

НЕЛИНЕЙНЫЕ ОПТИЧЕСКИЕ ЯВЛЕНИЯ В АТМОСФЕРЕ И ОКЕАНЕ

УДК 530.182.551.510.42+535.621.33

Множественная филаментация коллимированного лазерного излучения в воде и стекле

Д.В. Апексимов¹, С.С. Голик^{2,3}, А.А. Землянов¹, А.Н. Иглакова¹,
А.М. Кабанов¹, О.И. Кучинская^{1,4}, Г.Г. Матвиенко^{1,4}, В.К. Ошлаков¹,
А.В. Петров¹, Е.Б. Соколова^{1*}

¹Институт оптики атмосферы им. В.Е. Зуева СО РАН
634055, г. Томск, пл. Академика Зуева, 1

²Институт автоматики и процессов управления Дальневосточного отделения РАН
690041, г. Владивосток, ул. Радио, 5

³Дальневосточный федеральный университет
690950, г. Владивосток, ул. Суханова, 8

⁴Национальный исследовательский Томский государственный университет
634050, г. Томск, пр. Ленина, 36

Поступила в редакцию 25.08.2015 г.

Представлены результаты экспериментов по исследованию пространственных характеристик области множественной филаментации гига- и тераваттных импульсов Ti:Sapphire-лазера в стекле и воде. Получены зависимости координаты начала области филаментации, количества филаментов, их распределения вдоль оси лазерного пучка, средней длины филаментов от мощности импульса. Показано, что как для воды, так и для стекла пространственные характеристики области филаментации носят качественно схожий характер. Установлено, что количество филаментов вдоль области множественной филаментации имеет унимодальное распределение. 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. 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, вода; laser radiation, femtosecond pulse, self-focusing, multiple filamentation, glass, water.

Самофокусировка и филаментация 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 количественные модели, позволяющие устанавливать связи между исходными характеристиками лазерных импульсов и пространственными

параметрами области филаментации и отдельными филаментами в ней, в настоящее время отсутствуют.

В проводимых ранее экспериментах с прозрачными твердыми средами, например [4–7], в основном исследовалась филаментация сфокусированного в объеме среды излучения, при этом количественные данные об эволюции области филаментации и отдельных филаментов в ней в зависимости от мощности импульса отсутствуют. В эксперименте [8], в котором исследовалась филаментация коллимированных пучков в воде, также отсутствуют количественные характеристики множественной филаментации, в более поздних работах [9, 10] представлена только зависимость диаметра филамента от дистанции распространения лазерного излучения в кювете с водой.

В настоящей статье множественная филаментация коллимированных пучков исследуется в модельной среде с сильной кубичной нелинейностью, позволяющей визуально исследовать пространственные характеристики множественной филаментации.

В экспериментах использовалось лазерное излучение Ti:Sapphire-лазера на основной гармонике. Схема эксперимента и характеристики излучения представлены на рис. 1.

* Дмитрий Владимирович Апексимов (areximov@iao.ru); Сергей Сергеевич Голик (golik_s@mail.ru); Александр Анатольевич Землянов (zaa@iao.ru); Анастасия Николаевна Иглакова (ian@iao.ru); Андрей Михайлович Кабанов (kam@iao.ru); Олеся Ивановна Кучинская (olesyatsu14@mail.ru); Геннадий Григорьевич Матвиенко (mgg@iao.ru); Виктор Константинович Ошлаков (ovk@iao.ru); Алексей Вадимович Петров; Екатерина Борисовна Соколова (mastapes@mail.ru).

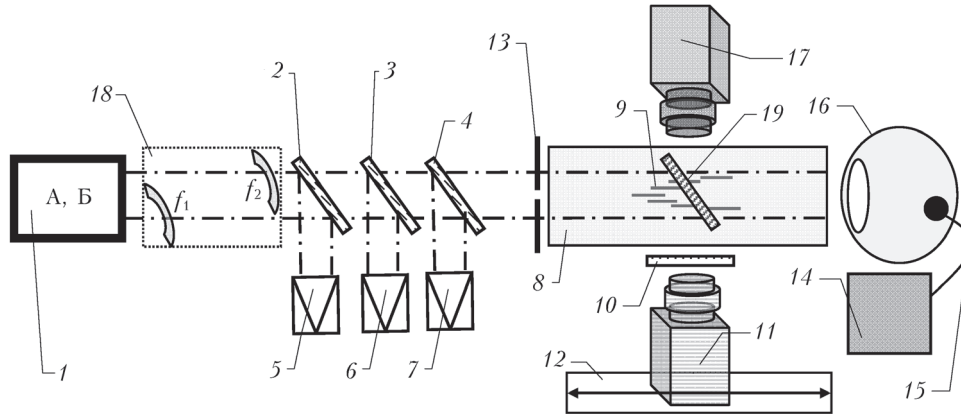


Рис. 1. Схема эксперимента филаментации в стекле и воде: 1 – А – лазерная система (Spitfire Pro 40F, Spectra Physics): $\lambda = 800$ нм, $E < 5$ мДж, частота следования импульсов 1 кГц, длительность импульса $\tau_{\text{и}} = 45$ фс, диаметр пучка (по уровню e^{-2}) $d = 7$ мм; Б – лазерная система (Авеста-Проект): $\lambda = 800$ нм, $E < 45$ мДж, частота следования импульсов 10 Гц, $\tau_{\text{и}} = 50$ фс, диаметр пучка d на входе в образец (по уровню e^{-2}) 25 и 11 мм; 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 = 90, 60, 60 мм, коэффициент кубичной нелинейности $n_2 = 3,5 \cdot 10^{-16}$ см²/Вт, критическая мощность самофокусировки $P_{\text{кр}} = 2 \cdot 10^6$ Вт) для первого ряда экспериментов, или кювета с дистиллированной водой (длина, ширина, высота = 300, 20, 20 мм, $n_2 = 2 \cdot 10^{-16}$ см²/Вт, $P_{\text{кр}} = 6,5 \cdot 10^6$ Вт); 9 – область филаментации; 10 – нейтральный светофильтр; 11 – CCD-камера ANDOR-Clara E, с объективом HELIOS-44M 2/58 на позиционере (M)-IMS Newport (12), для экспериментов в кювете располагалась под углом около 20° между направлением распространения излучения и направлением съемки камеры; 13 – съемная щель 2 мм (в экспериментах со стеклом); 14 – спектрометр Maya-2000PRO; 15 – световод; 16 – интегрирующая сфера (Newport 819C-SF-6); 17 – фотоаппарат Pentax K-3 (25 Мп) с макрообъективом Pentax100MacroWR; 18 – съемный телескоп (фокусное расстояние $f_1 = 1000$ мм, $f_2 = -500$ мм, эксперименты для стекла); 19 – подвижный экран

Схемы экспериментов однотипны, в первом случае использовался образец стекла ВК7, во втором – кювета с дистиллированной водой. Лазерный импульс от источников направлялся на образец 8 и, начиная с определенного значения мощности импульса, зависящего от типа образца и диаметра пучка, область филаментации формировалась внутри образца.

Регистрация области филаментации (ОФ) для эксперимента в стекле проводилась фотоаппаратом 17 и CCD-камерой 11. CCD-камера, установленная на позиционере 12, позволяла проводить последовательную съемку (размер каждого кадра составлял 20×25 мм) всей области филаментации путем перемещения позиционера вдоль образца с шагом 10 мм. Примеры полученных изображений для стекла представлены на рис. 2.

Область филаментации наблюдается в виде светящихся в сине-зеленой области спектра треков (полоса 350–700 нм, максимум – 520 нм, см. рис. 9, а), каждый из которых соответствует отдельному филamentу. Количество треков в ОФ возрастает с увеличением энергии (мощности) и принимает форму полого конуса или параболоида, зеркально повторяющего распределение интенсивности в поперечном сечении пучка (рис. 2, а). При энергии импульса > 40 мДж внутри конуса начинает формироваться внутренняя область множественной филаментации (рис. 2, б), которая при энергии > 45 мДж также приобретает коническую форму. Практически на всех снимках в начале области филаментации наблюдаются «пульсирующие» треки (рис. 2, в), которые, с одной стороны, могут быть результатом наложения треков, расположенных на разных расстояниях от камеры,

а с другой – могут также являться результатом повторных фокусировок (рефокусировок) первичных филаментов, которые ранее наблюдались при филаментации в воздухе (см., например, [11]). 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 увеличением мощности и для максимальной в эксперименте мощности 0,9 ТВт достигает 5. Рефокусировка реализуется на пространственном масштабе, сравнимом с длиной филамента, т.е. ~ 0,2 мм.

При исследовании множественной филаментации в воде проводилась регистрация поперечной структуры пучка на экране 19 помещенном в кювету, в отличие от [12], где экран размещался за задней гранью кюветы. Экран 19 параллельно с CCD-камерой 11 с помощью позиционера 12 перемещался от освещенной грани кюветы к задней ее грани с шагом в 1 мм. На рис. 3, а представлены снимки поперечной структуры области филаментации на различном удалении от начала кюветы. Яркие точки на снимках характеризуются повышенной плотностью энергии в пучке (интенсивность ~ 10¹¹–10¹² Вт/см² для воды) по сравнению со средним уровнем и соответствуют существующим в данной точке филamentам.

По количеству ярких точек на снимках поперечной структуры в области филаментации можно сделать вывод, что с увеличением дистанции распространения лазерного импульса в кювете с водой и в стекле число филаментов, образованных в лазерном пучке,

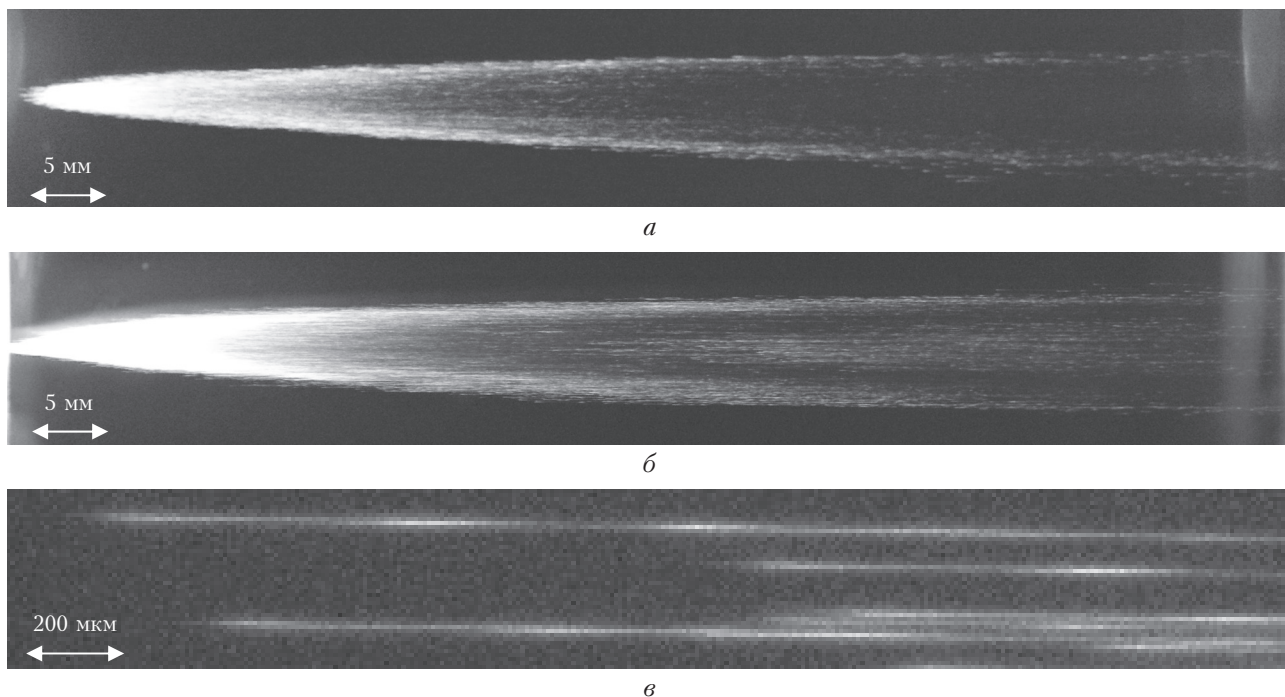


Рис. 2. Фотографии области филаментации лазерного пучка диаметром 11 мм, ограниченного вертикальной щелью шириной 2 мм, расположенной по центру пучка, для энергии 40 (а) и 45 мДж (б), съемка с помощью фотоаппарата 17; треки в начале области филаментации (в), энергия импульса 40 мДж, съемка с использованием CCD-камеры 11

сначала увеличивается, затем уменьшается. Кроме того, увеличивается диаметр области, заполненной световыми точками. Регистрируемые горячие точки с увеличением дистанции смещаются от центра к периферии пучка. Длина, на которой существует одна точка, не превышает нескольких миллиметров. Зарегистрированная трансформация продольной структуры лазерного пучка представлена на рис. 3, б. Видно, что в начале области филаментации (отмечено стрелкой) пучок немного сужается и, после этой перетяжки

ки, интенсивность в пучке резко снижается. Координата данной перетяжки соответствует координате максимума количества филаментов (рис. 4, б).

Распределение филаментов вдоль ОФ для различных энергий импульса в стекле и воде представлено на рис. 4. Видно, что измеренное распределение как для воды, так и для стекла имеет максимум, величина которого зависит от мощности импульса — с увеличением мощности значение максимума возрастает. Для случая филаментации в воде (рис. 4, б)

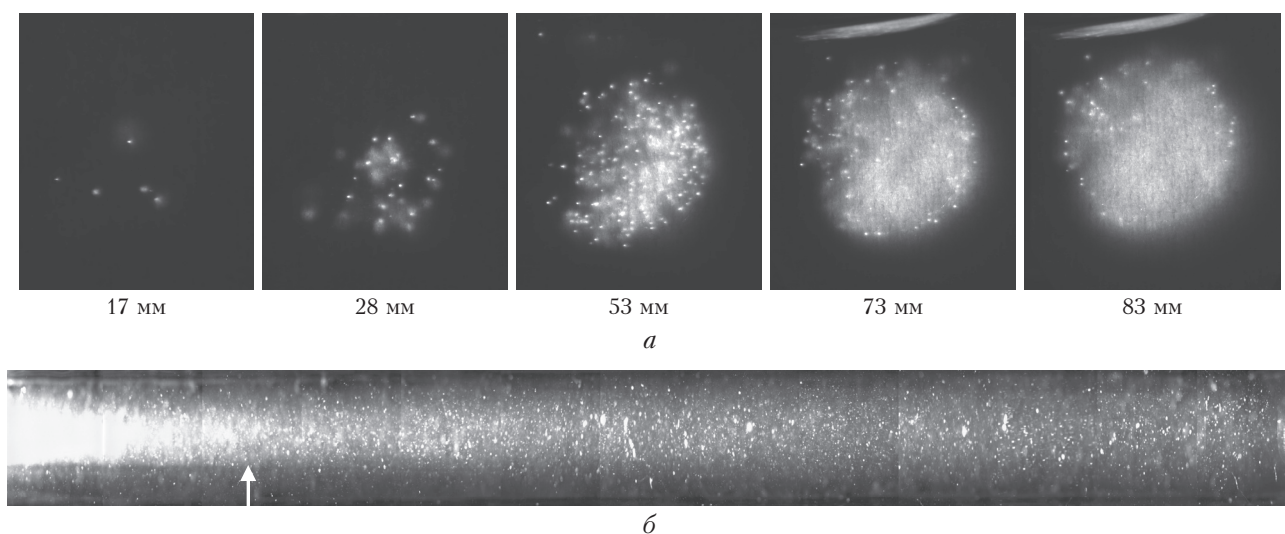


Рис. 3. Поперечная структура области филаментации на различном удалении от освещенной грани кюветы при энергии импульса 4,4 мДж, диаметр пучка 7 мм (а); структура лазерного пучка (светофильтр) в кювете при множественной филаментации пучка диаметром 11 мм (стрелка соответствует началу области филаментации) при энергии импульса 40 мДж (б)

максимум смещается в сторону источника излучения при увеличении мощности импульса. Такая же картина наблюдается при множественной филаментации в воздухе [13]. В качестве характеристик ОФ исследовались: начало области филаментации $L_{н.фил}$ как расстояние от передней грани образца до первого регистрируемого светящегося трека; длина области филаментации $L_{о.ф.}$, общее количество филаментов $N_{общ}$, количество филаментов в области максимума $N_{мах}$, средняя длина филаментов $L_{ф.}$. Измеренные зависимости выбранных характеристик от мощности лазерного импульса представлены на рис. 4–8.

Зависимости начала области филаментации от мощности лазерного излучения подобны для стекла и воды (рис. 6, а, б). На представленных графиках видно, что начало филаментации $L_{н.фил}$ с увеличением мощности смещается в сторону источника, как и предсказывает формула Марбургера (J.H. Marburger) [1], но при этом экспериментальные значения для воды

примерно в 200 раз, а для стекла в 50 раз меньше рассчитанных по [1].

Длина области филаментации (рис. 7) увеличивается с ростом мощности импульса, так же как для воздуха [13], это происходит за счет смещения координаты начала в сторону лазерного источника (см. рис. 6). Кривые на рис. 5 указывают, что общее количество филаментов в области множественной филаментации и количество филаментов в максимуме их распределения вдоль направления распространения излучения возрастает с увеличением мощности.

В экспериментах по филаментации лазерных пучков в среде с сильной керровской нелинейностью показано, что с увеличением начальной мощности лазерных импульсов растет количество и сокращается длина филаментов, увеличивается длина области филаментации. Распределение филаментов в продольном направлении ОФ имеет максимум, в поперечном

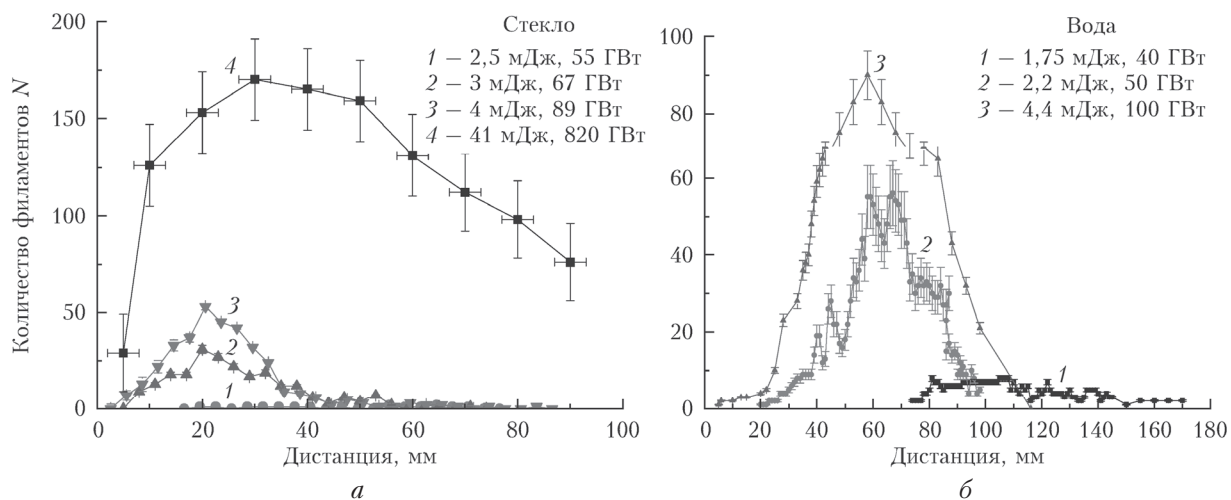


Рис. 4. Распределение филаментов вдоль области филаментации в стекле (а) и в воде (б). Кривая 4 на фрагменте а – диаметр пучка 11 мм, остальные кривые – диаметр пучка 7 мм

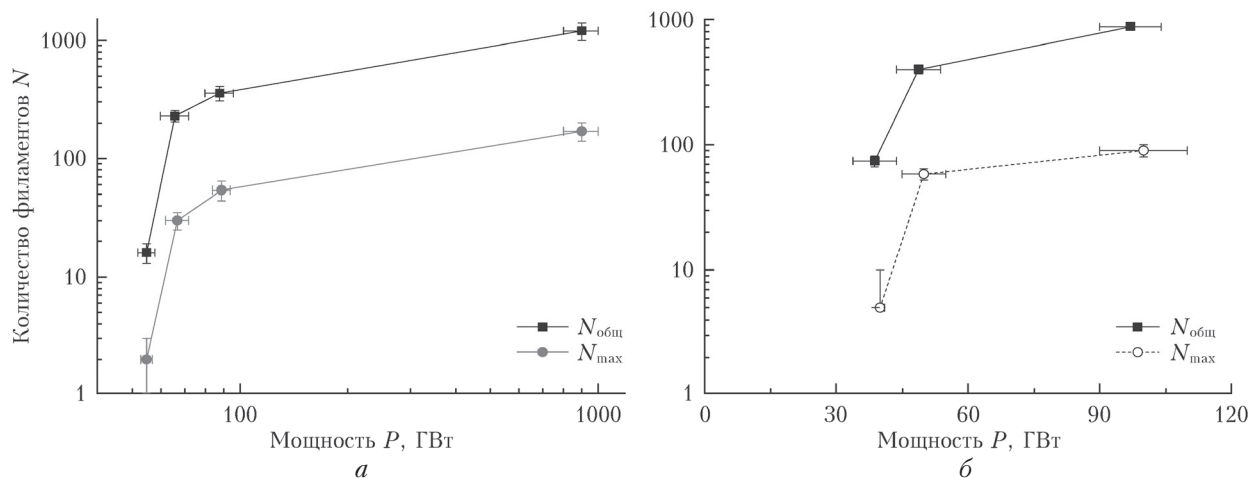


Рис. 5. Зависимость общего количества филаментов $N_{общ}$ и количества филаментов в максимуме распределения филаментов от мощности лазерного импульса $N_{мах}$ в стекле (а) и в воде (б)

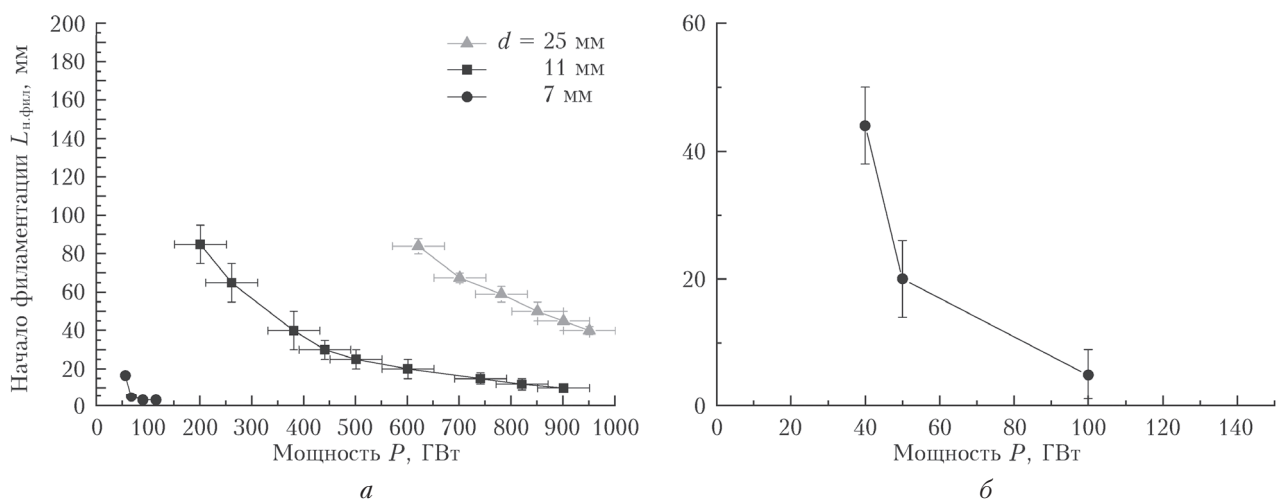


Рис. 6. Зависимости положения начала ОФ $L_{n,fil}$ от мощности лазерного излучения для пучков различного диаметра в стекле (а) и в воде (б)

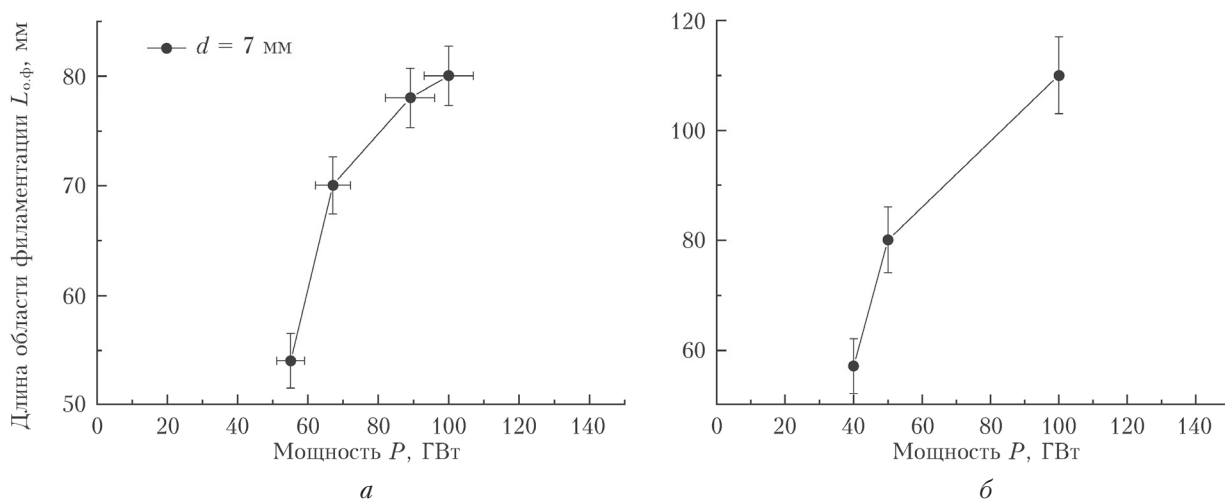


Рис. 7. Зависимость длины области филаментации от мощности лазерного излучения в стекле (а) и в воде (б)

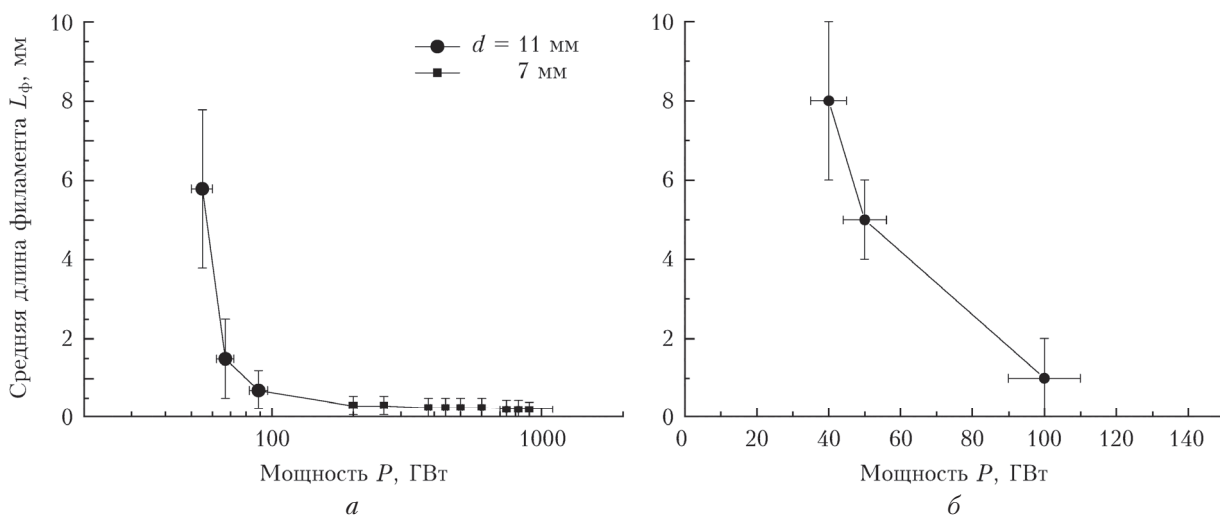


Рис. 8. Зависимости средней длины филаментов в области множественной филаментации от мощности лазерного импульса в стекле (а) и в воде (б)

сечении ОФ происходит смещение филаментов от центра пучка к его периферии к концу области филаментации. Минимальный диаметр пучка на трассе соответствует положению максимума количества филаментов в ОФ, после которого импульс существенно теряет энергию в начальном направлении распространения. При достижении мощности импульса $> 10^5 P_{кр}$ для стекла и $> 2 \cdot 10^4 P_{кр}$ для воды область множественной филаментации формируется в виде полого конуса, направленного вершиной к источнику излучения. На рис. 9 представлено уширение спектра лазерного импульса при его филаментации.

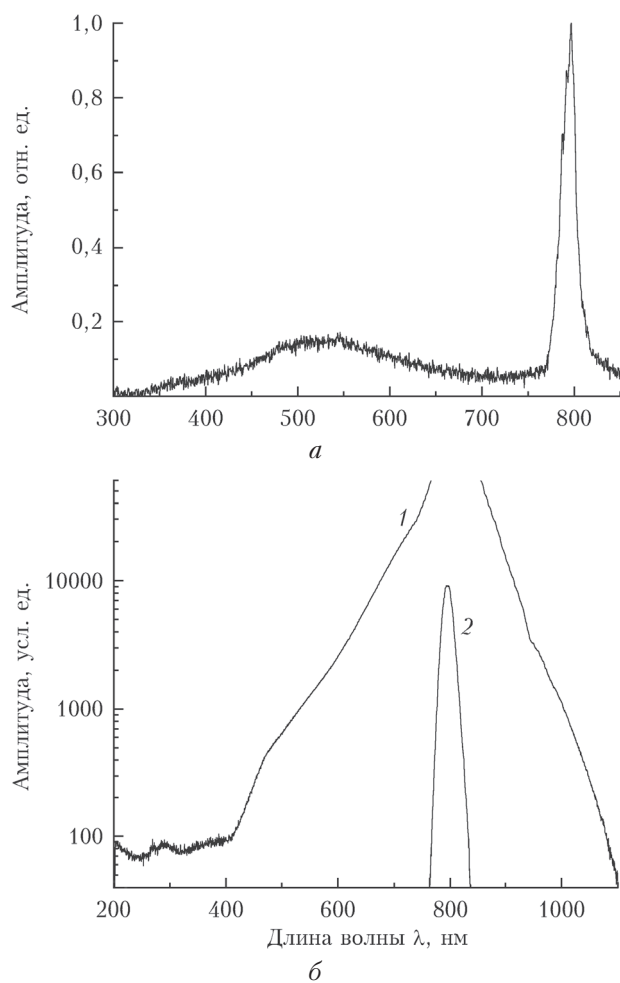


Рис. 9. Спектр свечения области филаментации в стекле в направлении 90° к оси пучка (а); спектр лазерного импульса в направлении вперед (б) с энергией 40 мДж после филаментации в стекле (1) и 1 мДж без филаментации в стекле (2)

Таким образом, 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 больше $10^5 P_{кр}$ 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.

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского научного фонда (соглашение 15-17-10001).

1. Marburger J.H. Self-focusing: Theory // Progr. Quant. Electron. 1975. V. 4, part 1. P. 35–110.
2. Гейнц Ю.Э., Землянов А.А. Характеристики филаментов при распространении мощного фемтосекундного лазерного излучения в воздухе и в воде: I. Качественный анализ // Оптика атмосф. и океана. 2010. Т. 23, № 9. С. 749–756.
3. Гейнц Ю.Э., Землянов А.А. Характеристики филаментов при распространении мощного фемтосекундного лазерного излучения в воздухе и в воде: II. Численное моделирование // Оптика атмосф. и океана. 2010. Т. 23, № 9. С. 757–760.
4. Мартынович Е.Ф., Кузнецов А.В., Куртичников А.В., Пестряков Е.В., Багаев С.Н. Создание люминесцентных эмиттеров интенсивным лазерным излучением в прозрачных средах // Квант. электрон. 2013. Т. 43, № 5. С. 463–466.
5. Дергачев А.А., Кадан В.Н., Шлёнов С.А. Взаимодействие неколлинеарных фемтосекундных лазерных филаментов в сапфире // Квант. электрон. 2012. Т. 42, № 2. С. 125–129.
6. Кульчин Ю.Н., Витрик О.Б., Чехленок А.А., Жижченко А.Ю., Проценко Д.Ю., Мирочник А.Г., Лю Жухуо. Фоторегистрация множественной филаментации фемтосекундного лазерного излучения в полиметилметакрилате, допированном 2,2-дифторо-4-(9-антрацил)-6-метил-1,3,2-диоксаборином // Квант. электрон. 2013. Т. 43, № 12. С. 1118–1121.
7. Alfano R.R., Shapiro S.L. Observation of self-phase modulation and small-scale filaments in crystals and glasses // Phys. Rev. Lett. 1970. V. 24, N 11. P. 592.
8. Schroeder H., Liu J., Chin S.L. From random to controlled small-scale filamentation in water // Opt. Express. 2004. V. 12, N 20. P. 4768–4774.
9. Liu J., Schroeder H., Chin S.L., Li R., Yu W., Xu Z. Space-frequency coupling, conical waves and small-scale filamentation in water // Phys. Rev. A. 2005. V. 72, N 5. P. 053817.
10. Liu J., Schroeder H., Chin S.L., Li R., Yu W., Xu Z. Control and organization of multi-filamentation of femtosecond laser pulses in optical media // J. Korean Phys. Soc. 2007. V. 51, N 4. P. 1572–1577.
11. Brodeur A., Chien C.Y., Ilkov F.A., Chin S.L., Kosareva O.G., Kandidov V.P. Moving focus in the propagation of ultrashort laser pulses in air // Opt. Lett. 1997. V. 22, N 5. P. 304.
12. Аепксимов Д.В., Букин О.А., Быкова Е.Е., Голик С.С., Землянов А.А., Кабанов А.М., Кучинская О.И., Майор А.В., Матвиенко Г.Г., Ошлаков В.К., Петров А.В., Соколова Е.Б. Множественная филаментация коллимированных пучков Ti:Sapphire-лазера в воде // Оптика атмосф. и океана. 2014. Т. 27, № 11. С. 957–960.
13. Аепксимов Д.В., Землянов А.А., Иглакова А.Н., Кабанов А.М., Кучинская О.И., Матвиенко Г.Г., Ошлаков В.К., Петров А.В. Филаментация тераваттных лазерных импульсов на стометровой атмосферной трассе // Оптика атмосф. и океана. 2015. Т. 28, № 3. С. 274–277.

D.V. Apeksimov, S.S. Golik, A.A. Zemlyanov, A.N. Iglakova, A.M. Kabanov, O.I. Kuchinskaya, G.G. Matvienko, V.K. Oshlakov, A.V. Petrov, E.B. Sokolova. **Multiple filamentation of collimated laser radiation in water and glass.**

Results of experimental investigation of spatial characteristics of the region of multiple filamentation of giga- and terawatt pulses of Ti:Sapphire laser in the glass and water are presented. The pulse power dependences of the coordinates of the filamentation region, the number of filaments, their distribution along the axis of the laser beam, and the mean length of the filaments on the impulse power are presented. It is shown that the spatial characteristics of filamentation region are qualitatively similar for water and glass. It is found that the number of filaments along the region of multiple filamentation has a unimodal distribution. When increasing the radiation power, the length of individual filaments in the field of multiple filamentation is reduced, and the diameter has a quasi-constant value at all values of power, implemented in the experiments. The filamentation region, when reaching a certain power laser pulses with a Gaussian distribution of energy density, takes the form of a hollow cone with the apex directed to the source of radiation.