

УДК 530.182.551.510.42+535.621.33

Множественная филаментация коллимированных пучков Ti:Sapphire-лазера в воде

Д.В. Апе́ксимов¹, О.А. Букин², С.С. Голик³, А.А. Землянов¹, А.М. Кабанов¹,
О.И. Кучинская⁴, А.Ю. Майор², Г.Г. Матвиенко¹, В.К. Ошлаков¹,
А.В. Петров¹, Е.Б. Соколова², Е.Е. Хорошаева^{1*}

¹Институт оптики атмосферы им. В.Е. Зуева СО РАН
634021, 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 18.02.2014 г.

Представлены результаты экспериментальных исследований филаментации фемтосекундных лазерных импульсов в воде. Измерены зависимости количества филаментов, ширины спектра лазерного излучения, дистанции нелинейной фокусировки, диаметра области филаментации от мощности лазерных импульсов. Отмечается существование участка на шкале относительной мощности, при прохождении которого происходит взрывообразный рост числа филаментов.

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

Явление самофокусировки и филаментации мощного лазерного излучения сопровождается рядом эффектов, таких как ионизация среды и плазмообразование, генерация суперконтинуального свечения, коническая эмиссия и т.д., делающих данное явление привлекательным для широкого круга прикладных задач. В конденсированных средах (жидкости, твердые прозрачные тела) критическая мощность самофокусировки на несколько порядков ниже, чем в газовых средах, что, собственно, и обусловило то, что впервые эффект стягивания лазерных пучков в «нить» (филаментация) был зафиксирован именно в жидкостях [1] через несколько лет после создания первого лазера. Филаментация в воздухе стала доступна для исследования при достижении лазерной техникой гигаваттных уровней мощности и бурно развивается последние 20 лет. За это время количественные параметры

филаментации (дистанция самофокусировки, длина области филаментации, количество филаментов в пучке и т.д.) в газовых средах исследованы более подробно [2–4], чем в жидких.

В большинстве экспериментальных работ по филаментации в жидких средах использовались остро сфокусированные лазерные пучки [5–9], что вносит ряд особенностей в протекание процесса филаментации [4, 7]. В части теоретических исследований наиболее последовательное качественное и количественное сравнение протекания процесса филаментации в воздухе и воде проводилось в [10, 11], где, однако, полученные результаты моделирования ограничены случаями одиночной филаментации и малыми диаметрами пучков.

В настоящей статье представлены результаты экспериментов по исследованию множественной филаментации гигаваттных коллимированных лазерных пучков в воде, задачей которых являлось получение опытной количественной информации о таких характеристиках, как количество филаментов, дистанция филаментации, поперечный размер области филаментации, уширение спектра излучения в зависимости от начальной мощности лазерного импульса. Эксперименты проводились на стенде ИАПУ ДВО РАН (г. Владивосток) совместно с ИОА СО РАН и ДВФУ. В экспериментах

* Дмитрий Владимирович Апе́ксимов (apeximov@iao.ru); Олег Алексеевич Букин (o_bukin@mail.ru); Сергей Сергеевич Голик (golik_s@mail.ru); Александр Анатольевич Землянов (zaa@iao.ru); Андрей Михайлович Кабанов (kam@iao.ru); Олеся Ивановна Кучинская; Александр Юрьевич Майор (mayor@iacr.dvo.ru); Геннадий Григорьевич Матвиенко (magg@iao.ru); Виктор Константинович Ошлаков (ovk@iao.ru); Алексей Вадимович Петров; Екатерина Борисовна Соколова (mastapes@mail.ru); Елена Евгеньевна Хорошаева (bee@iao.ru).

использовалось лазерное излучение Ti:Sapphire-лазера (Spitfire Pro 40F, Spectra Physics) на основной гармонике ($\lambda = 800$ нм) длительностью 45 фс, частотой следования 1 кГц, диаметром пучка 9 мм, мощностью в импульсе до 120 ГВт и энергией до 5,2 мДж (рис. 1).

Мощность лазерных импульсов варьировалась мощностью накачки лазера и длительностью импульса с помощью компрессора 2 и контролировалась с использованием измерителя мощности и энергии 7

и автокоррелятора 5. Также осуществлялся контроль качества пучка 9.

Регистрировались спектры излучения при филаментации в кювете 10 в направлении вперед в интегрирующую сферу 15 спектрометром 14. Проводилась фоторегистрация филаментации в кювете 12 и на экране 17 с помощью CCD-камер 12, 16. Примеры изображений поперечной структуры лазерного пучка после его филаментации в кювете, регистрируемые на экране, представлены на рис. 2.

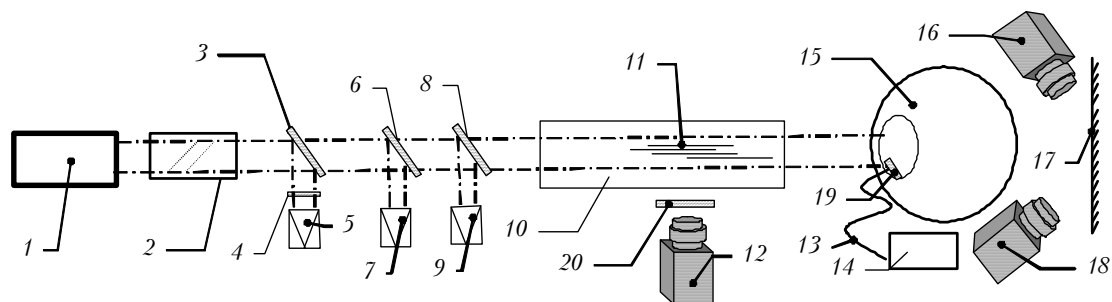


Рис. 1. Схема эксперимента: 1 – лазерная система (Spitfire Pro 40F, Spectra Physics): $\lambda = 800$ нм, $E \leq 5,2$ мДж, частота следования импульсов 1 кГц, $t_u = 45$ фс, диаметр пучка (по уровню e^{-2}) $d = 9$ мм; 2 – компрессор; 3, 6, 8 – поворотные пластины; 4 – нейтральный светофильтр (ослабитель); 5 – автокоррелятор PSCOUT PL-SP-LF, Spectra Physics; 7 – измеритель энергии 407A, Spectra Physics; 9 – измеритель профиля пучка; 10 – кювета (длина, ширина, высота = 100, 20, 20 мм соответственно, толщина входного окна 150 мкм); 11 – область филаментации; 12 – CCD-камера «видеоскан-285/П-USB», 1392×1040 пикселей, 12 бит/пиксель с объективом Nikon AF-S Micro NIKKOR 105 мм; 13 – световод; 14 – спектрометр Maya 2000 Pro, Ocean Optics; 15 – интегрирующая сфера; 16 – CCD-камера «Видеоскан-285»; 17 – экран; 18 – фотокамера SONY DSC-F828; 19 – светофильтр 10SWF-700-B CB108, Newport; 20 – светофильтр

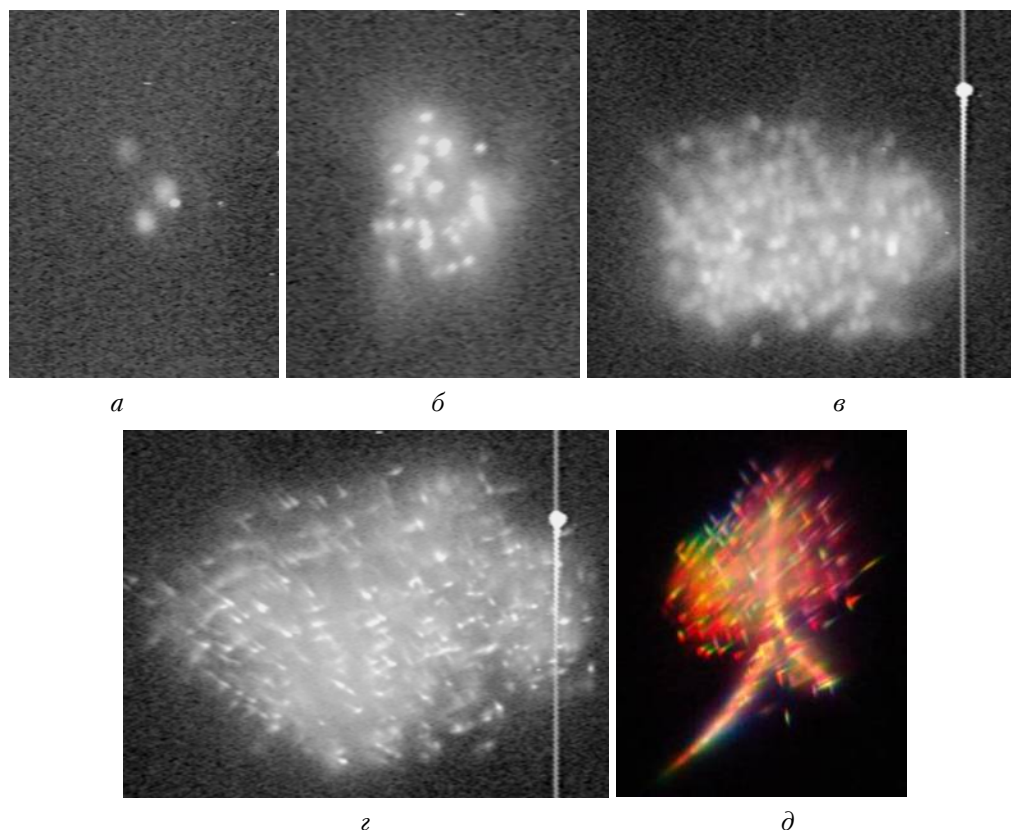


Рис. 2. Изображения структуры лазерного пучка после его филаментации в кювете с водой, регистрируемые на экране для различных энергий лазерных импульсов: а – 1,7; б – 2,4; в – 4; г – 5,2 мДж; д – вода, содержащая гидростоли, после 30 с от начала воздействия импульсно-периодическим излучением

Яркие точки на снимках характеризуют повышенное значение плотности энергии в пучке по сравнению со средним уровнем и представляют собой свечение от образовавшихся на трассе распространения филаментов. Под филаментами мы будем понимать световую структуру, содержащую в себе экстремально высокую интенсивность (для воды 10^{11} – 10^{12} Вт/см²). Значение интенсивности сохраняется вдоль направления распространения на определенной дистанции, называемой длиной филамента. Поперечный размер области филаментации характеризуется радиусом филамента, имеющим квазипостоянное значение (для воды 5–10 мкм), и числом филаментов. На рис. 2 видно, что с увеличением энергии лазерных импульсов увеличивается количество «горячих точек», формируемых в лазерном пучке, а также возрастает диаметр области, заполненный светлыми точками, каждая из которых соответствует филаменту в кювете. На рис. 2, д представлено изображение энергетической структуры лазерного пучка на экране после филаментации в воде с гидрозолями через 30 с после начала воздействия импульсно-периодическим излучением при добавлении 0,5 мл раствора бифидумбактерина (изогнутые палочки длиной 2–5 мкм) на 40 мл воды. Видно, что добавление в дистиллированную воду гидрозолей приводит к перераспределению поперечной структуры области филаментации, это, очевидно, связано с формированием конвективных потоков в кювете.

На рис. 3 представлена зависимость количества горячих точек от отношения начальной пиковой мощности лазерного излучения к критической мощности самофокусировки (для воды $P_{cr} = 6,5$ МВт [10]). Отмечается существование участка на шкале относительной мощности ($P_0/P_{cr} > 3000$), при его прохождении начинается резкий рост количества горячих точек, который связан с соответствующим ростом числа филаментов. При приращении мощ-

ности примерно в 10 раз количество указанных точек возрастает в 300 раз.

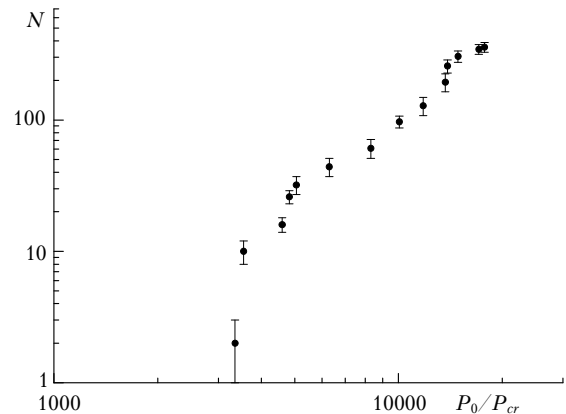


Рис. 3. Зависимость количества горячих точек N , зафиксированных на экране, от отношения начальной пиковой мощности лазерного импульса P_0 к критической мощности самофокусировки P_{cr}

На рис. 4 даны изображения филаментации в кювете для различных начальных мощностей лазерного импульса. Видно, что увеличение мощности импульса приводит, во-первых, к увеличению диаметра области, внутри которой формируются филаменты, во-вторых, начало области филаментации смещается в сторону источника.

Зависимости диаметра области филаментации и расстояния от передней стенки кюветы до начала филаментации от мощности лазерного импульса представлены на рис. 5 и 6 соответственно. На рис. 6 помимо экспериментальных данных также показана зависимость дистанции начала филаментации $L_{b,fil}$, рассчитанной по формуле Марбургера (Marburger J.H.) [12]. Удовлетворительное согласие расчетных и экспериментальных данных достигается при уменьшении расчетных значений в 7 раз.

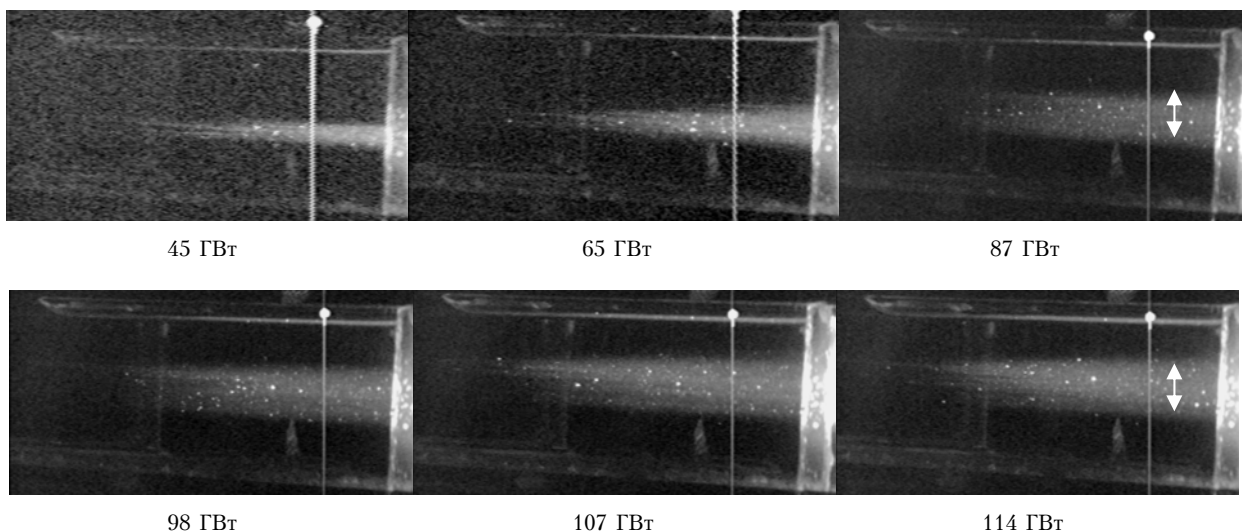


Рис. 4. Изображения области филаментации в кювете для различных значений мощности лазерного импульса (источник слева)

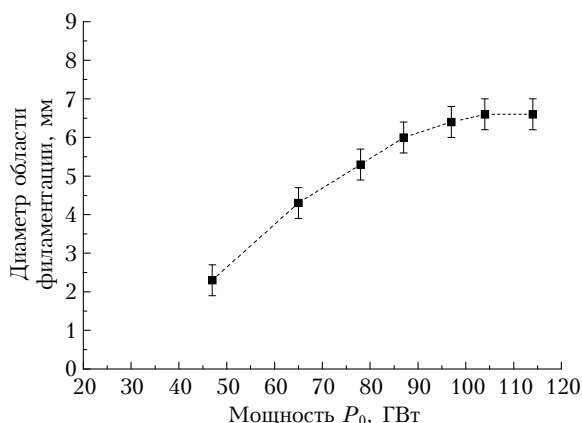


Рис. 5. Зависимость диаметра области филаментации D от пиковой мощности лазерного излучения

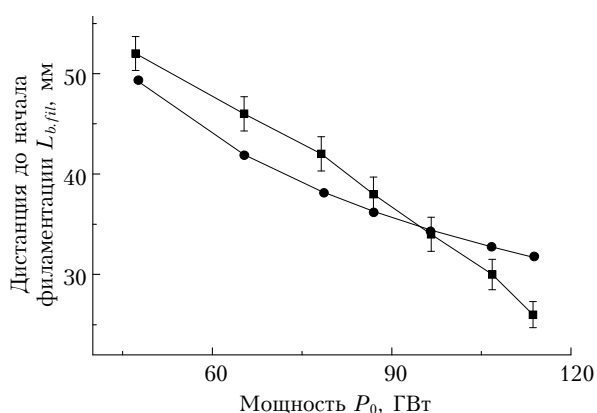


Рис. 6. Зависимости дистанции начала филаментации от мощности лазерного импульса; кружки рассчитаны по формуле Marburger [12] при $2P_{cr} \cdot 10^{-2}$, квадраты – экспериментальные данные

Измерения трансформации спектра излучения при филаментации в воде в зависимости от мощности импульса с использованием интегрирующей сферы, расположенной за кюветой, и спектрометра Maya 2000 Pro (Ocean Optics) проводились для случаев изменения мощности лазерных импульсов посредством изменения энергии и длительности импульса. Из рис. 7 видно, что уширение спектра, полученное тем и другим способом, сопоставимо по величине и перекрывает весь видимый диапазон спектра. Данное обстоятельство позволяет получать перестраиваемые по ширине спектра импульсы одинаковой энергии и использовать их, например, для оптоакустической спектроскопии [13, 14].

Таким образом, в экспериментах по филаментации лазерных пучков в воде показано, что с увеличением начальной мощности лазерных импульсов увеличивается количество филаментов, формируемых в лазерном пучке. При достижении мощности в импульсе ~ 20 ГВт происходит резкий рост количества филаментов. Спектр исходного лазерного импульса при его филаментации в воде существенно уширяется и при больших значениях энергии перекрывает весь видимый диапазон. При увеличении мощности лазерного излучения наблюдаются умень-

шение дистанции начала филаментации и увеличение поперечного размера области филаментации.

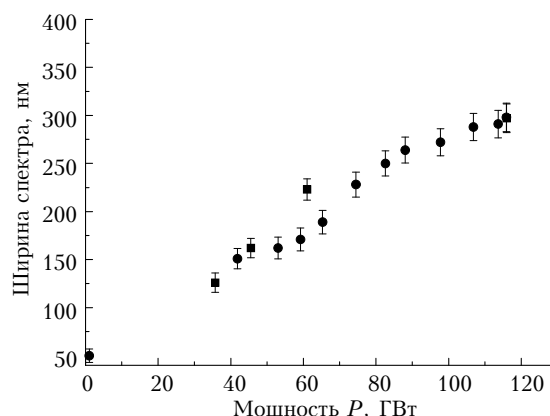


Рис. 7. Зависимость ширины спектра лазерного импульса после филаментации в воде от энергии импульса. Изменение мощности импульса варьированием его энергии (кружки) и варьированием длительности импульса (квадраты)

Работа выполнена при финансовой поддержке интеграционного проекта № 67, Проект П.11.2.4 Президиума СО РАН.

1. Пилипецкий Н.Ф., Рустамов А.Р. Наблюдение самофокусировки света в жидкостях // Письма в ЖЭТФ. 1965. Т. 2. С. 88–90.
2. Гейнц Ю.Э., Землянов А.А., Кабанов А.М., Матвиенко Г.Г. Нелинейная фемтосекундная оптика атмосферы / Под общей ред. д.ф.-м.н., профессора А.А. Землянова. Томск: Изд-во Института оптики атмосферы СО РАН, 2010. 212 с.
3. Chin S.L. Femtosecond laser filamentation. Springer Series on Atomic, Optical, and Plasma Physics. 2010. V. 55. DOI: 10.1007/978-1-4419-0688-5.
4. Алексимов 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.
5. Polynkin P., Kolesik M., Moloney J. Filamentation of femtosecond laser airy beams in water // Phys. Rev. Lett. 2009. V. 103, iss. 12. P. 123902-1–123902-4.
6. Liu W., Kosareva O.G., Golubtsov I.S., Iwasaki A., Becker A., Kandidov V.P., Chin S.L. Femtosecond laser pulse filamentation versus optical breakdown in H₂O // Appl. Phys. B. 2003. V. 76, N 3. P. 215–229.
7. Алексимов Д.В., Букин О.А., Быкова Е.Е., Голик С.С., Землянов А.А., Ильин А.А., Кабанов А.М., Матвиенко Г.Г., Ошлаков В.К., Петров А.В., Соколова Е.Б. Филаментация фемтосекундных импульсов Ti:Sapphire-лазера на первой и второй гармониках в жидких средах // Оптика атмосфер. и океана. 2013. Т. 26, № 12. С. 1029–1033.
8. Кульчин Ю.Н., Витрик О.Б., Чехленок А.А., Жижченко А.Ю., Проценко Д.Ю., Мирочник А.Г., Лю Жуох. 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.
9. Мартынович Е.Ф., Кузнецов А.В., Кирпичников А.В., Пестряков Е.В., Багаев С.Н. Создание люминесцентных эмиттеров интенсивным лазерным излучением

- ем в прозрачных средах // Квант. электрон. 2013. Т. 43, № 5. С. 463–466.
10. 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.
 11. 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.
 12. Marburger J.H. Self-focusing: Theory // Prog. Quant. Electr. 1975. V. 4. Part 1. P. 35–110.
 13. Алексимов Д.В., Бочкарев Н.Н., Бочковский Д.А., Быкова Е.Е., Кабанов А.М., Кистенев Ю.В., Никитин Е.С., Погодаев В.А., Протасевич Е.С., Романовский О.А., Степанов А.Н., Яковлев С.В. Исследование взаимодействия фемтосекундного лазерного излучения с биологическими тканями оптико-акустическим методом // Изв. вуз. Физ. 2010. Т. 53, № 5. С. 80–84.
 14. Букреева Е.Б., Буланова А.А., Кистенев Ю.В., Кузьмин Д.А., Никифорова О.Ю., Тузинов С.А., Юмов Е.Л. Особенности спектров поглощения выдыхаемого воздуха при хронических неинфекционных заболеваниях легких: хроническая обструктивная болезнь легких и рак легких // Биотехносфера. 2012. № 3–4 (21–22). С. 39–46.

D.V. Apeximov, O.A. Bukin, S.S. Golik, A.A. Zemlyanov, A.M. Kabanov, O.I. Kuchinskaya, A.Yu. Mayor, G.G. Matvienko, V.K. Oshlakov, A.V. Petrov, E.B. Sokolova, E.E. Khoroshaeva. **Multifilamentation of collimated Ti:Sapphire-laser beams in water.**

The results of experimental studies of femtosecond laser pulse filamentation in water are presented. The dependencies of filament number, laser radiation spectrum width, distance of nonlinear focusing, diameter of filamentation zone on laser pulse power are measured. A part of the scale of relative power is marked out; filament number increases dramatically after passing it.