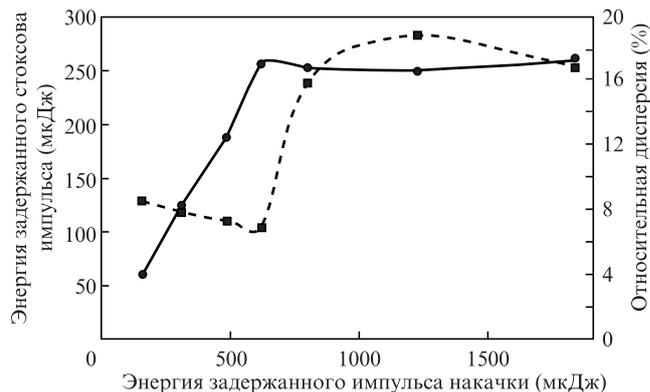


Рис.2. Зависимости энергии задержанного стоксова импульса (сплошная кривая) и ее относительной дисперсии (штриховая кривая) от энергии задержанного импульса накачки.

вой компоненты не зависит от соотношения энергий первого и задержанного импульсов накачки, т. к. при нестационарном режиме ВКР процесс генерации определяется не мощностью излучения накачки – формой импульса, а энергией, введенной в активную среду.

На рис.2 показана также зависимость относительной дисперсии (отношения дисперсии к среднему значению) энергии стоксовых импульсов от энергии задержанного импульса накачки. Дисперсия измерялась по 10^4 импульсам. В диапазоне энергий, в котором стоксов импульс возникает только в задержанном импульсе накачки, относительная дисперсия составляет 16%–18%. Относительная дисперсия энергий импульсов лазерного излучения равна 0.5%. При переходе к режиму, в котором стоксов импульс появлялся и в первом импульсе, относительная дисперсия уменьшалась до 7%–8%. Такое поведение относительной дисперсии может быть связано с тем, что если интенсивная стоксова волна развивается в первом импульсе и задержанный импульс накачки рассеивается уже на сформированной фоновой волне, то для задержанного импульса исключаются процессы, связанные с квантовыми флуктуациями начального этапа комбинационного рассеяния [15, 16]. Тем не менее относительная дисперсия энергии импульсов первой стоксовой компоненты значительно превышает дисперсию для импульсов накачки.

По-нашему мнению, основной вклад в нестабильность энергий импульсов первой стоксовой компоненты может вносить генерация стоксова излучения второго порядка с длиной волны 2.5 мкм. Измеренная ранее эффективность этого процесса, ограничивающего эффективность преобразования в первую стоксовую компоненту, достигала 5% при превышении порога генерации стоксова излучения первого порядка в 1.5 – 2 раза [17].

Эффективность преобразования по энергии задержанного импульса накачки в стоксово излучение достигает 42% в области энергий менее 600 мкДж (рис.2). При превышении этого значения возникает генерация стоксовой компоненты от первого импульса накачки. Соответственно квантовая эффективность приближается к 63%. В случае же моноимпульсного возбуждения активной среды энергетическая эффективность преобразования составляет только 14%. Как следствие, спектр стоксова импульса при двухимпульсной накачке становится более широким (рис.3). Как видно из рисунка, при моноимпульсной накачке отрицательно chirпированным импульсом отрезаются высокочастотные спектральные компо-

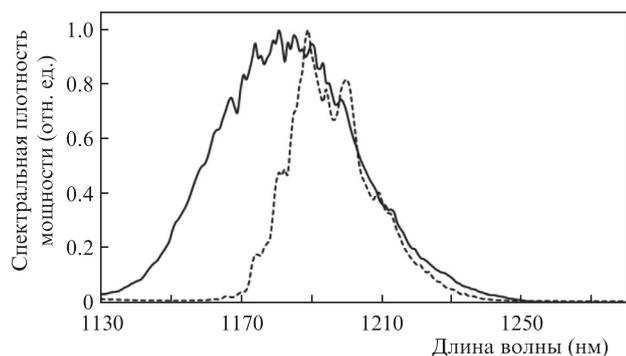


Рис.3. Спектр импульса стоксова излучения при моноимпульсной накачке (штриховая кривая) и спектр задержанного импульса накачки при двухимпульсной накачке (сплошная кривая).

ненты, находящиеся на переднем фронте импульса лазерного излучения. При накачке двумя импульсами спектр стоксовой компоненты от задержанного импульса накачки становится симметричным; его ширина достигает 44 нм (по уровню половины интенсивности), что соответствует спектрально ограниченному импульсу длительностью 48 фс.

Временная компрессия стоксова импульса с отрицательным частотным чирпом была осуществлена пропусканием излучения через блоки стекла ТФ-5. Использовалась двухпроходная схема. Общая длина пути в стекле равнялась 69 см. Дисперсия второго порядка стеклянных блоков составляла $+62000 \text{ фс}^2$, что позволяло компенсировать отрицательную дисперсию, вносимую при расстройке решеточного компрессора на выходе лазера. Для точного согласования дисперсионных характеристик импульса и стеклянного компрессора использовался сдвиг решетки компрессора лазера. На рис.4 показана форма импульса, измеренная системой SPIDER. Минимальная длительность импульса после компрессии составила 60 фс при длительности спектрально ограниченного импульса с аналогичным спектром 48 фс. Неполная компрессия и возникновение постимпульсов вызваны, в основном, нескомпенсированной дисперсией третьего порядка. Это подтверждает зависимость фазы импульса от времени (рис.4). Для компенсации дисперсии третьего и более высоких порядков может использоваться акустооптическая дисперсионная линия задержки [7].

В ряде приложений нелинейных преобразователей лазерного излучения требуется не только малая дисперсия энергии импульсов, но и стабильность их средней энергии – средней мощности излучения при работе в импульсно-периодическом режиме. Такая необходимость возникает при проведении экспериментов, связанных с большим количеством лазерных импульсов (режим сканирования или накопления, лазерная микрообработка материалов и т.д.). При высокой стабильности средней мощности лазерного источника дрейф мощности нелинейного преобразователя излучения чаще всего вызывается изменением внешних условий, таких как температура, воздушные потоки, механические колебания. В результате, например, может возникнуть отстройка от фазового синхронизма в параметрических генераторах и генераторах гармоник, а также потеря энергии при вводе излучения в волокна и полые световоды.

Для повышения долговременной стабильности обычно используются достаточно сложные электронно-механические системы с обратной связью [18, 19]. Как уже от-

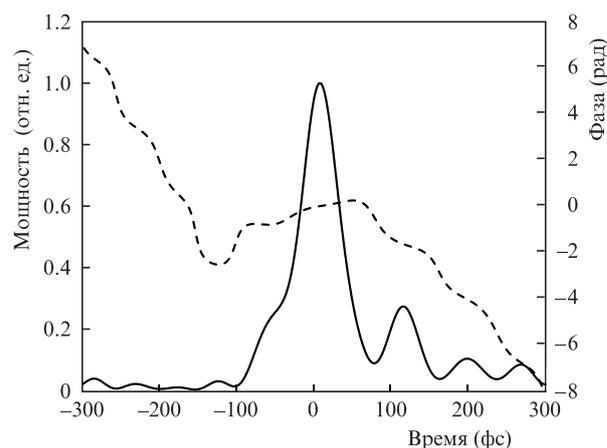


Рис.4. Форма импульса стоксова излучения (сплошная кривая) и фаза (штриховая кривая) после компрессии.

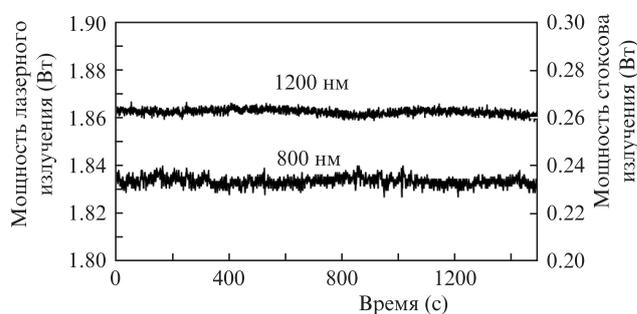


Рис.5. Зависимости средней мощности излучения лазера на сапфире с титаном (нижняя кривая) и мощности стоксова излучения (верхняя кривая) от времени.

мечалось, в настоящей работе ставилась цель минимизации влияния внешних условий на работу фемтосекундного комбинационного лазера с двухимпульсной накачкой. Наиболее важным было устранение флуктуации угла между оптическими осями световых пучков с ортогональными поляризациями. С этой целью оптическая система деления исходного лазерного пучка на пучки с ортогональными поляризациями, состоящая из поляризаторов и зеркал [5–8], была заменена двулучепреломляющими кристаллами. Зависимости средней мощности излучения лазера на сапфире с титаном и первой стоксовой компоненты от времени показаны на рис.5. В процессе измерения проводилось усреднение мощности по 65 импульсам. Видно, что изменение средней мощности лазера во всем диапазоне измерений (размах вариации) составило $\sim 10 \text{ мВт}$ при средней мощности $\sim 1.9 \text{ Вт}$. Соответственно относительное изменение средней мощности было равно $\sim 0.5\%$. Для комбинационного лазера это изменение оказалось больше, но не превысило 2% (5 мВт при средней мощности 260 мВт). По сравнению с ранее исследованными нами [5–8] фемтосекундными комбинационными лазерами, относительное изменение средней мощности было снижено более чем на порядок.

4. Заключение

Таким образом, в результате проведенных исследований фемтосекундного комбинационного лазера на сжатом водороде, работающего с частотой следования импульсов 1 кГц, был найден режим, в котором минимальная относительная дисперсия энергии импульсов первой

стоксовой компоненты составляет 7%. Получены импульсы стоксова излучения с длительностью 60 фс и энергией 0.26 мДж при эффективности преобразования по энергии 14%. Средняя мощность выходного излучения составила 0.26 Вт.

Использование схемы двухимпульсного возбуждения активной среды на основе деления исходного лазерного светового пучка на два пучка с ортогональными поляризациями с помощью двулучепреломляющих кристаллов, в которой автоматически обеспечивается совмещение световых пучков, позволило снизить влияние внешних факторов на стабильность работы преобразователя и достичь относительного изменения средней мощности первой стоксовой компоненты $\sim 2\%$.

Отметим также, что при снижении частоты следования импульсов до 100 Гц и сохранении прочих параметров эффективность преобразования увеличивалась до 20%, что свидетельствует о влиянии нагрева газа на ВКР-генерацию. Это обстоятельство открывает возможности увеличения эффективности преобразования и сокращения длительности импульса стоксова излучения при работе с частотой следования 1 кГц за счет использования схем со сменой газа в области преобразования.

1. Zaitsu S., Kida Y., Imasaka T. *Phys. Rev. A*, **70**, 031801 (2004).
2. Sali E., Mendham K., Tisch J., Halfman T., Marangos J.P. *Opt. Lett.*, **29**, 495 (2004).
3. Zhavoronkov N., Noack F., Petrov V., Kalosha V.P., Herrmann J. *Opt. Lett.*, **26**, 47 (2001).
4. Bepalov V.G., Efimov Y.N., Staselko D.I., Krylov V.N., Ollikainen O., Wild U.P., Rebane A. *Proc. SPIE Int. Soc. Opt. Eng.*, **4069**, 154 (2000).
5. Konyashchenko A.V., Losev L.L., Tenyakov S.Yu. *Opt. Express*, **15**, 11855 (2007).
6. Konyashchenko A.V., Losev L.L., Pazyuk V.S., Tenyakov S.Yu. *Appl. Phys. B*, **93**, 455 (2008).
7. Диденко Н.В., Колященко А.В., Кострюков П.В., Лосев Л.Л., Пазюк В.С., Теняков С.Ю., Молчанов С.Я., Чижигов С.И., Юшков К.Б. *Квантовая электроника*, **45**, 1101 (2015).
8. Колященко А.В., Лосев Л.Л., Теняков С.Ю. *Квантовая электроника*, **40**, 700 (2010).
9. Grigsby F.B., Peng Dong, Downer M.C. *J. Opt. Soc. Am. B*, **25**, 346 (2008).
10. Vicario C., Jazbinsek M., Ovchinnikov A.V., Chefonov O.V., Ashitkov S.I., Agranat M.B., Hauri C.P. *Opt. Express*, **23**, 4573 (2015).
11. Chen M.-C., Arpin P., Popmintchev T., Gerrity M., Zhang B., Seaberg M., Popmintchev D., Murnane M.M., Kapteyn H.C. *Phys. Rev. Lett.*, **105**, 173901 (2010).
12. Lehmeier H.J., Leupacher W., Penzkofer A. *Opt. Commun.*, **56**, 67 (1985).
13. Зельдович Б.Я., Пилипецкий Н.Ф., Шкунов В.В. *Обращение волнового фронта* (М.: Наука, 1985).
14. Шен И.Р. *Принципы нелинейной оптики* (М.: Наука, 1989).
15. Raumer M.G., Mostowski Y. *Phys. Rev. A*, **24**, 1980 (1981).
16. Апанасевич П.А., Гахович Д.Е., Грабчиков А.С., Килин С.Я., Козич В.П., Концевой Б.Л., Орлович В.А. *Квантовая электроника*, **19**, 884 (1992).
17. Колященко А.В., Лосев Л.Л., Теняков С.Ю. *Квантовая электроника*, **41**, 459 (2011).
18. Seres J., Muller A., Seres J., O Keeffe K., Lenner M., Herzog R.F., Kaplan D., Spielmann C., Krausz F. *Opt. Lett.*, **28**, 1832 (2003).
19. Ricci A., Jullien A., Rousseau J., Lopez-Martens R. *Appl. Sci.*, **3**, 314 (2013).