

Генерация стоксовых импульсов длительностью менее 100 фс при ВКР в кристалле нитрата бария

А.В.Конященко, Л.Л.Лосев, С.Ю.Теняков

Осуществлена генерация импульсов длительностью 72 фс на частоте первой стоксовой компоненты при ВКР в кристалле нитрата бария импульса излучения лазера на $Al_2O_3:Ti^{3+}$ длительностью 50 фс. Энергетическая эффективность преобразования составила 20 %. Использовалась оптическая схема накачки кристалла нитрата бария двумя последовательными ортогонально поляризованными chirпированными импульсами с последующей временной компрессией импульса стоксова излучения.

Ключевые слова: вынужденное комбинационное рассеяние, фемтосекундные импульсы, кристаллы.

1. Введение

Исследование процесса ВКР фемтосекундных световых импульсов в кристаллах связано с задачей создания компактной приставки-преобразователя частоты для фемтосекундных лазерных систем. Малый ($\sim 1000 \text{ см}^{-1}$) стоксов сдвиг в кристаллах позволяет достаточно просто осуществить частотную перестройку, для реализации которой в параметрических преобразователях требуется дополнительный этап нелинейного преобразования – генерация второй гармоники, что снижает эффективность преобразования и усложняет оптическую схему.

Основная проблема, связанная с комбинационным преобразованием фемтосекундных импульсов, – это резкое снижение эффективности преобразования вследствие нелинейной фазовой самомодуляции импульса накачки в комбинационно-активной среде [1]. Особенно ярко это проявляется в кристаллических активных средах. Для исключения эффекта самомодуляции в [2] было предложено использовать схему, в которой ВКР осуществляется для импульса пикосекундной длительности, полученного из исходного фемтосекундного лазерного импульса путем chirпирования по частоте. В дальнейшем импульс стоксова излучения с частотным chirпом, воспроизводящим chirп накачки, сжимается до импульса фемтосекундной длительности с помощью методов, разработанных в фемтосекундной лазерной технике. Недостатком данной схемы является сужение спектра chirпированного стоксова импульса из-за нелинейности процесса ВКР. Как следствие этого, длительность сжатого стоксова импульса в несколько раз превышает длительность импульса накачки [2, 3].

Для устранения указанного недостатка нами был предложен способ комбинационного преобразования фемтосекундных лазерных импульсов, заключающейся в том, что в активную среду подаются два лазерных chirпированных импульса, разделенные временным интервалом, меньшим времени поперечной релаксации T_2 активной среды [4]. При этом энергия первого импульса превышает пороговую энергию ВКР. При ВКР первого импульса в активной среде создается волна когерентных колебаний, которая не затухает к моменту прихода второго импульса. ВКР второго (задержанного) импульса определяется в этом случае амплитудой когерентной волны, созданной первым импульсом. Следовательно, эффективность комбинационного рассеяния практически не меняется на протяжении второго импульса, и спектр накачки просто смещается на величину, кратную стоксову сдвигу в активной среде, сохраняя свою ширину. Поскольку ВКР на колебательных и электронных уровнях молекулы относится к скалярному типу рассеяния [5], то возможно разделение комбинационных компонент первого и второго импульсов поляризационным методом: при линейных взаимно ортогональных поляризациях излучения накачек поляризации комбинационных компонент также будут ортогональны, и стоксовы импульсы могут быть разделены поляризатором.

Данная схема комбинационного преобразования была успешно экспериментально реализована для газовых активных сред: водорода [6], метана [4] и шестифтористой серы [6]. Длительности импульсов первой стоксовой компоненты превышали длительность импульса накачки не более чем на 30 %. В частности, при ВКР в сжатом водороде длительность стоксова импульса составила 52 фс при длительности импульса накачки 48 фс [6]. Эффективности преобразования по энергии в этих работах были близки к значениям, достигаемым в стандартных схемах с использованием одного импульса накачки, и превышали 10 %.

При использовании кристаллов в качестве активных сред комбинационных преобразователей фемтосекундных импульсов, работающих по схеме с двумя импульсами накачки, возникает проблема, связанная с малым значением T_2 . Для большинства комбинационно-актив-

А.В.Конященко. Физический институт им. П.Н.Лебедева РАН, Россия, 119991 Москва, Ленинский просп., 53; ООО «Авеста-Проект», Россия, Московская обл., 142190 Троицк, территория ФИАН, КРФ-2
Л.Л.Лосев. Физический институт им. П.Н.Лебедева РАН, Россия, 119991 Москва, Ленинский просп., 53;
e-mail: losev@pluton.fpi.troitsk.ru

С.Ю.Теняков. ООО «Авеста-Проект», Россия, Московская обл., 142190 Троицк, территория ФИАН, КРФ-2

ных кристаллов $T_2 \leq 5$ пс [7]. Исключением является кристалл нитрата бария $\text{Ba}(\text{NO}_3)_2$ с $T_2 = 26.5$ пс [7]. Из-за малого значения T_2 длительность chirпированного импульса накачки должна быть меньше нескольких пикосекунд для достижения режима нестационарного рассеяния, необходимого для реализации схемы с двумя импульсами. Однако, как было показано в [1] при исследовании ВКР в кристалле калий-гадолиниевого вольфрамата, при длительности импульса накачки ~ 1 пс и менее процесс ВКР срывается из-за фазовой самомодуляции. Исходя из вышесказанного, наиболее перспективным кристаллом для комбинационного преобразования фемтосекундных световых импульсов по двухимпульсной схеме является кристалл нитрата бария. Наряду с тем, что среди известных комбинационно-активных кристаллов кристалл нитрата бария обладает наибольшим временем T_2 , он также имеет одно из наивысших значений коэффициента комбинационного усиления g , равное (при накачке излучением с длиной волны $\lambda = 1$ мкм) 14.2 см/ГВт [7]. Экспериментальное исследование процесса комбинационного преобразования фемтосекундных лазерных импульсов в кристалле нитрата бария и являлось целью настоящей работы.

2. Экспериментальная установка

Схема экспериментальной установки приведена на рис.1,а. Источником фемтосекундных световых импульсов являлся лазер на $\text{Al}_2\text{O}_3:\text{Ti}^{3+}$. Лазерная система включала в себя задающий генератор, стретчер и регенеративный усилитель, в котором проводилось усиление chirпированного импульса. Chirпированный импульс длительностью ~ 100 пс формировался при прохождении импульса задающего генератора длительностью ~ 50 фс через стретчер на дифракционных решетках, а затем усиливался в регенеративном усилителе. На рис.1,б предста-

влен спектр лазерного импульса на выходе из регенеративного усилителя. Частота повторения импульсов составляла 2 кГц, средняя мощность выходного излучения достигала 200 мВт.

Для оптимального режима работы комбинационного преобразователя с двумя импульсами накачки желательно иметь chirпированный импульс накачки с длительностью, меньшей времени T_2 кристалла нитрата бария. В нашем случае этого можно было бы достичь путем установки решеточного компрессора между регенеративным усилителем и кристаллом нитрата бария. Однако с целью упрощения схемы и устранения оптических потерь, которые неизбежно возникли бы в таком компрессоре, было решено использовать импульсы, выходящие из регенеративного усилителя.

Для получения двух световых импульсов с линейными ортогональными поляризациями использовалась оптическая система, состоящая из двух пленочных поляризаторов и пяти зеркал. Соотношение энергий импульсов изменялось посредством вращения фазовой пластины $\lambda/2$, установленной перед системой зеркал. Временной интервал между импульсами варьировался с помощью оптической линии задержки.

Лазерное излучение фокусировалось линзой с фокусным расстоянием 50 см в кристалл нитрата бария размером $7 \times 7 \times 70$ мм. Излучение на выходе из кристалла коллимировалось линзой и направлялось в компрессор на дифракционных решетках с числом штрихов 1200 штр./мм. Для выделения задержанного стока импульса использовался призменный поляризатор.

Регистрация спектра импульса осуществлялась спектрометром ASP-200 (Авеста-Проект), а длительности импульса – автокоррелятором ASF-20 (Авеста-Проект).

3. Экспериментальные результаты и их обсуждение

Измеренная пороговая энергия при ВКР в нитрате бария chirпированного импульса длительностью $\tau_p \sim 100$ пс составила ~ 20 мкДж, что близко к рассчитанной энергии $E_{th} = 15$ мкДж для спектрально ограниченного импульса длительностью 100 пс. Расчет проводился по формуле $E_{th} = (8\tau_p + 45T_2)\lambda/g$ [8]. Отсюда следует, что в условиях эксперимента рассеяние широкополосного chirпированного импульсного излучения происходит с той же эффективностью, что и узкополосного спектрально ограниченного, и эффекты, связанные с дисперсией групповых скоростей, не оказывают заметного влияния на процесс ВКР.

На рис.2 показан спектр излучения на выходе из кристалла нитрата бария при накачке только одним chirпированным импульсом с энергией, примерно в два раза выше пороговой. В данном случае лазерный импульс имел положительный частотный chirп – первыми в кристалл попадали длинноволновые спектральные компоненты. Эффективность преобразования по энергии составила 20%. Из рис.2 видно, что истощение накачки происходит в области коротковолновых спектральных компонент. Это связано с тем, что вследствие нестационарности процесса ВКР эффективное преобразование реализуется на заднем фронте импульса накачки. В результате спектр стока импульса значительно уже спектра импульса накачки, и его ширина составляет ~ 8 нм, что соответствует спектрально ограниченному импульсу дли-

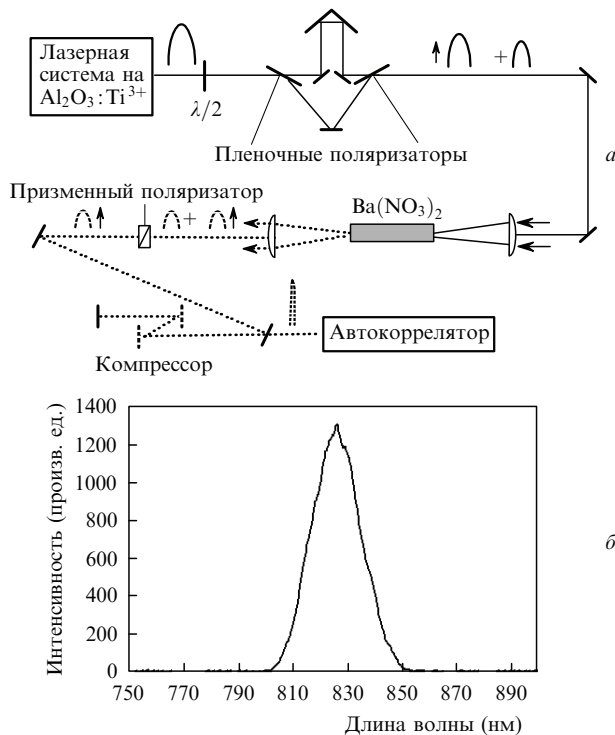


Рис.1. Схема экспериментальной установки (а) и спектр лазерного импульса на выходе из системы на $\text{Al}_2\text{O}_3:\text{Ti}^{3+}$ (б).

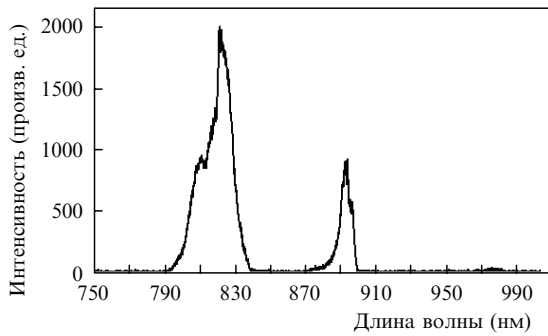


Рис.2. Спектр импульса на выходе из кристалла нитрата бария при моноимпульсном воздействии. Энергия импульса накачки на входе в кристалл равна 50 мкДж.

тельностью ~ 150 фс. Следовательно, при компрессии длительность стоксова импульса будет как минимум в три раза превышать длительность исходного лазерного импульса.

При использовании схемы с предварительным возбуждением активной среды (двухимпульсный режим) наблюдается увеличение ширины спектра задержанного стоксова импульса до 16 нм (рис.3). Исследования проводились в диапазоне энергий лазерного импульса на входе в оптическую систему формирования двух ортогонально поляризованных импульсов накачки 48–90 мкДж. Примерно одинаковая ширина спектра стоксовой компоненты получена для энергий импульсов накачки 22 и 26 мкДж при минимальной энергии входного лазерного импульса и 37 и 53 мкДж – при максимальной. При минимальной энергии лазерного импульса энергия первого импульса накачки практически совпадает с пороговой энергией ВКР. Тем не менее влияние предварительного возбуждения активной среды на процесс комбинационного преобразования задержанного импульса накачки ярко выражено. Эффективность преобразования по энер-

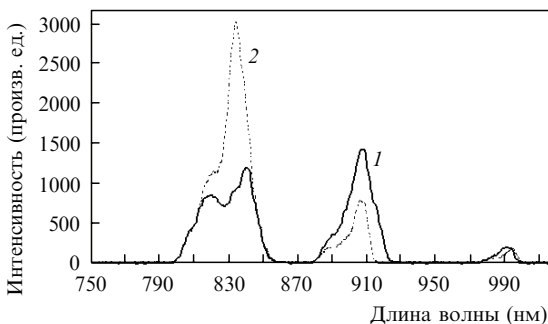
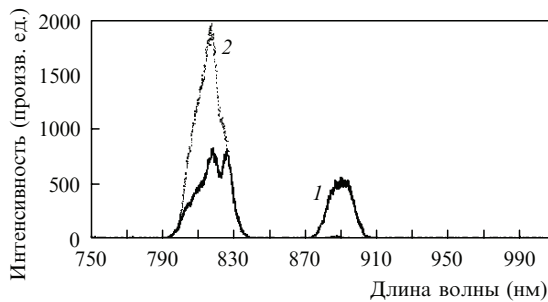


Рис.3. Спектры импульсов, выделенных поляризатором, на выходе из кристалла нитрата бария в двухимпульсном режиме (1) и в отсутствие первого импульса (2). Энергии первого и второго (задержанного) ортогонально поляризованных импульсов на входе в кристалл составляют соответственно 22 и 26 мкДж (а) и 37 и 53 мкДж (б).

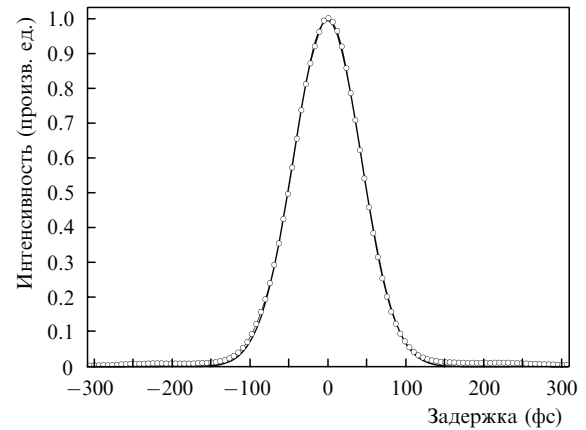


Рис.4. Автокорреляционная функция сжатого импульса первой стоксовой компоненты. Точки – эксперимент, кривая – аппроксимация в предположении sech^2 -формы импульса. Длительность импульса составляет 72 фс.

гии в первую стоксову компоненту совпадала с эффективностью, полученной в моноимпульсном режиме, и составляла $\sim 20\%$. При этом эффективность преобразования задержанного импульса накачки превышала 35%. Высокая эффективность комбинационного преобразования chirпированного импульса является достаточным условием для получения стоксова излучения с шириной спектра, близкой к ширине спектра накачки.

При ВКР в нитрате бария предельная ширина спектра первой стоксовой компоненты с $\lambda = 870$ нм составляет 24 нм в случае накачки chirпированным лазерным импульсным излучением с $\lambda = 800$ нм и шириной спектра 20 нм. Полученная в эксперименте для такого импульса накачки максимальная ширина спектра стоксова излучения оказалась равной 16 нм. Временная задержка между импульсами накачки с ортогональными поляризациями составляла 70 пс. Зарегистрированное сужение спектра стоксова импульса связано с тем, что длительность chirпированного импульса в несколько раз превышает время затухания когерентной волны колебаний (фононной волны) T_2 в кристалле нитрата бария. Поэтому в условиях эксперимента не реализуется оптимальный режим, при котором на протяжении всего задержанного импульса накачки амплитуда фононной волны в кристалле, созданной первым импульсом и определяющей эффективность комбинационного рассеяния, является постоянной.

На рис.4 показана автокорреляционная функция сжатого импульса первой стоксовой компоненты, полученная методом неколлинеарной генерации второй гармоники. Для импульса, имеющего форму $\text{sech}^2 t$, такая функция соответствует импульсу длительностью 72 фс. Рассчитанная по спектру, представленному на рис.3, длительность спектрально ограниченного импульса (фазы всех спектральных компонент импульса одинаковы) составляет 70 фс. Достаточно хорошее согласие результатов расчета с экспериментальными данными позволяет утверждать, что при ВКР chirпированного импульса длительностью ~ 100 пс в кристалле нитрата бария частотный chirп импульса накачки переносится на стоксов импульс без нелинейных искажений.

4. Заключение

В результате проведенных исследований процесса частотного преобразования лазерных импульсов дли-

тельностью 50 фс посредством ВКР в кристалле нитрата бария получены импульсы первой стоковой компоненты длительностью ~ 72 фс. На сегодняшний день, по нашим данным, это самые короткие импульсы стокового излучения, генерируемые при ВКР в кристаллах.

Следует также отметить, что схема комбинационного преобразования с использованием двух последовательно распространяющихся световых импульсов с ортогональными поляризациями оказывается эффективной и в том случае, когда длительности импульсов в несколько раз превышают время T_2 активной среды. Эта особенность открывает дополнительные возможности генерации фемтосекундных импульсов стокового излучения при ВКР в других кристаллах и плотных газах.

1. Losev L.L., Song J., Xia J.F., Strickland D., Brukhanov V.V. *Opt. Lett.*, **27** (23), 2100 (2002).
2. Zhavoronkov N., Noack F., Petrov V., Kalosha V.P., Herrmann J. *Opt. Lett.*, **26** (1), 47 (2001).
3. Grigsby F.B., Dong P., Downer M.C. *J. Opt. Soc. Am. B*, **25** (3), 346 (2008).
4. Konyashchenko A.V., Losev L.L., Tenyakov S.Yu. *Opt. Express*, **15** (19), 11855 (2007).
5. Зельдович Б.Я., Пилипецкий Н.Ф., Шкунов В.В. *Обращение волнового фронта* (М.: Наука, 1985).
6. Konyashchenko A.V., Losev L.L., Pazyuk V.S., Tenyakov S.Yu. *Appl. Phys. B*, **93** (2), 455 (2008).
7. Басиев Т.Т., Зверев П.Г., Карасик Ф.Я., Осико В.В., Соболев А.А., Чунаев Д.С. *ЖЭТФ*, **126** (5), 1073 (2004).
8. Everall N.J., Partanen J.P., Barr J.P.M., Shaw M.J. *Opt. Commun.*, **64** (4), 393 (1987).