

Параметрическое преобразование и активное формирование спектра излучения суперконтинуума в поле интенсивных фемтосекундных лазерных импульсов

И. В. Федотов⁺, А. Б. Федотов^{+,*}, П. А. Жохов⁺, А. А. Ланин⁺, А. Д. Саввин⁺, А. М. Желтиков^{+,*}

⁺ Физический факультет, МГУ им. М.В. Ломоносова, 119992 Москва, Россия

^{*} Международный лазерный центр, МГУ им. М.В. Ломоносова, 119992 Москва, Россия

Поступила в редакцию 16 июня 2008 г.

Реализована каскадная схема нелинейно-оптической трансформации мощных сверхкоротких световых импульсов в ионизируемой газовой среде, включающая генерацию излучения суперконтинуума и последующее преобразование спектра этого излучения в поле фемтосекундных лазерных импульсов с интенсивностью 10^{14} – 10^{15} Вт/см². Показана возможность высокоэффективного преобразования спектра излучения суперконтинуума и активного формирования спектра сверхкоротких световых импульсов за счет процесса параметрического четырехволнового взаимодействия. Максимальная эффективность параметрического преобразования фемтосекундных лазерных импульсов в условиях выполненных экспериментов составляет 1%.

PACS: 42.65.Wi, 42.81.Qb

Нелинейно-оптическое пространственно-временное преобразование поля интенсивных сверхкоротких лазерных импульсов в ионизируемой газовой среде приводит к генерации излучения с широким непрерывным спектром [1–3]. Это явление, известное как генерация белого света, или генерация суперконтинуума (СК) [4–7], широко исследуется в настоящее время в связи с возможностями дистанционного зондирования атмосферы [8], перспективами создания новых широкополосных источников излучения [9], а также развитием новых методов генерации предельно коротких импульсов со стабилизированным сдвигом фазы между несущей и огибающей светового поля [10, 11]. Генерация СК-излучения в поле лазерных импульсов длительностью несколько циклов светового поля сопровождается необычными нелинейно-оптическими эффектами [12, 13] и позволяет наблюдать уникальные режимы пространственно-временной динамики широкополосных световых сигналов [14].

В настоящей работе экспериментально продемонстрирована возможность нелинейно-оптического преобразования СК-излучения в поле фемтосекундных лазерных импульсов с интенсивностью 10^{14} – 10^{15} Вт/см² за счет использования каскадной схемы, включающей генерацию СК-излучения и последующее нелинейно-оптическое преобразование спектра этого излучения в ионизируемой газовой среде, создаваемой дополнительным фемтосекундным лазерным импульсом.

Схема последовательного нелинейно-оптического преобразования мощных сверхкоротких световых импульсов представлена на рис.1. Для генерации световых импульсов используется фемтосекундная

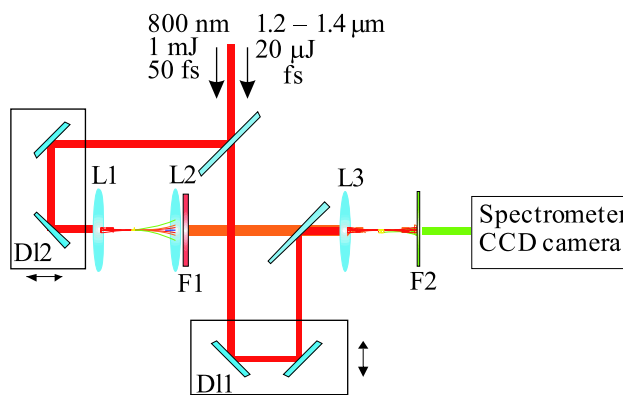


Рис.1. Схема эксперимента: D11, D12 – оптические линии задержки, L1, L2, L3 – линзы, F1, F2 – спектральные фильтры

лазерная система в составе задающего генератора фемтосекундных импульсов на титанате сапфира, накачиваемого излучением второй гармоники лазера на гранате с неодимом, а также регенеративного и многопроходного усилителей. Фемтосекундная лазерная система формирует импульсы излучения с центральной длиной волны около 800 нм длительностью 50 фс с энергией до 1 мДж при частоте повторения 50 Гц. Спектр импульсов излучения,

формируемых лазерной системой, показан штриховой линией на рис.2.

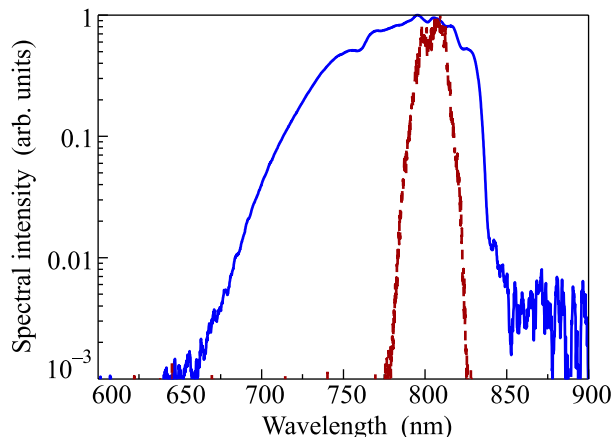


Рис.2. Спектр излучения фемтосекундного титан-сапфирового лазера (штриховая линия) и спектр, уширенный в результате нелинейно-оптического преобразования импульса титан-сапфирового лазера в объеме ионизируемого газа. Начальная энергия лазерного импульса 0.4 мДж

С помощью светоделительной пластины лазерный пучок делился на два плеча с примерно равными энергиями излучения, предназначенных для генерации суперконтинуума (первое плечо, рис.1) и его последующего нелинейно-оптического преобразования (второе плечо на рис.1). Пиковая мощность световых импульсов в каждом из плечей составляла величину $P \approx 1.7P_{cr}$, где P_{cr} – критическая мощность самофокусировки в атмосферном воздухе. Излучение первого плеча, сфокусированное с помощью линзы с фокусным расстоянием 10 см, приводит к частичной ионизации воздуха вблизи области фокуса и испытывает значительное спектральное уширение (рис.2) в процессе сложной пространственно-временной динамики, обусловленной нелинейно-оптическими явлениями, связанными с керровской и ионизационной нелинейностью газовой среды. Наиболее важную роль в условиях описываемых экспериментов, как показывает теоретическое моделирование, основанное на решении трехмерного уравнения эволюции светового поля в ионизируемом газе [14], играют такие нелинейно-оптические эффекты, как фазовая самомодуляция, самофокусировка и укрупнение огибающей импульса за счет керровской нелинейности газа, а также связанный с ионизационной нелинейностью высокочастотный спектральный сдвиг светового поля, приводящий к заметной асимметрии спектра СК (см. рис.2).

Для преобразования спектра излучения СК в первом каскаде схемы использовался процесс параметрического четырехволнового взаимодействия (ЧВВ) импульсов излучения с центральной длиной волны 800 нм, используемого в качестве излучения накачки, и перестраиваемых по частоте импульсов излучения, формируемых оптическим параметрическим усилителем (длина волны 1.2–1.4 мкм), используемых в качестве стоксова поля. Ранее процессы параметрического ЧВВ в газовой среде, ионизируемой интенсивными сверхкороткими световыми импульсами, использовались для генерации терагерцового излучения [15, 16], а также перестраиваемых по частоте сверхкоротких импульсов видимого диапазона [17]. В условиях описываемых экспериментов ЧВВ-преобразование импульсов накачки и Стокса приводило к генерации перестраиваемого по частоте антистоксова сигнала в спектральном диапазоне 530–640 нм (рис.3). Максимальная эффективность преоб-

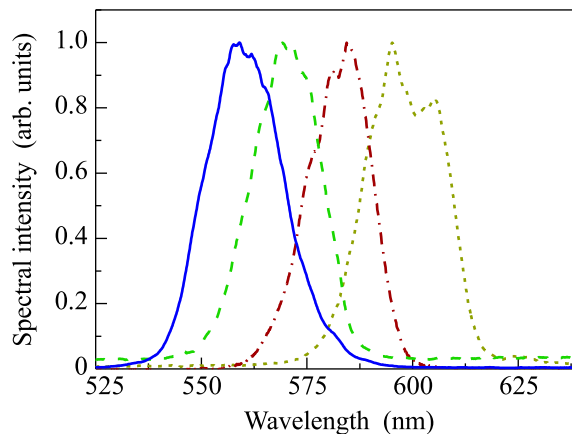


Рис.3. Спектр антистоксова сигнала, генерируемого в результате параметрического четырехволнового взаимодействия излучения титан-сапфирового лазера (центральная длина волны 800 нм) с перестраиваемым по частоте стоксовым излучением. Центральная длина волны стоксова сигнала 1200 нм (пунктир), 1250 нм (штрих-пунктир), 1320 нм (штриховая линия), 1400 нм (сплошная линия)

разования энергии стоксова поля в условиях наших экспериментов составила 1%.

Излучение второго канала фокусируется с помощью линзы с фокусным расстоянием 20 см и используется для создания области ионизированного газа (см. схему на рис. 1) для нелинейно-оптического преобразования излучения СК, генерируемого излучением первого канала. Для визуализации области возбуждения газовой среды и обеспечения оптимальных условий нелинейно-оптического преобразования

излучения СК использовался пробный пучок излучения второй гармоники лазера на титанате сапфира. Картина дифракции пробного пучка на возбужденной излучением титан-сапфирового лазера области газа (рис.4) свидетельствует о цилиндрической

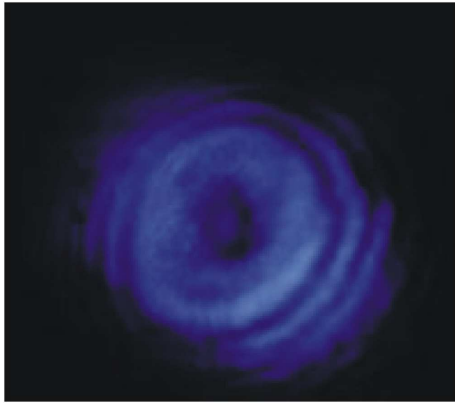


Рис.4. Картина дифракции пробного пучка (излучение второй гармоники титан-сапфирового лазера) на области газа, ионизированной излучением основной частоты титан-сапфирового лазера

симметрии области ионизации и позволяет обеспечить точное пространственное позиционирование отдельных спектральных компонент излучения СК относительно области ионизированного газа. Анализ картины дифракции пробного пучка, как показано в работе [18], позволяет получить количественную информацию об электронной плотности в ионизированной газовой среде. В условиях наших экспериментов средняя по длине области ионизации плотность электронов в центре лазерного пучка, $\bar{n} = l^{-1} \int_0^l n_e(r=0, z) dz$, где $n_e(r, z)$ – электронная плотность, r, z – поперечная и продольная координаты, l – длина области ионизации, составляла величину порядка 10^{16} см^{-3} .

На рис.5 представлены результаты экспериментов, демонстрирующие возможность преобразования излучения СК за счет процесса ЧВВ. В этих экспериментах спектральная компонента с центральной длиной волны $\lambda_1 \approx 677 \text{ нм}$, получаемая путем пропускания генерируемого импульсами первого канала излучения СК через спектральный фильтр, взаимодействует с импульсом второго канала (центральная длина волны $\lambda_2 \approx 800 \text{ нм}$), приводя к генерации сигнала ЧВВ с центральной длиной волны $\lambda_{\text{ФВМ}} \approx 587 \text{ нм}$, удовлетворяющей соотношению, выражающему закон сохранения энергии для процесса ЧВВ, $\lambda_{\text{ФВМ}}^{-1} = 2\lambda_1^{-1} - \lambda_2^{-1}$. Максимум интенсивности сигнала ЧВВ достигается в условиях точного временного совмещения взаимодействующих световых им-

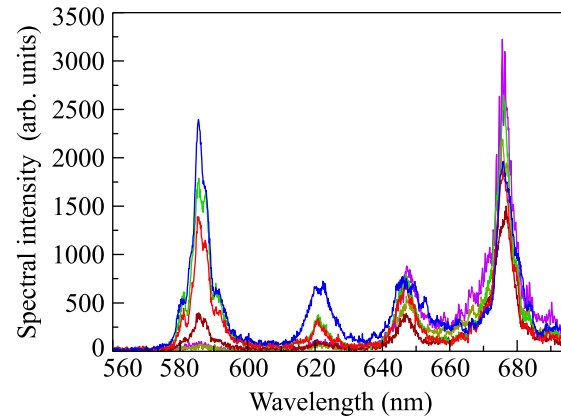


Рис.5. Фрагмент спектра излучения, генерируемого в результате параметрического взаимодействия отфильтрованной из излучения СК спектральной компоненты ($\lambda_1 \approx 677 \text{ нм}$) с излучением титан-сапфирового лазера в области ионизированного излучением титан-сапфирового лазера газа. Время задержки импульса титан-сапфирового лазера изменяется с шагом 130 фс от 0 (наиболее интенсивный пик на $\lambda_{\text{ФВМ}} \approx 587 \text{ нм}$) до 780 фс (наиболее слабый сигнал на $\lambda_{\text{ФВМ}} \approx 587 \text{ нм}$)

пульсов (рис.5). Сильная зависимость интенсивности сигнала ЧВВ от времени задержки между импульсами может быть использована как для управления амплитудой ЧВВ-сигнала, так и для прямого измерения времен групповой задержки различных спектральных компонент излучения СК.

Разработанная и экспериментально реализованная в настоящей работе схема последовательного нелинейно-оптического преобразования мощных сверхкоротких световых импульсов в ионизируемой газовой среде открывает возможности активного формирования спектра излучения суперконтинуума и управления параметрами мощных сверхкоротких световых импульсов. Продемонстрированная методика может быть использована для решения задач дистанционного зондирования атмосферы, создания новых источников сверхкоротких импульсов, разработки генераторов излучения далекого ИК и терагерцового диапазонов, а также для развития систем оптической связи на основе прямой передачи оптических сигналов.

Работа выполнена при поддержке грантов Российского фонда фундаментальных исследований # 07-02-12175-офи, # 06-02-16880-а, # 06-02-39011-ГФЕН, # 07-02-91215-ЯФ, # 08-02-90061-Бел, # 08-02-91756-АФ и Федеральной целевой научно-технической программы РФ.

1. P. B. Corkum, C. Holland, and T. Srinivasan-Rao, *Phys. Rev. Lett.* **57**, 2268 (1986).
2. L. Bergé, S. Skupin, R. Nuter et al., *Rep. Prog. Phys.* **70**, 1633 (2007).
3. A. Couairon and A. Mysyrowicz, *Physics Reports* **441**, 47 (2007).
4. *The Supercontinuum Laser Source*, Ed. R. Alfano, Springer: New York, 1989.
5. *Supercontinuum Generation*, Special issue of *Applied Physics B* **77**, nos. 2/3 (2003), Ed. A. M. Zheltikov.
6. V. P. Kandidov, O. G. Kosareva, I. S. Golubtsov et al., *Appl. Phys. B* **77**, 149 (2003).
7. А. М. Желтиков, *Сверхкороткие импульсы и методы нелинейной оптики*, М.: Наука, 2006.
8. J. Kasparian, M. Rodriguez, G. M'ejean et al. *Science* **301**, 61 (2003).
9. E. Goulielmakis, V. S. Yakovlev, A. L. Cavalieri et al., *Science* **317**, 769 (2007).
10. C. P. Hauri, W. Kornelis, F. W. Helbing et al., *Appl. Phys. B* **79**, 673 (2004).
11. C. Hauri, A. Guandalini, P. Eckle et al., *Opt. Express* **13**, 7541 (2005).
12. A. L. Gaeta, *Phys. Rev. Lett.* **84**, 3582 (2000).
13. А. М. Желтиков, *УФН* **176**, 623 (2006).
14. E. Goulielmakis, S. Koehler, B. Reiter et al., *Opt. Lett.* **33**, 1407 (2008).
15. D. J. Cook and R. M. Hochstrasser, *Opt. Lett.* **25**, 1210 (2000).
16. T. Bartel, P. Gaal, K. Reimann et al., *Opt. Lett.* **30**, 2805 (2005).
17. F. Théberge, N. Aközbek, W. Liu et al., *Phys. Rev. Lett.* **97**, 023904 (2006).
18. F. Théberge, W. Liu, P. Tr. Simard et al., *Phys. Rev. E* **74**, 036406 (2006).