

ИССЛЕДОВАНИЕ ЯВЛЕНИЯ ФИЛАМЕНТАЦИИ ФЕМТОСЕКУНДНОГО ЛАЗЕРНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ

М. А. Тарасова, К. С. Хорьков, Д. А. Кочуев, А. В. Иващенко

В статье экспериментально исследовано явление филаментации при распространении фемтосекундного лазерного излучения в прозрачных твердых средах. Разработана и собрана экспериментальная схема по измерению параметров филаментов с использованием сферической и цилиндрической оптики. Произведено структурирование образца в режиме филаментации, что позволяет получать заданное распределение интенсивности лазерного излучения.

Ключевые слова: фемтосекундное лазерное излучение, филаментация, перераспределение интенсивности.

Введение. Явление филаментации фемтосекундного лазерного излучения заключается в пространственно-временной локализации энергии в мощном лазерном фемтосекундном импульсе под действием самофокусировки в среде и нелинейности в самонаведенной лазерной плазме [1]. Уникальные возможности филаментации открывают новые направления для использования фемтосекундных лазерных технологий в микрооптике, модификации материалов, атмосферной оптике и других приложениях [2]. Необходимым условием развития филаментации является превышение критической мощности самофокусировки. В процессе филаментации рост интенсивности при самофокусировке излучения фемтосекундной длительности ограничивается нестационарной дефокусировкой излучения в самонаведенной лазерной плазме, возникающей при превышении интенсивностью порога фотоионизации среды, что можно рассматривать как появление дефокусирующей линзы [3–4]. Изменение показателя преломления связано с оплавлением участков среды при прохождении высокоинтенсивного лазерного излучения через образец. Импульсное лазерное излучение, пиковая мощность которого в десятки

Владимирский государственный университет имени А. Г. и Н. Г. Столетовых, 600000 Россия, Владимир, ул. Горького, 87; e-mail: trsvmargarita@yandex.ru.

и более раз превышает критическую мощность самофокусировки, формирует множество филаментов.

Описание экспериментальной схемы. В качестве источника лазерного излучения использовался иттербиевый фемтосекундный лазер ТЕТА-10, обладающий следующими параметрами: центральная длина волны излучения $\lambda = 1029 \pm 2$ нм, длительность импульса излучения $\tau = 280$ фс, частота повторения импульсов $f = 10$ кГц, энергия в импульсе $\varepsilon_{\max} = 150$ мкДж.

В качестве образца использовалось кварцевое стекло марки КУ-1 с геометрическими размерами $5 \times 5 \times 20$ мм. КУ-1 – стекло кварцевое оптическое, прозрачное в ультрафиолетовой и видимой областях спектра, без полос поглощения в интервале длин волн 170–250 нм, с полосами поглощения в интервалах длин волн 2100–2300 нм и 2600–2800 нм, нелюминесцирующее, радиационно-оптически устойчивое [5]. Была проведена серия экспериментов по измерению параметров филаментов, а именно, длины (регистрировалась по длине плазменного канала) и распределения интенсивности в поперечном профиле пучка [6]. Схема проведения эксперимента представлена на рис. 1.

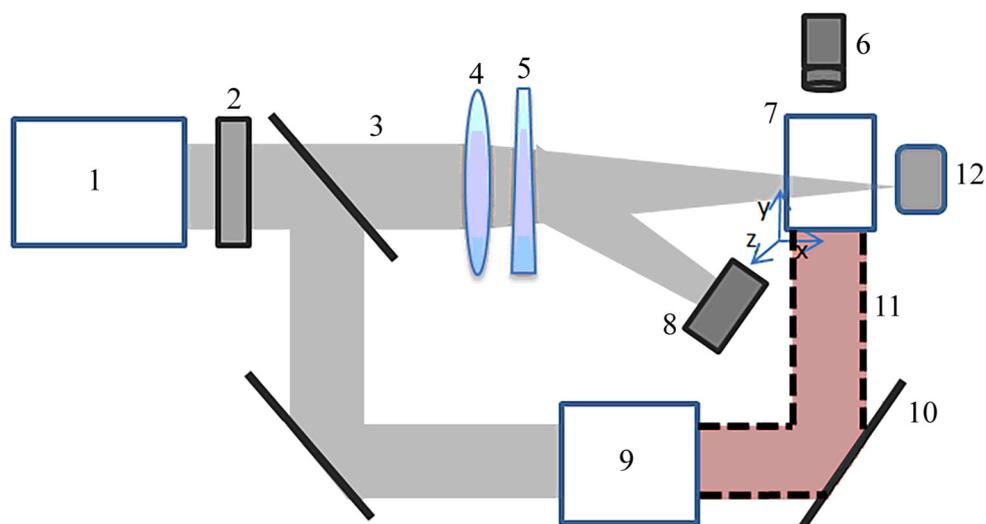


Рис. 1: Схема измерения параметров филаментов: 1 – лазерная система; 2 – поляризационный ослабитель; 3 – лазерное излучение с центральной длиной волны; 4 – сферическая линза; 5 – оптический клин; 6 – камера и микробъектив; 7 – образец; 8 – фотодиодный датчик; 9 – блок преобразователя частоты; 10 – зеркало; 11 – лазерное излучение с длиной волны 257 нм; 12 – измерительный прибор поперечного профиля распределения интенсивности лазерного излучения.

Для фокусировки лазерного излучения использовалась сферическая линза с фокусным расстоянием 150 мм. Образец был закреплен на прецизионном подвижном столике XYZ, что позволяло перемещать его относительно фокуса. В нашем случае фокус был расположен за задней гранью образца, для предотвращения его разрушения. Поляризаторный ослабитель необходим для регулирования значений мощности излучения. Фоторегистрация зоны филаментации проводилась с помощью ССD-камеры и микрообъектива, расположенных на трехкоординатном прецизионном столике над образцом.

Измерение параметров и управление пространственным распределением филаментов. Были измерены параметры филаментов: длина филамента, зависимость длины от мощности, критическое значение мощности начала филаментации, а также мощность, необходимая для начала эффекта множественной филаментации. При использовании фокусирующей линзы диаметр пучка в фокусе составил 50 мкм, что соответствует импульсной плотности мощности $\sim 10^{13}$ Вт/см², при энергии в импульсе 150 мкДж. Для удобства в работе приведены значения средней мощности. Изображения зоны филаментации при различных значениях средней мощности представлены на рис. 2. При увеличении мощности излучения длина филамента растет.

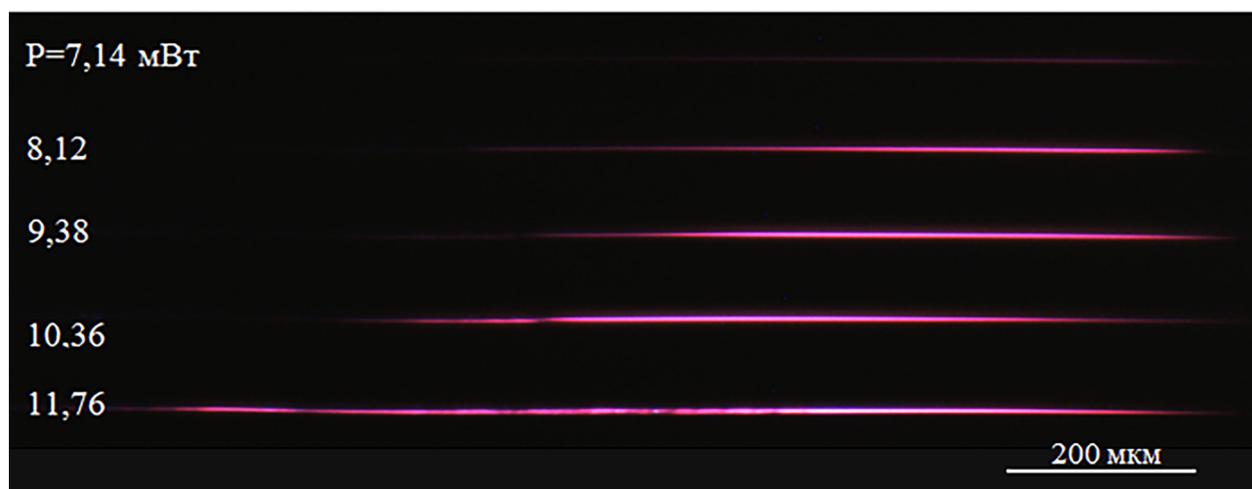


Рис. 2: Филаментация в плавленом кварце КУ-1.

Экспериментально определено значение критической мощности, которое составило 5.18 мВт. Регистрация отдельных филаментов осуществлялась путем фотофиксации сформированных плазменных каналов. При достижении значения 38.5 мВт был замечен эффект образования множественной филаментации. При филаментации происходит перераспределение интенсивности в поперечном профиле пучка. Прохождение высокоин-

тенсивного излучения через образец формирует участки с измененным показателем преломления в местах самолокализации лазерного излучения. В дальнейшем формирование филаментов происходит на модифицированных участках. На рис. 3 представлено распределение интенсивности в поперечном профиле пучка при различных значениях мощности излучения, которое получено при помощи BeamStar – устройства, измеряющего поперечный профиль распределения интенсивности лазерного излучения.

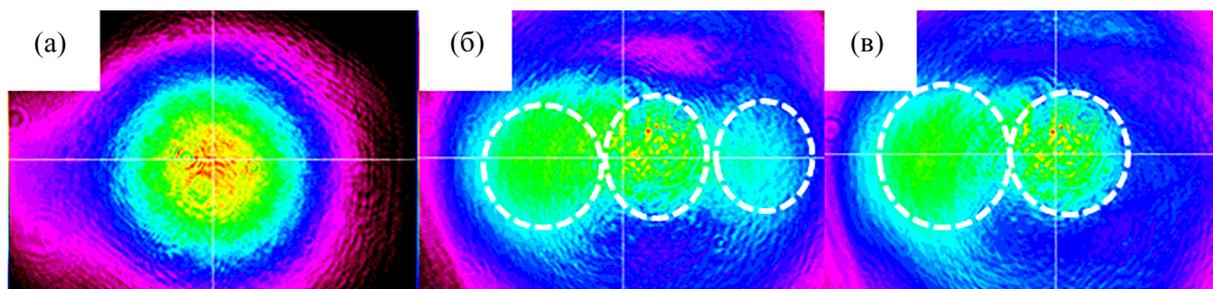


Рис. 3: Распределение поперечного профиля интенсивности лазерного пучка: (а) исходный пучок; (б) мощность 4.2 мВт; (в) мощность 9 мВт.

Исходя из рис. 3 можно сделать вывод, что образование филаментов происходит и при меньших значениях мощности, когда визуально филамент не наблюдается. При 4.2 мВт происходит перераспределение на несколько локальных максимумов интенсивности, которые выражены не сильно. Достижение мощности 5.18 мВт позволяет зарегистрировать филамент с помощью камеры. При мощности 9 мВт наблюдается два выраженных более обособленных максимума. Таким образом, используя явление филаментации, можно получать перераспределение интенсивности, формируя несколько локальных максимумов.

Множественная филаментация мощных фемтосекундных лазерных импульсов развивается неизбежно и носит стохастический характер. Поэтому представляет интерес изучение вопроса управления филаментацией. Использование фокусировки, например цилиндрической или аксиконной оптики, является одним из простейших способов управления параметрами лазерных филаментов и их плазменных каналов [7].

Была проведена серия экспериментов с использованием цилиндрической линзы с фокусным расстоянием 50 мм, пучок излучения фокусировался в линию, соответственно, мощность лазерного излучения распределяется по большей площади, чем в предыдущем эксперименте со сферической оптикой, и для достижения эффекта филаментации требуются большие значения мощности.

Использование в экспериментах цилиндрической оптики позволяет сформировать массивы филаментов, распространяющихся в одной плоскости [8]. При этом происходит перераспределение интенсивности в поперечном профиле пучка, представленное на рис. 4.

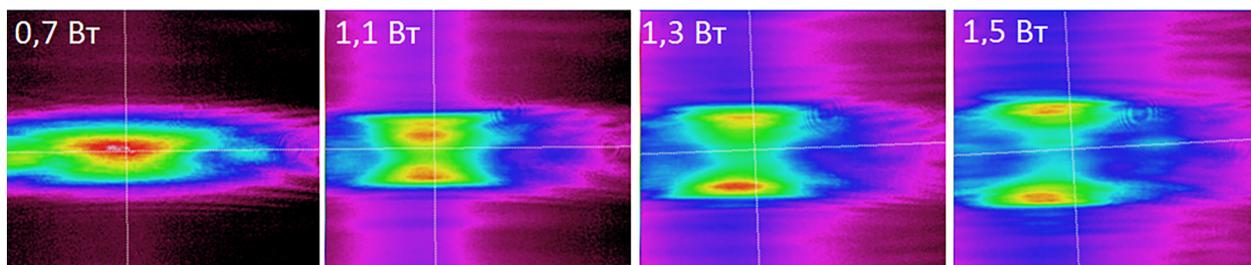


Рис. 4: Распределение интенсивности в поперечном профиле пучка при различных значениях мощности лазерного излучения, с использованием цилиндрической оптики.

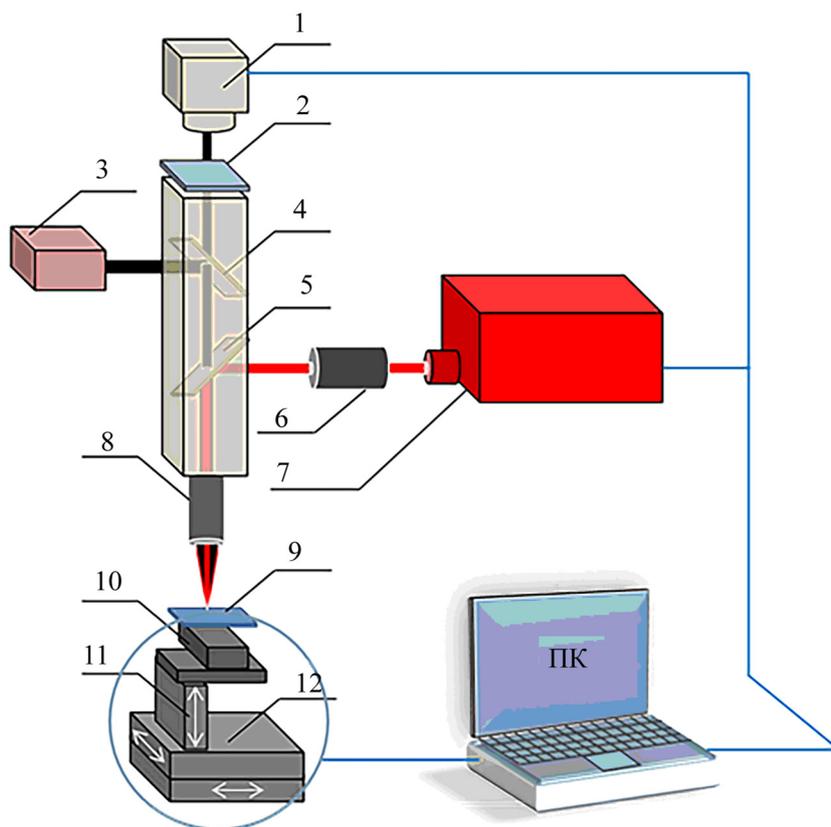


Рис. 5: Экспериментальная схема по модификации кварцевого образца. Пояснения в тексте.

Эксперимент по модификации кварцевого стекла. Был проведен эксперимент по модификации образца с использованием явления множественной филаментации. Лазерное излучение проходило по портално-перископической системе, схема проведения эксперимента представлена на рис. 5.

На рис. 5 лазерное излучение фемтосекундной лазерной системы 7 проходило через поляризационный ослабитель 6 [9]. Далее излучение отражалось от дихроичного зеркала 5 и фокусировалось в образец 9 с помощью фокусирующего объектива 8. Перемещение образца осуществлялось с помощью XYZ платформы 11-12, а также моторизованного привода 10. Настройка области фокусировки и визуализация полученных результатов осуществлялась с помощью камеры 1 и подсветки 3, свет от которой, проходя через светоделитель, распространялся в направлении области обработки через фокусирующий объектив 8, а также в противоположном направлении, и, проходя через светофильтр 2, попадал на матрицу камеры 1. Траектория перемещения образца задавалась с использованием компьютерной программы. Запись структур осуществлялась продольно. Мощность излучения составляла 600 мВт, скорость перемещения луча по образцу составляла 50 мкм/с. Для визуализации образованных структур образец подсвечивался ультрафиолетовым излучением с длиной волны 257 нм, которое было получено из блока преобразователя частоты, согласно схеме, изображенной на рис. 1. Блок преобразования частоты позволяет получать излучение второй и четвертой гармоники, последняя и была необходима в данной работе. Ультрафиолетовое излучение, попадая в образец кварцевого стекла, вызывало выраженную люминесценцию образованных структур. На рис. 6 представлены оптические структуры в подсветке УФ-излучением.

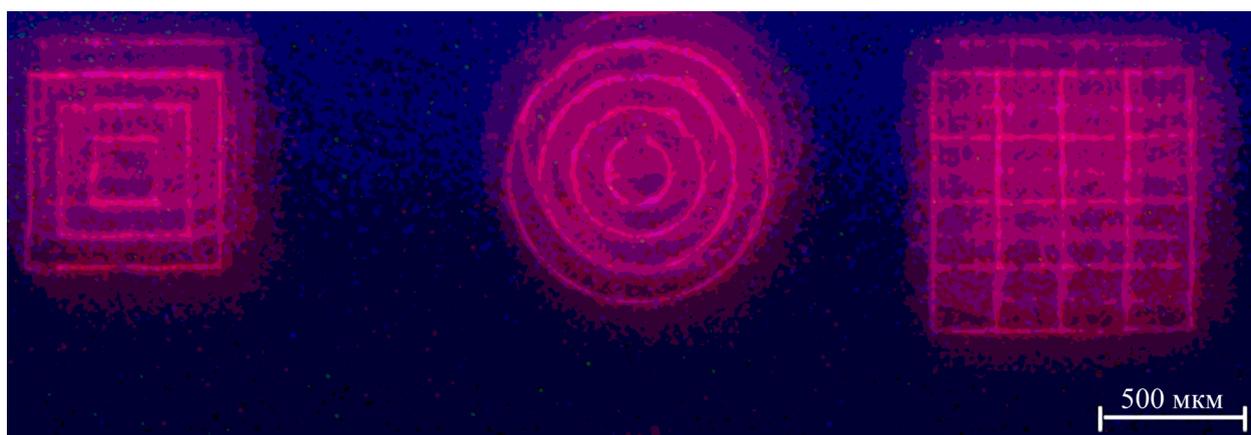


Рис. 6: Оптические структуры в подсветке УФ-излучением.

На рис. 7 представлено перераспределение интенсивности при прохождении лазерного излучения с центральной длиной волны через весь объем модифицированного образца, согласно схеме на рис. 1, но без использования фокусирующей линзы. Диаметр пучка лазерного излучения составлял порядка 4 мм.

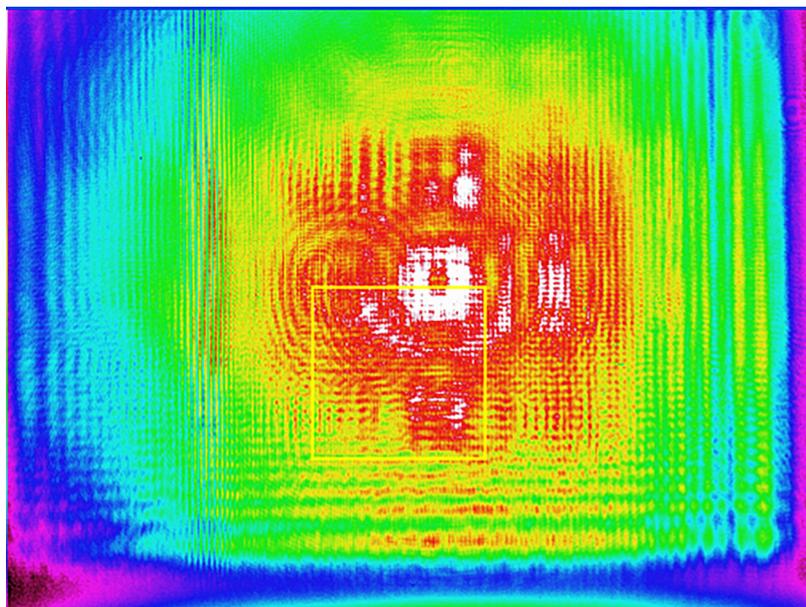


Рис. 7: Снимок перераспределения интенсивности.

Перемещение луча по образцу с заданной траекторией формирует структуры, которые обеспечивают перераспределение интенсивности. Геометрия распределения интенсивности определяется пространственным расположением элементов образованных структур.

Заключение. Таким образом, в данной работе исследован процесс перераспределения интенсивности при филаментации фемтосекундного лазерного излучения, позволяющий формировать протяженные структуры с измененным показателем преломления. Проведена серия экспериментов с использованием цилиндрической оптики, что позволяет получать упорядоченное расположение филаментов в одной из плоскостей. Управляя пространственным расположением филаментов, возможно осуществить распределение интенсивности с заданной геометрией. Управление пространственным положением филаментов представляет большой интерес, так как может применяться при модификации и структурировании материалов.

Работа была выполнена в рамках государственного задания ВлГУ 3.5531.2017/8.9 ГБ-1106/17 и грантов РФФИ №№ 16-42-330651, 16-08-01226.

Л И Т Е Р А Т У Р А

- [1] С. В. Чекалин, В. О. Компанец и др., Квантовая электроника **34**(4), 326 (2013).
- [2] В. П. Кандидов, С. А. Шленов, Е. П. Силаева, А. А. Дергачев, Оптика атмосферы и океана **23**(10), 873 (2010).
- [3] С. В. Чекалин, В. П. Кандидов, Успехи физических наук **183**(2), 133 (2013).
- [4] В. П. Кандидов, В. Ю. Федоров и др., Квантовая электроника **41**(4), 382 (2011).
- [5] В. А. Зверев, Е. В. Кривоустова, Т. В. Точилина, *Оптические материалы. Часть 2* (ИТМО, СПб., 2013).
- [6] М. А. Тарасова, Д. А. Кочуев, К. С. Хорьков и др., в сборнике: IV Международная конференция “Лазерные, плазменные исследования и технологии”, Москва, 2018 (М., НИЯУ МИФИ, 2018), с. 518.
- [7] F. Theberge, W. Liu, P.Tr. Simard et al., Physics Review E **74**, 036406 (2006).
- [8] J-Ph. Bérubé, R. Vallée et al., Optics Express. **18**(3), 1801 (2010).
- [9] А. С. Черников, К. С. Хорьков, Д. А. Кочуев, Р. В. Чкалов, в: Международная научно-техническая конференция “INTERMATIC–2017”, Москва, 2017 (Редакционно-издательский отдел МИРЭА, Москва, 2017), с. 176.

По материалам VII Международной молодежной научной школы-конференции “Современные проблемы физики и технологий”.

Поступила в редакцию 12 июля 2018 г.