

РАСПРОСТРАНЕНИЕ ОПТИЧЕСКИХ ВОЛН

УДК 530.182.551.510.42+535.621.33

Влияние фазовых аберраций на положение и протяженность области филаментации

Д.В. Апе́ксимов¹, Ю.Э. Гейнц¹, А.А. Землянов¹,
А.Н. Иглакова¹, А.М. Кабанов¹, О.И. Кучинская^{1,2},
Г.Г. Матвиенко¹, В.К. Ошлаков¹, А.В. Петров^{1*}

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

²Национальный исследовательский Томский государственный университет
634050, г. Томск, пр. Ленина, 36

Поступила в редакцию 3.08.2018 г.

Представлены результаты экспериментального и теоретического исследования филаментации фемтосекундных лазерных импульсов с использованием биморфного деформируемого зеркала, которое позволяет за счет фазовых искажений различных частей лазерного пучка управлять положением области филаментации по всей длине модельной трассы, детерминировать локализацию филаментов и высокоинтенсивных каналов в поперечном сечении пучка, формировать протяженные (> 100 м) высокоинтенсивные (10^{11} – 10^{12} Вт/см²) слаборасходящиеся бесплазменные каналы.

Ключевые слова: фемтосекундный лазерный импульс, филаментация, деформируемое зеркало; femto-second laser pulse, filamentation, deformable mirror.

Введение

Задача дальнего распространения высокоинтенсивного лазерного излучения актуальна для дистанционной диагностики аэрозольной и газовой компонент атмосферы с использованием, в том числе методов эмиссионного спектрального анализа. Уникальные свойства фемтосекундных лазерных импульсов (высокая мощность, филаментация, генерация суперконтинуального свечения, создание протяженных плазменных каналов) делают данный класс излучения привлекательным для задач атмосферной оптики [1–4]. При этом управление положением области множественной филаментации (ОМФ), особенно удаление ее от источника, является технически нетривиальной задачей. Существуют несколько методик удаления ОМФ: увеличение начального диаметра лазерного пучка [5], внесение начальной пространственной дефокусировки, временная фокусировка импульса за счет создания начальной частотной модуляции, т.е. отрицательное «чирпирование» исходного импульса, а также коррекция фазового и амплитудного фронтов лазерного пучка. В настоящей

работе для управления положением ОМФ на модельной трассе была применена гибридная схема, сочетающая в себе увеличение диаметра пучка, его начальную дефокусировку и дифференцированную коррекцию фазового фронта с использованием элементов адаптивной оптики.

Эксперимент

Для создания интенсивных световых каналов протяженностью десятки метров и управления их положением на трассе применялось деформируемое зеркало. Эксперименты проводились на стенде ИОА СО РАН с использованием Ti:Sapphire лазера с несущей длиной волны 780 нм. Схема эксперимента показана на рис. 1.

Расширение диаметра лазерного пучка до 5 см, а также его пространственная фокусировка или дефокусировка осуществлялись с помощью телескопа, состоящего из дефокусирующего 2 и фокусирующего 3 зеркал. База телескопа (50 см) соответствовала коллимированному пучку; уменьшение базы дефокусировало пучок, увеличение — фокусировало. В экспериментах регистрировались: начало области филаментации, ее конец и распределения филаментов (интенсивных световых каналов) внутри области филаментации с помощью CCD-камеры 9 на подвижном экране 12. С помощью фотокамеры 11 регистрировалась картина конической эмиссии. Кроме того, измерялись спектры постфиламентационных и бесфиламентационных каналов с использованием спектрометра Maya2000Pro и интегрирующей сферы.

* Дмитрий Владимирович Апе́ксимов (areximov@iao.ru); Юрий Эльмарович Гейнц (ygeints@iao.ru); Александр Анатольевич Землянов (zaa@iao.ru); Анастасия Николаевна Иглакова (ian@iao.ru); Андрей Михайлович Кабанов (kam@iao.ru); Олеся Ивановна Кучинская (olesyats14@mail.ru); Геннадий Григорьевич Матвиенко (megg@iao.ru); Виктор Константинович Ошлаков (ovk@iao.ru); Алексей Вадимович Петров (awp@iao.ru).

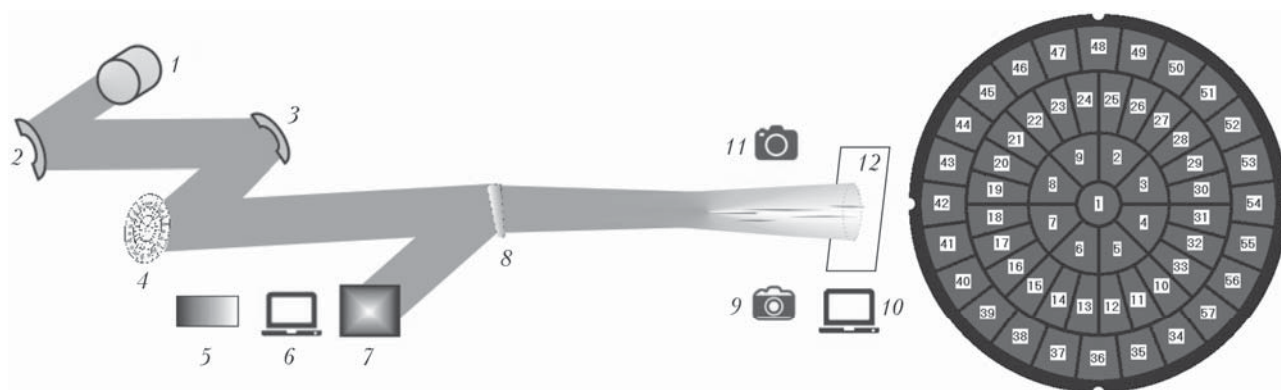


Рис. 1. Схема эксперимента: 1 — Ti:Sapphire лазерный комплекс (длительность импульсов $\tau = 50$ фс, энергия в импульсе до 50 мДж, начальный диаметр пучка $d_0 = 2,5$ см (по уровню e^{-2}), частота следования импульсов 10 Гц); 2 — дефокусирующее зеркало с фокусным расстоянием $f_1 = -50$ см; 3 — фокусирующее зеркало с фокусным расстоянием $f_2 = 100$ см; 4 — деформируемое зеркало U-Flex-56-MDL-57; 5 — блок управления деформируемым зеркалом PAD-300; 6 — ноутбук для управления 5 и 7; 7 — датчик волнового фронта ShaH-6060; 8 — оптический клин Optosigma WSSQ-50C10-10-3; 9 — CCD-камера ANDOR-Clara E с объективом HELIOS-44M 2/58 и набором светофильтров HC-8, HC-10; 10 — ноутбук для управления 9; 11 — фотокамера Pentax K-3 (25 МП) с макрообъективом Pentax100MacroWR; 12 — экран. На врезке представлена структура деформируемого зеркала

Данное оборудование было зафиксировано на подвижном оптическом столе, перемещаемом по всей длине трассы. Длительность импульса измерялась с помощью автокоррелятора PSCOUT PL-SP-LF, Spectra Physics. Деформируемое зеркало (ДЗ) 4 с серебряным покрытием состоит из 57 управляющих электродов, объединенных пьезокерамической пластиной. Схема размещения управляющих электродов представлена на врезке рис. 1. Деформация (изгиб) зеркала задается величиной напряжения, приложенного к конкретному электроду. Максимальные напряжения составляют ± 300 В, при этом амплитуда смещения пьезоэлектрической пластины составляет 45 мкм. Датчик волнового фронта 7 регистрировал волновой фронт, формируемый ДЗ.

На рис. 2 показана эволюция энергетического профиля пучка на трассе при напряжении на элементах 1–9: 0 В, 10–57: 300 В, энергия импульса составляла 20 мДж, начало ОМФ наблюдалось на расстоянии 10,5 м от ДЗ, конец — на расстоянии 17 м. Данная конфигурация соответствует фокусировке пучка и приводит к близкой филаментации и расхождению пучка как целого после глобального фокуса.

С использованием конфигурации, где напряжение элемента 1 зеркала равно +100 В, 2–9: +50 В, 10–33: -100 В, 34–57: 0 В, был получен режим бесплазменного каналирования пучка, при котором каналы в атмосфере достаточно высокоинтенсивные и протяженные (> 100 м) [6]. Данный режим зафиксирован с помощью CCD- и фотокамеры, которые перемещались по всей дистанции вместе с экраном, на светочувствительной бумаге по ожогам (рис. 3).

Чтобы оценить интенсивность в каналах, в них был помещен образец стекла K8, в котором была зарегистрирована ОМФ в виде полого конуса. Данная структура формируется при средней интенсивности в лазерном пучке $\sim 10^{11} - 10^{12}$ Вт/см² (рис. 4, цв. вкладка) [7]. Спектры лазерного излучения в конце трассы представлены на рис. 5.

Использование биморфного деформируемого зеркала позволяет за счет фазовых искажений различных частей тераваттного широкоапертурного лазерного пучка управлять положением области филаментации по всей длине 130-метровой трассы и детерминировать локализацию филаментов и высокоинтенсивных каналов в поперечном сечении пучка.

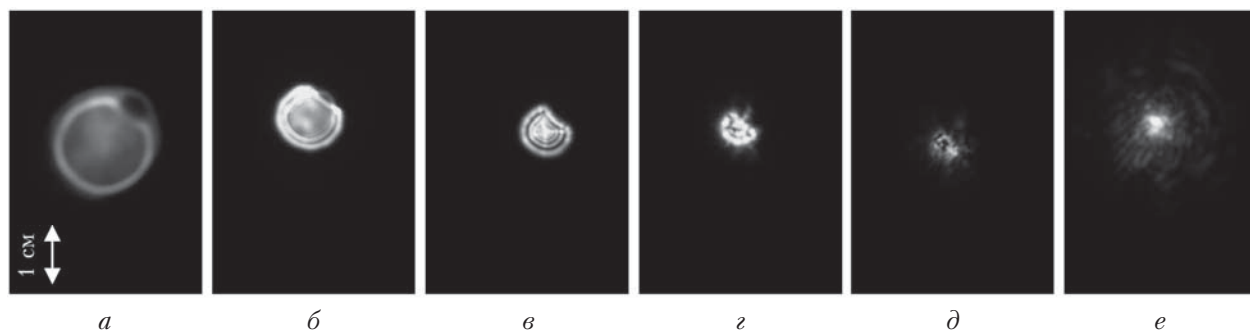


Рис. 2. Профиль плотности энергии в поперечном сечении лазерного пучка на следующих расстояниях от ДЗ в режиме филаментации: 8,2 (а); 10,5 (б); 11,6 (в); 13,5 (г); 14,4 (д); 17,2 м (е)

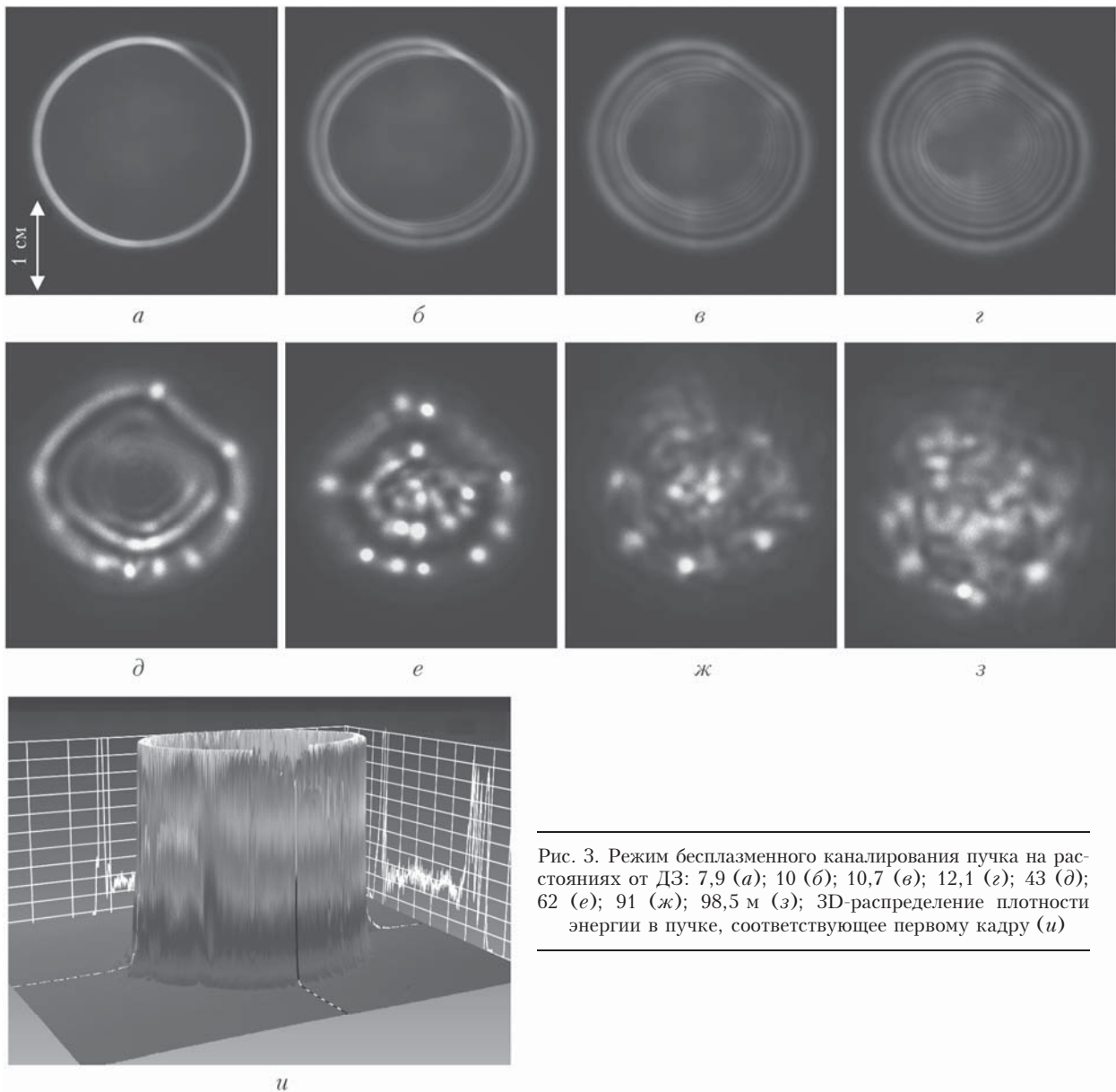


Рис. 3. Режим бесплазменного каналирования пучка на расстояниях от ДЗ: 7,9 (а); 10 (б); 10,7 (в); 12,1 (г); 43 (д); 62 (е); 91 (ж); 98,5 м (з); 3D-распределение плотности энергии в пучке, соответствующее первому кадру (и)

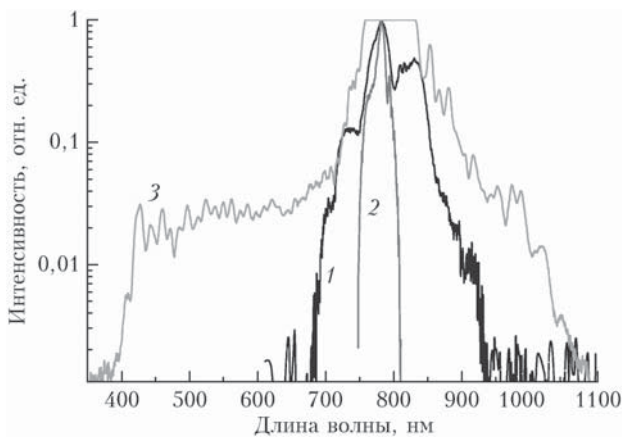


Рис. 5. Спектры лазерного излучения в конце трассы (энергия в импульсе 30 мДж): 1 – бесфиламентационный канал; 2 – исходный спектр; 3 – постфиламентационный канал

Полученные результаты рассмотрим для пяти конфигураций элементов ДЗ:

1. Элементы деформируемого зеркала без напряжения, что идентично работе плоского поворотного зеркала. Область филаментации при этом начинает формироваться на расстоянии ~ 44 м от ДЗ и имеет протяженность ~ 22 м (рис. 6, а).

2. На элементы зеркала подается одинаковое отрицательное напряжение, равное -300 В, что соответствует дополнительной фокусировке пучка. При этом начало ОМФ смещается в сторону источника и ее протяженность сокращается до 2 м (рис. 6, б).

3. На центральные элементы зеркала подается положительное напряжение, что соответствует дефокусировке центральной части пучка. На элементы 10–33 (предпоследний ряд в поперечном сечении ДЗ) подается напряжение -20 В, тем самым обеспечивается фокусировка периферии лазерного пучка. Край

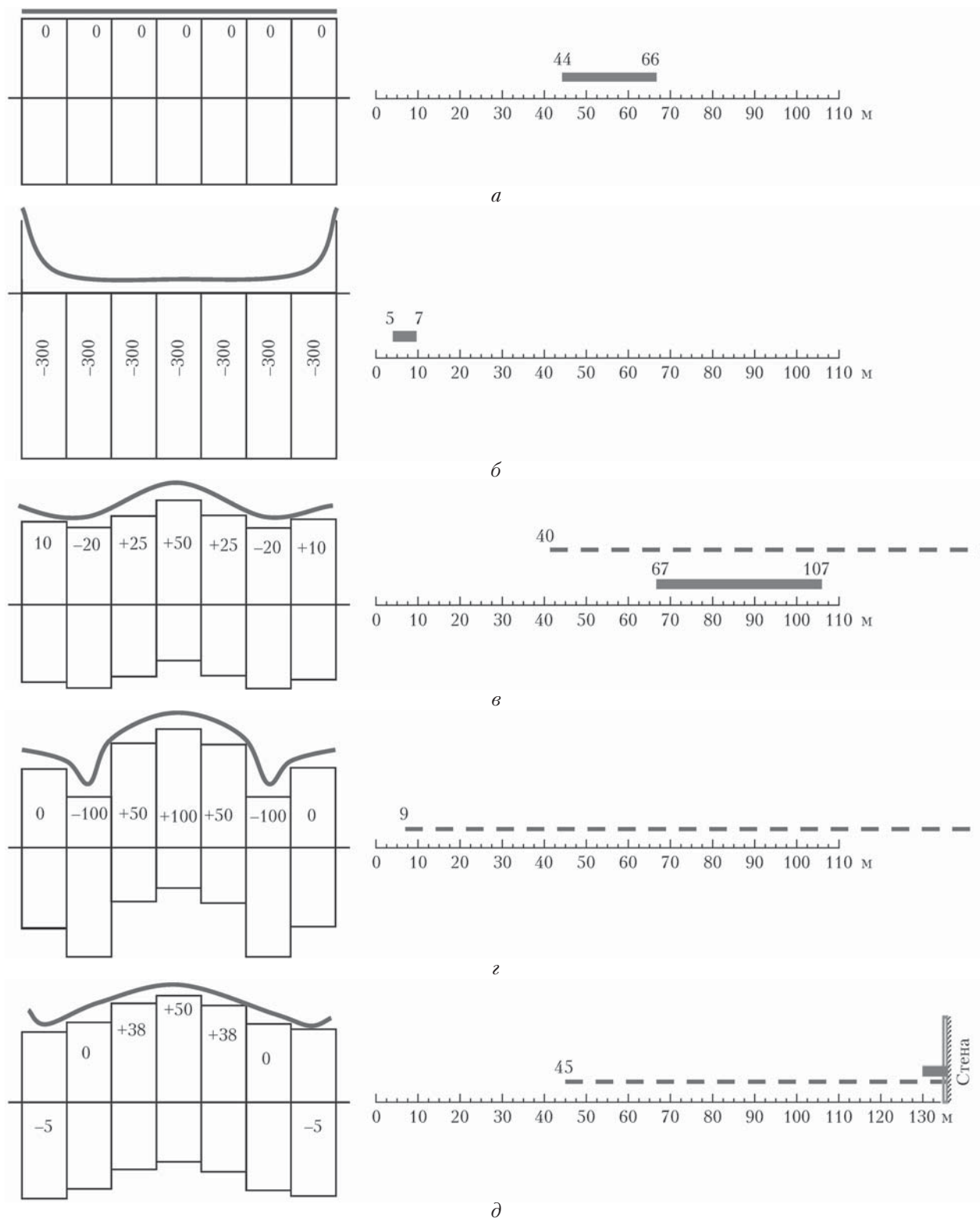


Рис. 6. Схематическое изображение элементов ДЗ для конфигураций 1–5 (а–д) и соответствующие им расположения областей филаментации (полуширная линия) и бесплазменных (штриховая линия) каналов на трассе (по оси отложено расстояние от ДЗ)

поперечного сечения пучка слабо сфокусирован за счет напряжения на краях ДЗ, равного 10 В. При этом начальное положение ОМФ сместилось от ДЗ на расстояние 67 м, что на 35% дальше по

сравнению с режимом плоского зеркала. Протяженность области филаментации составляет ~ 40 м, что в 2 раза больше по сравнению со случаем поворотного зеркала. На расстоянии 40 м от ДЗ и до конца

трассы наблюдалось формирование многочисленных (~21) бесплазменных каналов (рис. 6, *в*).

4. Конфигурация повторяет предыдущую, но с более сильной дефокусировкой центра и периферии лазерного пучка за счет подачи большего положительного напряжения на соответствующие элементы ДЗ. В данном случае интенсивность в поперечном сечении пучка была недостаточной для формирования области филаментации. На расстоянии 9 м от ДЗ происходит формирование бесплазменных каналов, которые наблюдаются на протяжении всей трассы (рис. 6, *з*).

5. Полноценное удаление области филаментации в конец модельной трассы достигается путем комбинирования телескопической и деформируемой систем — так называемая «гибридная» схема (рис. 6, *д*), при которой мягкая дополнительная дефокусировка пучка происходит за счет изменения базы телескопа, добавляются дефокусировка центра и фокусировка периферии деформируемым зеркалом. База телескопа равна 49,5 м, что соответствует дефокусировке пучка с $f = -100$ м. На расстоянии 45 м от ДЗ наблюдаются бесплазменные каналы, область филаментации начинает формироваться на расстоянии 130 м от ДЗ в конце модельной трассы.

Численное моделирование и обсуждение

Теоретическое рассмотрение проблемы распространения мощного лазерного импульсного излучения в нелинейной среде, как правило, проводится на основе параксиального уравнения квазиоптики, записанного либо для частотного спектра поля [8], либо для временного профиля огибающей электрического поля светового импульса [9]. В последнем случае данное уравнение в литературе принято называть нелинейным уравнением Шредингера (НУШ). Полная задача описания множественной филаментации лазерного импульса требует расчета пространственной динамики оптического поля по всем четырем координатным осям: трем пространственным и одной временной. Численное решение такой полной четырехмерной задачи самовоздействия для реалистичных сантиметровых лазерных пучков требует колоссальных объемов компьютерной памяти и экстремально большого объема вычислений, что недостижимо в современных условиях даже при использовании высокопроизводительных серверных кластеров [10]. Более того, в случае достаточно протяженных открытых трасс от теории и не требуется точного повторения пространственно-временного профиля интенсивности лазерного пучка, а важно лишь достоверно описать эволюцию его ключевых характеристик.

По этой причине при моделировании нелинейного распространения широкоапертурного лазерного излучения нами была использована так называемая редуцированная стационарная версия НУШ, получаемая путем его интегрирования по временной координате. Данная методика была предложена в [11]

и продемонстрировала неплохое согласие, прежде всего по положению нелинейного фокуса и длине филаментации, с результатами решения полной задачи с учетом временной структуры импульса. Использование стационарной версии НУШ оправдано именно при моделировании атмосферного распространения мощного излучения в условиях действия случайных факторов, таких как турбулентность или аэрозольное ослабление, что приводит к стохастизации профиля интенсивности пучка и развитию хаотичной мелкомасштабной самофокусировки [12].

Управление характером и параметрами филаментации излучения посредством изменения величины искажений фазы демонстрирует рис. 7 (цв. вкладка). Здесь показаны трассовое распределение интегральной интенсивности I_e и соответствующее ему распределение числа филаментов N_f для двух ситуаций распространения пучка, различающихся формой волнового фронта. Для определенности выбраны варианты сильной и слабой абберационной фокусировки с фазой, показанной над рис. 7, *а* и *б* соответственно.

Как видно, усиление сферических аббераций волнового фронта приводит к нарастающей дефокусировке центральной области пучка, что резко увеличивает число кольцевых зон (до десятка) и интенсивных световых каналов вблизи начала оптической трассы ($z = 18$ м). Однако в дальнейшем из-за высокой угловой расходимости центральной зоны происходят дифракционное уширение всего пучка и падение количества интенсивных каналов до уровня $N_f \sim 3 \div 5$, которые существуют на протяжении еще примерно 60 м, постоянно увеличивая свою радиальную координату. Затем филаментация излучения прекращается, и лишь ближе к концу трассы ($z \approx 175$ м) вновь наблюдается единичный центральный канал, появление которого обусловлено повторной нелинейной фокусировкой излучения на оси пучка.

Если искажения фазового фронта малы и его пространственная форма близка к параболической (фрагмент над рис. 7, *б*), то поведение такого излучения на трассе в целом подобно случаю сфокусированного пучка на рис. 7, *б*, т.е. демонстрирует выраженную фокальную перетяжку с образованием большого числа филаментов. Мягкая дефокусировка центральной области пучка приводит к некоторому удалению фокальной перетяжки по трассе до $z \approx 75$ м в сравнении с рис. 7, *б*, где максимум числа световых каналов наблюдается при $z \approx 50$ м, и одновременно продлевает дистанцию существования филаментов до конца расчетной трассы, как и в случае с более сильной абберационной фокусировкой (рис. 7, *а*).

Итоговая информация по параметрам области филаментации излучения с абберационным волновым фронтом приведена на рис. 8 в форме зависимостей максимального числа интенсивных световых каналов $N_{f_{\max}}$, координаты, где реализуется этот максимум z_{\max} (нелинейный фокус пучка), и общей протяженности существования филаментов L_f от значения модового коэффициента c_6^0 , отвечающего за уровень сферических аббераций 5-го порядка в представлении фазы по полиномам Цернике [13].

Увеличение данного коэффициента приводит к более сильной дефокусировке центральной зоны пучка, что оказывает отличное от обычной параболической (де)фокусировки действие на динамику филаментации излучения.

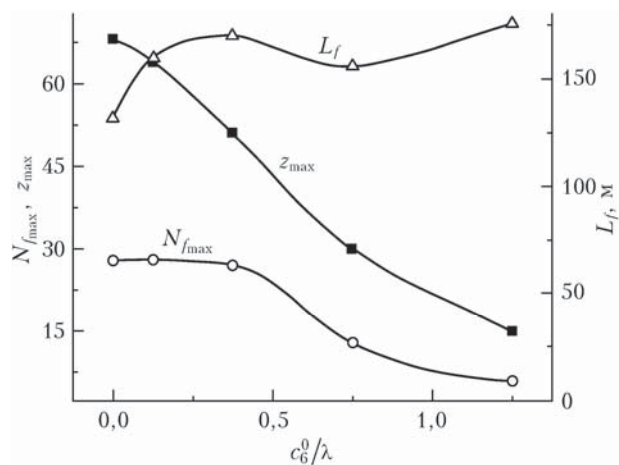


Рис. 8. Максимальное число N_{fmax} , координата z_{max} и общая протяженность существования филаментов L_f в зависимости от степени сферических aberrаций фазы

Действительно, в условиях классической атмосферной филаментации излучения с параболическим волновым фронтом нелинейный фокус пучка сдвигается либо к началу для положительной фокусировки, либо к концу трассы, если используется дефокусировка [13]. В случае aberrационной фокусировки повышение угловой расходимости центра (дефокусировка) приводит к более раннему формированию системы колец вследствие интерференции центральной расходящейся и периферийной сходящейся волн. Это, как видно на рис. 8, наоборот, приближает нелинейный фокус пучка z_{max} к началу трассы.

Более того, параболическая (де)фокусировка обычно сокращает протяженность участка филаментации [14] из-за дополнительной глобальной расходимости излучения после нелинейного фокуса. В рассматриваемом здесь случае вариации длины филаментации нерегулярны по отношению к величине c_6^0 и не превышают 15%. Общим для aberrационной и безaberrационной дефокусировок является уменьшение суммарного числа образующихся филаментов N_{fmax} по трассе, поскольку расходимость пучка всегда противодействует его самофокусировке.

Заключение

В работе представлены результаты экспериментальных и теоретических исследований нелинейного распространения мощных фемтосекундных импульсов Ti:Sapphire лазера (несущая длина волны 780 нм, пиковая мощность ~1 ТВт, энергия в импульсе ~40 мДж) в режиме множественной филаментации на 140-метровой воздушной трассе. Основной задачей экспериментов было изучение возможностей управления пространственным положением

и структурой области филаментации широкоапертурного лазерного пучка (диаметр апертуры 5 см) путем внесения контролируемых искажений фазы волны с помощью многоэлементного биморфного деформируемого зеркала.

Эксперименты показали, что в сравнении с обычной сферической фокусировкой использование биморфного деформируемого зеркала позволяет перемещать область филаментации и плазмообразования по всей длине трассы в широком диапазоне дистанций от 20 м до конца трассы без существенного сокращения протяженности ОМФ. Кроме того, появляется возможность осуществлять конфигурирование пространственного расположения высокоинтенсивных световых каналов в поперечном сечении пучка. Для ряда специальных конфигураций волнового фронта пучка реализован режим бесплазменного распространения излучения в форме упорядоченной связки («снопа») высокоинтенсивных ($10^{11} - 10^{12}$ Вт/см²) слаборасходящихся (<0,01 мрад) световых каналов, имеющих миллиметровый поперечный размер и высокую пространственную протяженность (>100 м).

Моделирование множественной филаментации лазерного излучения с aberrационным фазовым фронтом, выполненное на основе численного решения нелинейного уравнения Шредингера в трехмерной пространственной конфигурации, показало, что упорядочение филаментов в пучке происходит вследствие появления в нем устойчивых (кольцевых) световых структур еще на этапе самофокусировки. Форма и энергозапас этих структур определяют расположение и число формирующихся интенсивных каналов, часть из которых впоследствии эволюционирует в филаменты, сопровождаемые плазменными каналами.

Работа выполнена при финансовой поддержке РНФ (соглашение № 18-77-00028).

1. Букин О.А., Бабий М.Ю., Голик С.С., Ильин А.А., Кабанов А.М., Колесников А.В., Кульчин Ю.Н., Луцица В.В., Матвиенко Г.Г., Ошлаков В.К., Шмирко К.А. Лидарное зондирование атмосферы с использованием гигаваттных лазерных импульсов фемтосекундной длительности // Квант. электрон. 2014. Т. 44, № 6. С. 563–570.
2. Mitrofanov A.V., Voronin A.A., Sidorov-Biryukov D.A., Andriukaitis G., Flury T., Puguly A., Fedotov A.B., Mikhailova J.M., Panchenko V.Ya., Baltuka A. Zheltikov A.M. Post-filament self-trapping of ultrashort laser pulses // Opt. Lett. 2014. N 39(16). P. 4659–4662.
3. Durand M., Houard A., Prade B., Mysyrowicz A., Durré A., Moreau B., Fleury D., Vasseur O., Borchert H., Diener K., Schmitt R., Théberge F., Châteauneuf M., Daigle J-F., Dubois J. Kilometer range filamentation // Opt. Express. 2013. V. 21, N 22. P. 26836–26845.
4. Гейнц Ю.Э., Землянов А.А., Кабанов А.М., Матвиенко Г.Г. Нелинейная фемтосекундная оптика атмосферы. Томск: Изд-во ИОА СО РАН, 2010. 212 с.
5. Анексимов Д.В., Землянов А.А., Иглакова А.Н., Кабанов А.М., Кучинская О.И., Матвиенко Г.Г., Ошлаков В.К., Петров А.В. Множественная филаментация лазерных пучков различного диаметра в воздухе на трассе длиной 150 м // Оптика атмосфер. и океана.

2016. Т. 29, № 1. С. 51–55; *Apeksimov D.V., Zemlyanov A.A., Iglakova A.N., Kabanov A.M., Kuchinskaya O.I., Matvienko G.G., Oshlakov V.K., Petrov A.V.* Multiple filamentation of laser beams of different diameters in air along a 150-meter path // *Opt. Atmos. Ocean.* 2016. V. 29, N 3. P. 263–266.
6. *Méchain G., D'Amico C., 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. P. 171–180.
 7. *Апексимов Д.В., Голык С.С., Землянов А.А., Кабанов А.М., Майор А.В., 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 // *Opt. Atmos. Ocean.* 2017. V. 30, N 3. P. 222–225.
 8. *Kolesik M., Moloney J.V., Mlejnek M.* Unidirectional optical pulse propagation equation // *Phys. Rev. Lett.* 2002. V. 89. P. 283902-1–283902-4.
 9. *Shen Y.R., Boyd R.W., Lukishova S.G.* Self-focusing: Past and Present // *Top. Appl. Phys.* 2009. V. 114. P. 3–19.
 10. *Shlenov S.A., Bezborodov A.E., Smirnov A.V.* Parallel algorithm for filamentation of high-power super-short laser pulses // *Conference on Parallel and Distributed Processing Techniques and Applications (PDPTA'06).* Las Vegas, USA, 2006. P. 94–98.
 11. *Berge L., Skupin S., Lederer F., Méjean 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. 225002-1–225002-4.
 12. *Силаева Е.П., Кандидов В.П.* Перенос филамента мощного фемтосекундного импульса в слое аэрозоля // *Оптика атмосф. и океана.* 2009. Т. 22, № 2. С. 132–140; *Silaeva E.P., Kandidov V.P.* Propagation of a high-power femtosecond pulse filament through a layer of aerosol // *Opt. Atmos. Ocean.* 2009. V. 22, N 1. P. 26–34.
 13. *Апексимов Д.В., Гейнц Ю.Э., Землянов А.А., Кабанов А.М., Матвиенко Г.Г., Ошлаков В.К.* Управление областью множественной филаментации тераваттных лазерных импульсов на стометровой воздушной трассе // *Квант. электрон.* 2015. Т. 45, № 5. С. 408–414.
 14. *Fibich G., Eisenmann S., Ilan B., Zigler A.* Control of multiple filamentation in air // *Opt. Lett.* 2004. V. 29, N 15. P. 1772–1774.

D.V. Apeksimov, Yu.E. Geints, A.A. Zemlyanov, A.N. Iglakova, A.M. Kabanov, O.I. Kuchinskaya, G.G. Matvienko, V.K. Oshlakov, A.V. Petrov. **The effect of phase aberrations on the position and length of the filamentation domain.**

The results of experimental and theoretical studies of femtosecond laser pulse filamentation with use of a bimorph deformable mirror are presented. The mirror allows controlling the position of the filamentation domain throughout a model path due to phase distortions of different parts of a laser beam, determining localization of filaments and high-intensity channels in the beam cross section, and forming long (>100 m) high-intensity (10^{11} – 10^{12} W/cm²) weakly diverging plasma-free channels.

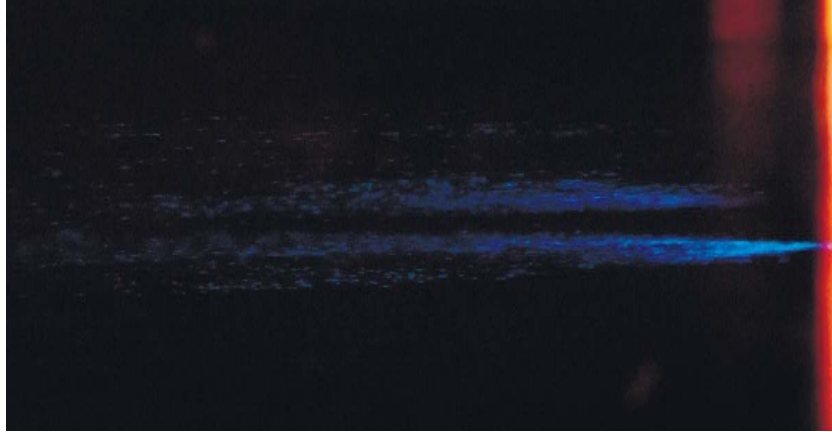


Рис. 4. Снимок множественной филаментации в стекле К8 при воздействии бесфиламентационных каналов на удалении 70 м от ДЗ (излучение справа налево)

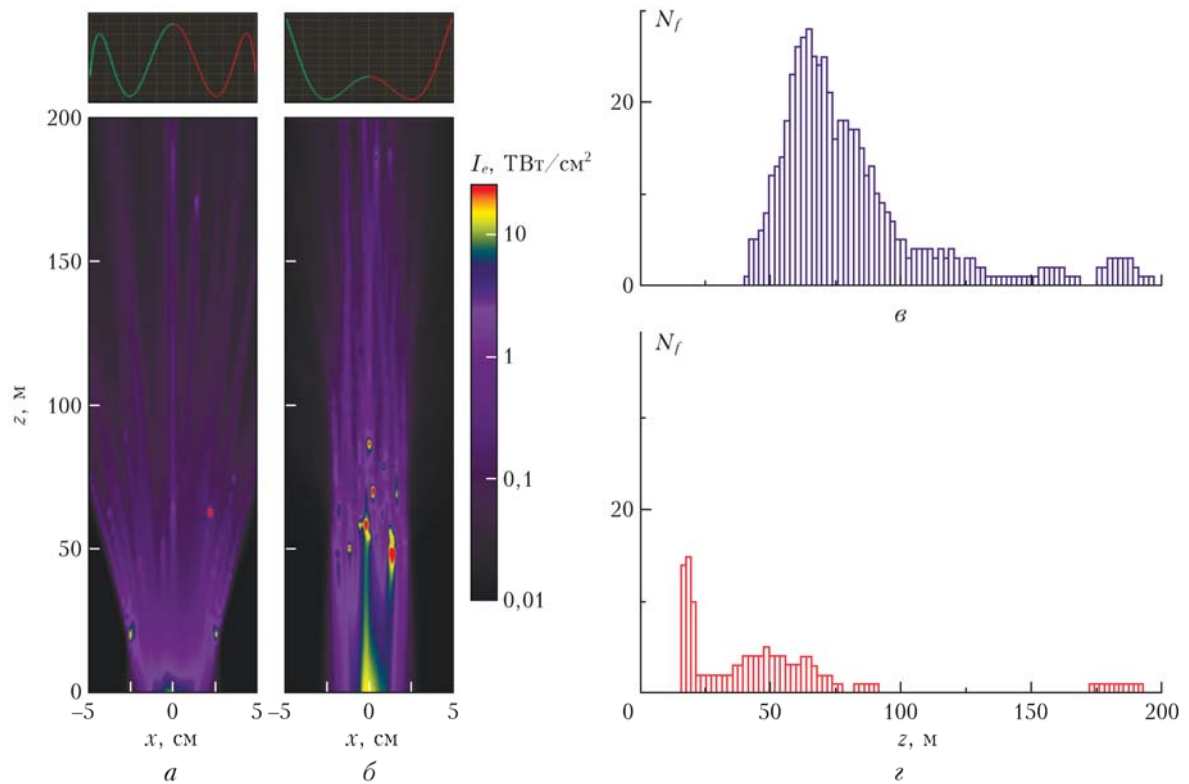


Рис. 7. Интенсивность I_e (a , b) и число филаментов N_f (z) по дистанции распространения излучения с сильной (a , z) и слабой (b , z) абберационными фокусировками различных типов. Форма фазы показана сверху над рис. a , b