

СВЕРХСИЛЬНЫЕ ПОЛЯ
И СВЕРХБЫСТРЫЕ ПРОЦЕССЫ

УДК 535.8

ИССЛЕДОВАНИЕ ТРАНСФОРМАЦИИ СПЕКТРА
ФЕМТОСЕКУНДНОГО ЛАЗЕРНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ
ПРИ ЕГО ФИЛАМЕНТАЦИИ В ГАЗОВОЙ СРЕДЕ

© 2009 г. М. В. Курилова, Д. С. Урюпина, А. В. Мажорова, С. Р. Горгуца,
Р. В. Волков, О. Г. Косарева, А. Б. Савельев

Физический факультет и Международный учебно-научный лазерный центр Московского государственного
университета им. М.В. Ломоносова, 119991 Москва, Россия

E-mail: kuma_hotel@mail.ru

Поступила в редакцию 22.01.2009 г.

Экспериментально исследована зависимость параметров фемтосекундного лазерного излучения (55 фс, 3.7 мДж, 800 нм) в филаменте от расстояния вдоль оси распространения филамента, диаметра диафрагмы, типа и давления газа, используемого для формирования филамента.

PACS: 42.65.Jx, 42.65.Sf, 42.65.Re

ВВЕДЕНИЕ

Явление филаментации, наблюдаемое при распространении фемтосекундного лазерного излучения в газообразных и конденсированных средах и состоящее в коллимированном распространении излучения на расстояния, существенно превышающие релеевскую длину, а также сопровождающееся образованием протяженных ионизированных каналов – нитей, известно достаточно давно. Первые работы по изучению этого явления появились еще в 90-х годах прошлого века [1—3]. В настоящее время активно исследуются возможности применения этого явления в самых разнообразных приложениях: дистанционной диагностике удаленных объектов и атмосферы, создания виртуальной плазменной антенны, защите от грозовых помех за счет принудительного разряда облаков, создании источников терагерцевого излучения, получении предельно коротких мощных оптических импульсов длительностью в несколько периодов колебаний поля и многих других (см. обзор [4] и ссылки в нем).

Особый интерес представляет наблюдающееся при филаментации сужение спектра излучения, поскольку именно с этим эффектом связан целый ряд упоминавшихся ранее перспективных приложений. Несмотря на большое количество публикаций, связанных с изучением сужения спектра, исследование пространственной динамики спектра излучения в филаменте практически не проводилось. В частности, представляет несомненный интерес вопрос о трансформации спектра вдоль филамента (в том

числе в зависимости от давления газа) в случае формирования филамента коллимированным пучком, поскольку именно такая геометрия интересна для целого ряда задач, в частности, для поиска оптимальных условий формирования сверхкоротких импульсов длительностью в несколько оптических периодов при самокомпрессии фемтосекундных импульсов в процессе филаментации в газовой среде [5—6]. В связи с этим в настоящей работе представлены результаты по исследованию трансформации спектра излучения в филаменте в зависимости от расстояния вдоль оси филамента, давления газовой среды и типа газа именно для случая предварительно коллимированного лазерного пучка.

ОПИСАНИЕ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЙ УСТАНОВКИ

В наших экспериментах использовалось излучение лазерной системы на сапфире с титаном [8]. Параметры исходного излучения были следующими: центральная длина волны 805 нм, ширина спектра FWHM 23 ± 2 нм, длительность импульса 55 ± 5 фс. Лазерная система обеспечивает энергию в импульсе до 10 мДж, частота повторения импульсов 10 Гц, стабильность по энергии 3% (среднеквадратичное отклонение), флуктуации энергии от импульса к импульсу $<10\%$. Максимальная энергия, используемая для формирования филамента, составляла 4 мДж. Выходное излучение нашей лазерной системы было слабосходящимся с диаметром пучка 1 см FWHM и качеством пучка $M^2 = 1.8 \pm 0.1$.

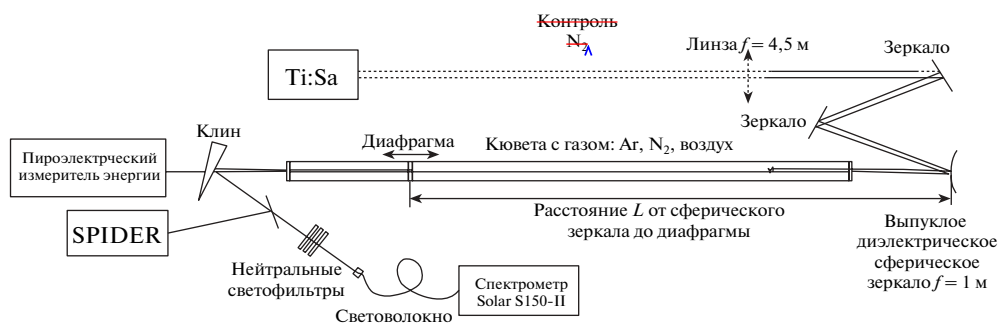


Рис. 1. Схема экспериментальной установки и система регистрации энергии и спектра.

Для формирования коллимированного пучка диаметром 1.3 ± 0.1 мм использовался телескоп, состоящий из фокусирующей линзы с фокусным расстоянием 4.56 м и выпуклого диэлектрического зеркала с фокусным расстоянием 1 м. Схема экспериментов представлен на рис. 1. Для измерения характеристик излучения вдоль оси филамента в необходимом месте в филамент помещался стеклянный клин с коэффициентом отражения от передней грани 4%. Клин перемещался в плоскости передней грани для предотвращения пробоя его поверхности. При измерении энергии импульса излучение, отраженное от передней грани клина, попадало на пирозэлектрический измеритель энергии. При измерении энергии либо регистрации спектра излучения вне диапазона 750—850 нм в измерительный тракт устанавливалось также диэлектрическое зеркало, отражающее 99.8% энергии излучения в этом диапазоне длин волн. Регистрация спектра излучения производилась с использованием волоконного спектрометра Solar S150-II, перед входом которого устанавливались калиброванные нейтральные светофильтры. При измерении характеристик излучения в приосевой области филамента в него на определенном расстоянии помещались диафрагмы диаметром 100—700 мкм, а стеклянный клин располагался на расстоянии порядка 20 см за диафрагмой.

ТРАНСФОРМАЦИЯ СПЕКТРА ИЗЛУЧЕНИЯ В ФИЛАМЕНТЕ, СОЗДАННОМ В ВОЗДУХЕ

Первая серия экспериментов была посвящена исследованию трансформации спектра излучения вдоль филамента, сформированного в воздухе на лабораторной трассе. Измерения проводились в диапазоне расстояния от 0.5 до 7 м, отсчитываемых от выпуклого зеркала вдоль оси распространения излучения. В наших условиях зарождение филамента происходило на расстоянии порядка 2.2 ± 0.5 м. С увеличением расстояния наблюдалось уширение как центральной части спектра, так и его коротковолнового крыла. Филамент исчезал на расстоянии 6—7 м от выпуклого диэлектрического зеркала. Следует отметить, что оценка длины самофокусировки согласно формуле Марбургера [9] в наших экспериментальных условиях дает заниженное значение $L_{st} \sim 60 \pm 5$ см, а с учетом фактора качества пучка M^2 получаем $L_{sf} \sim 160 \pm 25$ см, что значительно лучше соответствует экспериментально наблюдаемой величине.

На рис. 2а представлены спектры излучения в филаменте на четырех различных расстояниях от выпуклого диэлектрического зеркала. На расстоянии $L = 220$ см спектр излучения в филаменте существенно уширен, в нем также присутствует коротковолновое крыло, простирающееся до 350 нм. На расстояниях $L = 280$ и 360 см излучение в

Таблица 1. Ширина спектра излучения (по уровню $1/e^2$, в нм) в филаменте, сформированном в различных газовых средах при давлении 1 атм, в зависимости от расстояния от выпуклого диэлектрического зеркала до измерительной диафрагмы

L , см	Воздух, без диафрагмы	Воздух, диафрагма 250 мкм	Аргон, диафрагма 700 мкм	Азот, диафрагма 700 мкм
220	47 ± 5	135 ± 10		
280	50 ± 5	160 ± 10	117 ± 10	89 ± 10
360	52 ± 5	148 ± 10		
500	39 ± 5	122 ± 10		

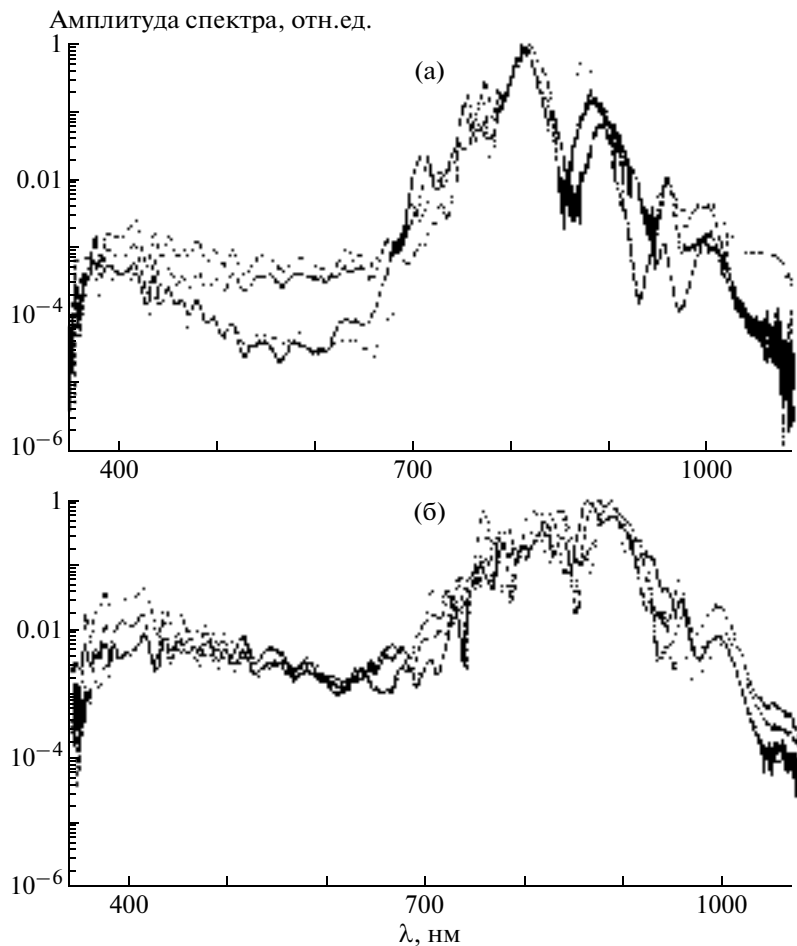


Рис. 2. Спектр излучения в филаменте, сформированном в воздухе для четырех различных расстояний от выпуклого диэлектрического зеркала вдоль оси распространения филамента: а – без использования диафрагмы, $L = 220$ (пунктир), 280 (штрихпунктир), 360 (штриховая линия), 500 см (сплошная линия); б – с использованием диафрагмы 250 мкм, $L = 220$ (сплошная линия), 280 (штриховая линия), 360 (штрихпунктир), 500 см (пунктир).

филаменте имеет максимальное уширение. Ширины спектров для этих случаев приведены в табл. 1.

Также хорошим индикатором формирования филамента является генерация излучения в коротковолновом крыле спектра. Так, на длине волны 565 нм на расстоянии 130–220 см от выпуклого диэлектрического зеркала происходит быстрое нарастание сигнала, связанное с формированием филамента. В области наиболее яркого филамента на расстояниях 250–400 см сигнал на длине волны 565 нм слабо зависит от расстояния L и имеет слабо выраженный максимум при $L = 280$ см. На расстояниях более 400 см филамент ослабевает и амплитуда спектра на длине волны 565 нм быстро уменьшается.

На рис. 3 представлена зависимость полной энергии излучения в филаменте и энергии в коротковолновом крыле спектра (длины волн < 750 нм) от расстояния от выпуклого зеркала. Видно,

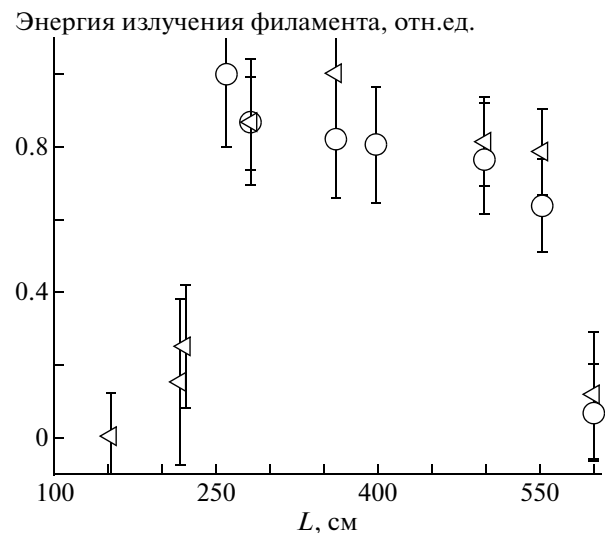


Рис. 3. Зависимости полной энергии излучения в филаменте во всем спектральном диапазоне (кружки) и энергии излучения в филаменте в спектральном диапазоне 300–750 нм (треугольники) от расстояния от выпуклого зеркала вдоль оси распространения филамента.

что полная энергия в филаменте по мере увеличения расстояния медленно убывает, а затем резко уменьшается при $L > 550$ см. Также хорошо видно, что формирование филамента происходит на расстоянии $L \sim 220$ см, на котором наблюдается быстрое нарастание энергии филамента в коротковолновом крыле. На этом же рисунке хорошо видна область максимального уширения спектра излучения филамента

Мы также исследовали пространственную динамику спектра излучения в филаменте в приосевой части, устанавливая в филамент диафрагмы диаметром от 100 до 700 мкм. На рис. 2б представлены спектры излучения в филаменте, полученные с использованием диафрагмы диаметром 250 мкм. Ширины спектров для этого случая также приведены в табл. 1. Пространственная динамика спектра филамента, полученного при использовании диафрагмы 250 мкм, качественно походит на динамику спектра филамента без использования какой-либо пространственной фильтрации пучка. Однако нетрудно видеть, что для каждого значения расстояния от выпуклого диэлектрического зеркала ширина спектра филамента при использовании диафрагмы 250 мкм существенно (в три и более раза) шире, чем без использования диафрагмы. Известно, что существенная часть энергии филамента содержится в так называемом энергетическом резервуаре, который находится в непрерывном взаимодействии с филаментом, снабжая его энергией [10, 11]. Энергетический резервуар обладает в поперечном сечении относительно оси распространения филамента диаметром 1–3 мм, значительно превышающим диаметр самого филамента (по оценкам разных авторов порядка 100–200 мкм). При этом интенсивное уширение спектра происходит только в центральной части филамента. Данный результат соответствует известным экспериментальным данным [12] и результатам, полученным при численном моделировании процесса филаментации [7].

Следует отметить схожесть форм и амплитуд коротковолнового крыла спектров, полученных с диафрагмой 250 мкм на различных расстояниях L . Вместе с тем форма коротковолновой части спектра на рис. 2а и 2б различна — коротковолновое крыло спектра излучения в филаменте на рис. 2б обладает большей относительной амплитудой, чем на рис. 2а.

ТРАНСФОРМАЦИЯ СПЕКТРА ИЗЛУЧЕНИЯ В ФИЛАМЕНТЕ, СФОРМИРОВАННОМ В АРГОНЕ

Для работы с различными газовыми средами в схему экспериментальной установки была добавлена кювета с переменной длиной от 1.5 до 4 м, наполняемая газом под давлением ≤ 1 атм. Эксперимент проводился с использованием аргона и молекулярного азота. Выбор газов был обусловлен следующими соображениями — так как воздух на 70% состоит из азота, то можно предположить, что с точки зрения формирования филамента именно азот окажется средой, наиболее приближенной к воздуху. В то же время и азот, и воздух являются молекулярными средами, что может привести к возбуждению различных колебательных и вращательных мод и к значительной перекачке энергии основного излучения в энергию этих мод. Избежать влияния молекулярных колебаний и вращений можно, используя атомарные благородные газы, например аргон. Для получения информации о параметрах филамента на желаемом расстоянии от выпуклого зеркала в кювету помещалась диафрагма диаметром 700 мкм. Поскольку диафрагма отрезает энергетический резервуар, то за диафрагмой филамент прекращается и излучение становится расходящимся. Входное и выходное окна кюветы были изготовлены из кварцевого стекла толщиной 600 мкм. В остальной схеме эксперимента соответствовала рис. 1. Измерения были выполнены с различными газами при различных давлениях от 0 до 1 атм.

На рис. 4 представлены спектры излучения в филаменте при заполнении кюветы аргоном и установке диафрагмы на расстоянии 280 см от выпуклого диэлектрического зеркала, т.е. в начале диапазона расстояний L , в котором наблюдалось наибольшее уширение центральной части спектра. Уширение спектра, соответствующее появлению филамента на расстоянии 280 см, появляется уже при давлении 0.33 атм, хотя ширина центральной части спектра еще незначительно превышает ширину спектра исходного излучения. Одновременно появляется коротковолновое крыло спектра (рис. 4б). Наблюдающееся уже при низких давлениях аргона разбиение центрального максимума спектра на два связано, по-видимому, с самовоздействием излучения на входном окне кюветы.

При увеличении давления коротковолновое крыло расширяется в область малых длин волн, возрастает его относительная амплитуда, а полный спектр заметно уширяется. Так, при давлении 0.50 атм спектр излучения по уровню $1/e^2$ уширяется практически в 1.7 раза. Максимальная

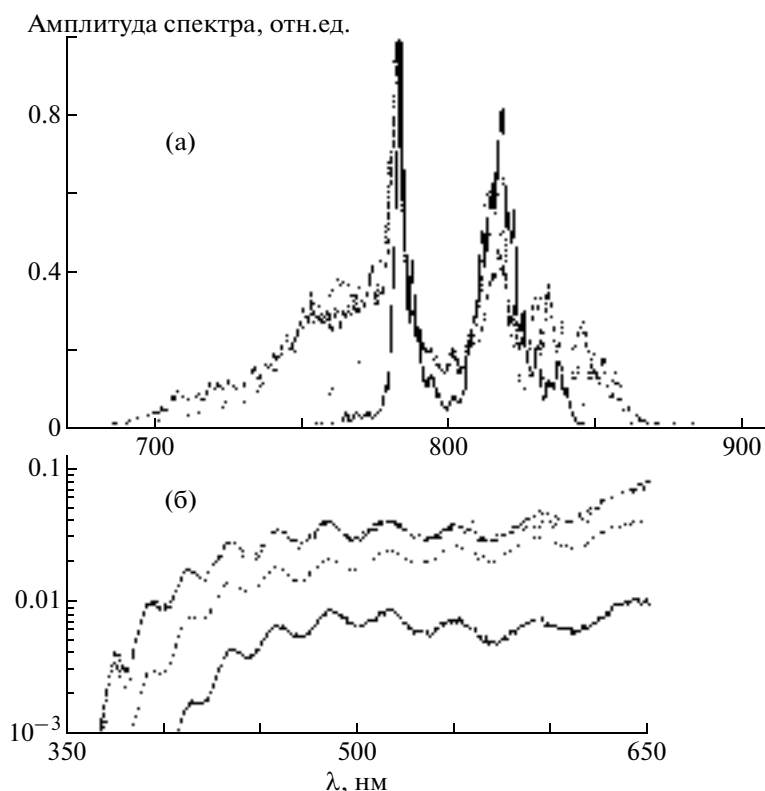


Рис. 4. Спектр излучения в филаменте на расстоянии 280 см от выпуклого диэлектрического зеркала для четырех различных значений давления аргона P в области длин волн 700–900 нм (а) и коротковолновое крыло спектра (б). Данные на рис. 4б нормированы на максимальное значение спектра при том же давлении (рис. 4а). $P = 0.5$ (сплошная линия), 0.65 (штриховая линия), 0.8 (штрихпунктир), 1 атм (пунктир).

ширина спектра наблюдается при давлении 0.8 атм и составляет 125 ± 10 нм по уровню $1/e^2$. При дальнейшем увеличении давления ширина спектра излучения в филаменте начинает уменьшаться. Так, при давлении 1 атм ширина спектра составила лишь 117 ± 10 нм, максимальная наблюдаемая длина волны коротковолнового крыла спектра увеличилась, а относительная амплитуда коротковолнового крыла уменьшилась. Это означает, что существует оптимальное давление, при котором центральная часть спектра имеет максимальную ширину.

Подобное поведение спектра излучения в филаменте в зависимости от давления газа характерно и при заполнении кюветы азотом. В этом случае спектр излучения в филаменте достигает максимальной ширины при 0.92 атм. Ширины спектров излучения в филаменте, сформированного в аргоне и азоте при различных давлениях газа, приведены в табл. 2.

ИЗМЕРЕНИЕ ДЛИТЕЛЬНОСТИ ИМПУЛЬСА, ПОЛУЧЕННОГО ПРИ САМОКОМПРЕССИИ В ФИЛАМЕНТЕ

Таким образом, максимальное уширение спектра в наших экспериментальных условиях наблюдалось при давлении газа порядка 0.8–0.9 атм. Представляет несомненный интерес оценка длительности импульса в данном режиме взаимодействия. В связи с этим нами проведены измерения спектральной фазы излучения методом SPIDER, следуя схеме, предложенной в [13].

Таблица 2. Ширина спектра излучения (по уровню $1/e^2$, в нм) в филаменте при установке диафрагмы диаметром 700 мкм на расстоянии 280 см от выпуклого диэлектрического зеркала в зависимости от давления газа

P , атм	Аргон	Азот
0.5	58 ± 5	40 ± 5
0.65	74 ± 7	69 ± 8
0.92	120 ± 10	96 ± 10
0.8	125 ± 10	83 ± 10
1	117 ± 10	89 ± 10

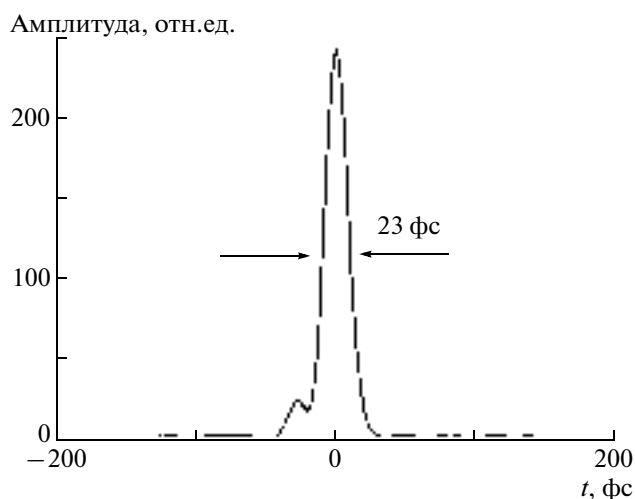


Рис. 5. Длительность импульса излучения филамента t на расстоянии 280 см от выпуклого диэлектрического зеркала, сформированного в аргоне при давлении 0.85 атм.

Для формирования опорного chirпированного пучка нами использовалась часть исходного фемтосекундного излучения, растянутая по длительности с использованием бруска из стекла SF_6 длиной 10 см. Исследовался импульс, полученный при установке в филамент диафрагмы диаметром 700 мкм на расстоянии 280 см от выпуклой линзы. Тонкая пластинка из кварцевого стекла толщиной 150 мкм служила для формирования двух реплик исследуемого импульса. Для генерации суммарной частоты использовался тонкий кристалл ВВО толщиной 50 мкм.

Временной профиль импульса, восстановленный по измерению его спектра и спектральной фазы, представлен на рис. 5. В наших экспериментальных условиях минимальная длительность импульса составила 23 ± 3 фс. Следует отметить, что длительность импульса, сформированного в филаменте, сильно зависит от размера устанавливаемой диафрагмы. Так, согласно расчетам [7], при использовании диафрагмы в 100–150 мкм возможно получение импульса с длительностью, меньшей 10 фс.

Важной особенностью полученных данных является стабилизация длительности компрессированного импульса в диапазоне давлений 0.6–0.8 атм, соответствующем максимальному уширению его спектра. Так, при малых давлениях (до 0.4 атм) длительность импульса примерно совпадает с длительностью исходного импульса, а дисперсия длительности определяется флуктуациями параметров исходного излучения (длительность, энергия, пространственная мода). При увеличении давления до 0.6 атм длительность компресси-

рованного импульса уменьшается, а разброс по длительности от реализации к реализации падает. При превышении давлением значения 0.85 атм наблюдается существенно возрастание флуктуаций формы (и длительности) “компрессированного” импульса в 5–6 раз. По-видимому, данный эффект связан с одновременным формированием нескольких филаментов за счет существенного превышения мощности излучения над критической, что и приводит к генерации нескольких достаточно коротких импульсов, различающихся по фазе и временной задержке.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Таким образом, исследовано изменение спектров фемтосекундного коллимированного излучения в условиях формирования филамента в газовых средах. Прослежено уширение спектра и поведение коротковолнового крыла спектра вдоль филамента в воздухе на лабораторной трассе от момента его возникновения до момента исчезновения. Формирование филамента сопровождается быстрым уширением спектра и появлением интенсивного коротковолнового крыла. Вдоль филамента характеристики излучения меняются незначительно, а затем в конце филамента коротковолновое крыло исчезает и центральная часть спектра начинает сужаться. Ширина спектра излучения в филаменте зависит от расстояния от центра филамента — при диафрагме 250 мкм спектр существенно шире, чем при диафрагме 3 мм.

При создании филамента в чистых газах (аргон, азот) динамика трансформации спектра аналогична описанной выше и отличается, в первую очередь, интенсивностью коротковолнового крыла и шириной центральной части спектра. Наибольшую ширину центральная часть спектра достигает при давлении аргона в 0.8–0.9 атм.

Проведенные измерения длительности импульса излучения в филаменте показали, что оптимальные условия для реализации режима самокомпрессии реализуются при давлении около 0.8 атм. В этих условиях нами наблюдалось при использовании диафрагмы 700 мкм стабильное сжатие импульса с минимальной длительностью 23 фс. Получение более коротких импульсов связано с проведением измерений с диафрагмами меньшего диаметра и оптимизацией характеристик излучения (расходимость, энергия, мощность) и газовой среды (давление) для достижения большего уширения спектра излучения.

Настоящая работа поддержана РФФИ (проект 06-02-17508а) и грантом Президента РФ для молодых кандидатов наук МК-2519.2008.2.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Braun A., Korn G., Liu X., Du D., Squier J., Mourou G. // Opt. Lett. 1995. V. 20. № 1. P. 73.
2. Nibbering E.T.J., Curley P.F., Grillon G., Prade B.S., Franco M.A., Salin F., Mysyrowicz A. // Opt. Lett. 1996. V. 21. № 1. P. 62.
3. La Fontaine B., Vidal F., Jiang Z., Chien C.Y., Comtois D., Desparois A., Johnston T.W., Kieffer J.-C., Pepin H. // Phys. Plasmas. 1999. № 6b. P. 1615.
4. Couairon A., Mysyrowicz A. // Phys. Rep. 2007. V. 441. P. 47.
5. Hauri C.P., Kornelis W., Helbing F.W., Heinrich A., Couairon A., Mysyrowicz A., Biegert J., Keller U. // Appl. Phys. B. 2004. V. 79. P. 673.
6. Stibenz G., Zhavoronkov N., Steinmeyer G. // Opt. Lett. 2006. V. 31. № 2. P. 274.
7. Kosareva O.G., Panov N.A., Uryupina D.S., Kuri-lova M.V., Mazhorova A.V., Savel'ev A.B., Volkov R.V., Kandidov V.P., Chin S.L. // Appl. Phys. B. 2008. V. 91. P. 35.
8. Большаков В.В., Воробьев А.А., Волков Р.В., Князь-ков В.А., Еремин Н.В., Пасхалов А.А., Шевелько А.П., Казаков Е.Д., Романовский М.Ю., Савельев А.Б. // Прикладная физика. 2009. № 1. С. 18.
9. Marburger J.H. // Prog. Quant. Electron. 1975. V. 4. P. 35.
10. Brodeur A., Chien C.Y., Ilkov F.A., Chin S.L., Kosareva O.G., Kandidov V.P. // Opt. Lett. 1997. V. 22. № 5. P. 304.
11. Mlejnek M., Wright E.M., Moloney J.V. // Opt. Lett. 1998. V. 23. № 5. P. 382.
12. Zairl A., Guandalini A., Schapper F., Holler M., Biegert J., Gallmann L., Keller U., Couairon A., Franco M., Mysyrowicz A. // Opt. Expr. 2007. V. 15. № 9. P. 5394.
13. Stibenz G., Steinmeyer G. // Rev. Sci. Instr. 2006. V. 77. P. 073105.