

УДК 530.182.551.510.42+535.621.33

*Д.В. АПЕКСИМОВ\**, *О.А. БУКИН\*\**, *С.С. ГОЛИК\*\*\**, *А.А. ЗЕМЛЯНОВ\**, *А.Н. ИГЛАКОВА\**, *А.М. КАБАНОВ\**,  
*О.И. КУЧИНСКАЯ\*\*\*\**, *Г.Г. МАТВИЕНКО\**, *В.К. ОШЛАКОВ\**, *А.В. ПЕТРОВ\**, *Е.Б. СОКОЛОВА\**

## **МНОЖЕСТВЕННАЯ ФИЛАМЕНТАЦИЯ ЛАЗЕРНЫХ ИМПУЛЬСОВ В СТЕКЛЕ<sup>1</sup>**

Представлены результаты экспериментов по исследованию пространственных характеристик области множественной филаментации гига и тераваттных импульсов Ti:Sapphire лазера в стекле. Получены зависимости координаты начала области филаментации, количества филаментов, их распределения вдоль оси лазерного пучка, длины филаментов от мощности импульса. Показано, что количество филаментов вдоль области множественной филаментации имеет унимодальное распределение. Показано, что с увеличением мощности излучения длина отдельных филаментов в области множественной филаментации уменьшается, а их диаметр имеет квазипостоянное значение при всех величинах мощности, реализованных в экспериментах. Показано, что область филаментации, при достижении определенной мощности лазерного импульса, имеющего гауссово распределение плотности энергии, приобретает форму полого конуса, направленного вершиной к источнику излучения.

**Ключевые слова:** лазерное излучение, фемтосекундный импульс, самофокусировка, множественная филаментация, стекло.

### **Введение**

Самофокусировка и филаментации лазерного излучения являются привлекательными объектами исследований, поскольку сопровождающие их эффекты – локализация световой энергии, генерация суперконтинуума, плазмообразование имеют перспективы применения в задачах атмосферной оптики, оптики океана, нанооптике. В настоящее время достаточно подробно исследован и промоделирован процесс формирования одиночных филаментов в средах с различной степенью кубичной нелинейности – воздухе, воде, стекле и т.д., когда реализуется самофокусировка всего лазерного пучка [1-3]. При множественной филаментации процесс самофокусировки и филаментации пока количественно не описан. В проводимых ранее экспериментах с прозрачными твердыми средами в основном исследовалась филаментация сфокусированных в объем среды излучения, например [4-6], при этом количественные данные об эволюции области филаментации и отдельных филаментов в ней в зависимости от мощности импульса отсутствуют. В настоящей работе множественная филаментация коллимированных пучков исследуется в модельной среде с сильной кубичной нелинейностью, позволяющей визуально исследовать пространственные характеристики множественной филаментации.

### **Схема и методика эксперимента**

В экспериментах использовалось лазерное излучение Ti:Sapphire-лазера на основной гармонике. Схема эксперимента и характеристики излучения представлены на рис. 1. Лазерный импульс от источников (1а,б) направлялся на образец (9) стекла ВК7, для которого коэффициент кубичной нелинейности  $n_2 = 3,5 \cdot 10^{-16} \text{ см}^2/\text{Вт}$ , критическая мощность самофокусировки  $P_{кр} = 2 \text{ МВт}$ , испытывал в нем самофокусировку, и при достижении энергии импульса  $\sim 2 \text{ мДж}$  (44 ГВт), область филаментации формировалась внутри образца. Уменьшение диаметра пучка для источника 1б с 25 мм до 11 мм достигалось телескопированием пучка с использованием фокусирующего и дефокусирующего зеркал (18). Регистрация области филаментации (ОФ) проводилась CCD-камерой (12), расположенной на позиционере (13), позволявшем проводить последовательную съемку всей области филаментации с длиной обзора внутри образца 25 мм.

<sup>1</sup> Работа выполнена при финансовой поддержке Российского научного фонда (соглашение 15-17-10001).

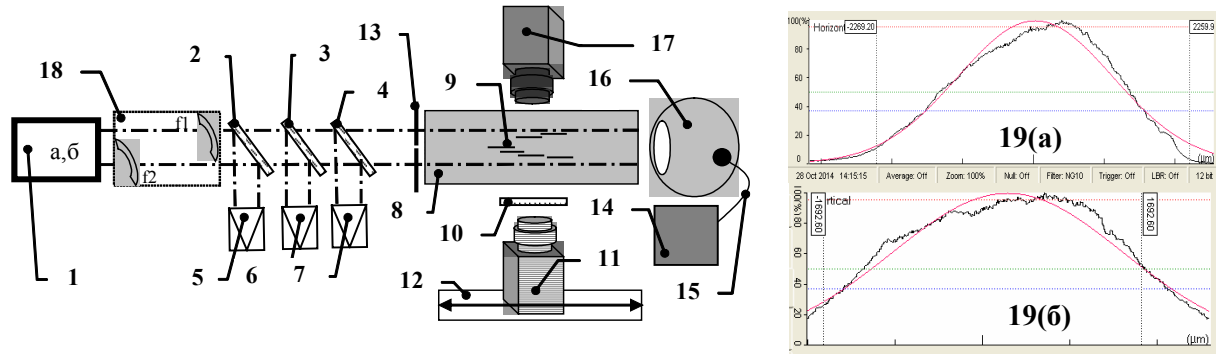


Рис. 1. Схема эксперимента. 1 – (а) лазерная система (Spitfire Pro 40F, Spectra Physics):  $\lambda = 800$  нм,  $E < 5$  мДж, частота следования импульсов  $\nu = 1$  кГц,  $t_u = 45$  фс, диаметр пучка  $d = 7$  мм ( $e^{-2}$ ); (б) - лазерная система (Авеста-Проект)  $\lambda = 800$  нм,  $E < 45$  мДж,  $\nu = 10$  Гц,  $t_u = 50$  фс, диаметр пучка  $d$  на входе в образец 25 и 11 мм ( $e^{-2}$ ); 2,3,4 – поворотные пластины; 5 - автокоррелятор PSCOUT PL-SP-LF, Spectra Physics; 6 – измеритель энергии Spectra Physics 407A; 7 – измеритель профиля пучка LBP2-HR-VIS (Ophir); 8 – стекло (длина, ширина, высота = 800, 40, 40 мм); 9 – область филаментации; 10 – светофильтр; 11 – CCD-камера «ANDOR-Clara E», с объективом HELIOS-44M 2/58 на позиционере M-IMS Newport (12); 13 – вертикальная щель 2 мм; 14 – спектрометр Maya-2000PRO; 15 – световод; 16 – интегрирующая сфера (Newport 819C-SF-6); 17 – фотоаппарат Pentax K-3 с макрообъективом Pentax100MacroWR; 18 – съемный телескоп ( $f_1=100$ мм,  $f_2=-50$ мм); 19 - структура лазерного пучка в горизонтальной (а) и вертикальной (б) плоскости

### Результаты эксперимента

Примеры полученных изображений представлены на рис. 2(а,б). Область филаментации наблюдается в виде светящихся в сине-зеленой области спектра треков, каждый из которых соответствует отдельному филаменту. Количество треков в области филаментации возрастает с увеличением энергии (мощности) и, при достижении значений мощности  $\sim 10^5 P_{кр}$ , принимает форму полого конуса или параболоида направленного вершиной к источнику излучения, т.е. зеркально повторяющего распределение интенсивности в поперечном сечении пучка (см. рис. 1, позиция 19(а,б)).

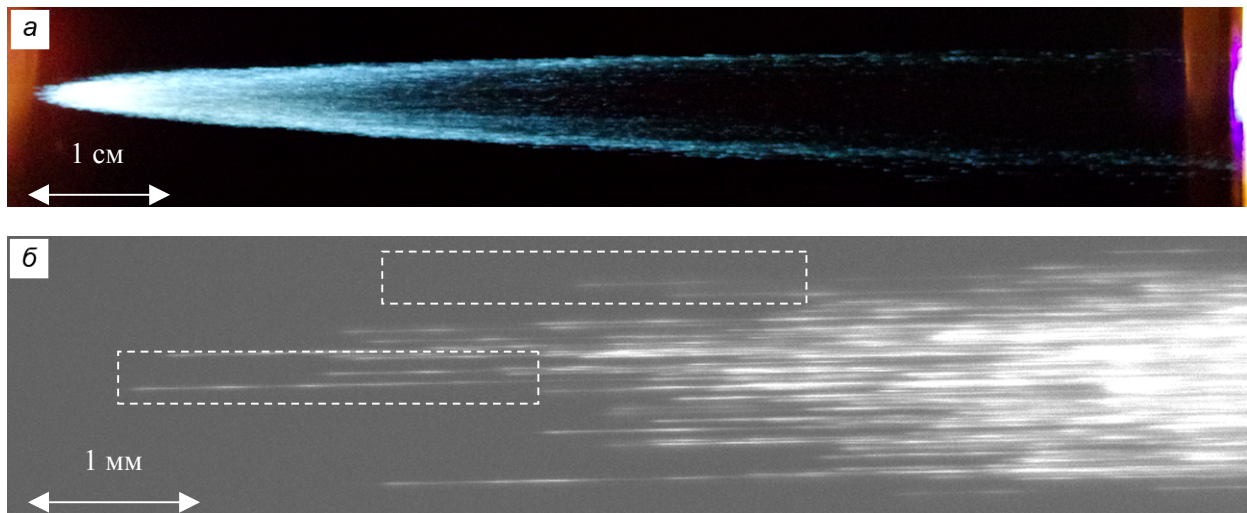


Рис. 2 а - фотографии области филаментации при энергии лазерного импульса 40 мДж (2 ТВт); б – треки в начале области филаментации, энергия импульса 41 мДж. Излучение – слева направо

Практически на всех снимках в начале области филаментации наблюдаются «пульсирующие» треки (рис. 2, б). Подобная конфигурация треков не может быть результатом регистрации действия нескольких лазерных импульсов при частоте их следования 10 Гц, экспозиции камеры 100 мс и времени затухания свечения треков  $\ll 10^{-1}$  с. Возможна регистрация треков, имеющих одинаковую координату по вертикали, но расположенных на разных расстояниях от камеры, но это маловероятно в начале области филаментации, где концентрация филаментов еще мала. Возможно,

также, что зарегистрированы повторные фокусировки (рефокусировки) первичных филаментов, которые ранее наблюдались при филаментации в воздухе, например в [7]. В этом случае, из анализа полученных снимков (1516 шт.), можно констатировать следующее: рефокусировки появляются при мощности импульса  $> 300$  ГВт (для диаметра пучка 11 мм), количество рефокусировок первичного филамента возрастает с ростом мощности и для максимальной в эксперименте мощности 0,9 ТВт достигает 5. Рефокусировка реализуется на пространственном масштабе сравнимым с длиной филамента, т.е.  $\sim 0,2$  мм.

В качестве характеристик ОФ исследовались следующие: начало области филаментации  $L_{ноф}$ , как расстояние от передней грани образца до первого регистрируемого светящегося трека; длина области филаментации  $L_{оф}$ , общее количество филаментов  $N_{ф.общ}$ , количество филаментов в области максимума их распределения вдоль ОФ  $N_{ф.макс}$ , длина филаментов  $L_{ф}$ . Измеренные зависимости выбранных характеристик от мощности лазерного импульса представлены на рис. 3–7.

На графике рис. 3 представлено распределение количества филаментов вдоль области филаментации для различных значений энергии (мощности) лазерного импульса. Видно, что распреде-

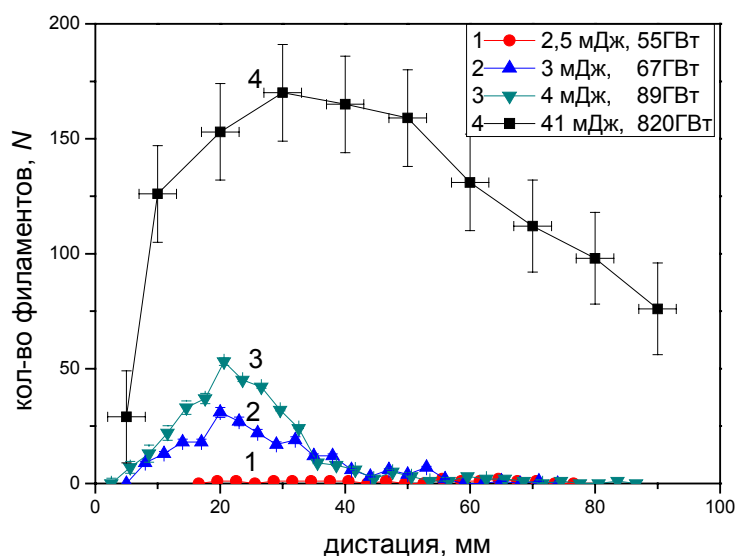


Рис. 3. Распределение филаментов вдоль области филаментации для различных значений энергий (мощности) лазерного импульса

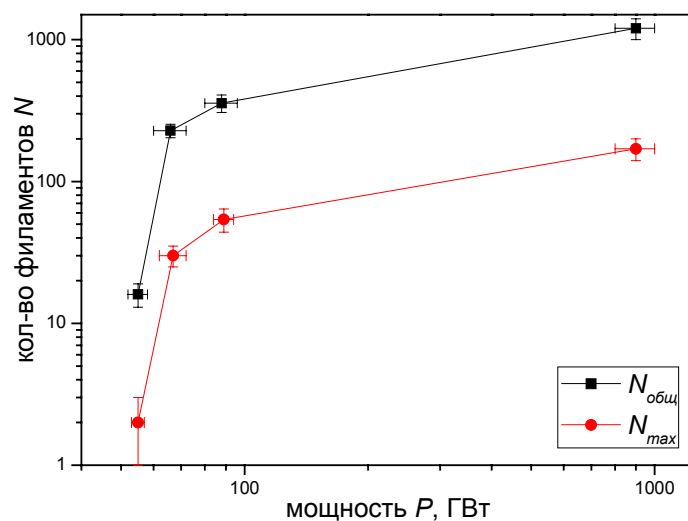


Рис. 4. Зависимость общего количества филаментов  $N_{ф.общ}$  и количества филаментов в максимуме распределения  $N_{ф.макс}$  от мощности лазерного импульса

ление имеет максимум, величина и положение которого существенно зависят от мощности импульса. Такая же зависимость регистрировалась нами ранее при множественной филаментации в воздухе и воде [8, 9]. Начало области филаментации  $L_{ноф}$  с увеличением мощности смещается в сторону источника (рис. 3, 5), как и предсказывает теория [1], но при этом экспериментальные значения на несколько порядков меньше рассчитанных. Увеличение диаметра пучка приводит к удалению координаты начала филаментации от источника. Общее количество филаментов в области множественной филаментации и количество филаментов в максимуме их распределения вдоль направления распространения излучения возрастают с увеличением мощности (рис. 3, 4).

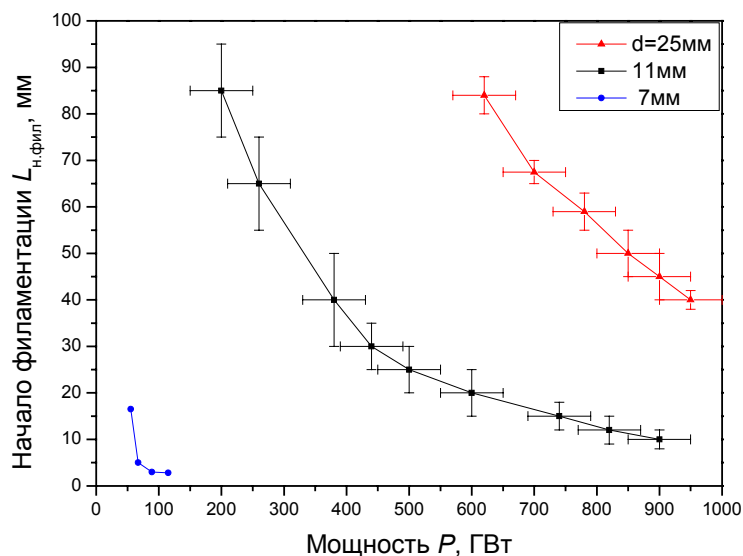


Рис. 5. Зависимость начала ОФ  $L_{ноф}$  для пучков различного диаметра от мощности лазерного импульса

Средняя длина отдельных филаментов  $L_{ф}$  сокращается более чем на порядок при увеличении мощности с 50 до 900 ГВт (рис. 6). Длина области филаментации увеличивается с ростом мощности импульса (рис. 7), так же как для воды и воздуха [8, 9]. Трансформация спектра излучения при его филаментации в стекле иллюстрируется на рис. 8.

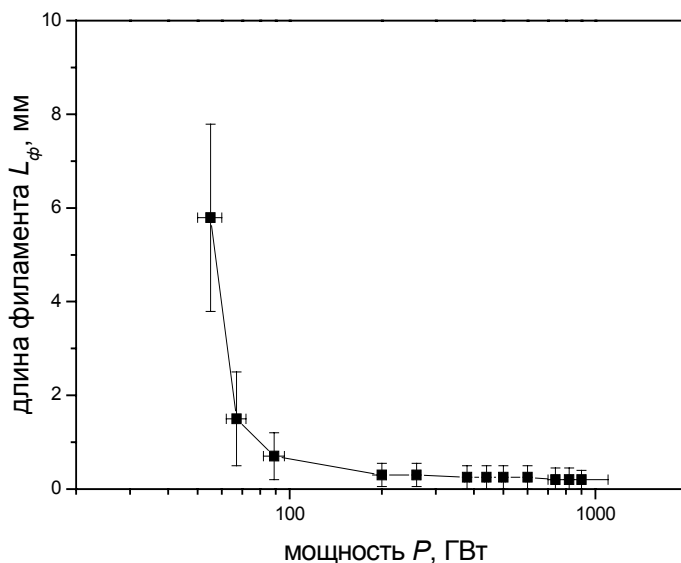


Рис. 6. Зависимость длины филамента  $L_{ф}$  в зависимости от мощности лазерного импульса

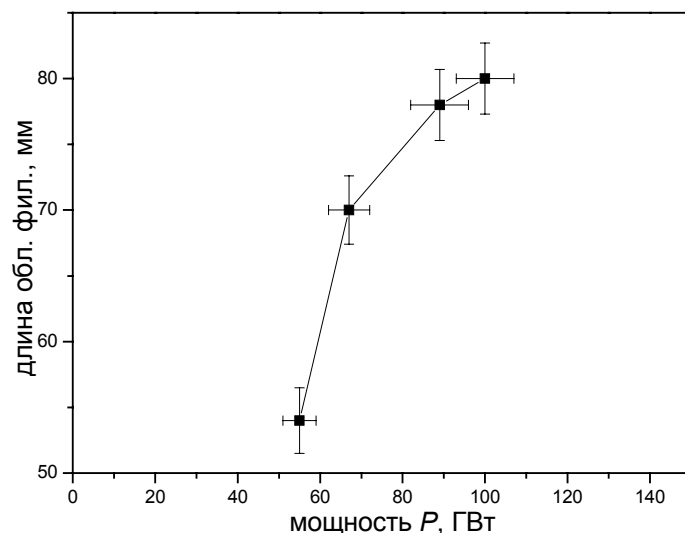


Рис. 7. Зависимость длины ОФ  $L_{of}$  от мощности лазерного импульса

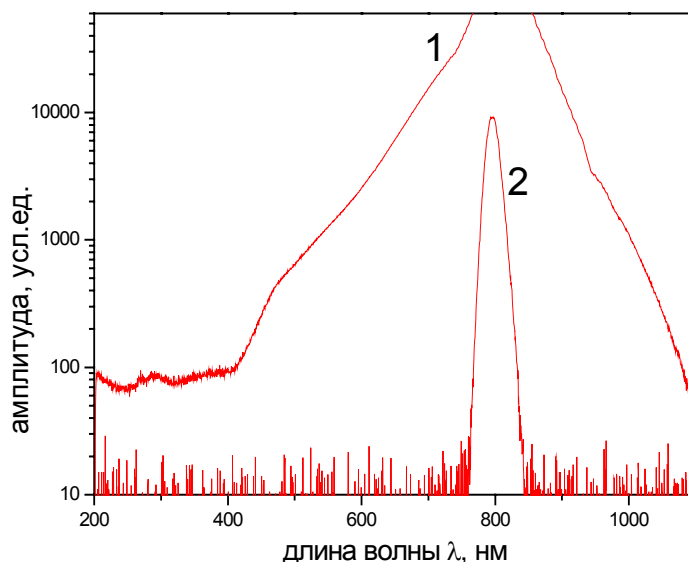


Рис. 8. Спектр лазерного импульса с энергией 40 мДж после филаментации в стекле (1) и 1 мДж без филаментации в стекле (2)

### Заключение

В экспериментах по филаментации лазерных пучков с гауссовым профилем в среде с сильной керровской нелинейностью показано, что с увеличением мощности импульса область множественной филаментации увеличивается в длине и диаметре, распределение филаментов в продольном направлении области филаментации имеет максимум. При достижении значений мощности  $> 10^5 P_{кр}$  область филаментации приобретает форму полого конуса, направленного вершиной к источнику лазерного излучения. Средняя длина отдельных филаментов сокращается при увеличении мощности импульса, сохраняя при этом практически одинаковый диаметр.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Marburger J. H. // Prog. Quant. Electr. 1975. V. 4, part 1. P. 35–110.
2. Гейнц Ю. Э., Землянов А. А. // Оптика атмосферы и океана. 2010. Т. 23. № 9. С. 749-756.
3. Гейнц Ю. Э., Землянов А. А. // Оптика атмосферы и океана. 2010. Т. 23. № 9. С. 757-760.
4. Мартынович Е. Ф., Кузнецов А. В., Кирпичников А. В. и др. // Квантовая электроника. – 43:5 (2013), 463–466.

5. Дергачев А.А., Кадан В.Н., Шлёнов С.А. // Квантовая электроника. – 2012. – Т. 42, №2. — С. 125–129.
6. Кульчин Ю.Н., Витрик О.Б., Чехленок А.А. и др. // Квант. электрон., 43:12 (2013), 1118–1121.
7. Brodeur A., Chien C.Y., Ilkov F.A., et al. // Optics Letters 22, 304 (1997).
8. Апексимов Д.В., Букин О.А., Быкова Е.Е. и др. // Оптика атмосферы и океана. 2014. Т.27. №11, С. 957-960.
9. Апексимов Д.В., Землянов А.А., Иглакова А.Н. и др. // Оптика атмосферы и океана. 2015. Т. 28. № 03. С. 274-277.

\*Институт оптики атмосферы им. В.Е. Зуева СО РАН, г. Томск, Россия

Поступила в редакцию 31.07.15.

\*\*Институт автоматки и процессов управления ДВО РАН,

г. Владивосток, Россия

\*\*\*Дальневосточный федеральный университет, г. Владивосток, Россия

\*\*\*\*Национальный исследовательский Томский государственный университет,

г. Томск, Россия

Апексимов Дмитрий Владимирович, к.ф.-м.н., ст. науч. сотр., e-mail: ;  
 Букин Олег Алексеевич, д.ф.-м.н., гл. науч. сотр., e-mail: ;  
 Голик Сергей Сергеевич, к.ф.-м.н., зав.лабораторией, e-mail: ;  
 Землянов Александр Анатольевич, д.ф.-м.н., проф., зав. лабораторией, e-mail: ;  
 Кабанов Андрей Михайлович, д.ф.-м.н., гл. науч. сотр., e-mail: ;  
 Иглакова Анастасия Николаевна, программист, e-mail: ;  
 Кучинская Олеся Ивановна, аспирантка, e-mail: OlesyaTSU14@mail.ru;  
 Матвиенко Геннадий Григорьевич, д.ф.-м.н., директор, e-mail: ;  
 Ошлаков Виктор Константинович, к.ф.-м.н., ст. науч. сотр., e-mail: ;  
 Петров Андрей Вадимович, мл. науч. сотр., e-mail: ;  
 Соколова Екатерина Борисовна, к.ф.-м.н., науч. сотр., e-mail: .