

Спектрально-временная структура сверхкоротких световых импульсов ультрафиолетового диапазона, генерируемых интенсивным лазерным излучением в атмосфере

И. В. Федотов, А. Б. Федотов, А. М. Желтиков

Физический факультет, Международный лазерный центр МГУ им. М.В. Ломоносова, 119992 Москва, Россия

Поступила в редакцию 11 января 2009 г.

Выполнены прямые измерения спектрально-временной структуры сверхкоротких импульсов ультрафиолетового (УФ) излучения, формируемых в результате генерации третьей гармоники интенсивным излучением титан-сапфирового лазера в атмосфере. Экспериментально реализованная методика позволяет определить длительность и чирп импульсов УФ излучения, а также измерить электронную плотность создаваемой лазерным излучением плазмы. Ширина спектра третьей гармоники, генерируемой лазерными импульсами с начальной длительностью 45 фс в условиях выполненных экспериментов, соответствует длительности спектрально ограниченного импульса УФ излучения около 30 фс.

PACS: 42.65.Wi, 42.81.Qb

Выполненные в последние годы эксперименты по распространению мощных сверхкоротких лазерных импульсов в атмосфере и других газовых средах позволили обнаружить новые режимы нелинейно-оптического преобразования световых полей [1, 2]. Результаты этих исследований сообщают мощный импульс развитию базовых представлений нелинейной оптической физики [3, 4] и представляют значительный интерес для практических приложений, включая новые методы генерации мощных предельно коротких световых импульсов [5], дистанционного зондирования атмосферы [6] и передачи оптических сигналов на большие расстояния [1, 2].

Распространение мощных сверхкоротких импульсов в газовых средах сопровождается существенным уширением спектра лазерного излучения [1, 2]. Это явление, часто называемое генерацией суперконтинуума [7, 8], широко исследуется в настоящее время в связи с возможностями формирования мощных сверхкоротких импульсов с длительностями порядка периода оптического поля [9, 10]. Сверхуширение спектра лазерного излучения в газовой среде во многих случаях сопровождается возникновением сигнала в коротковолновой области спектра за счет процесса генерации третьей гармоники (ГТГ) излучения накачки [11–13]. Этот эффект открывает новые возможности генерации мощного коротковолнового излучения, включая формирование высокоинтенсивных предельно коротких, фемто- и субфемтосекундных импульсов ультрафиолетового (УФ) диапазона [14]. Основные свойства и закономерности явления ГТГ при взаимодействии мощных лазерных импуль-

сов с газовыми средами, однако, исследованы и поняты в значительно меньшей степени, чем эффект генерации суперконтинуума, из-за значительных фазовых и групповых расстройек полей накачки и третьей гармоники, ограничивающих эффективность ГТГ, а также из-за трудностей измерения спектрально-временной структуры сверхкоротких импульсов УФ излучения.

В настоящей работе предложена и экспериментально реализована методика прямого измерения спектрально-временной структуры поля УФ излучения, позволяющая определить длительность и чирп импульсов третьей гармоники, а также измерить электронную плотность плазмы, создаваемой лазерным излучением. С помощью разработанной методики найдены режимы высокоэффективной генерации сверхкоротких импульсов когерентного УФ излучения интенсивным излучением титан-сапфирового лазера в атмосфере. Показано, что уширение спектра излучения накачки в условиях нелинейно-оптического взаимодействия с атмосферой позволяет формировать импульсы УФ излучения, длительность которых существенно меньше начальной длительности импульсов накачки.

Схема генерации и спектрально-временного анализа сверхкоротких импульсов УФ излучения, формируемых за счет процесса ГТГ при распространении высокоинтенсивных лазерных импульсов в атмосфере, представлена на рис.1. В качестве источника излучения накачки используется фемтосекундная лазерная система в составе задающего генератора сверхкоротких импульсов на титанате сапфира, нака-

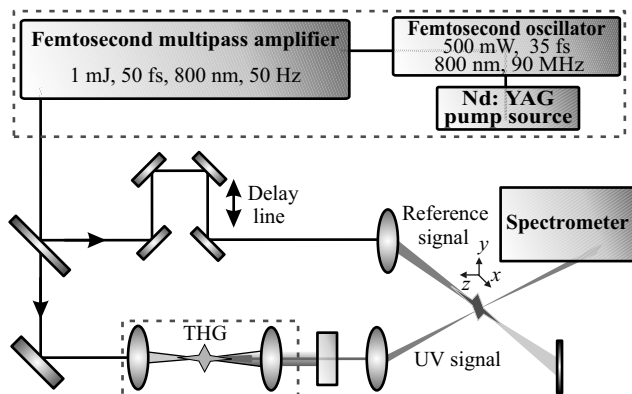


Рис.1. Схема экспериментальной установки

чиваемого излучением второй гармоники лазера на гранате с неодимом, а также регенеративного и многопроходного усилителей. Фемтосекундная лазерная система формирует импульсы излучения с центральной длиной волны 818 нм длительностью 45 фс с энергией до 1 мДж при частоте повторения 50 Гц. Спектр импульсов излучения накачки на выходе лазерной системы показан штриховой линией на рис.2.

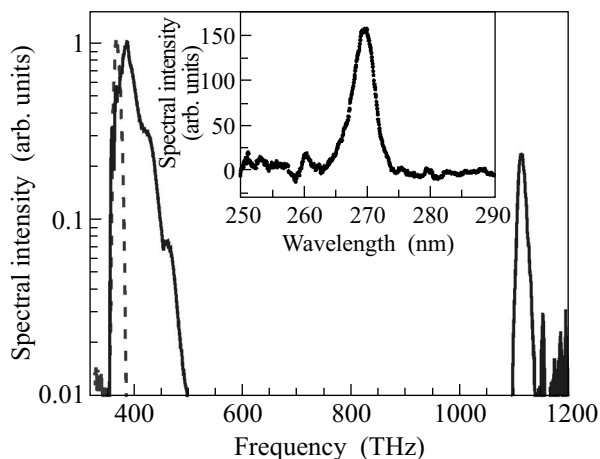


Рис.2. Спектр лазерного излучения (штриховая линия) и спектр излучения, испытавшего нелинейно-оптическое преобразование в сфокусированном пучке в атмосфере. На врезке представлен спектр сигнала третьей гармоники после спектральной и пространственной фильтрации

Генерируемое лазерной системой излучение делится на два пучка с примерно равными энергиями (рис.1) и пиковой мощностью световых импульсов, установленной на уровне $P \approx 1.7P_{cr}$, где P_{cr} – критическая мощность самофокусировки в атмосферном воздухе. Первый пучок предназначен для генерации суперконтинуума и третьей гармоники. Второй пучок используется в качестве опорного поля для анали-

за спектрально-временной структуры импульсов УФ излучения, генерируемого в результате взаимодействия первого пучка с атмосферой.

Излучение первого пучка, 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. Как показывает теоретическое моделирование, основанное на решении трехмерного уравнения эволюции светового поля в ионизируемом газе [15], наиболее важную роль в пространственно-временном преобразовании поля в условиях описываемых экспериментов играют эффекты кубичной по полю нелинейности газа, включающие фазовую самомодуляцию, самофокусировку и укрупнение огибающей импульса, а также явления, связанные с ионизационной нелинейностью газа.

В результате совместного действия ионизационной нелинейности, пространственного самовоздействия, а также укрупнения огибающей импульса [15] спектр излучения суперконтинуума сдвинут в высокочастотную область относительно спектра излучения накачки (рис.2). Ширина спектра излучения суперконтинуума, измеренная по уровню 10%-ной максимальной спектральной интенсивности, составляет 90 ТГц, что в 4.5 раза больше начальной ширины спектра излучения накачки, определенной на том же уровне спектральной интенсивности. Излучение третьей гармоники наблюдается в спектре испытавшего нелинейно-оптическое преобразование излучения в виде изолированного сигнала с максимумом на длине волны 269 нм (см. врезку на рис.2). Ширина спектра сигнала третьей гармоники (определенная по уровню 50%-ного максимума спектральной интенсивности) в 1.5 раза больше начальной ширины спектра излучения накачки и соответствует спектрально-ограниченному импульсу длительностью около 30 фс. Максимум спектра сигнала третьей гармоники составляет 23% от максимума видимой части спектра (рис.2). При этом высокочастотная часть спектра, соответствующая излучению с длиной волны короче 280 нм, содержит более 5% полной энергии излучения после нелинейно-оптического взаимодействия.

Для анализа спектрально-временной структуры УФ поля коротковолновое излучение, генерируемое при взаимодействии лазерных импульсов с атмосферой, отделялось от видимой части излучения с помощью набора спектральных и пространственных фильтров. Выделенное таким образом коротковол-

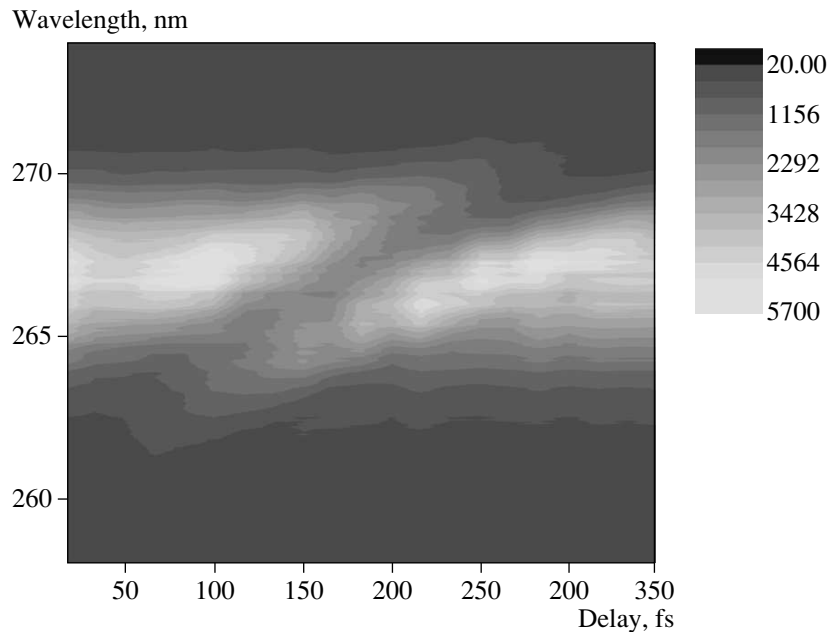


Рис.3. Карта спектрально-временной структуры УФ излучения, составленная из спектров УФ сигнала, измеренных для различных времен задержки УФ сигнала

новое излучение рассеивалось на нелинейной линзе, индуцируемой опорным излучением второго пучка титан-сапфирового лазера (рис.1). При точном временном совмещении импульсов УФ излучения и лазерного пучка наводимое мощным лазерным излучением изменение показателя преломления приводило к отклонению УФ пучка. На установленном за диафрагмой и спектрометром УФ детекторе при этом наблюдался минимум сигнала.

На рис.3 представлена характерная карта спектрально-временной структуры генерируемого при описанных выше условиях УФ излучения, составленная из спектров УФ сигнала, измеренных для различных времен задержки УФ сигнала τ_d . На рис.4 представлены характерные спектры УФ сигнала, измеренные для трех различных значений τ_d . При времени задержки УФ сигнала, выбранной за начало отсчета τ_d , УФ излучение проходит через область взаимодействия значительно раньше опорного импульса. Опорный импульс при этом не оказывает воздействия на УФ сигнал, спектр которого остается неизменным (спектр 1 на рис.4). При $\tau_d = 150$ фс высокочастотные компоненты достигают области взаимодействия одновременно с опорным излучением, испытывая рассеяние на модуляции показателя преломления, индуцируемой опорным сигналом (спектр 2 на рис.4). При $\tau_d = 200$ фс уже низкочастотные компоненты испытывают наиболее

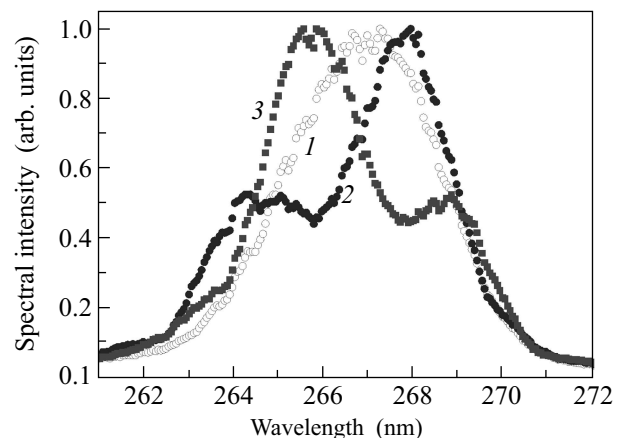


Рис.4. Спектры УФ сигнала, измеренные для трех различных значений времени задержки: $\tau_d = 0$ (1), 150 фс (2), 200 фс (3)

эффективное взаимодействие с опорным сигналом (спектр 3 на рис.4).

Как следует из представленных на рис.3 и 4 результатов, высокочастотные компоненты УФ сигнала достигают области наибольшего взаимодействия с опорным лазерным пучком раньше низкочастотных составляющих УФ сигнала. Такой характер чирпа поля третьей гармоники объясняется аномальной дисперсией плазмы, индуцируемой мощным лазерным излучением. Действительно, пусть для пары

близких спектральных компонент λ и $\lambda + \Delta\lambda$ условие наиболее эффективного взаимодействия с опорным пучком обеспечивается при временах задержки τ и $\tau + \Delta\tau$. Тогда, записывая разность групповых скоростей этих двух спектральных компонент в виде $1/u(\omega + \Delta\omega) - 1/u(\omega) \approx k_2\Delta\omega$, где $k_2 = \partial^2 k/\partial\omega^2$, $k = n\omega/c$, $\omega = 2\pi c/\lambda$ – частота, получаем следующее выражение для профиля линии максимальной эффективности взаимодействия УФ сигнала и опорного импульса на карте рис.3: $\Delta\tau/\Delta\lambda \approx -2\pi c\lambda^{-2}lk_2$, где l – полная длина трассы распространения УФ сигнала в ионизованном газе. Для плазменного закона дисперсии показателя преломления $n_p \approx 1 - \omega_p^2/2\omega^2$, где $\omega_p = (4\pi n_e e^2/m)^{1/2}$ – плазменная частота (n_e – плотность электронов, e и m – заряд и масса электрона), имеем $\Delta\tau/\Delta\lambda \approx c^{-1}(l/\lambda)(\omega_p/\omega)^2$. Предложенная экспериментальная методика, таким образом, может быть использована для определения плазменной частоты ω_p и, следовательно, электронной плотности n_e плазмы, создаваемой мощными лазерными импульсами.

Для определения параметров УФ импульса спектрально-временная карта, представленная на рис.3, моделируется в виде свертки опорного импульса и УФ сигнала с варьируемой длительностью и фазой. Как следует из приведенной на рис.3 карты, чирп УФ сигнала при описанных выше экспериментальных условиях близок к линейному. В классе линейно чирпированных гауссовых импульсов с огибающей вида $E(t) = E_0 \exp[-t^2/(2\tau_0^2)] \exp(-i\alpha t^2/2)$ наилучшее согласие между моделируемыми и экспериментальными картами достигается при длительности огибающей и параметре чирпа УФ сигнала $\tau_0 \approx 90$ фс, $\alpha \approx 350$ пс⁻². Путем компенсации линейного чирпа импульсы с такими параметрами могут быть сжаты до минимальной длительности $\tau_{\min} \approx 30$ фс. Такой же минимальной длительности импульса соответствует ширина спектра третьей гармоники на рис.2.

Выполненные в настоящей работе прямые измерения спектрально-временной структуры сверхкоротких импульсов УФ излучения позволяют установить важные особенности нелинейно-оптического преобразования интенсивных сверхкоротких импульсов в газовых средах. С помощью разработанной методики найдены режимы высокоэффективной генерации сверхкоротких импульсов когерентно-

го УФ излучения интенсивным излучением титан-сапфирового лазера в атмосфере. Показано, что уширение спектра излучения накачки в условиях нелинейно-оптического взаимодействия с атмосферой позволяет формировать импульсы УФ излучения, длительность которых существенно меньше начальной длительности импульсов накачки. Ширина спектра третьей гармоники, генерируемой лазерными импульсами с начальной длительностью 45 фс в условиях выполненных экспериментов, соответствует длительности спектрально ограниченного импульса УФ излучения около 30 фс.

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

1. L. Bergé, S. Skupin, R. Nuter et al., Rep. Prog. Phys. **70**, 1633 (2007).
2. A. Couairon and A. Mysyrowicz, Phys. Rep. **441**, 47 (2007).
3. А. М. Желтиков, УФН **176**, 623 (2006).
4. E. Goulielmakis, M. Schultze, M. Hofstetter et al., Science **320**, 1614 (2008).
5. C. P. Hauri, W. Kornelis, F. W. Helbing et al., Appl. Phys. B **79**, 673 (2004).
6. J. Kasparian, M. Rodriguez, G. M'ejean et al., Science **301**, 61 (2003).
7. *The Supercontinuum Laser Source*, Ed. R. Alfano, Springer: New York, 1989.
8. А. М. Желтиков, *Сверхкороткие импульсы и методы нелинейной оптики*, Москва: Наука, 2006.
9. E. Goulielmakis, V. S. Yakovlev, A. L. Cavalieri et al., Science **317**, 769 (2007).
10. E. Goulielmakis, S. Koehler, B. Reiter et al., Opt. Lett. **33**, 1407 (2008).
11. A. V. Fedotov, N. I. Koroteev, M. M. T. Loy et al., Opt. Commun. **133**, 587 (1997).
12. N. Aközbeke, A. Iwasaki, A. Becker et al., Phys. Rev. Lett. **89**, 143901 (2002).
13. U. Graf, M. Fieß, M. Schultze et al., Opt. Express **16**, 18956 (2008).
14. U. Graf, E. Goulielmakis, E. E. Serebryannikov et al., CLEO-Europe, Munich, June 2009, submitted.
15. E. E. Serebryannikov, E. Goulielmakis, and A. M. Zheltikov, New J. of Phys. **10**, 093001 (2008).