

РАСПРОСТРАНЕНИЕ ОПТИЧЕСКИХ ВОЛН

УДК 530.182+551.510

Пространственная структура фемтосекундного лазерного излучения при филаментации в воздухе

Д.В. Апексимов, Ю.Э. Гейнц, А.А. Землянов, А.Н. Иглакова, А.М. Кабанов, О.И. Кучинская, Г.Г. Матвиенко, О.В. Минина, В.К. Ошлаков, А.В. Петров*

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

Поступила в редакцию 2.09.2020 г.

Представлены результаты экспериментальных и теоретических исследований эволюции мелкомасштабной поперечной структуры мощного фемтосекундного лазерного излучения, распространяющегося в воздухе в режиме множественной филаментации. Установлено, что наличие неоднородностей интенсивности в начальном поперечном профиле лазерного пучка за счет эффекта керровской самофокусировки приводит к формированию пространственно обособленных световых каналов с высокой интенсивностью. При превышении в таких каналах некоторого порогового значения мощности (критической мощности самофокусировки) в них реализуется филаментация излучения.

Теоретическая оценка параметров указанных световых каналов проводилась на основе дифракционно-лучевой модели одиночной филаментации. Показано, что для лазерного пучка сантиметрового радиуса и суб-тераваттной мощности начальный радиус неоднородностей интенсивности в его поперечном профиле, способных к самофокусировке и филаментации, имеет характерные значения в несколько миллиметров.

Ключевые слова: фемтосекундный лазерный импульс, воздух, филаментация, световые каналы, дифракционно-лучевая трубка; femtosecond laser pulse, air, filamentation, light channels, diffraction-ray tube.

Введение

Актуальная проблема нелинейной оптики — филаментация фемтосекундных лазерных импульсов. Это явление представляет собой распад лазерного пучка на ряд пространственно обособленных световых структур, характеризующихся экстремальными значениями интенсивности. Примерами вышеупомянутых структур являются световые и плазменные филаменты, а также световые каналы, наблюдаемые на этапах до- и постфиламентационного распространения. Для широкоапертурных (сантиметровых) лазерных пучков образование указанных каналов связано с наличием неоднородностей в исходном профиле интенсивности лазерного пучка. Образование постфиламентационных каналов обеспечивается формированием бессель-гауссовых световых структур в зоне распространения светового филамента.

При распространении в воздухе мощного фемтосекундного излучения ближнего ИК-диапазона формируемые филаменты характеризуются диамет-

ром порядка 100 мкм и длиной до нескольких десятков метров [1]. В отличие от них постфиламентационные каналы (ПФК) имеют малую угловую расходимость (десятки микрорадиан) [2], но сохраняются на более протяженных трассах [3–5].

Для понимания механизмов формирования отдельных световых филаментов при множественной филаментации интерес представляют экспериментальные и теоретические исследования эволюции неоднородностей интенсивности в исходном профиле лазерного пучка — так называемой мелкомасштабной поперечной структуры пучка. Их самофокусировка приводит к формированию световых каналов до начала филаментации [6].

Настоящая статья продолжает начатые в [6] экспериментальные исследования по регистрации дофиламентационных световых каналов. Наши исследования, в частности, позволят установить, какая часть лазерного пучка непосредственно участвует в филаментации излучения. Для этого изучены не только характеристики указанных каналов, но и физические механизмы их формирования, т.е. проведено численное моделирование мелкомасштабной фокусировки, филаментации и постфиламентационного распространения отдельной световой неоднородности в начальном профиле интенсивности лазерного пучка.

Необходимость дополнительного теоретического исследования вопроса о мелкомасштабной самофокусировке обоснована тем, что проработка этого эффекта к настоящему времени осуществлена лишь качественно. Например, в [7] использовался подход,

* Дмитрий Владимирович Апексимов (apeximov@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 (olesyatsu14@mail.ru); Геннадий Григорьевич Матвиенко (magg@iao.ru); Ольга Владимировна Минина (mov@iao.ru); Виктор Константинович Ошлаков (ovk@iao.ru); Алексей Вадимович Петров (awp@iao.ru).

рассматривающий первичные флуктуации фазы плоской волны в среде с кубичной нелинейностью. Их следствием является рост амплитуды участка плоской волны, который прекращается на некотором расстоянии в результате баланса самофокусировки и дифракции. После этого волна распадается на «нити» с определенными размерами и мощностью, равной критической. Использование этой модели для интерпретации экспериментальных данных по множественной филаментации в воздухе не представляется возможным, поскольку размер первичной области повышенной интенсивности и содержащаяся в ней мощность (она всегда постоянна как в этой модели, так и в других [1]) являются неопределенными. Также отсутствует описание изменения размера первичной неоднородности после распада волны на указанные «нити». Другой аспект связан с количеством филаментов N_{fil} в поперечном сечении лазерного пучка. Оценки этой величины проводятся по приближенному соотношению, согласно которому N_{fil} определяется отношением начальной пиковой мощности излучения к критической мощности самофокусировки. Используя это соотношение, можно сделать вывод, что для сантиметровых лазерных пучков фемтосекундных импульсов субтераваттной мощности, распространяющихся в воздухе (см., например, параметры экспериментов в [4, 8]), количество филаментов должно достигать нескольких сотен. В то же время значение, полученное в ходе экспериментальных исследований, оказывается на порядок [4] или даже два [8] меньше.

В настоящей работе на основе экспериментов и численного моделирования изучена эволюция мелкомасштабной поперечной структуры сантиметрового пучка фемтосекундного лазерного излучения в воздухе. Рассмотрена самофокусировка отдельных неоднородностей интенсивности в профиле лазерного пучка, приводящая к формированию высокоинтенсивных световых каналов до начала филаментации и отдельных световых филаментов вдоль трассы распространения фемтосекундного лазерного излучения. Определены количество и размеры пространственных неоднородностей в поперечном сечении лазерного пучка, установлены особенности их эволюции вдоль трассы.

1. Экспериментальные исследования

Эксперименты проводились на фемтосекундном стенде ИОА СО РАН. В качестве источника лазерных импульсов использовалась титан-сапфировая фемтосекундная тераваттная система, имеющая следующие характеристики: несущая длина волны — 786,8 нм, длительность импульса — 50 фс, частота повторения импульсов — 10 Гц, энергия в импульсе — до 40 мДж, диаметр пучка — 2,5 см (по уровню плотности энергии e^{-2}). Схема эксперимента представлена на рис. 1.

Исходный профиль пучка регистрировался с помощью профилометра 2. Время накопления профилометра 100 мс, что с учетом частоты повторения импульсов позволяло регистрировать профиль пучка для одного лазерного импульса. Изменение энергии лазерного излучения контролировалось измерителем 3. Регистрация мелкомасштабной структуры пучка проводилась CCD-камерой 6 на экране 5, которые размещались на подвижном столе. Его перемещение позволяло регистрировать поперечную структуру пучка вдоль трассы распространения. Наличие световых филаментов контролировалось фотокамерой 7, которая фиксировала картину конической эмиссии [8, 9] на экране 5, расположенном в конце трассы. Начало и окончание области множественной филаментации (ОМФ) определялись по ожогам на светочувствительной бумаге (ТУ 6-17-766-76) и с помощью акустического датчика. Подробное описание экспериментальной установки и методики проведения экспериментов приведено в [8].

Эволюция фемтосекундного лазерного излучения с энергией 40 мДж вдоль воздушной трассы показана на рис. 2. Видно, что самофокусировка неоднородностей интенсивности в профиле лазерного пучка привела к тому, что на расстоянии 7 м от источника (за 5 м до начала области филаментации) были зарегистрированы высокоинтенсивные световые каналы миллиметрового масштаба. На снимках они представляют собой яркие пространственно локализованные области. Вдоль трассы их диаметр уменьшается с нескольких до примерно одного миллиметра (рис. 2, б, в). Затем на расстоянии 12 м (рис. 2, г) внутри этих каналов формируются плаз-

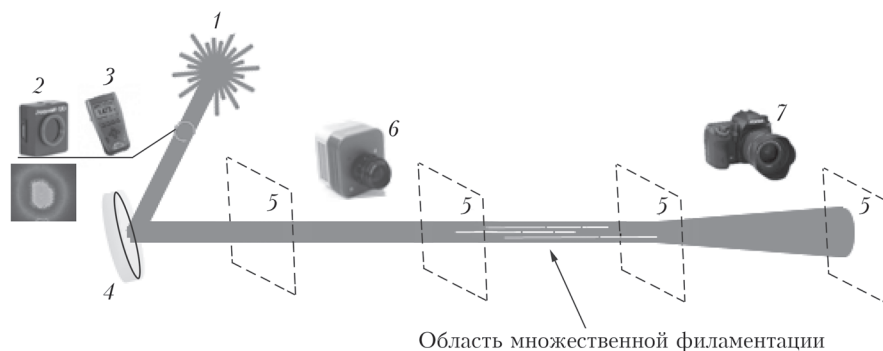


Рис. 1. Схема эксперимента: 1 — титан-сапфировый лазерный комплекс; 2 — измеритель профиля пучка LBP2-HR-VIS; 3 — измеритель энергии импульса ОРНІR-II; 4 — поворотное зеркало; 5 — экран; 6 — CCD-камера «ANDOR-Clara E»; 7 — фотокамера Pentax K-3

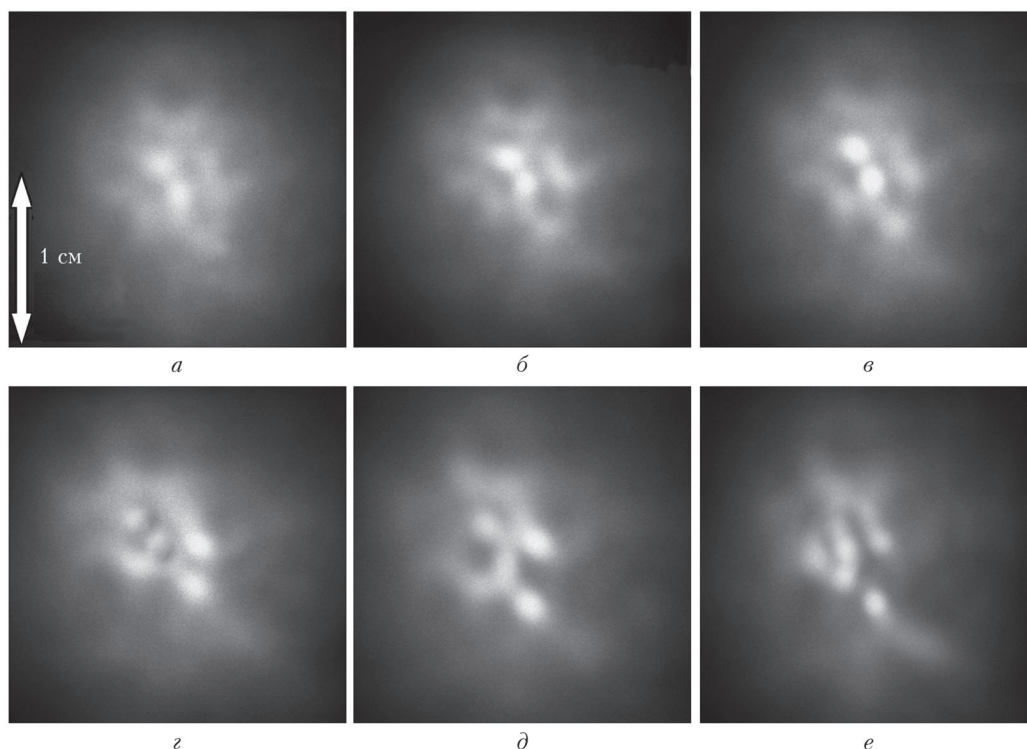


Рис. 2. Изображения высокоинтенсивных каналов в поперечном сечении пучка с $E = 40$ мДж на расстоянии 7 (а); 9 (б); 10 (в); 12 (г); 13 (д) и 16 м (е) от источника излучения

менные филаменты, которые сохраняются на расстоянии до 23 м. Для примера на рис. 2, д, е изображены каналы на расстояниях 13 и 16 м соответственно. Следует отметить, что не в каждом таком канале, зарегистрированном до ОМФ, формировался световой филамент. Качественным подтверждением существования световых филаментов является наличие конической эмиссии. После окончания множественной филаментации на расстоянии 23 м от источника лазерных импульсов дальнейшее распространение излучения происходило в виде ПФК. Характерные особенности этого этапа проанализированы и подробно описаны в [6, 8].

Из рис. 2, а–в также видно, что на начальном этапе распространения излучения (до образования филаментов) расположение высокоинтенсивных световых каналов, формируемых из неоднородностей интенсивности в профиле лазерного пучка, относительно друг друга в поперечном сечении пучка остается постоянным с учетом погрешности измерений. Это свидетельствует об их независимом распространении. По мере удаления от начала трассы интенсивность излучения в каналах возрастает, а также увеличивается количество каналов, регистрируемых в поперечном сечении лазерного пучка. Это связано с самофокусировкой неоднородностей с меньшей мощностью и/или с большим начальным радиусом. По мере приближения к области филаментации (рис. 2, г) расположение каналов относительно друг друга существенно не меняется, что согласуется с результатами работы [10]. Интенсивность в каналах на указанном этапе распространения остается примерно постоянной, это же касается и их количества.

В результате проведенных экспериментов установлено, что при изменении энергии в лазерных импульсах качественный характер описанных выше закономерностей сохраняется. Для лазерных импульсов с меньшей энергией формируется меньшее число каналов на одинаковом расстоянии от источника излучения.

На рис. 3 представлены экспериментальные результаты измерений диаметра d высокоинтенсивных световых каналов, сформировавшихся при самофокусировке неоднородностей интенсивности в поперечном профиле лазерного пучка, вдоль трассы распространения z .

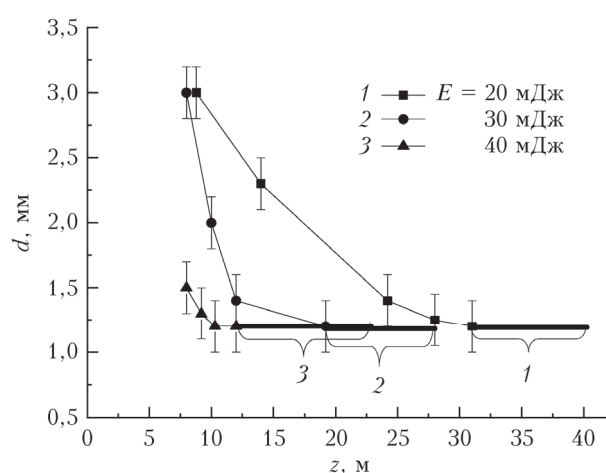


Рис. 3. Зависимость диаметра высокоинтенсивных световых каналов от дистанции распространения для различных энергий импульса; фигурные скобки – ОМФ

В соответствии с рис. 3 размер высокоинтенсивных световых каналов в поперечном профиле лазерного пучка на стадии его филаментации вдоль трассы распространения для импульсов с $E = 20\text{--}40$ мДж остается практически постоянным. Диаметр этих каналов, зарегистрированных до начала ОМФ, уменьшается вдоль трассы распространения с нескольких до приблизительно одного миллиметра. При уменьшении энергии в импульсе увеличивается дистанция, на которой регистрируются высокоинтенсивные световые каналы.

2. Интерпретация экспериментальных данных в рамках метода дифракционно-лучевых трубок

На основе экспериментальных результатов (разд. 1) и выводов [10] можно заключить, что при формировании ОМФ лазерных импульсов происходят циклические рефокусировки одиночных филаментов, которые слабо взаимодействуют с другими или не зависят от них. Независимое формирование филаментов подтверждается результатами экспериментов, в которых были зарегистрированы ПФК в воздухе [3, 8] и множественная филаментация фемтосекундных лазерных импульсов в стекле [11]. Это позволяет для оценки характеристик множественной филаментации использовать данные, полученные для одиночной филаментации.

В качестве модели одиночной филаментации рассмотрим дифракционно-лучевую модель [12], в рамках которой лазерный пучок разделяется на множество вложенных друг в друга дифракционно-лучевых трубок (ДЛТ) [13]. В связи с тем, что эти трубки не пересекаются в пространстве и не обмениваются друг с другом энергией, изменение их характеристик вдоль трассы позволяет оценить действие физических процессов, сопровождающих распространение излучения в среде. Рассматривая каждую ДЛТ в качестве отдельной световой структуры, можно описать все характерные стадии филаментации, включая начальный этап распространения до образования филаментов и постфиламентационное каналирование.

В качестве примера использования дифракционно-лучевой модели одиночной филаментации фемтосекундных лазерных импульсов для интерпретации экспериментальных данных по множественной филаментации в воздухе рассмотрим рис. 4. На нем представлены результаты численного моделирования самофокусировки и филаментации импульсов титан-сапфирового лазера длительностью $t_p = 100$ фс для неоднородности интенсивности в исходном профиле лазерного пучка радиусом $r_0 = 3,5$ мм в случае, когда начальная пиковая мощность в импульсе P_0 превосходит значение критической мощности самофокусировки P_{cr} в 6 раз, т.е. относительная пиковая мощность $\eta = P_0/P_{cr} = 6$. Значение критической мощности в воздухе, в соответствии с [1, 8], составляет 3,2 ГВт. Полная математическая постановка задачи приведена в [12].

На рис. 4 полужирной кривой отмечена энергетически пополюющая ДЛТ. Она выбирается из множества ДЛТ как ближайшая внешняя трубка на этапе постфиламентационного распространения ($z > 60$ м) относительно кривой, соответствующей плотности энергии в приосевой области пучка по уровню e^{-1} от максимального значения (пунктирная кривая). Такой подход к выбору энергетически пополюющей трубки основан на том, что именно эта характеристика (плотность энергии по уровню e^{-1}) используется для оценки параметров ПФК в экспериментальных исследованиях (например, [2]). Если рассмотреть начальный этап распространения излучения (рис. 4), видно, что указанная трубка соответствует также высокоинтенсивным световым каналам (квадраты), описанным в разд. 1. На рис. 4 экспериментальные данные (квадраты) соответствуют кривой 1, представленной на рис. 3 для лазерного пучка с $r_0 = 1,25$ см с $E = 20$ мДж. Для удобства сравнения экспериментальных данных с результатами численного моделирования на рисунке приведены радиусы рассматриваемых световых структур.

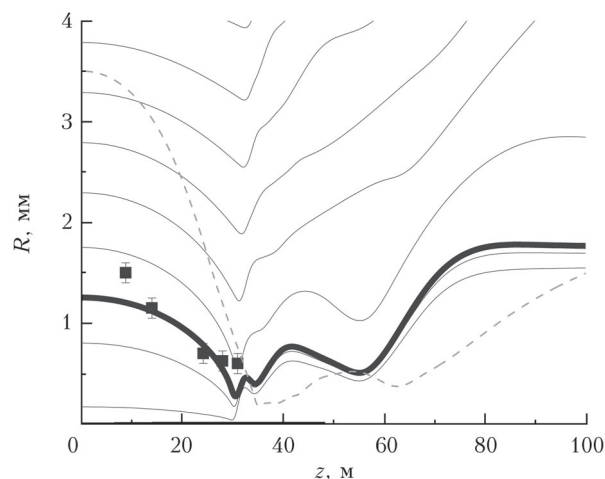


Рис. 4. Трагессовая зависимость радиусов ДЛТ R_{dw} (сплошные кривые) для неоднородности профиля интенсивности с $r_0 = 3,5$ мм и $\eta = 6$; пунктирная кривая соответствует плотности энергии по уровню e^{-1} от максимального значения R_w , полужирная кривая — энергетически пополюющей ДЛТ, квадраты — представленным на рис. 3 экспериментальным данным для импульса с $E = 20$ мДж

Из анализа рис. 4 видно, что координата начала филаментации фемтосекундных лазерных импульсов, определенная по результатам численного моделирования для неоднородности с $r_0 = 3,5$ мм (полужирная кривая), совпадает с полученной в ходе экспериментальных исследований координатой начала филаментации для лазерных пучков радиусом $R_0 = 1,25$ см. Это обстоятельство подтверждает, что состоящая из отдельных филаментов ОМФ сантиметрового лазерного пучка субтерагетической мощности формируется при самофокусировке и филаментации отдельных неоднородностей интенсивности светового поля миллиметрового масштаба с $P_0 < 10P_{cr}$. В рассматриваемом случае радиус неоднородности составляет 3,5 мм, а мощность в ней (с учетом того, что $P_{cr} = 3,2$ ГВт) — около 19 ГВт.

При учете отношения радиусов отдельной неоднородности и пучка в целом также можно оценить возможное количество неоднородностей, сформировавшихся в лазерном пучке и способных к самофокусировке и филаментации. Если рассматривать эту задачу в рамках радиальной симметрии и допустить, что неоднородности находятся на одинаковом расстоянии друг от друга, равном радиусу неоднородности, то в простейшем случае получается, что количество неоднородностей будет равно 5. Принимая во внимание, что в [6, 8] максимальное число световых каналов, формирующихся из неоднородностей интенсивности в профиле лазерного пучка, составляет 4 (в начале ОМФ оно равно 3, а далее увеличивается до 4), можно сделать вывод, что рассмотренный подход позволяет получить достаточно точную оценку. Следует отметить, что при филаментации лазерного пучка, поперечная структура которого представлена на рис. 2, с таким же радиусом, что и в [8], но с большей энергией, число каналов, а значит и неоднородностей, достигает 5. Полученные оценки числа неоднородностей, а также экспериментальные результаты, представленные на рис. 2 и в [6, 8, 14], имеют важное значение для проведения численного моделирования множественной филаментации фемтосекундных лазерных импульсов в воздухе.

Все это, а также результаты экспериментальных исследований множественной филаментации [8, 10, 11, 14] свидетельствует о том, что неоднородности интенсивности в лазерном пучке имеют различные начальные параметры (радиус и мощность). Для каждой такой неоднородности именно эти параметры будут определять координату начала филаментации и длину плазменной области. В связи с этим вопрос о расположении неоднородностей в пучке и их параметрах требует дополнительных исследований.

Совпадение на рис. 4 экспериментальных данных и результатов численных расчетов также позволяет оценить радиус этих неоднородностей и содержащуюся в них мощность. В соответствии с рис. 5 получается, что для экспериментов из разд. 1 (кривая 1 на рис. 3) и работы [6] при условии фиксированной относительной пиковой мощности в неоднородности $\eta = 6$ начальный радиус неоднородности $r_0 \approx 3,5$ мм. Это значение на порядок превосходит характерные поперечные размеры филаментов, формирующихся для излучения ближней ИК-области спектра [1, 15, 16], и сопоставимо с поперечными размерами высокоинтенсивного светового канала, наблюдаемого до начала ОМФ [6], и ПФК [6, 8]. Если принять другое значение η , например, 3 или 9, то радиус этой неоднородности также изменится, но сохранит миллиметровый масштаб ($\sim 4,5$ и $2,5$ мм соответственно). При использовании экспериментальных данных о координате начала филаментации фемтосекундных лазерных импульсов с большей энергией (кривые 2 и 3 на рис. 3) и при условии фиксированной $\eta = 6$ получается, что $r_0 = 2,8$ и $2,3$ мм соответственно. Другими словами, при увеличении энергии в импульсе радиус неодно-

родностей, способных к самофокусировке и филаментации, уменьшается, что подтверждают результаты [17].

Для оценки мощности неоднородностей интенсивности в исходном профиле лазерного пучка воспользуемся зависимостью координаты начала филаментации, нормированной на длину Рэлея, равную половине длины дифракции, от относительной пиковой мощности для лазерных пучков миллиметрового радиуса, полученной в [18] на основе метода ДЛТ (кривые на рис. 5). Для сравнения с экспериментальными данными на рис. 5 координата начала филаментации приведена в размерных величинах. Далее на построенные кривые были нанесены символы, соответствующие значениям координаты начала ОМФ на рис. 3. Вид символов на рис. 5 для импульсов с различной энергией соответствует рис. 3.

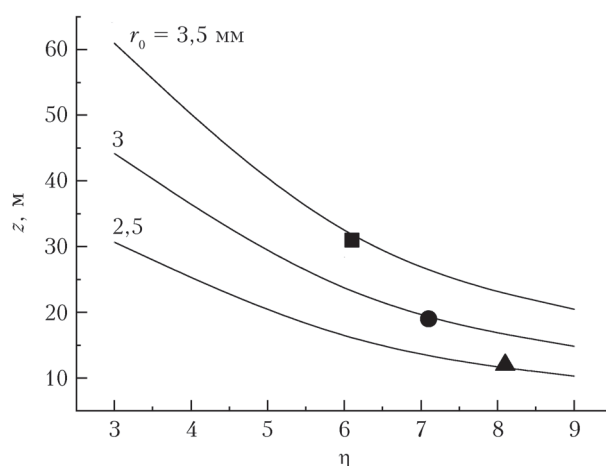


Рис. 5. Зависимость координаты начала филаментации от относительной пиковой мощности в неоднородностях различного начального радиуса; символы — экспериментально полученные координаты начала филаментации из рис. 3

В соответствии с рис. 5 формирование филаментов на большем расстоянии от начала трассы происходит за счет неоднородностей с большим начальным радиусом и меньшей мощностью. Полученные результаты также соответствуют качественным выводам, сделанным в [9]. В проведенных экспериментах по распространению фемтосекундных лазерных импульсов в воздухе формирование области филаментации происходит за счет неоднородностей интенсивности в исходном профиле сантиметрового лазерного пучка, имеющих миллиметровый масштаб: от 2,5 до 3,5 мм. Значение мощности в этих неоднородностях варьируется от 19 до 26 ГВт. При этом в [17], где проанализировано большее количество экспериментальных данных о филаментации лазерных импульсов в воздухе, в том числе на атмосферных трассах длиной до нескольких сотен метров, показано, что в целом мощность в неоднородностях варьируется от нескольких единиц до десятков гигаватт (9–26 ГВт).

Анализ экспериментальных данных из [4, 8] также показал, что при повышении пиковой мощности

в лазерном импульсе увеличивается длина области филаментации. Другая закономерность, выявленная на основе анализа экспериментальных данных, состоит в том, что при повышении пиковой мощности возрастает количество филаментов в поперечном сечении пучка.

Заключение

Представлены результаты экспериментальных исследований распространения коллимированных пучков титан-сапфирового лазера на контролируемой воздушной трассе. Диаметр лазерного пучка составлял 2,5 см, энергия в импульсе варьировалась от 20 до 40 мДж. Рассмотрена пространственная мелкомасштабная поперечная структура фемтосекундного лазерного излучения при множественной филаментации, реализующейся за счет самофокусировки неоднородностей интенсивности в его поперечном профиле. В результате показано, что поперечный размер высокоинтенсивных световых каналов в лазерном пучке на участке оптической трассы, где реализуется множественная филаментация, остается примерно постоянным и слабо зависит от энергии импульса. Установлено, что распространение не каждого такого канала сопровождается появлением филамента, т.е. пространственно локализованной световой структуры, связанной с плазмообразованием и генерацией конической эмиссии.

Для оценок характеристик ОМФ, сформированной на воздушной трассе, была использована дифракционно-лучевая модель одиночной филаментации фемтосекундных лазерных импульсов. Применение такого подхода основано на экспериментальных данных, показавших, что при формировании ОМФ происходят циклические рефокусировки одиночных филаментов. Рассмотрение в качестве отдельной световой структуры ДЛТ позволяет описать все характерные стадии филаментации. Оценки, выполненные в рамках этого подхода, показывают, что в проведенных экспериментах радиус мелкомасштабных неоднородностей интенсивности в профиле сантиметрового лазерного пучка, формирующих ОМФ субтераваттных лазерных импульсов, варьируется в пределах 2,5–3,5 мм. Мощность излучения, характерная для указанных неоднородностей, изменяется от 19 до 26 ГВт.

Работа выполнена в рамках государственного задания ИОА СО РАН.

1. *Self-focusing: Past and Present. Fundamentals and Prospects* / R.W. Boyd, S.G. Lukishova, Y.R. Shen (eds.). Berlin: Springer, 2009. 605 p.
2. *Daigle J.-F., Kosareva O.G., Panov N.A., 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.
3. *Méchain G., Couairon A., André 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, iss. 3. P. 379–382.
4. *Méchain G., D'Amico C., André 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.
5. *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.-F., Dubois J.* Kilometer range filamentation // *Opt. Express.* 2013. V. 21. P. 26836–26845.
6. *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.* Localized high-intensity light structures during multiple filamentation of Ti:Sapphire-laser femtosecond pulses along an air path // *Atmos. Ocean. Opt.* 2018. V. 31, N 2. P. 107–111.
7. *Беспалов В.И., Литвак А.Г., Таланов В.И.* Самовоздействие электромагнитных волн в кубических изотропных средах // *Нелинейная оптика.* Новосибирск: Наука, 1968. С. 428–463.
8. *Апексимов Д.В., Гейнц Ю.Э., Землянов А.А., Кабанов А.М., Матвиенко Г.Г., Ошлаков В.К.* Филаментация фемтосекундных лазерных импульсов в воздухе / под ред. А.А. Землянова. Томск: Изд-во ИОА СО РАН, 2017. 162 с.
9. *Кандидов В.П., Шленов С.А., Косарева О.Г.* Филаментация мощного фемтосекундного лазерного излучения // *Квант. электрон.* 2009. Т. 39, № 3. С. 205–228.
10. *Гейнц Ю.Э., Голик С.С., Землянов А.А., Кабанов А.М., Петров А.В.* Микроструктура области множественной филаментации фемтосекундного лазерного излучения в твердом диэлектрике // *Квант. электрон.* 2016. Т. 46, № 2. С. 133–141.
11. *Апексимов Д.В., Голик С.С., Землянов А.А., Иглакова А.Н., Кабанов А.М., Кучинская О.И., Матвиенко Г.Г., Ошлаков В.К., Петров А.В., Соколова Е.Б.* Множественная филаментация коллимированного лазерного излучения в воде и стекле // *Оптика атмосф. и океана.* 2015. Т. 28, № 11. С. 972–978; *Apeksimov D.V., Golik S.S., Zemlyanov A.A., Iglakova A.N., Kabanov A.M., Kuchinskaya O.I., Matvienko G.G., Oshlakov V.K., Petrov A.V., Sokolova E.B.* Multiple filamentation of collimated laser radiation in water and glass // *Atmos. Ocean. Opt.* 2016. V. 29, N 2. P. 135–140.
12. *Гейнц Ю.Э., Землянов А.А., Минина О.В.* Дифракционно-лучевая оптика филаментации: I. Формализм дифракционных лучей и световых трубок // *Оптика атмосф. и океана.* 2018. Т. 31, № 5. С. 364–371; *Geints Yu.E., Zemlyanov A.A., Minina O.V.* Diffraction-beam optics of filamentation: I – Formalism of diffraction beams and light tubes // *Atmos. Ocean. Opt.* 2018. V. 31, N 6. P. 611–618.
13. *Раутиан С.Г.* Квазилучевые трубки // *Опт. и спектроскоп.* 1999. Т. 87, № 3. С. 494–498.
14. *Апексимов 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 радиуса в воздухе на 150-метровой трассе // *Оптика атмосф. 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 // *Atmos. Ocean. Opt.* 2016. V. 29, N 3. P. 263–266.
15. *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, iss. 1. P. 73–75.
16. *Nibbering E.T.J., Curley P.F., Grillon G., Prade B.S., Franco M.A., Salin F., Mysyrowicz A.* Conical emission from self-guided femtosecond pulses in air // *Opt. Lett.* 1996. V. 21, iss. 1. P. 62–64.
17. *Землянов А.А., Гейнс Ю.Э., Минина О.В.* Оценка характеристик области множественной филаментации фемтосекундных лазерных импульсов в воздухе на основе модели одиночной филаментации // *Оптика атмосф. и океана.* 2019. Т. 32, № 8. С. 601–608; *Zemlyanov A.A., Geints Yu. E., Minina O.V.* Estimation of the characteristics of the domain of multiple filamentation of femtosecond laser pulses in air based on the single filamentation model // *Atmos. Ocean. Opt.* 2020. V. 33, N 2. P. 117–123.
18. *Geints Yu.E., Minina O.V., Zemlyanov A.A.* Diffraction-ray tubes analysis of ultrashort high-intense laser pulse filamentation in air // *J. Opt. Soc. Am. B.* 2019. V. 36, N 12. P. 3209–3217.

D.V. Apeximov, Yu.E. Geints, A.A. Zemlyanov, A.N. Iglakova, A.M. Kabanov, O.I. Kuchinskaya, G.G. Matvienko, O.V. Minina, V.K. Oshlakov, A.V. Petrov. **Spatial structure of femtosecond laser radiation during filamentation in air.**

The results of experimental and theoretical studies of the evolution of the small-scale transverse structure of high-power femtosecond laser radiation propagating in air in the multiple filamentation mode are presented. It has been found that the presence of intensity inhomogeneities in the initial transverse profile of a laser beam leads to the formation of high-intensity light channels due to the Kerr-induced self-focusing effect. When the power in these channels exceeds a certain threshold value (the critical power), the filamentation in these structures is implemented. Parameters of these light channels are theoretically estimated on the basis of the diffraction-ray model of single filamentation. It is shown that the initial radius of intensity inhomogeneities in the transverse profile of a laser beam with a centimeter radius and subterawatt power is of characteristic value of several millimeters.