

Закономерности филаментации фемтосекундного лазерного излучения в воздухе в режиме абберационной фокусировки

Д.В. Апексимов, Ю.Э. Гейнц, А.М. Кабанов, А.В. Петров, Е.Е. Хорошаева*

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

Поступила в редакцию 18.02.2022 г.

Представлены результаты лабораторных экспериментов по управлению областью филаментации сфокусированного фемтосекундного лазерного пучка с пространственно структурированным (с помощью деформируемого зеркала) волновым фронтом. Исследовались абберационные пучки, состоящие из когерентных вложенных друг в друга кольцевых субапертур, получаемых при специфической определенной из теоретических оценок форме деформируемого зеркала. Это позволяет в процессе распространения лазерного пучка создавать неоднородности распределения амплитуды оптического поля, которые впоследствии могут стать затравками для формирования световых филаментов. Такой режим управления филаментацией мощного излучения не требует компенсации искажений начального профиля пучка, а, наоборот, основан на контролируемом внесении предварительно рассчитанных аббераций волнового фронта.

Ключевые слова: ультракороткое лазерное излучение, структурированный свет, эффект Керра, самофокусировка, высокоинтенсивные световые каналы; ultrashort laser radiation, structured light, Kerr effect, self-focusing, high-intensity light channels.

Введение

Распространение мощного фемтосекундного лазерного излучения в среде сопровождается рядом нелинейно-оптических эффектов, которые приводят к формированию пространственно локализованных световых каналов – филаментов [1, 2] с характерной интенсивностью до десятков ТВт/см², содержащих внутри себя высоко ионизированные (плазменные) области среды. После окончания филаментации и разрушения плазменных областей, в лазерном пучке остаются «следы» филаментов – постфиламентационные световые каналы (ПФК) с достаточно высокой интенсивностью (до 10¹¹ Вт/см²) и пониженной угловой расходимостью (по сравнению с пучком в целом) [3, 4]. В ряде случаев возможно так называемое бесплазменное самоканалирование излучения [5] по всей оптической трассе, когда в процессе распространения пучка также формируются устойчивые световые каналы, но с интенсивностью до 10¹² Вт/см² и низкой (не регистрируемой в экспериментах) плотностью лазерной плазмы. Подобный режим характерен для излучения с мощностью,

близкой по величине к порогу самофокусировки в среде распространения, или же в случае сильных аббераций лазерного пучка [5, 6].

Исследования особенностей распространения таких световых каналов показали их уникальные свойства, применимые в ряде задач атмосферной оптики [7–9], решение которых непосредственно связано с доставкой высокой плотности мощности излучения в заданную точку пространства. Филаменты характеризуются высокой интенсивностью, малыми размерами (несколько сотен микрон) и угловой расходимостью (до нескольких десятков мкрад), большой протяженностью (сотни метров) и высокой устойчивостью к внешним воздействиям, таким как турбулентность, присутствие аэрозолей и т.д. [1, 10, 11]. Для использования филаментов при решении задач атмосферной оптики необходимо научиться управлять ими на протяженных дистанциях.

В настоящее время известно несколько способов управления длиной и положением филаментов на протяженной атмосферной трассе. Один из них связан с chirпированными (частотно-модулированными) импульсами [12]. Другой заключается в пространственной модуляции начального распределения амплитуды или фазы [13, 14] светового поля и соответствующих изменений условий самофокусировки пучка. В экспериментах контролируемые фазовые искажения начального профиля пучка можно реализовать с помощью адаптивного модуля, в который входят деформируемое зеркало (ДЗ) и датчик

* Дмитрий Владимирович Апексимов (apeximov@iao.ru); Юрий Эльмарович Гейнц (ygeints@iao.ru); Андрей Михайлович Кабанов (kam@iao.ru); Алексей Вадимович Петров (awp@iao.ru); Елена Евгеньевна Хорошаева (bee@iao.ru).

волнового фронта [15]. ДЗ также используется в комбинированной схеме с телескопом – еще одним способом управления филаментацией [16]. Амплитудных искажений начального профиля пучка можно добиться путем использования амплитудных масок [17].

Представляет интерес развитие способов управления областью множественной филаментации, в частности, с помощью ДЗ как инструмента, позволяющего реализовать комплексную пространственно-фазовую модуляцию пучка в целом и отдельных его областей.

Изначально главной задачей ДЗ была компенсация искажений волнового фронта для увеличения качества изображений астрономических объектов [18]. Способ компенсации оптических искажений с использованием ДЗ основан на измерении aberrаций искаженного волнового фронта и преобразовании результатов этих измерений в набор управляющих сигналов – напряжений – для элементов ДЗ адаптивной оптической системы. Следовательно, для компенсации искажений, вносимых средой распространения, поверхность зеркала с помощью управляющих напряжений задается обратной измеренным aberrациям искаженного волнового фронта. Более того, ДЗ может быть применено для компенсации оптических aberrаций пучков мощных лазерных систем, для которых искаженный начальный профиль является нормой в силу конструктивных особенностей таких систем.

Для рассматриваемой задачи управления филаментацией мощного излучения представляется важным не компенсировать искажения волнового фронта, а, наоборот, создавать их по определенному закону, чтобы инициировать самофокусировку, прежде всего, в определенных областях пучка. Конструктивные особенности ДЗ дают возможность задать отражающую поверхность определенной кривизны.

Задача реализации комплексной пространственно-фазовой модуляции пучка в целом и отдельных его областей может быть сведена к определению необходимых управляющих напряжений для формирования предварительно рассчитанной поверхности зеркала. Для этих целей могут быть использованы теоретические представления о филаментации пространственно-структурированного пучка в воздухе, позволяющие оценить необходимый уровень aberrаций фазы волны [5, 6].

В настоящей работе мы представляем результаты экспериментов по филаментации сфокусированных пучков фемтосекундного лазерного излучения в воздухе. Для контроля за участком филаментации пучка мы создаем сильные aberrации его фазового профиля с помощью ДЗ, сопряженного с телескопом. Радиально-кольцевой тип ДЗ позволил получить пространственно-структурированные пучки с мультикольцевым профилем интенсивности.

Экспериментальные исследования

В экспериментах по исследованию влияния фазовой модуляции пучка на филаментацию в воздухе использовалась схема, представленная на рис. 1. Источник лазерных импульсов – титан-сапфировый (Ti:Sa) фемтосекундный лазерный комплекс «СТАРТ-480М» производства ООО «Авеста-Проект» (Россия), расположенный в Институте сильноточной электроники СО РАН. Характеристики комплекса: длительность импульса $\tau = 65$ фс (контроль автокоррелятором ASF-20), начальная энергия импульса $E_0 < 13$ мДж (контроль измерителем мощности ОРНИР-II), частота следования импульсов – 10 Гц, начальный диаметр пучка $d_0 = 20$ мм (по уровню энергии e^{-2}), длина волны $\lambda = 950$ нм.

Деформируемое зеркало использовалось в двух режимах: режим плоского зеркала (рис. 2, а), когда

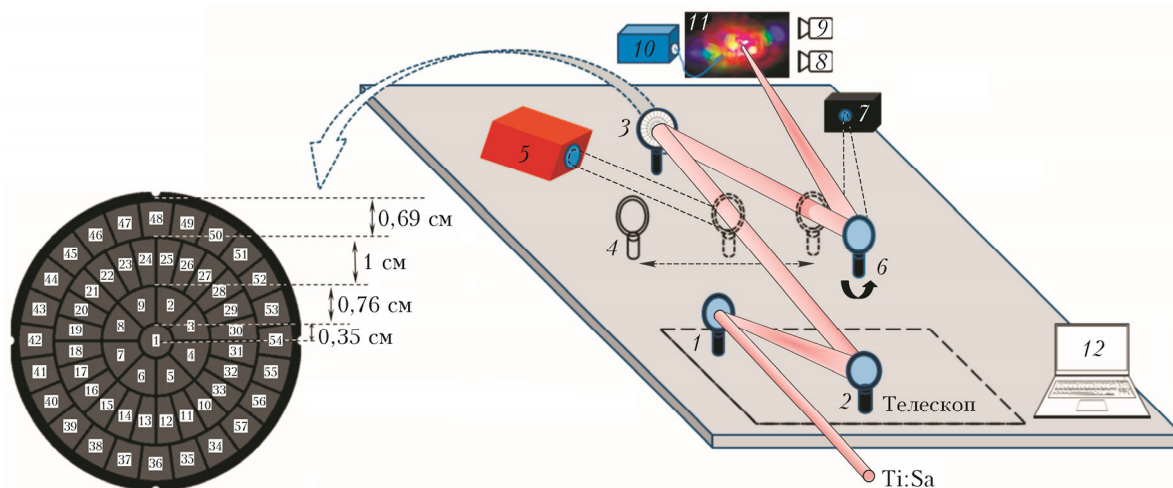


Рис. 1. Телескопическая система по схеме Галилея: 1 – дефокусирующее зеркало с радиусом кривизны -75 см; 2 – фокусирующее зеркало с радиусом кривизны 200 см; 3 – деформируемое зеркало U-Flex-56-MDL-57 с блоком управления пьезоприводами PAD-300; 4 – оптический клин Optosigma WSSQ-50C10-10-3; 5 – датчик Шака–Гартмана Shah 6060; 6 – фокусирующее зеркало с радиусом кривизны 200 см; 7 – измеритель профиля пучка LBP2-HR-VIS; 8 – фотокамера Pentax K-3 (25 МП) с макрообъективом Pentax100MacroWR; 9 – CCD-камера ANDOR-Clara E; 10 – спектрометр Maya 2000 Pro; 11 – экран; 12 – ноутбук для управления (3), (5), (7), (9), (10). Слева – структура деформируемого зеркала с размерами управляющих колец (цвет. рисунок см. <http://iao.ru/ru/content/vol.35-2022/iss.04>)

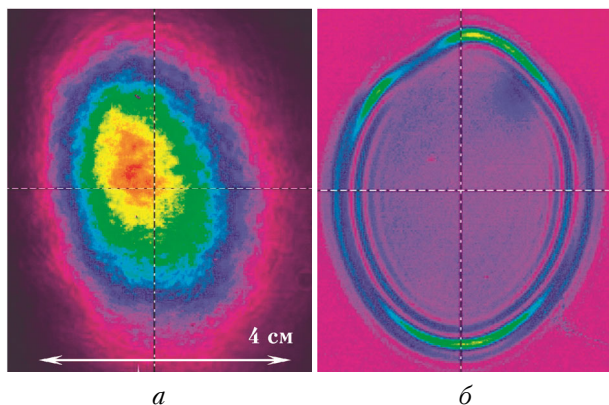


Рис. 2. Профиль пучка, зафиксированный на расстоянии 2 м от ДЗ, в режиме плоского зеркала (а) и в режиме aberrаций (б); $E_0 = 6$ мДж (цв. рисунок см. <http://iao.ru/ru/content/vol.35-2022/iss.04>)

форма пучка такая же, как на выходе Тi:Sa-системы, и режим с искривленной отражающей поверхностью, в дальнейшем называемый aberrационным (рис. 2, б).

Для задействования максимального числа активных элементов ДЗ размер начального пучка был увеличен в два раза с помощью телескопической системы и составил 4 см. Размер апертуры ДЗ составлял 5,6 см, следовательно, увеличенный пучок полностью перекрывался зеркалом, а незадействованным оставалось только внешнее кольцо актюаторов. При этом немаловажно, что исключение из работы внешнего кольца дз позволило устранить влияние краевых эффектов при фокусировке пучка. В обоих режимах работы пучок после отражения от ДЗ оставался коллимированным с E_0 от 6 до 12,5 мДж. Дальнейшая фокусировка пучка в воздухе осуществлялась сферическим зеркалом с радиусом кривизны 200 см.

Использовавшийся в измерениях aberrационный кольцевой профиль пучка был определен ранее в рамках теоретического моделирования филаментации мощного излучения в воздухе на основе численного решения эволюционного уравнения для средней (по времени) амплитуды оптического поля [6, 19], дополненного интегральным соотношением для генерации электронной плазмы в канале излучения.

Эта методика продемонстрировала неплохое согласие, прежде всего, по положению нелинейного фокуса и длине филаментации, с результатами решения полной задачи с учетом временной структуры импульса. Конструирование волнового фронта излучения $\theta(\mathbf{r}_\perp)$ проводилось на основе модового разложения по ортогональным полиномам Цернике в полярных координатах r и φ :

$$\theta(\mathbf{r}_\perp) = k_0 \sum_{n,m} c_n^m [R_n^m(r) \cos m\varphi + R_n^{-m}(r) \sin m\varphi],$$

где $R_n^m(r)$ — полиномы Цернике, заданные на единичном круге $0 \leq r \leq 1$; c_n^m — коэффициенты разложения; k_0 — волновое число. Как правило, использовались только три полинома, задающие наиболее значимые радиально-симметричные ($m = 0$) aberrации [20]: дефокусировка (R_2^0), сферические aberrации 3-го (R_4^0) и 5-го порядков (R_6^0). Этого оказалось достаточным для воспроизведения фазы излучения, приводящей к формированию требуемого многокольцевого распределения амплитуды в зоне дифракции Френеля, имитирующего пучок бессель-гауссовского профиля.

На практике структурирование пучка было реализовано путем деформации поверхности зеркала подачей на определенные элементы конкретных значений управляющих напряжений: эл. 1 — +275 В, эл. 2–9 — +150 В, эл. 10–33 — –300 В, эл. 34–57 — 0 В, т.е. фактически центральная часть пучка дефокусировалась, а периферия фокусировалась. Нулевое напряжение на электродах внешнего кольца ДЗ означает, что оно не использовалось.

На рис. 3 представлена эволюция поперечного профиля пучка вдоль трассы наблюдения при работе ДЗ в режиме плоского зеркала. Датчиком Шака–Гартмана контролировались aberrации волнового фронта и значения функции рассеяния. Из рис. 4, а видно, что рассеяние энергии в изображении точки в режиме плоского зеркала для начального профиля пучка фактически соответствует распределению в плоскости наилучшей установки, что указывает на минимальную величину aberrаций. Точка рассеяния определяется на основе функции рассеяния точки [21].

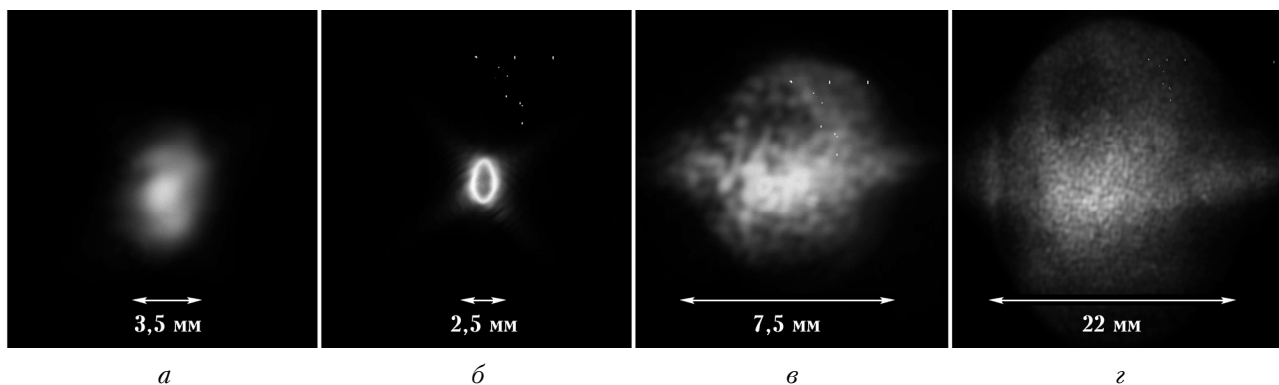


Рис. 3. Поперечный профиль пучка на расстоянии 90 (а), 97 (б), 113 (в), 134 см (г) от фокусирующего зеркала; ДЗ в режиме плоского зеркала, $E_0 = 6$ мДж

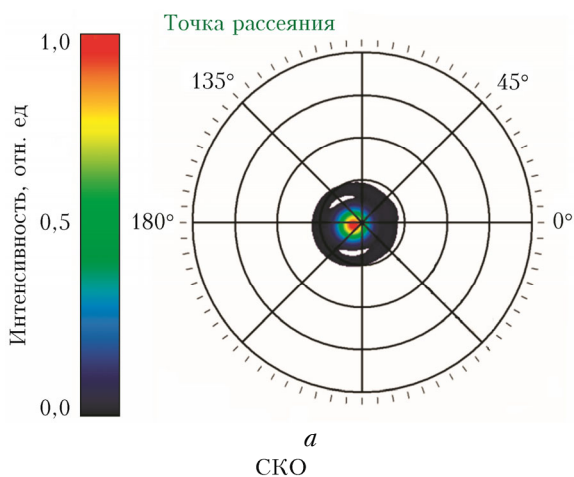


Рис. 4. Работа ДЗ в режиме плоского зеркала: точка рассеяния (а), СКО от идеального волнового фронта (б) (цвет. рисунок см. <http://iao.ru/ru/content/vol.35-2022/iss.04>)

При рассмотрении волновых aberrаций, прежде всего, оценивают среднеквадратическое отклонение (СКО), которое характеризует ошибки волнового фронта [21]. Полученные в эксперименте данные с датчика Шака–Гартмана позволили рассчитать коэффициенты разложения волнового фронта по орто-

гональным полиномам Цернике на круге единичного радиуса (активная часть апертуры ДЗ), которые определяют СКО от плоскости наилучшей установки [22]. Здесь основное влияние на величину aberrаций оказывают наклоны, дефокусировка и астигматизм. Значения СКО при работе ДЗ в режиме плоского зеркала представлены на рис. 4, б.

Из рис. 4, б видно, что значения СКО при работе ДЗ в режиме плоского зеркала минимальны (в пределах погрешности), в нашем случае для полиномов Цернике со 2-го по 5-й порядок, следовательно, величина aberrаций невелика. Этот факт подтверждает и рис. 3, где представлены профили пучка на различном удалении от фокусирующего зеркала. Можно утверждать, что с учетом заданной фокусировки профиль пучка сохраняет форму на расстоянии до 134 см при увеличении своего геометрического размера.

На рис. 5 показана динамика деформаций поперечного профиля пучка вдоль траектории наблюдения при работе ДЗ в режиме с aberrациями.

Здесь после геометрического фокуса зеркала (рис. 1, элемент б) появляется особенность в реализации нелинейно-оптических эффектов в виде устойчивых кольцевых световых структур (рис. 5, в–е), формирование которых происходит еще на этапе самофокусировки. Природа их возникновения связана с конкурирующим взаимодействием самофокусировки и плазменной рефракции импульса и обсуждается в [23]. Форма и энергосодержание этих кольцевых структур определяют расположение и число формирующихся интенсивных световых каналов, часть из которых впоследствии эволюционирует в филаменты.

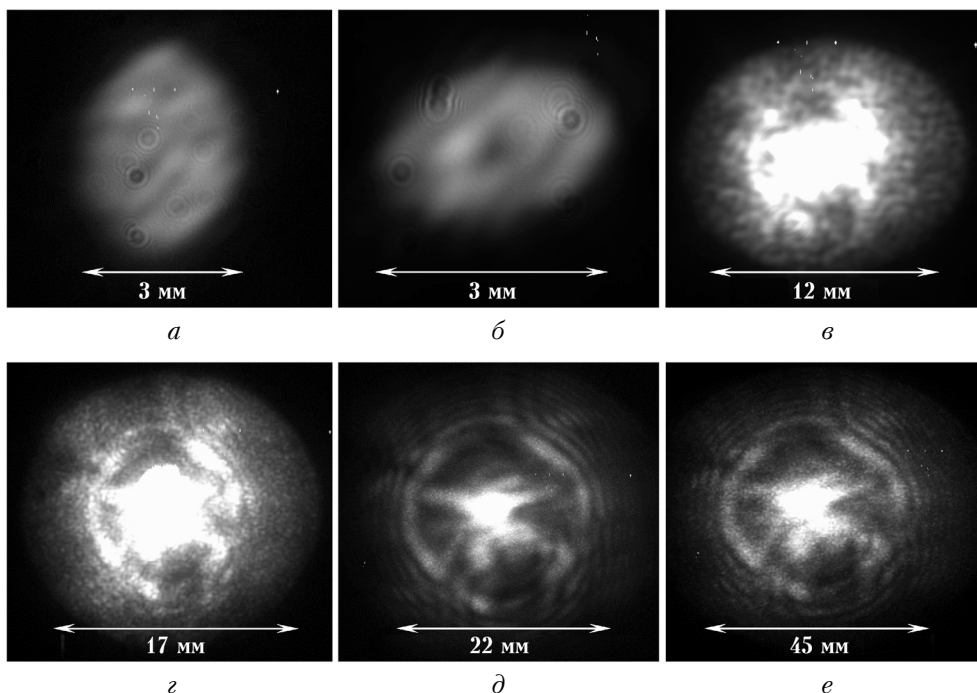


Рис. 5. Поперечный профиль пучка на расстоянии 90 (а), 100 (б), 117 (в), 128 (г), 154 (д), 213 см (е) от фокусирующего зеркала; ДЗ в режиме с искривленной отражающей поверхностью (aberrации), $E_0 = 6$ мДж

Дифракционная природа структур не подтверждается. Для доказательства этого было реализовано диафрагмирование исходного пучка, при котором формирование кольцевых структур начиналось сразу после диафрагмы (дифракция на краях диафрагмы). Из рис. 5, *a*, *b* видно, что никакие кольцевые распределения до геометрического фокуса зеркала не возникают, т.е. на всех оптико-механических узлах схемы эксперимента краевая дифракция пучка не проявляется.

Значения СКО и точки рассеяния при работе ДЗ в режиме с абберациями представлены на рис. 6. Из рис. 6, *b* видно, что при работе ДЗ в абберационном режиме значения СКО больше, чем в случае отклонения от плоскости наилучшей установки и, следовательно, величина аббераций фазы излучения велика. Этот факт подтверждает рис. 5, где на протяжении всей трассы наблюдения пучок искажается. Это объясняется тем, что при больших абберациях часть энергии перекачивается в кольцевые структуры (при значительном вкладе дефокусировки) и в различные сложные локализации (при остальных видах искажений), а распределение интенсивности полностью определяется присутствующими в системе абберациями (рис. 6, *a*) [21].

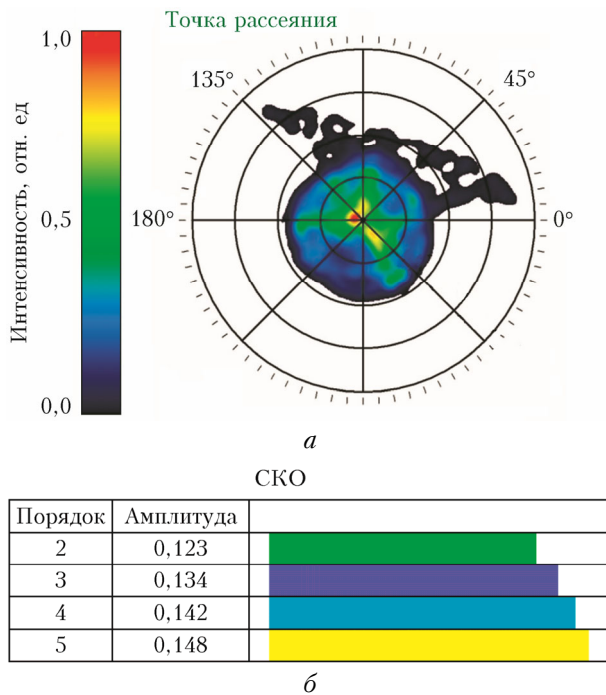


Рис. 6. Работа ДЗ в абберационном режиме: точка рассеяния (*a*), СКО от идеального волнового фронта (*b*) (цветной рисунок см. <http://iao.ru/ru/content/vol.35-2022/iss.04>)

Представленные выше результаты позволили определить условия контролируемого образования неоднородностей в пучке, которые являются источником филаментов. Здесь стоит отметить, что при таких режимах работы ДЗ филаменты возникали только на кольцевых структурах. Данный факт фиксиро-

вался на фотобумаге. На рис. 7 представлена динамика филаментации сфокусированного фемтосекундного лазерного излучения при работе ДЗ в режиме плоского зеркала (*a*), (*b*), (*в*) и в режиме с абберациями (*a'*), (*b'*), (*в'*). Видно, что во всех случаях, кроме рис. 7, *в'*, формировалось две области филаментации. Это связано с особенностью филаментации эллиптического пучка, который генерировался лазерной установкой. Известно, что пучок такой формы характеризуется наличием двух разнесенных в пространстве зон филаментации, обусловленных наличием меридионального (первая область филаментации) и сагиттального (вторая область филаментации) фокусов [24].

Увеличение энергии лазерного излучения приводит к сдвигу в сторону источника координаты начала обеих областей филаментации и их удлинению, что согласуется с установленными ранее закономерностями [23]. Структурирование пучка деформируемым зеркалом способствовало повышению протяженности областей филаментации (рис. 7, *b'*). Однако на рис. 7, *в'* эти области трансформировались в одну с двумя ярко выраженными максимумами свечения. Распределению интенсивности вдоль всей области филаментации способствовало увеличение протяженности двух отдельных областей при повышении энергии лазерного излучения и уменьшение их яркости свечения по сравнению со случаем плоского зеркала. Такая динамика обусловлена высокой начальной энергией пучка и искаженным волновым фронтом, характерным для бессель-гаусовского и кольцевого распределений интенсивности, которые приводят к большей протяженности зоны филаментации [25].

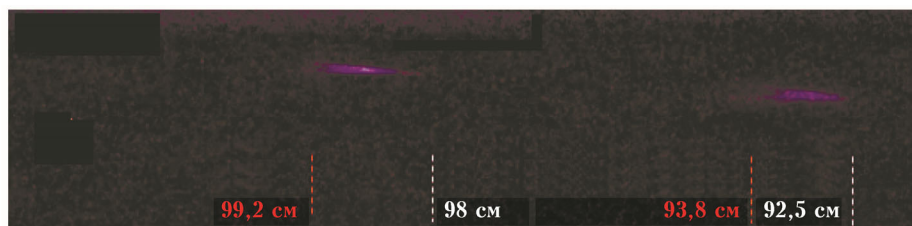
На рис. 8 видно, что световые каналы после филаментации, представленной на рис. 7, *в'*, распространяются уже как ПФК.

Для их визуализации по трассе распространения был внесен стеклянный образец марки К8 (60 × 60 × 100 мм) как среда с более сильной, чем у воздуха, кубичной нелинейностью и, следовательно, более низким порогом филаментации (единицы МВт [26]). Видно, что бесплазменные ПФК, попадая в стекло, входят в режим филаментации, проявляющийся в виде яркого белого свечения образца.

На рис. 9 представлены спектры исходного лазерного излучения и сфокусированного излучения при работе ДЗ в двух режимах. Видно, что в режиме плоского зеркала происходит сдвиг спектра в коротковолновую область, при этом ширина спектра импульса увеличивается в два раза относительно начальной (~26 нм) и составляет ~54 нм. В режиме с абберационной поверхностью зеркала также происходит сдвиг в коротковолновую область спектра. Однако он уже менее значительный по сравнению с предыдущим случаем, а ширина спектра по половине максимума составляет ~38 нм.

Такое поведение спектров при филаментации закономерно и свидетельствует о наличии филаментов в среде при распространении лазерного излучения [27].

$$E_0 = 6 \text{ мДж}$$



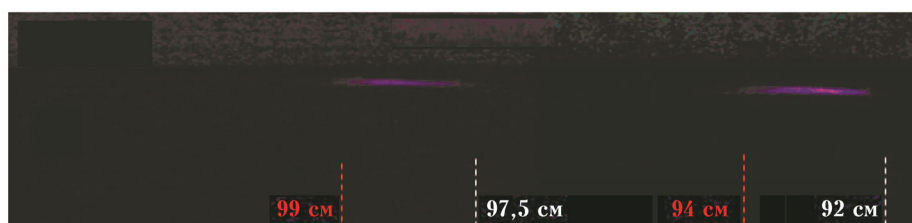
a

Две области филаментации
из-за слабой интенсивности свечения зафиксировать не удалось;
управляющие напряжения, поданные на ДЗ:

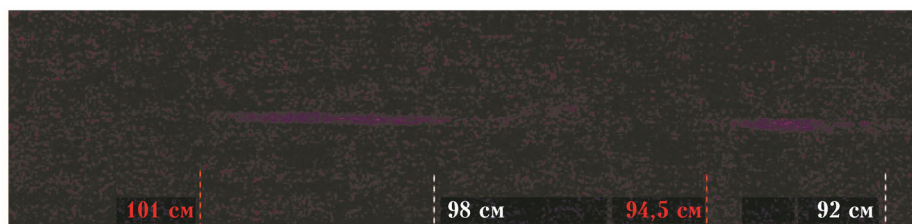
эл. 1 – +275 В
эл. 2–9 – +150 В
эл. 10–33 – –300 В

a'

$$E_0 = 9 \text{ мДж}$$



b

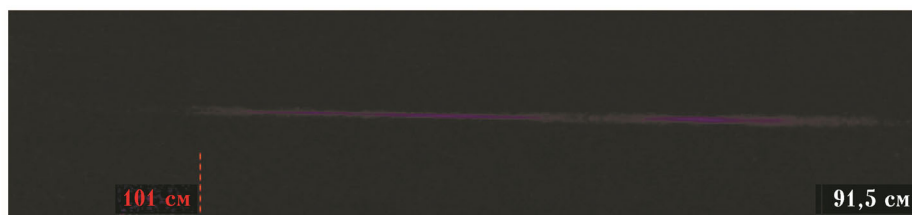


b'

$$E_0 = 12,5 \text{ мДж}$$



c



c'

Рис. 7. Филаментация сфокусированного фемтосекундного лазерного излучения при работе ДЗ в режиме плоского зеркала (*a–c*) и в абберационном режиме (*a'–c'*) при $E_0 = 6$ (*a, a'*); 9 (*b, b'*); 12,5 мДж (*c, c'*) (цв. рисунок см. <http://iao.ru/ru/content/vol.35-2022/iss.04>)

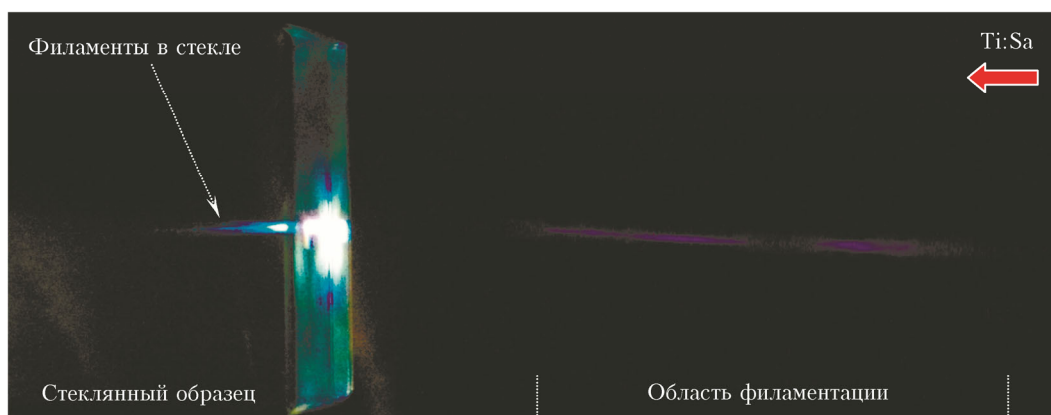


Рис. 8. Филаментация для случая на рис. 7, σ' и дальнейшее распространение ПФК, для визуализации которых применялся стеклянный образец (цв. рисунок см. <http://iao.ru/ru/content/vol.35-2022/iss.04>)

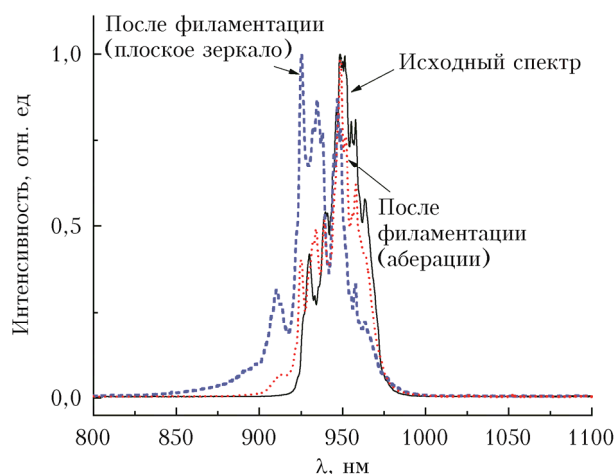


Рис. 9. Исходный спектр излучения, спектр после филаментации (ДЗ в режиме плоского зеркала), спектр после филаментации (ДЗ в режиме с искривленной отражающей поверхностью); $E_0 = 12,5$ мДж (цв. рисунок см. <http://iao.ru/ru/content/vol.35-2022/iss.04>)

Меньшее «синее» уширение спектра импульса в режиме абберационной фокусировки свидетельствует о меньшей плотности свободных электронов плазменных областей, образующихся в результате многофотонной ионизации воздуха фемтосекундным излучением, что показывает сниженная интенсивность свечения области филаментации на рис. 7, σ и σ' .

Заключение

Установлены закономерности филаментации пространственно-структурированного пучка фемтосекундного лазерного излучения с мультикольцевым профилем интенсивности. Структурирование осуществлялось путем внесения определенного типа аббераций волнового фронта с помощью деформируемого зеркала и последующей фокусировкой излучения в воздухе. Оказалось, что подобный тип структурирования пучка приводит к более раннему формированию интенсивных световых каналов и плазменных

областей, а также к возникновению повторной филаментации после прохождения фокальной перетяжки. Это можно объяснить различием в динамике дифракции унимодального (гауссовского) и пространственно-структурированного кольцевого пучков.

Сформированные при абберационной фокусировке кольцевые световые структуры образуют неоднородности, которые в дальнейшем в результате самофокусировки определяют расположение интенсивных световых каналов (и филаментов) как в поперечном сечении пучка, так и вдоль трассы распространения. Кольцевые структуры способствовали трансформации двух областей филаментации в одну более протяженную область с ярко выраженными максимумами свечения азота. При этом по сравнению со случаем плоского зеркала в режиме аббераций зафиксировано уменьшение яркости свечения протяженной области филаментации, что говорит о более низкой плотности электронов плазмы в филаменте.

Полученные результаты позволяют предположить, что для контролируемого распространения филаментов на протяженные дистанции в атмосфере необходимо создавать «нелинейные волноводы», число которых будет определять дальность распространения филаментов, их протяженность и ориентацию в поперечном профиле пучка. Повышение энергии лазерного излучения и увеличение числа активных колец деформируемого зеркала могут способствовать созданию благоприятных условий для возникновения филаментов.

Авторы выражают благодарность сотрудникам ИСЭ СО РАН В.Ф. Лосеву и С.В. Алексееву за помощь в проведении экспериментов на фемтосекундном лазерном комплексе.

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФ (№ 21-12-00109).

1. Braun A., Korn G., Liu X., Du D., Squier J., Mourou G. Self-channeling of high-peak-power femtosecond laser pulses in air // Opt. Lett. 1995. V. 20, N 1. P. 73–75.

2. *Self-focusing: Past and Present* / R.W. Boyd, S.G. Lukishova, Y.R. Shen (eds.). Berlin: Springer, 2009. 605 p.
3. *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. P. 3601–3606.
4. *Geints Yu.E., Ionin A.A., Mokrousova D.V., Seleznev L.V., Sinityn D.V., Sunchugasheva E.S., Zemlyanov A.A.* High intensive light channels formation in post-filamentation region of ultrashort laser pulses in air // *J. Opt.* 2016. V. 18, N 9. P. 095503.
5. *Méchain G., Couairon A., Andre Y.-B., D'Amico C., Franco M., Prade B., Tzortzakis S., Mysyrowicz A., Sauerbrey R.* Long-range self-channeling of infrared laser pulses in air: A new propagation regime without ionization // *Appl. Phys. B* 2004. V. 79. P. 379–382.
6. *Apeksimov D.V., Geints Yu.E., Matvienko G.G., Oshlakov V.K., Zemlyanov A.A.* Experimental study of high-intensity light channels produced on extended air-path by phase and amplitude modulated femtosecond laser pulses // *Appl. Opt.* 2022. V. 61, N 6. P. 1300–1306.
7. *Singh J., Thakur S.* Laser-Induced Breakdown Spectroscopy. Elsevier Science, 2020. 620 p.
8. *Clerici M., Hu Y., Lassonde P., Milian C., Couairon A., Christodoulides D.N., Chen Z., Razzari L., Vidal F., Legare F., Faccio D., Morandotti R.* Laser-assisted guiding of electric discharges around objects // *Sci. Adv.* 2015. V. 1, N 5. P. 1400111.
9. *Durand M., Houard A., Prade B., Mysyrowicz A., Durécu A., Moreau B., Fleury D., Vasseur O., Borchert H., Diener K., Schmitt R., Théberge F., Châteauneuf M., Daigle J., Dubois J.* Kilometer range filamentation // *Opt. Express*. 2013. V. 21, N 22. P. 26836–26845.
10. *Кандидов В.П., Шленов С.А., Косарева О.Г.* Филаментация мощного фемтосекундного лазерного излучения // *Квант. электрон.* 2009. Т. 39, № 3. С. 205–228.
11. *Kasparian J., Wolf J.-P.* Physics and applications of atmospheric nonlinear optics and filamentation // *Opt. Express*. 2008. V. 16, N 1. P. 466–493.
12. *Mechain G., Amico C.D., Andre Y.-B., Tzortzakis S., Franco M., Prade B., Mysyrowicz A., Couairon A., Salmon E., Sauerbrey R.* Range of plasma filaments created in air by a multi-terawatt femtosecond laser // *Opt. Commun.* 2005. V. 247, N 1. P. 171–180.
13. *Liu W., Hosseini S.A., Luo Q., Ferland B., Chin S.L., Kosareva O.G., Panov N.A., Kandidov V.P.* Experimental observation and simulations of the self-action of white light laser pulse propagating in air // *New J. Phys.* 2004. V. 6, N 6. P. 6.1–6.8.
14. *Hosseini S.A., Luo Q., Ferland B., Liu W., Chin S.L., Kosareva O.G., Panov N.A., Aközbek N., Kandidov V.P.* Competition of multiple filaments during the propagation of intense femtosecond laser pulses // *Phys. Rev. A*. 2004. V. 70, N 3. P. 033802-1–033802-12.
15. *Ionin A.A., Iroshnikov N.G., Kosareva O.G., Larichev A.V., Mokrousova D.V., Panov N.A., Seleznev L.V., Sinityn D.V., Sunchugasheva E.S.* Filamentation of femtosecond laser pulses governed by variable wavefront distortions via a deformable mirror // *J. Opt. Soc. Am. B: Opt. Phys.* 2013. V. 30, N 8. P. 2257–2262.
16. *Apeksimov D.V., Geints Yu.E., Matvienko G.G., Oshlakov V.K., Zemlyanov A.A.* Experimental study of high-intensity light channels produced on extended air-path by phase and amplitude modulated femtosecond laser pulses // *Appl. Opt.* 2022. V. 61, N 6. P. 1300–1306.
17. *Kosareva O.G., Liu W., Panov N.A., Bernhardt J., Ji Z., Sharifi M., Li R., Xu Z., Liu J., Wang Z., Ju J., Lu X., Jiang Y., Leng Y., Liang X., Kandidov V.P., Chin S.L.* Can we reach very high intensity in air with femtosecond PW laser pulses? // *Laser Phys.* 2009. V. 19, N 8. P. 1776.
18. *Jacques M.B.* Adaptive optics for astronomy principles, performance, and applications // *Ann. Rev. Astron. Astroph.* 1993. V. 31, N 1. P. 13–62.
19. *Berge L., Skupin S., Lederer F., Me'jean G., Yu J., Kasparian J., Salmon E., Wolf J.P., Rodriguez M., Woste L., Bourayou R., Sauerbrey R.* Multiple filamentation of terawatt laser pulses in air // *Phys. Rev. Lett.* 2004. V. 92. P. 22502.
20. *Bokalo S.Yu., Zhupanov V.G., Lyakhov D.M., Mizin P.P., Smekalin V.P., Shanin O.I., Shchipalkin V.I., Garanin S.G., Grigorovich S.V., Koltugin M.O., Kulikov S.M., Manachinskii A.N., Ogorodnikov A.V., Smyshlyayev S.P., Sukharev S.A.* Deformable mirror based on piezoelectric actuators for the adaptive system of the ISKRA-6 facility // *Quantum Electron.* 2007. V. 37, N 8. P. 691–696.
21. *Романова Г.Э., Паршин М.А., Серегин Д.А.* Конспект лекций по курсу «Компьютерные методы контроля оптики». СПб.: ИТМО, 2011. 185 с.
22. *Лавринов В.В., Лавринова Л.Н.* Анализ зависимости динамических свойств адаптивной оптической системы от характеристик гибкого зеркала и способа воздействия на него // *Оптика атмосф. и океана.* 2018. Т. 31, № 7. С. 570–577.
23. *Апексимов Д.В., Гейнц Ю.Э., Землянов А.А., Кабанов А.М., Матвиенко Г.Г., Ошлаков В.К.* Управление характеристиками множественной филаментации фемтосекундных лазерных импульсов в воздухе // *Оптика атмосф. и океана.* 2019. Т. 32, № 9. С. 717–725; *Apeksimov D.V., Geints Yu.E., Zemlyanov A.A., Kabanov A.M., Matvienko G.G., Oshlakov V.K.* Control of multiple filamentation of femtosecond laser pulses in air // *Atmos. Ocean. Opt.* 2020. V. 33, N 1. P. 42–50.
24. *Прокопьев В.Е., Лубенко Д.М., Лосев В.Ф.* Исследование пространственной структуры фемтосекундного лазерного пучка в области филамента при его абберационной фокусировке в воздухе // *Оптика атмосф. и океана.* 2020. Т. 33, № 9. С. 685–689.
25. *Geints Yu.E., Zemlyanov A.A.* Ring-Gaussian laser pulse filamentation in a self-induced diffraction waveguide // *J. Opt.* 2017. V. 19, N 10. P. 105502.
26. *Апексимов Д.В., Голик С.С., Землянов А.А., Кабанов А.М., Майор А.Ю., Петров А.В.* Динамика структуры области множественной филаментации лазерных импульсов в стекле // *Оптика атмосф. и океана.* 2016. Т. 29, № 12. С. 1029–1033; *Apeksimov D.V., Golik S.S., Zemlyanov A.A., Kabanov A.M., Mayor A.Yu., Petrov A.V.* Dynamics of the structure of multiple filamentation domain of laser pulses in glass // *Atmos. Ocean. Opt.* 2017. V. 30, N 3. P. 222–225.
27. *Апексимов Д.В., Землянов А.А., Иглакова А.Н., Кабанов А.М., Кучинская О.И., Матвиенко Г.Г., Ошлаков В.К., Петров А.В., Соколова Е.Б.* Локализованные световые структуры с высокой интенсивностью при множественной филаментации фемтосекундного импульса титан-сапфирового лазера на воздушной трассе // *Оптика атмосф. и океана.* 2017. Т. 30, № 11. С. 910–914; *Apeksimov D.V., Zemlyanov A.A., Iglakova A.N., Kabanov A.M., Kuchinskaya O.I., Matvienko G.G., Oshlakov V.K., Petrov A.V., Sokolova E.B.*

D.V. Apeksimov, Yu.E. Geints, A.M. Kabanov, A.V. Petrov, E.E. Khoroshaeva. **Regularities of femtosecond laser radiation filamentation in air under aberration focusing.**

Results of laboratory experiments on control of the filamentation domain of a focused femtosecond laser beam with a spatially structured (using a deformable mirror) wavefront are described. Aberration beams consisting of coherent interleaved ring subapertures obtained with a deformable mirror of specific form are studied. This allows producing inhomogeneities of the distribution of the optical field amplitude during laser beam propagation; these inhomogeneities can subsequently become seeds for light filaments. This approach to control high-power radiation filamentation does not require compensation for distortions of the initial beam profile; on the contrary, it is based on controllable introduction of pre-calculated wavefront aberrations.