

Водородный комбинационный лазер с длительностью импульса генерации 40 фс

Н.В.Диденко, А.В.Конященко, П.В.Кострюков, Л.Л.Лосев, В.С.Пазюк,
С.Ю.Теняков, В.Я.Молчанов, С.И.Чижиков, К.Б.Юшков

С использованием схемы накачки водородного ВКР-преобразователя двумя последовательными chirпированными с линейными ортогональными поляризациями импульсами излучения лазера на сапфире с титаном и применением программируемой акустооптической дисперсионной линии задержки получены импульсы первой стоковой компоненты с длиной волны 1.2 мкм и длительностью 40 фс. Эффективность преобразования по энергии составила 22%.

Ключевые слова: фемтосекундные лазерные системы, дисперсионная линия задержки, акустическая дифракция, вынужденное комбинационное рассеяние.

1. Введение

Нелинейное преобразование фемтосекундных лазерных импульсов с целью уменьшения частоты исходного лазерного излучения широко используется в последние годы при проведении исследований по получению генерации аттосекундных импульсов [1] и мощного терагерцевого излучения [2]. Эффективность этих процессов возрастает при увеличении длины волны лазерного излучения. В обоих случаях основная физическая причина повышения эффективности заключается в увеличении энергии электрона, осциллирующего в поле световой волны, при уменьшении частоты лазерного излучения.

Наиболее часто в качестве нелинейных преобразователей используются параметрические генераторы на кристаллах [3]. При этом кристалл должен обеспечить большое усиление в требуемом спектральном диапазоне и достаточно широкую полосу фазового синхронизма для импульсов фемтосекундной длительности.

Альтернативным методом является преобразование на основе процесса вынужденного комбинационного рассеяния (ВКР). В этом случае при использовании активных газовых сред полоса фазового синхронизма существенно шире полосы синхронизма параметрических преобразователей на кристаллах. Также комбинационные преобразователи могут быть применены для лазерных импульсов с большей энергией. Для исключения конкурирующих нелинейных эффектов, таких как фазовая самомодуляция и самофокусировка, подавляющих процесс ВКР, была предложена схема преобразования с использованием chirпированных лазерных импульсов с длительностью до

сотни пикосекунд [4]. Такие импульсы обычно выводят из фемтосекундной лазерной системы, построенной по принципу усиления chirпированных импульсов, сразу после усилителя, до входа в решеточный компрессор. После преобразования chirпированный стоковый импульс сжимается во времени с помощью решеточного либо призматического компрессора. В дальнейшем эта схема преобразования была нами модернизирована для устранения эффекта сужения спектра chirпированного стокового импульса по сравнению со спектром импульса лазерного излучения [5]. По этой схеме было осуществлено комбинационное преобразование в сжатых газах [6] и кристаллах [7] и получены стоковые импульсы с шириной спектра, близкой к ширине спектра исходного лазерного импульса.

Для достижения максимальной степени компрессии и получения минимальной длительности компрессированного стокова импульса (близкого к спектрально-ограниченному) требуется обеспечить компенсацию дисперсии в решеточном компрессоре вплоть до дисперсии четвертого порядка. Поскольку в стретчере, установленном на входе в усилитель фемтосекундной лазерной системы, и в компрессоре на выходе комбинационного преобразователя световые импульсы существенно различаются по длине волны, то компенсировать дисперсии высших порядков простым подбором решеток компрессора достаточно сложно. В частности, это требует изготовления нестандартных решеток с заданным числом штрихов. Другим возможным путем решения данной задачи является использование акустооптической дисперсионной линии задержки (АОДЛЗ) для внесения дополнительной программируемой дисперсии на входе в лазерный усилитель. В принципе, это может позволить точно согласовать дисперсионные характеристики лазерного усилителя и комбинационного преобразователя с дисперсионной характеристикой решеточного компрессора, установленного на выходе системы.

Целью настоящей работы было исследование возможности получения максимально коротких стоковых импульсов при комбинационном преобразовании излучения фемтосекундной лазерной системы на сапфире с титаном с использованием программируемой АОДЛЗ.

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: lllosev@mail.ru
С.Ю.Теняков. ООО «Авеста-Проект», Россия, 142190 Москва, Троицк, ул. Физическая, 11; e-mail: tenyakov@avesta.ru
В.Я.Молчанов, С.И.Чижиков, К.Б.Юшков. Национальный исследовательский технологический университет «МИСиС», Россия, 119049 Москва, Ленинский просп., 4; e-mail: aocenter@mail.ru

Поступила в редакцию 21 июля 2015 г.

2. Экспериментальная установка

2.1. Лазерная система на сапфире с титаном

Оптическая схема экспериментальной установки показана на рис.1. Лазерная система включает в себя задающий генератор (TiF-15F, Авеста) и регенеративный усилитель (REUS-40F20, Авеста). Между ними установлены решеточный стретчер и программируемая АОДЛЗ. Импульсы задающего генератора длительностью 30 фс с энергией 4 нДж растягиваются во времени до 100 пс в решеточном стретчере, проходят АОДЛЗ и инжектируются в резонатор регенеративного усилителя.

Частота следования импульсов регенеративного усилителя была равна 20 Гц. Энергия одиночного chirпированного импульса с длительностью примерно 100 пс на выходе регенеративного усилителя достигала 2.5 мДж. Ширина спектра излучения с центральной длиной волны 810 нм составляла около 30 нм (рис.2), что соответствует спектрально-ограниченному импульсу длительностью 35 фс с такой же формой спектра. Световой пучок диаметром 3 мм имел близкое к гауссову распределение интенсивности по поперечному сечению. Параметр качества светового пучка M^2 не превышал 1.1.

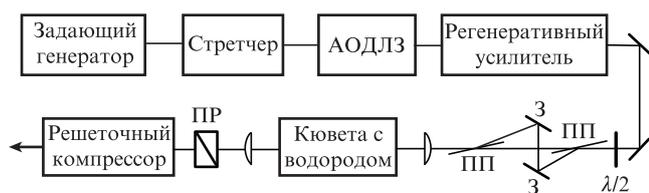


Рис.1. Оптическая схема экспериментальной установки: ПР – призма Рошона; ПП – пленочные поляризаторы; 3 – зеркала.

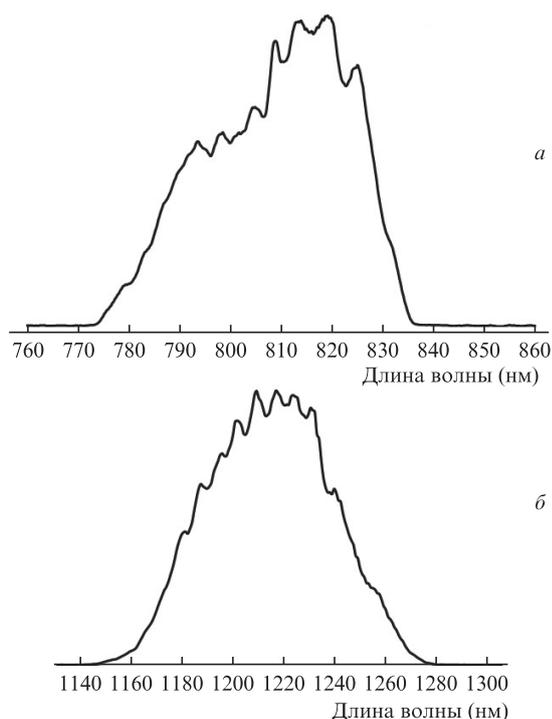


Рис.2. Спектры выходного излучения лазера на сапфире с титаном (а) и первой стоксовой компоненты (б).

2.2. Акустооптическая дисперсионная линия задержки

АОДЛЗ в оптическом тракте системы осуществляет формирование дополнительных дисперсий D_1, D_2, D_3 и D_4 необходимого порядка и знака. Для управления спектральной фазой используется квазиколлинеарная геометрия акустооптического взаимодействия в монокристалле парателлурита с углом наклона волнового вектора ультразвуковой волны 5° к оси $[110]$ кристалла [8, 9]. В установке применялась дисперсионная линия с рекордной величиной групповой задержки около 20 пс на длине волны 810 нм. Геометрия акустооптического взаимодействия была оптимизирована для минимизации спектральной плотности управляющего высокочастотного сигнала и увеличения эффективности дифракции ультракоротких лазерных импульсов в диапазоне длин волн 650–880 нм. Схема дисперсионной линии задержки показана на рис.3. Там же приведены направления поляризаций входного и дифрагировавшего излучений. Прибор сохраняет направление оптической оси системы для дифрагировавших спектральных компонент и осуществляет компенсацию угловой дисперсии брэгговского синхронизма.

Электронная система управления дисперсионной линией задержки состоит из цифрового генератора сигналов произвольной формы с частотой дискретизации 625 МГц и усилителя мощности. В области акустооптического взаимодействия возбуждаются ультразвуковые волновые пакеты, синхронизированные с системой инъекции лазерных импульсов в регенеративный усилитель. Эффективность дифракции на длине волны 810 нм в спектральном окне шириной 80 нм превышала 60% при пиковой управляющей мощности высокочастотного сигнала 4 Вт и оптической апертуре прибора 4×4 мм. Величины дисперсий, возникающих при квазиколлинеарной акустооптической дифракции фемтосекундного излучения на частотно-модулированном ультразвуке, определяются геометрией акустооптического взаимодействия и пропорциональны длине области взаимодействия. Данная АОДЛЗ имела экстремально протяженную (длиной 85 мм), по сравнению с ранее описанными приборами [9–13], область взаимодействия лазерного излучения с ультразвуком, что позволило значительно увеличить диапазоны вносимых линией задержки дисперсий третьего и четвертого порядков. При этом, однако, возрастает и абсолютная величина дисперсии второго порядка, создаваемой

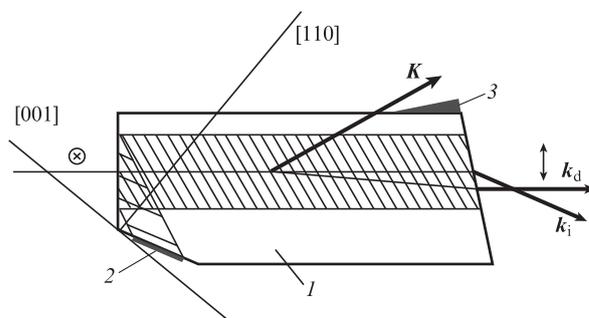


Рис.3. Схема дисперсионной линии задержки: 1 – монокристалл парателлурита; 2 – пьезопреобразователь; 3 – акустический поглотитель; k_i – волновой вектор пучка нулевого порядка дифракции; k_d – волновой вектор дифрагировавшей (задержанной/ускоренной) спектральной компоненты света; K – волновой вектор ультразвука; падающее и дифрагировавшее излучения линейно поляризованы, направления поляризаций указаны на рисунке.

АОДЛЗ. Величина вносимой АОДЛЗ дисперсии второго порядка D_2 , определяемая шириной спектрального окна, длительностью ультразвуковых волновых пакетов и коэффициентом пересчета оптических частот [10] в акустические, составляла 4×10^4 фс².

Следует также отметить, что установка АОДЛЗ в лазерную систему перед регенеративным усилителем не приводила к уменьшению энергии выходного импульса, несмотря на потери, вносимые АОДЛЗ. Это связано с тем, что регенеративный усилитель работал в области насыщения усиления входного сигнала.

2.3. Преобразователь на основе ВКР и решеточный компрессор

В комбинационном преобразователе (рис.1) использовалась схема с двухимпульсным возбуждением активной среды [5]. С помощью оптической системы, состоящей из полуволновой фазовой пластины $\lambda/2$, двух пленочных поляризаторов ПП и двух зеркал З, формировались два последовательных световых импульса с ортогональными линейными поляризациями. Временной интервал между chirпированными импульсами длительностью около 150 пс составлял 250 пс. Соотношение энергий импульсов варьировалось посредством вращения фазовой пластины. В результате ВКР первого импульса в активной среде возникала фоновая волна, на которой с высокой эффективностью происходило ВКР задержанного импульса. Стоксово излучение задержанного импульса с центральной длиной волны 1230 нм выделялось с помощью призмы Рошона ПР.

В качестве активной среды использовался сжатый до 45 атм водород. Длина кюветы комбинационного преобразователя составляла 120 см. Лазерное излучение фокусировалось в кювету линзой с фокусным расстоянием 150 см.

Временной компрессор стоксова излучения был построен по двухрешеточной схеме. Применялись голографические решетки (800 штр./мм) с золотым покрытием. Измеренная энергетическая эффективность компрессора на длине волны 1220 нм была равна 71%.

3. Экспериментальные результаты и их обсуждение

Предварительно, перед проведением экспериментов по компрессии стоксова излучения, проводилась оптимизация работы комбинационного преобразователя для достижения максимальной эффективности преобразования при ширине спектра импульса стоксова излучения, близкой к ширине спектра излучения лазера на сапфире с титаном. Варьировались соотношение энергий лазерных импульсов с ортогональными поляризациями и давление водорода в кювете преобразователя. Было установлено, что максимальная эффективность преобразования, равная 22%, достигается при энергиях первого и задержанного импульсов 1.2 и 0.9 мДж соответственно. Эффективность преобразования задержанного импульса по энергии при этом составила 50%, что соответствует эффективности преобразования по фотонам 75%. Высокая эффективность преобразования задержанного chirпированного импульса способствовала тому, что ширина спектра стоксова излучения была всего на 10% меньше ширины спектра лазерного импульса (в шкале частот). В

спектре стоксова сигнала (рис.2) в данном случае отсутствует обрезание низкочастотных спектральных компонент, приводящее к сужению спектра, что характерно для схем с моноимпульсной накачкой положительно chirпированными импульсами [5, 14]. Такой спектр соответствует спектрально-ограниченному импульсу длительностью 39 фс.

Перераспределение энергии между задержанными импульсами с увеличением энергии в первом импульсе приводило к незначительному уширению спектра задержанного импульса и заметному снижению энергетической эффективности преобразования. Уменьшение давления водорода также вызывало снижение эффективности. При увеличении давления наблюдалось ухудшение пространственных характеристик стоксова светового пучка, который в оптимальных условиях имел гауссово распределение интенсивности.

Проведенные расчеты показывают, что для согласования дисперсионных характеристик компрессора с дисперсией, вносимой стретчером и регенеративным усилителем, необходимо внести дополнительные дисперсии третьего и четвертого порядков, равные соответственно -25×10^4 фс³ и 45×10^4 фс⁴. Дисперсия второго порядка компенсировалась изменением расстояния между решетками компрессора, дисперсии третьего и четвертого порядков – с помощью АОДЛЗ.

При отсутствии в схеме акустооптической линии задержки стоксов импульс был компрессирован до длительности около 150 фс, что примерно в четыре раза больше длительности спектрально-ограниченного импульса с аналогичным спектром. В дальнейшем компрессия осуществлялась в схеме с АОДЛЗ.

Для достижения максимальной степени компрессии (получения наиболее короткого импульса стоксова излучения) проводилось варьирование с помощью АОДЛЗ величин дисперсий третьего и четвертого порядков. На рис.4 представлены зависимости длительности компрессированного стоксова импульса от величины дисперсии четвертого порядка D_4 при фиксированной дисперсии третьего порядка D_3 . (Измерение длительности импульса осуществлялось автокоррелятором (ASF-20, Авеста) в предположении, что форма импульса описывается функ-

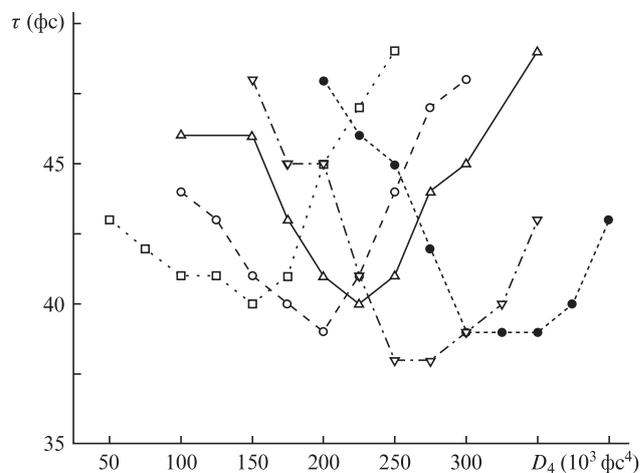


Рис.4. Зависимости длительности импульса τ стоксова излучения с центральной длиной волны 1220 нм на выходе решеточного компрессора от величины дисперсии D_4 , вносимой АОДЛЗ, при $D_3 = -215 \times 10^3$ (□), -220×10^3 (○), -225×10^3 (△), -230×10^3 (▽) и -235×10^3 фс³ (●).

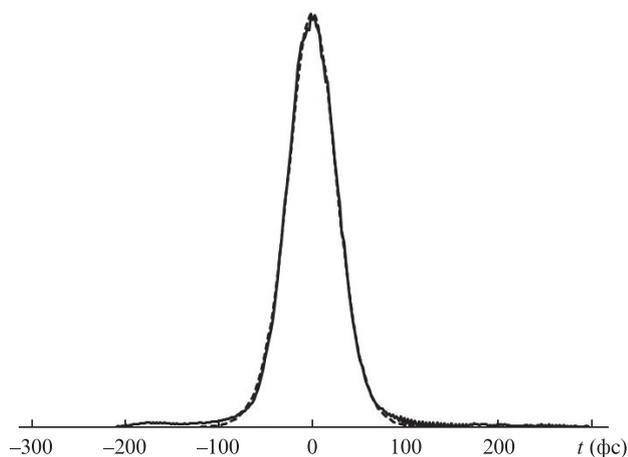


Рис.5. Автокорреляционные функции импульса излучения на выходе решеточного компрессора (сплошная кривая) и импульса длительностью 40 фс, форма которого описывается функцией $\text{sech}^2 t$ (штриховая кривая).

цией $\text{sech}^2 t$.) Наиболее короткие импульсы первой стоксовой компоненты с длительностью около 38 фс получены при $D_3 = -23 \times 10^4 \text{ фс}^3$ и $D_4 = 27.5 \times 10^4 \text{ фс}^4$. Автокорреляционная функция такого импульса показана на рис.5. Заметное отличие рассчитанной дисперсии четвертого порядка от оптимального значения, полученного экспериментально, мы связываем с недостаточной точностью расчета этой дисперсии, вносимой регенеративным усилителем, оптическими элементами комбинационного преобразователя и решеточным компрессором.

4. Заключение

Таким образом, в результате использования разработанной нами схемы комбинационного преобразования фемтосекундных лазерных импульсов и введения программируемой АОДЛЗ в фемтосекундную лазерную систему на сапфире с титаном удалось получить импульсы первой стоксовой компоненты с длительностью 40 фс и энергией 300 мкДж при ВКР в водороде с эффективностью преобразования по энергии 22%. В настоящее время эти импульсы являются наиболее короткими одиночными импульсами, генерируемыми при ВКР.

Необходимо также отметить следующее:

1. Поскольку ВКР-преобразование в газе лазерных импульсов длительностью свыше 100 пс (в диапазоне интенсивностей, существенно меньших пороговых значений для самофокусировки и фазовой самомодуляции) происходит в режиме насыщения с эффективностью преобразования по фотонам около 75%, то стабильность работы комбинационного преобразователя по энергии и длительности импульса примерно равна стабильности работы лазерной системы.

2. Не вызывает сомнения возможность увеличения энергии импульса накачки вплоть до 100 мДж, что под-

тверждается работами по ВКР-преобразованию в газах импульсов с такой энергией [15, 16]. Более того, повышение энергии лазерного импульса потребует снижения давления водорода для достижения оптимального режима преобразования (превышения энергии импульса накачки над пороговой энергией ВКР), что, в свою очередь, приведет к увеличению времени фазовой дефазировки, уменьшению волновой расстройки и, как следствие, к более эффективной работе ВКР-преобразователя, построенного по двухимпульсной схеме накачки.

3. Широкий спектральный диапазон прозрачности активных газовых сред комбинационного преобразователя открывает возможности для продвижения в область среднего ИК диапазона. Например, при использовании в качестве источника накачки фемтосекундного лазера на хром-форстерите с длиной волны излучения 1.25 мкм длина волны стока излучения составит 2.6 мкм.

Работа выполнена при частичной финансовой поддержке Министерства образования и науки РФ по программе повышения конкурентоспособности НИТУ «МИСиС» среди ведущих мировых научно-образовательных центров на 2013–2020 гг. (№ К1-2014-008).

1. 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).
2. Clerici M., Peccianti M., Schmidt B.E., Caspani L., Shalaby M., Giguere M., Lotti A., Couairon A., Legare F., Ozaki T., Faccio D., Morandotti R. *Phys. Rev. Lett.*, **110**, 253901 (2013).
3. Andriukaitis G., Balčiūnas T., Ališauskas S., Baltuška A., Popmintchev T., Chen M., Murnane M.M., Kapteyn H.C. *Opt. Lett.*, **36**, 2755 (2011).
4. Zhavoronkov N., Noack F., Petrov V., Kalosha V.P., Herrmann J. *Opt. Lett.*, **26**, 47 (2001).
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. Конященко А.В., Лосев Л.Л., Теняков С.Ю. *Квантовая электроника*, **40**, 700 (2010).
8. Молчанов В.Я., Волошинов В.Б., Макаров О.Ю. *Квантовая электроника*, **39**, 353 (2009).
9. Molchanov V.Ya., Chizhikov S.I., Makarov O.Yu., Solodovnikov N.P., Ginzburg V.N., Katin E.V., Khazanov E.A., Lozhkarev V.V., Yakovlev I.V. *Appl. Opt.*, **48**, C118 (2009).
10. Молчанов В.Я., Чижиков С.И., Юшков К.Б. *Квантовая электроника*, **41**, 675 (2011).
11. Chizhikov S.I., Garanin S.G., Goryachev L.V., Molchanov V.Ya., Romanov V.V., Rukavishnikov N.N., Sokolovskii S.V., Voronich I.N., Yushkov K.B. *Laser. Phys. Lett.*, **10**, 015301 (2013).
12. Tournois P. *Opt. Commun.*, **140**, 245 (1997).
13. Verluise F., Laude V., Cheng Z., Spielmann Ch., Tournois P. *Opt. Lett.*, **25**, 575 (2000).
14. Guo X., Lu J., Li W., Xu Y., Lu X., Leng Y., Li R. *Opt. Laser Technol.*, **67**, 8 (2015).
15. Грасюк А.З., Лосев Л.Л., Никогосян Д.Н., Ораевский А.А. *Квантовая электроника*, **11**, 1872 (1984).
16. Андреев Р.Б., Горбунов В.А., Гулидов С.С., Паперный С.Б., Серебряков В.А. *Квантовая электроника*, **9**, 56 (1982).