

## Формирование оптических импульсов длительностью до 8 фс при филаментации коллимированного фемтосекундного лазерного излучения в аргоне

М.В.Курилова, Д.С.Урюпина, А.В.Мажорова, Р.В.Волков,  
С.Р.Горгуца, Н.А.Панов, О.Г.Косарева, А.Б.Савельев

*Экспериментально реализована новая схема самокомпрессии фемтосекундного лазерного излучения при филаментации коллимированного пучка в аргоне, находящемся при давлении  $\sim 0.8$  атм. Импульсы с начальной длительностью 55 фс были сжаты до 8 фс, пиковая мощность сжатого импульса превышала 20 ГВт.*

**Ключевые слова:** оптические импульсы длительностью несколько периодов, филаментация, самокомпрессия, коллимированный пучок.

В настоящее время мощные оптические импульсы длительностью несколько оптических периодов получают, как правило, с помощью сверхуширения спектра фемтосекундных (с начальной длительностью 30–70 фс) импульсов, возникающего при волноводном распространении лазерного излучения в газовых средах, и последующего временного сжатия импульсов внешним компрессором, построенным на основе chirпированных зеркал либо системы призм [1–3]. Недавно была экспериментально продемонстрирована возможность самокомпрессии мощного фемтосекундного лазерного излучения при его филаментации в газе [4–6]. В этих работах лазерное излучение фокусировалось в объем газа, что приводило к образованию филамента длиной 10–50 см, на выходе которого и формировался мощный сжатый импульс длительностью менее 10 фс.

Нами в численном эксперименте [7] было показано, что при использовании мощного коллимированного лазерного пучка также возможно существенное самосжатие импульса в формирующемся филаменте. В настоящем сообщении представлены новые экспериментальные результаты, подтверждающие выводы работы [7]. Получено временное сжатие импульсов мощностью 80 ГВт и начальной длительностью 55 фс до 8 фс с высокой стабильностью параметров импульсов.

Одиночный филамент формировался излучением импульсного лазера на титанате сапфира (55 фс, 10 мДж, 10 Гц) [8]. Делительная пластинка делила исходный пучок на два в соотношении 5 : 3 по энергии импульса. Первый пучок использовался для образования филамента в кювете с газом, второй – в качестве опорного пучка для

измерения длительности импульса методом SPIDER, реализованным нами на основе описанной в [9] схемы.

Пучок с плоским волновым фронтом диаметром 1.3 мм на входе в кювету формировался телескопом, состоящим из собирающей линзы (с фокусным расстоянием  $f = 4.52$  м) и выпуклого зеркала ( $f = 1$  м). Таким образом создавался относительно короткий одиночный филамент. Длина кюветы составляла 3 м. На входе и выходе кюветы стояли кварцевые окна толщиной 600 мкм.

Внутри кюветы в пучок устанавливалась диафрагма диаметром от 100 до 1000 мкм, смещаемая вдоль кюветы с помощью магнитного захвата. За этой диафрагмой филамент прекращался, поскольку с ее помощью отрезался так называемый энергетический резервуар и тем самым прерывалась подкачка энергии в центральную часть филамента. Спектральная фаза и временная огибающая импульса после кюветы измерялись с использованием методики SPIDER [9].

Параметры входного излучения (энергия 4.5–5.0 мДж, диаметр исходного пучка 1.3 мм) и газовой среды (аргон при давлении 0.8–0.9 атм), а также расстояние от начала формирования филамента (1.5–1.8 м от выходного зеркала телескопа) до точки, в которой была установлена диафрагма (1 м), были выбраны на основе исследования спектральной трансформации излучения вдоль филамента [10]. Наши измерения показали, что установка диафрагмы диаметром более 700 мкм не приводит к «обрыву» филамента и появлению расходящегося пучка, что хорошо соответствует известным литературным данным о поперечном размере энергетического резервуара [11, 12] и результатам нашего численного моделирования. При диаметре диафрагмы менее 300 мкм нестабильность лазерного пучка по углу его распространения не дает возможности провести количественные измерения по методике SPIDER (осевая часть филамента редко попадает в апертуру диафрагмы).

При использовании диафрагмы диаметром 700 мкм нами наблюдалось формирование стабильных по длительности и спектрально-временной форме импульсов длительностью  $14 \pm 3$  фс. Спектр и временное распределение интенсивности типичного импульса длительностью 12 фс по полувысоте представлены на рис.1,а,б.

М.В.Курилова, Д.С.Урюпина, Р.В.Волков, О.Г.Косарева, А.Б.Савельев. Международный учебно-научный лазерный центр МГУ им. М.В.Ломоносова; Московский государственный университет им. М.В.Ломоносова, физический факультет, Россия, 119991 Москва, Воробьевы горы; e-mail: ab\_savelev@phys.msu.ru

А.В.Мажорова, С.Р.Горгуца. Московский государственный университет им. М.В.Ломоносова, физический факультет, Россия, 119991 Москва, Воробьевы горы

Н.А.Панов. Международный учебно-научный лазерный центр МГУ им. М.В.Ломоносова, Россия, 119991 Москва, Воробьевы горы

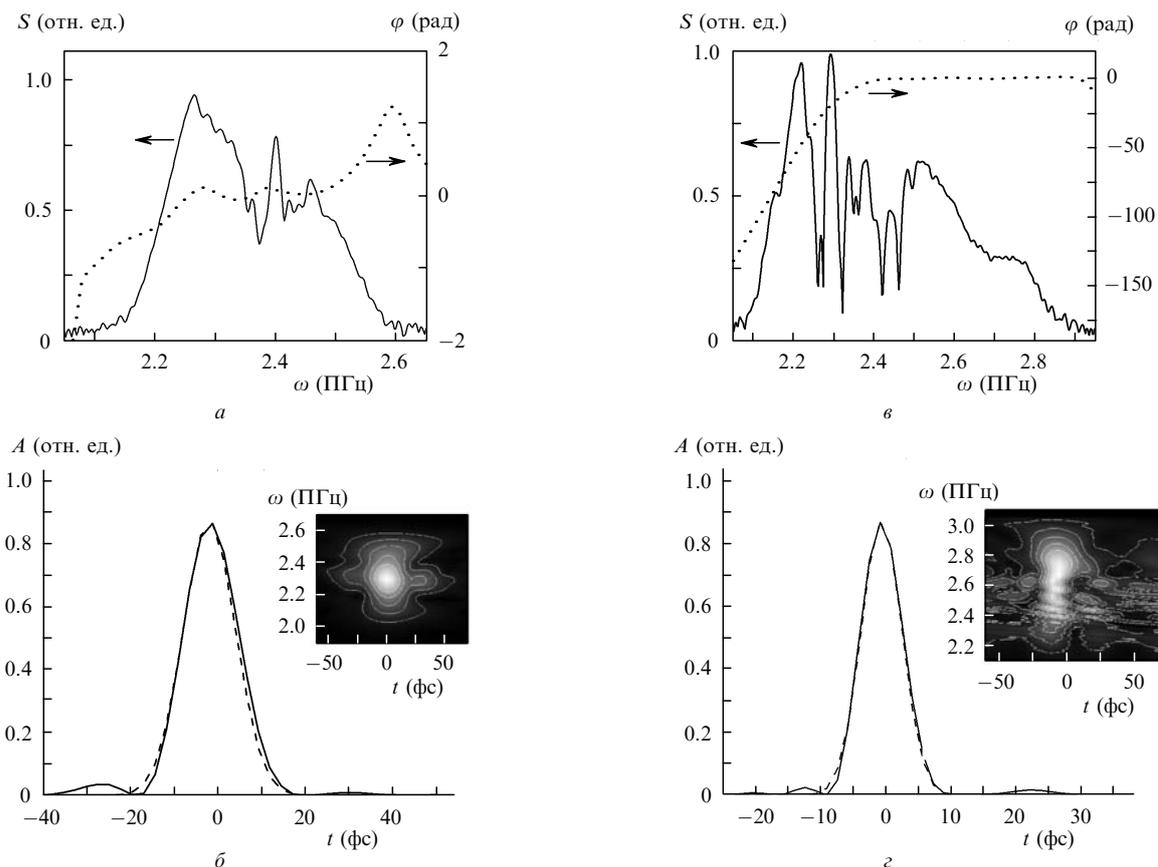


Рис.1. Восстановленная спектральная фаза  $\varphi$  и амплитуда  $S$  (*a, в*), а также временная форма  $A$  (эксперимент – сплошная кривая, гауссова аппроксимация – штриховая кривая) (*б, з*) импульсов, полученных при филаментации в аргоне с использованием диафрагмы диаметром 700 (*a, б*) и 300 мкм (*в, з*). На вставках – спектрально-временные диаграммы тех же импульсов (тонкие белые кривые соответствуют шести уровням яркости для равномерной шкалы).

Вследствие филаментации спектр импульса уширяется до  $\sim 0.35$  ПГц, а его спектральная фаза в выбранном нами оптимальном положении диафрагмы (1 м от начала филамента) является практически плоской с отклонением от константы не более 0.4 рад в пределах уширенного спектра (рис.1,*a*). Следует отметить, что при данном положении диафрагмы такая плоская фаза получается в относительно узком диапазоне давлений аргона (0.75–0.9 атм). При меньших давлениях ширина спектра импульса существенно уменьшается, а при больших – происходит значительное искажение спектральной фазы вследствие множественной филаментации. Временная форма сжатого импульса (рис.1,*б*) хорошо аппроксимируется гауссовой функцией с шириной по попувысоте 12 фс. Временная структура импульса содержит также ряд предимпульсов и постимпульсов, которые, однако, имеют значительно меньшую амплитуду по сравнению с импульсами, полученными в [4, 6], и, в нашем случае, могут также возникнуть при обработке сигналов по методике SPIDER, включающей в себя три преобразования Фурье на конечном интервале времен или частот. На вставке к рис.1,*б* представлена спектрально-временная  $\omega - t$ -диаграмма импульса, построенная по его спектральной амплитуде и фазе в соответствии с алгоритмом PGFROG [13]. Видно, что импульс существенно ограничен как во временной, так и в спектральной областях и близок к спектрально-ограниченному импульсу.

Частотное распределение интенсивности и спектральная фаза импульса, полученные в аргоне при тех же условиях с использованием диафрагмы диаметром 300 мкм,

представлены на рис.1,*в*. Видно, что спектр импульса уширился примерно вдвое, а спектральная фаза осталась постоянной на большей части ширины спектра. Длительность импульса составила менее 8 фс (см. гауссову аппроксимацию на рис.1,*з*). Спектрально-временная диаграмма импульса (вставка на рис.1,*з*) показывает, что энергия импульса в основном сосредоточена в ограниченной области этой диаграммы, однако импульс явно не соответствует спектрально-ограниченному. Тем не менее, даже в этих условиях предимпульсы и постимпульсы имеют малую амплитуду.

Существенной особенностью реализованного нами режима самокомпрессии является высокая стабильность таких параметров импульсов, как длительность и энергия. Так, флуктуации длительности сжатых импульсов при оптимальном давлении газа были существенно подавлены (сжатые импульсы при диаметре диафрагмы 700 мкм получались в 92 % реализаций при флуктуации длительности 3 фс) и оказались даже меньше, чем флуктуации длительности исходного импульса. По нашим оценкам, полученным при сравнении результатов измерения полной энергии филамента и численного моделирования, энергия сжатого импульса составила 400–500 мкДж при диаметре диафрагмы 700 мкм и 250 мкДж при диаметре 300 мкм.

Таким образом, реализованный нами режим самокомпрессии обладает рядом существенных преимуществ перед традиционной геометрией, использующей фокусировку лазерного излучения, а именно: существенной стабильностью процесса временного сжатия, связанной с

самосогласованным режимом формирования филамента вследствие керровской нелинейности среды и её ионизации (без геометрической фокусировки); возможностью «извлечения» сжатого импульса на нужном расстоянии от начала филамента и, как следствие, возможностью оптимизации параметров импульса; слабой чувствительностью параметров сжатого импульса к флуктуациям параметров входного излучения.

Настоящая работа выполнена при частичной поддержке РФФИ (гранты № 06-02-17508а и 09-02-01200а), Федерального агентства по науке и инновациям (Роснаука) (госконтракт 02.740.11.0223) и программы Президента РФ для молодых ученых МК-2519.2008.2.

1. Nisoli M., de Silvestri S., Svelto O., Szipocz R., Ferencz K., Spielmann C., Sartania S., Krausz F. *Opt. Lett.*, **22**, 522 (1997).
2. Hauri C.P., Kornelis W., Helbing F.W., Heinrich A., Couairon A., Mysyrowicz A., Biegert J., Keller U. *Appl. Phys. B*, **79**, 673 (2004).
3. Hauri C.P., Trisorio A., Merano M., Rey G., Lopez-Martens R.B., Mourou G. *Appl. Phys. Lett.*, **89**, 151125 (2006).
4. Stibenz G., Zhavoronkov N., Steinmeyer G. *Opt. Lett.*, **31**, 274 (2006).
5. Skupin S., Stibenz G., Berge L., Lederer F., Sokollik T., Schnurer M., Zhavoronkov N., Steinmeyer G. *Phys. Rev. E*, **74**, 056604 (2006).
6. Zaïr A., Guandalini A., Schapper F., Holler M., Biegerti J., Gallmann L., Keller U., Couairon A., Franco M., Mysyrowicz A. *Opt. Express*, **15**, 5394 (2007).
7. Kosareva O.G., Panov N.A., Uryupina D.S., Kurilova M.V., Mazhorova A.V., Savel'ev A.B., Volkov R.V., Kandidov V.P., Chin S.L. *Appl. Phys. B*, **91**, 35 (2008).
8. Большаков В.В., Воробьев А.А., Волков Р.В., Князьков В.А., Еремин Н.В., Пасхалов А.А., Шевелько А.П., Казаков Е.Д., Романовский М.Ю., Савельев А.Б. *Прикладная физика*, № 1, 18 (2009).
9. Stibenz G., Steinmeyer G. *Rev. Sci. Instr.*, **77**, 073105 (2006).
10. Курилова М.В., Урюпина Д.С., Мажорова А.В., Горгуца С.Р., Волков Р.В., Косарева О.Г., Савельев А.Б. *Оптика и спектроскопия*, **107**, 459 (2009).
11. Brodeur A., Chien C.Y., Ilkov F.A., Chin S.L., Kosareva O.G., Kandidov V.P. *Opt. Lett.*, **22**, 304 (1997).
12. Mlejnek M., Wright E.M., Moloney J.V. *Opt. Lett.*, **23**, 382 (1998).
13. Trebino R., DeLong K.W., Fittinghoff D.N., Sweetser J.N., Krumbugel M.A., Richman B.A. *Rev. Sci. Instr.*, **68**, 3277 (1997).