

Филаментация тераваттных лазерных импульсов на стометровой атмосферной трассе

Д.В. Апе́ксимов, А.А. Землянов, А.Н. Иглакова, А.М. Кабанов, О.И. Кучинская, Г.Г. Матвиенко, В.К. Ошлаков, А.В. Петров*

*Институт оптики атмосферы им. В.Е. Зуева СО РАН
634021, г. Томск, пл. Академика Зуева, 1*

Поступила в редакцию 21.01.2015 г.

Представлены результаты экспериментов по исследованию филаментации тераваттных фемтосекундных импульсов Ti:Sapphire-лазера на атмосферной трассе длиной 106 м с использованием различной пространственной фокусировки и мощности импульсов. Показана высокая эффективность управления положением и протяженностью области филаментации изменением начальной фокусировки лазерного пучка. Получены зависимости длины и положения области филаментации от начальной степени фокусировки и мощности импульсов, количества филаментов вдоль области филаментации. Проведено сравнение полученных данных о длине области филаментации и количестве филаментов с результатами проведенных нами ранее экспериментов и данными других авторов.

Ключевые слова: лазерное излучение, филаментация, фемтосекундный импульс, жидкость, спектр; laser radiation, filamentation, femtosecond pulse, liquid, spectrum.

Задача формирования области множественной филаментации на заданном удалении от источника, имея в виду дистанции в сотни и тысячи метров, является актуальной в области фемтосекундной атмосферной оптики, включающей в себя как задачи зондирования, так и задачи транспортировки экстремально высоких значений интенсивности световых полей. Среди методов управления положением области филаментации (ОФ) основными являются: изменение мощности лазерного импульса, пространственная и временная фокусировка, вариации начального поперечного профиля интенсивности пучка, в том числе с использованием адаптивного управления [1].

В настоящей статье представлены результаты экспериментальных исследований пространственных характеристик области множественной филаментации на стометровой контролируемой по всей длине трассе в условиях управления положением и длиной ОФ с использованием переменной начальной пространственной фокусировки и изменением энергии импульса. Схема эксперимента изображена на рис. 1. В качестве фокусирующего элемента применялся зеркальный телескоп Галилея.

На рис. 1, а изображена филаментация фемтосекундного импульса на трассе. Свечение наблюдается в красной области спектра. Фотоснимок цветных колец на экране в конце трассы представлен на рис. 1, б. Цвет колец изменяется от красного в центре пучка до синего на периферии пучка, что указывает на филаментацию вдоль трассы. На рис. 1, в показаны ожоги на фотобумаге от филаментов в центре области филаментации.

На рис. 2, 3 приведены результаты измерений ОФ для случаев управления дальностью начала филаментации с использованием начальной пространственной фокусировки (рис. 2) и энергией импульса (рис. 3). Видно, что увеличение базы телескопа в диапазоне нескольких сантиметров (увеличение остроты фокусировки) дает возможность перемещать начало филаментации и всю ОФ по всей длине стометровой трассы. Изменение энергии, а следовательно мощности импульса, также позволяет варьировать положение ОФ, но при этом увеличение дальности ОФ от источника сопровождается существенным уменьшением количества филаментов (рис. 4). На рис. 3 также нанесена зависимость дистанции начала филаментации, рассчитанная по формуле J.H. Marburger [2], для нелинейного фокуса

$$F_n = 0,734 L_R [(\eta^{1/2} - 0,852)^2 - 0,0219]^{-1/2},$$

где $L_R = \pi r_0^2 / \lambda$ — длина Рэлея, r_0 — радиус пучка; $\eta = P_0 / P_{cr}$ — безразмерная мощность импульса, P_0 — мощность импульса, $P_{cr} = 3,77 \lambda^2 / 8 \pi n_0 n_2$ — критичес-

* Дмитрий Владимирович Апе́ксимов (apeximov@iao.ru); Александр Анатольевич Землянов (zaa@iao.ru); Анастасия Николаевна Иглакова (ian@iao.ru); Андрей Михайлович Кабанов (kam@iao.ru); Олеся Ивановна Кучинская (koi@iao.ru); Геннадий Григорьевич Матвиенко (megg@iao.ru); Виктор Константинович Ошлаков (ovk@iao.ru); Алексей Вадимович Петров (rav@iao.ru).

кая мощность самофокусировки (для воздуха и $\lambda = 800$ нм $P_{cr} = 3,2$ ГВт), n_0 – показатель преломления среды, n_2 – нелинейный коэффициент преломления.

Видно, что экспериментальные и расчетные значения хорошо согласуются в области малых энергий (мощностей) импульса, когда количество филаментов в пучке невелико. С увеличением мощности, а следовательно при реализации множественной филаментации, измеренные значения координаты начала филаментации существенно меньше рассчитанных, т.е. филаменты формируются раньше, чем прогнозируется моделью. Это, возможно, связано с тем, что для множественной филаментации формула J.H. Marburger применима не для всего пучка, а для его отдельных областей, в которых формируется одиночный филамент.

Измерения количества филаментов в поперечном сечении лазерного пучка показали, что оно неоднородно вдоль длины ОФ. В начале ОФ насчитывается несколько филаментов, затем их количество возрастает примерно до двух десятков к центру ОФ, а после снова снижается (см. рис. 4).

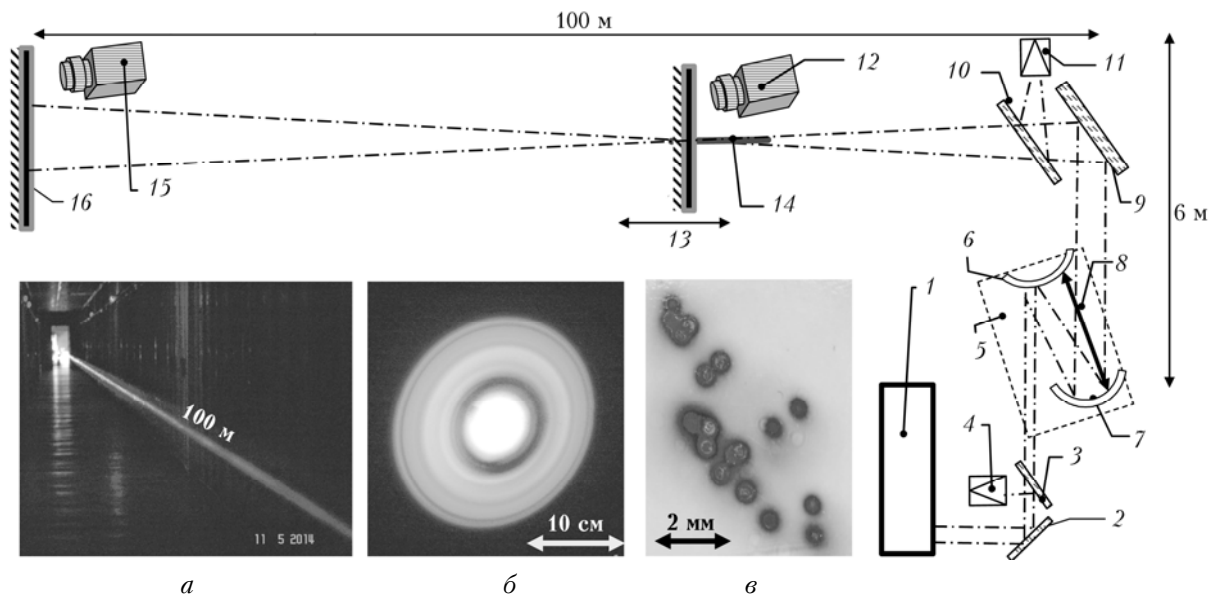


Рис. 1. Принципиальная схема эксперимента: 1 – Ti:Sapphire-лазерный комплекс, длительность импульса $t = 30$ фс, энергия импульса $E < 80$ мДж, $P < 2,5$ ТВт, длина волны $\lambda = 800$ нм, частота повторения импульсов $\nu = 10$ Гц, диаметр пучка по уровню e^{-2} $d = 2,5$ см (после телескопа $d = 5$ см); 2, 3, 9, 10 – поворотные пластины; 4 – измеритель длительности импульса (автокоррелятор); 5 – телескоп Галилея; 6 – дефокусирующее зеркало $F_1 = -50$ см; 7 – фокусирующее зеркало $F_2 = 100$ см; 8 – переменная база телескопа (расстояние между зеркалами $b = 50$ см соответствует коллимированному пучку); 11 – измеритель энергии импульса OPHIR-II; 12, 15 – CCD-камеры, фотокамеры, видеокамеры; 13 – подвижный экран для регистрации положения области филаментации; 14 – область филаментации; 16 – неподвижный экран в конце трассы; а – лазерный пучок на трассе (филаментация в начале трассы); б – структура пучка на экране в конце трассы; в – мелкомасштабная структура пучка на подвижном экране в области филаментации на трассе (в центре кольцевой полихромной структуры)

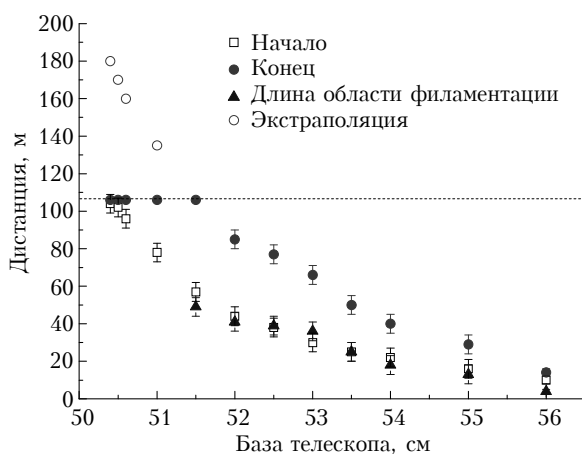


Рис. 2. Координаты начала, конца и длины области филаментации в зависимости от базы (фокусного расстояния телескопа)

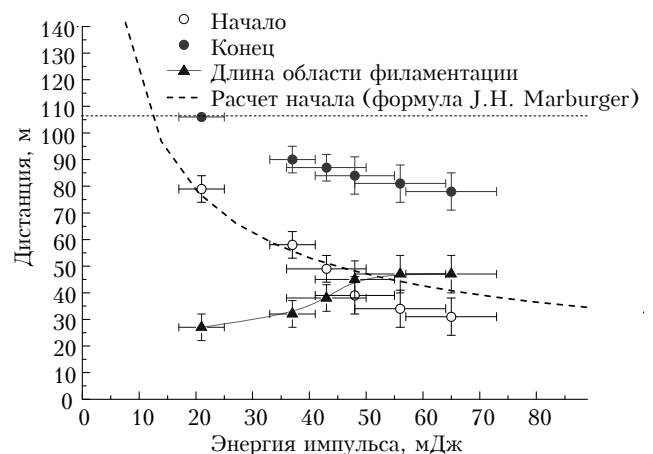


Рис. 3. Координаты начала, конца и длины области филаментации коллимированного пучка в зависимости от энергии лазерного импульса

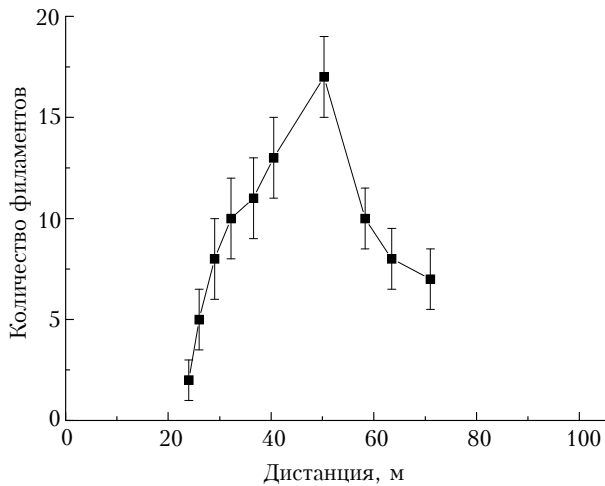


Рис. 4. Количество филаментов в поперечном сечении пучка на атмосферной трассе для коллимированного пучка с энергией импульса 82 мДж

Зависимость максимального количества филаментов от относительной мощности импульса представлена на рис. 5. Наблюдаемая тенденция возрастания количества филаментов в пучке согласуется с полученными нами ранее данными [3, 4], а также данными других авторов [5–7].

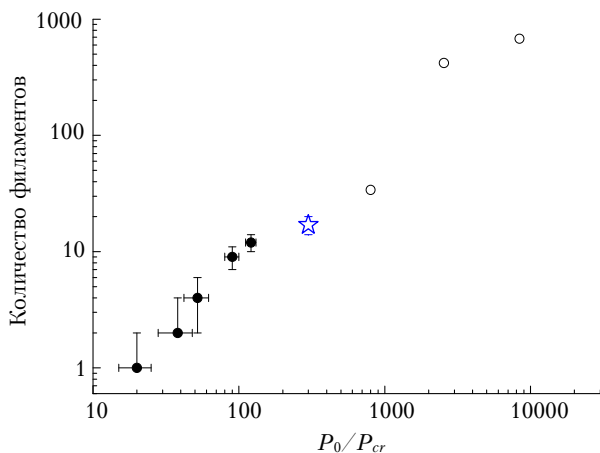


Рис. 5. Зависимость количества филаментов от относительной мощности импульса. Темные точки – данные [3, 4], светлые точки – данные [5–7], звездочка – данные настоящей работы

Анализ результатов настоящей работы, а также данных, полученных нами ранее [8–11] по длине области филаментации, показывает (рис. 6), что увеличение остроты фокусировки приводит к сокращению длины ОФ, росту мощности импульса при заданной числовой апертуре пучка ($NA = r_0/F$, где F – длина геометрического пучка), увеличивает протяженность области филаментации при существенном уменьшении количества филаментов.

Таким образом, по результатам проведенных экспериментов показана эффективность управления положением области множественной филаментации протяженностью в десятки метров с использованием начальной пространственной фокусировки пучка

на стометровых атмосферных трассах, содержащей десятки филаментов в поперечном сечении пучка, локализованных на сантиметровых площадках.

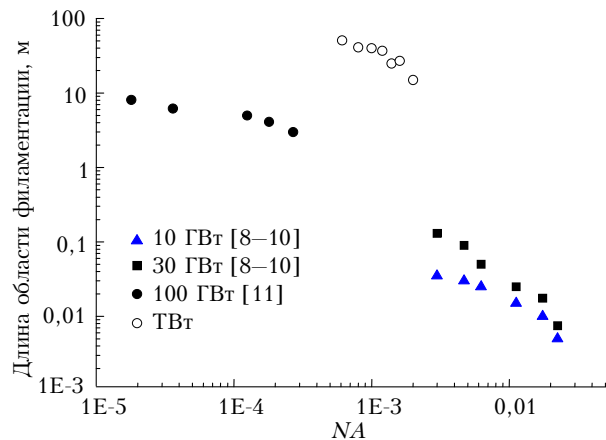


Рис. 6. Данные различных [8–11] экспериментов и настоящей работы (светлые точки) по исследованию длины области множественной филаментации в воздухе в зависимости от числовой апертуры пучка для различных мощностей импульсов

Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта № 14-28-02023 офн_м.

1. Гейнц Ю.Э., Землянов А.А., Кабанов А.М., Матвиенко Г.Г. Нелинейная фемтосекундная оптика атмосферы / Под общ. ред. А.А. Землянова. Томск: Изд-во ИОА СО РАН, 2010. 212 с.
2. Marburger J.H. Self-focusing: Theory // Prog. Quant. Electron. 1975. V. 4, part 1. P. 35–110.
3. Алексимов Д.В., Гейнц Ю.Э., Землянов А.А., Кабанов А.М., Матвиенко Г.Г., Степанов А.Н. Филаментация негауссовских лазерных пучков с различной геометрической расходимостью на атмосферной трассе // Оптика атмосф. и океана. 2012. Т. 25, № 11. С. 929–935.
4. Гейнц Ю.Э., Землянов А.А., Кабанов А.М., Матвиенко Г.Г., Степанов А.Н. Экспериментальные исследования филаментации мощного ультракороткого лазерного излучения с начальной геометрической расходимостью в воздухе // Квант. электрон. 2013. Т. 43, № 4. С. 350–356.
5. Béjot P., Bonacina L., Extermann J., Moret M., Wolf J.-P., Ackermann R., Lascoux N., Salamé R., Salmon E., Kasparian J., Bergé L., Champeaux S., Guet C., Blanchot N., Bonville O., Boscheron A., Canal P., Castaldi M., Hartmann O., Lepage C., Marmande L., Mazataud E., Mennerat G., Patissou L., Prevot V., Raffestin D., Ribolzi J. 32 TW atmospheric white-light laser // App. Phys. Lett. 2007. V. 90, iss. 15. P. 151106-1–151106-4.
6. Couairon A., Myzyrowicz A. Femtosecond filamentation in transparent media // Phys. Reports. 2007. V. 441, N 2–4. P. 47–189.
7. Daigle J.-F., Kosareva O., Panov N., Wang T.-J., Hosseini S., Yuan S., Roy G., Chin S.L. Formation and evolution of intense, post-filamentation, ionization-free low divergence beams // Opt. Commun. 2011. V. 284, iss. 14. P. 3601–3606.
8. Гейнц Ю.Э., Голик С.С., Землянов А.А., Кабанов А.М., Матвиенко Г.Г. Влияние размера светового пучка на

- длину филамента, созданного мощным фемтосекундным лазерным излучением в воздухе // Квант. электрон. 2014. Т. 44, № 5. С. 489–497.
9. *Apeksimov D.V., Bykova E.E., Geints Yu.E., Zemlyanov A.A., Kabanov A.M., Matvienko G.G., Oshlakov V.K., Petrov A.V., Bukin O.A., Ilyin A.A., Sokolova E.B., Golik S.S.* Filamentation of a focused Ti:Sapphire-laser pulse at two harmonics in air // Plasma Phys. Rep. 2013. V. 39, N 13. P. 1074–1081.
10. *Апексимов Д.В., Букин О.А., Быкова Е.Е., Гейнц Ю.Э., Голик С.С., Землянов А.А., Кабанов А.М., Матвиенко Г.Г.* Длина филаментации мощного остро сфокусированного фемтосекундного лазерного излучения в воздухе. Влияние размера светового пучка // Оптика атмосфер. и океана. 2013. Т. 26, № 3. С. 247–252.
11. *Апексимов Д.В., Букин О.А., Быкова Е.Е., Голик С.С., Землянов А.А., Кабанов А.М., Кучинская О.И., Матвиенко Г.Г., Ошлаков В.К., Петров А.В., Соколова Е.Б.* Пространственные характеристики области филаментации гигаваттных лазерных импульсов при их различной фокусировке на атмосферной трассе // Оптика атмосфер. и океана. 2014. Т. 27, № 12. С. 1042–1046.

D.V. Apeksimov, A.A. Zemlyanov, A.N. Iglakova, A.M. Kabanov, O.I. Kuchinskaya, G.G. Matvienko, V.K. Oshlakov, A.V. Petrov. **Filamentation of terawatt laser pulses on a hundred-meter atmospheric path.**

The results of experiments filamentation of terawatt femtosecond pulses of a Ti:Sapphire laser at atmospheric path length of 106 m using different spatial focus and power pulses are presented. The high efficiency control for the position and length of the field filamentation change the initial focus of the laser beam. The dependences of the length and position of filamentation on the initial degree of focus and power of the pulses, the number of filaments along the filamentation region are found. The obtained data on the length of the filamentation region and the number of filaments with the results of earlier experiments and data of other authors were compared.