

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки
Физический институт им. П. Н. Лебедева Российской Академии наук

На правах рукописи

Мокроусова Дарья Вадимовна

**Влияние резервуара энергии на распространение фемтосекундных
лазерных импульсов в режиме филаментации вблизи геометрического
фокуса**

Специальность 01.04.21–Лазерная физика

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
кандидата физико-математических наук

Москва 2019

Работа выполнена в Федеральном государственном бюджетном учреждении
науки Физическом институте им. П. Н. Лебедева РАН (ФИАН).

Научный руководитель:

доктор физико-математических наук, профессор
Ионин Андрей Алексеевич (ФИАН)

Научный консультант:

доктор физико-математических наук, доцент
Селезнев Леонид Владимирович (ФИАН)

Официальные оппоненты:

Кузнецов Андрей Петрович

доктор физико-математических наук, профессор, директор института
лазерных и плазменных технологий Федерального государственного
автономного образовательного учреждения высшего образования
«Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ»
(НИЯУ МИФИ)

Компанец Виктор Олегович

кандидат физико-математических наук, старший научный сотрудник
Федерального государственного бюджетного учреждения науки
Института спектроскопии Российской академии наук (ИСАН)

Ведущая организация:

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт
сильноточной электроники Сибирского отделения Российской академии
наук (ИСЭ СО РАН, г. Томск)

Защита диссертации состоится «20» января 2020 года в 11:00 часов на заседании
диссертационного совета Д 002.023.03 на базе Физического института
им. П. Н. Лебедева РАН по адресу: 119991, г. Москва, Ленинский пр-т, 53.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ФИАН, а также на сайте
www.lebedev.ru.

Автореферат разослан «_____» _____ 2019 г.

Ученый секретарь диссертационного совета Д 002.023.03

доктор физико-математических наук

А. С. Золотько

I. ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность проблемы

Филаментация фемтосекундных лазерных импульсов – явление, заключающееся в локализации энергии лазерного излучения и сопровождающееся образованием плазменного канала. В режиме одиночной филаментации излучение при распространении имеет практически постоянный диаметр (в воздухе около 100 мкм на длине волны 800 нм [1]) на протяженных трассах (до десятков метров). Филаментация наблюдается при превышении ультракоротким лазерным импульсом мощности, называемой критической мощностью самофокусировки, и обусловлена самофокусировкой излучения, дифракцией и его рефракцией на ионизованном веществе. Стоит сразу отметить, что термин «filament» (в русскоязычных работах «нить») применялся во второй половине XX века к плазменным образованиям, появляющимся вследствие оптического пробоя среды. В данной работе будет использоваться терминология, согласно которой процессом филаментации называется только самолокализация энергии ультракоротких лазерных импульсов, сопровождающаяся образованием плазменного канала за счет полевой ионизации. Такая филаментация фемтосекундных импульсов впервые наблюдалась группой проф. Ж. Муру в 1995 г. [2].

Изучением филаментации ультракоротких импульсов занимаются множество научных групп по всему миру. По результатам исследований опубликовано большое количество обзорных статей, несколько монографий и множество других публикаций. Раз в два года проводится конференция по филаментации “International Conference on Laser Filamentation” (COFIL), кроме того, на некоторых международных конференциях (ICONO/LAT, UltrafastLight и др.) организуют секции, целиком посвященные филаментации. Существует интернет-ресурс filamentation.org, в котором собраны публикации по филаментации с 1995 года по настоящее время, информация о конференциях и симпозиумах, посвященных изучению филаментации, а также информация об основных научных группах, исследующих это явление по всему миру.

Возможные применения филаментации, такие как дистанционное детектирование загрязнений в атмосфере, молниезащита, спектроскопия плазмы

на расстоянии, требуют получения как можно более удаленного от лазерной системы и протяженного филамента и сопутствующего ему плазменного канала. Актуальность проведения лабораторных экспериментов по управлению параметрами филаментов для последующего масштабирования результатов на полевые применения сохраняется до сих пор. В случае турбулентной атмосферы и режима множественной филаментации, множество эффектов вносят свой вклад, что делает невозможным выделение одного из них для исследования. Эксперименты с геометрически сфокусированными импульсами, распространяющимися в режиме одиночной филаментации, позволяют исследовать влияние одного выбранного параметра.

Изначально филаментация геометрически сфокусированного излучения использовалась только для проведения лабораторных экспериментов с перспективой последующего масштабирования на атмосферные применения. На первый взгляд, вследствие самосогласованности явления, при геометрической фокусировке (то есть линейной фокусировке оптическим элементом) излучения должна изменяться только длина филамента и положение его начала, но это неверно. В работе [3] было показано, что при геометрической фокусировке параметры филамента: радиус, длина, пиковая интенсивность, плотность лазерной плазмы – в значительной степени зависят от числовой апертуры.

Для некоторых применений важно использование сфокусированного излучения, например, для генерации высоких гармоник либо терагерцового излучения, наноструктурирования на поверхности и в объеме образцов. В этом случае важно знать распределение плотности энергии в области фокальной перетяжки для подбора необходимых условий воздействия. Поэтому для корректного применения таких пучков необходимо понимать процесс распространения излучения вблизи фокуса, в частности, условия распространения низкоинтенсивного резервуара энергии, который окружает высокоинтенсивный филамент, для коллимированного излучения имеет миллиметровые размеры и содержит около 90% всей энергии излучения [4, 5]. Именно за счет подпитки филамента энергией из резервуара возможно существование протяженных плазменных каналов [6, 7]. Кроме того, взаимодействие различных частей пучка вблизи геометрического фокуса может

приводить к появлению постфиламентационных каналов - узконаправленных световых структур, образующихся в пучке после окончания филаментации [8, 9], часто наблюдаемых в случае коллимированного излучения и увеличивающих расстояние, на которых существует область высокой интенсивности в лазерном пучке. Высокоинтенсивное излучение постфиламентационных каналов также может осуществлять структурирование среды, поэтому должно приниматься во внимание для предотвращения нежелательного повреждения образцов. При этом параметры постфиламентационных каналов зависят от распространения резервуара энергии вблизи и после геометрического фокуса пучка.

С увеличением интенсивности лазерного излучения растет эффективность нелинейных процессов (генерации гармоник и ТГц импульсов), поэтому возможность повышения интенсивности излучения вблизи геометрического фокуса является важным направлением исследования. В последнее время привлекает большой интерес возможность увеличения лазерной интенсивности при взаимодействии филаментов [10]. Однако в большинстве работ рассматривается взаимодействие пары филаментов, либо сотен филаментов, образованных при множественной филаментации ТВт лазерного импульса. При этом более репрезентативным как часть картины множественной филаментации и одновременно простым для компьютерного моделирования является взаимодействие нескольких (3, 4 или 6) филаментов. Во взаимодействии филаментов и образовании дочерних филаментов вблизи геометрического фокуса резервуар энергии играет важную роль [11].

Таким образом, в настоящее время **актуально** понимание роли резервуара энергии в протекании процессов, происходящих вблизи геометрического фокуса лазерного пучка, распространяющегося в условиях сильной нелинейности, в том числе сложение в фокальной области нескольких филаментов и формирование постфиламентационных каналов.

Цели и задачи диссертационной работы

Целью данной диссертационной работы являлось изучение особенностей распространения сходящихся пучков вблизи геометрического фокуса в режиме филаментации фемтосекундных импульсов, которые обусловлены влиянием резервуара энергии.

Для достижения цели были поставлены и решены следующие задачи:

1. Исследование распространения резервуара энергии вблизи фокуса при филаментации сфокусированного излучения;
2. Определение влияния апертурной диафрагмы, внесенной вблизи геометрического фокуса системы, на филаментацию сфокусированного ультракороткого импульса;
3. Анализ взаимодействия нескольких пучков ультракоротких лазерных импульсов при геометрической фокусировке;
4. Исследование влияния числовой апертуры на параметры постфиламентационных каналов, образующихся при фокусировке лазерного излучения;
5. Определение влияния начальной энергии импульса на параметры постфиламентационных каналов, образующихся при филаментации сфокусированных импульсов.

Научная новизна работы

1. Экспериментально установлено, что периферия пучка вблизи фокуса испытывает геометрическую фокусировку, при этом в перетяжке линзы нет четкого деления излучения на филамент и окружающий его резервуар энергии;
2. Экспериментально наблюдалось, что ИК филаменты при фокусировке и взаимодействии образуют протяженный аксиальный суммарный филамент, в то время как в случае УФ филаментов взаимодействие не наблюдалось;
3. Экспериментально установлено, что при филаментации сходящихся пучков расходимость образующегося постфиламентационного канала меньше, чем у основной части излучения, и чем у пучка с теми же параметрами, распространяющегося в линейном режиме;
4. Экспериментально зарегистрировано уменьшение приведенной угловой расходимости постфиламентационного канала (расходимости, отнесенной к расходимости в линейном случае) при увеличении энергии лазерного импульса и числовой апертуры пучка.

Практическая ценность работы

Результаты и закономерности, полученные в данной работе, могут быть использованы для решения следующих задач:

1. Управление высоковольтными разрядами, в том числе для осуществления молниезащиты;
2. Передача высокоинтенсивного излучения на протяженных атмосферных трассах для осуществления удаленного экологического мониторинга;
3. Лазерная обработка материалов излучением ультракороткой длительности;
4. Удаленное детектирование разливов нефтепродуктов на поверхности воды;
5. Генерация высоких гармоник и терагерцового излучения при филаментации ультракоротких импульсов

Защищаемые положения

1. При распространении сходящихся лазерных пучков в режиме филаментации фемтосекундных импульсов вблизи геометрического фокуса отсутствует явное разделение пучка на высокоинтенсивный филамент и резервуар энергии, что обеспечивает сохранение филаментационного режима распространения после прохождения диафрагмы, размещенной вблизи геометрического фокуса.
2. При фокусировке нескольких пучков мощных фемтосекундных ИК лазерных импульсов в результате их нелинейного взаимодействия вблизи геометрического фокуса образуется протяженный аксиальный филамент с плотностью плазмы в плазменном канале, превышающей соответствующие значения для одиночных филаментов.
3. При фокусировке фемтосекундных импульсов, распространяющихся в режиме филаментации, вблизи геометрического фокуса происходит формирование интенсивного постфиламентационного канала, в распространении которого основную роль играет его резервуар энергии. Угловая расходимость такого канала меньше расходимости лазерного пучка, распространяющегося в линейном режиме, и уменьшается с увеличением энергии лазерного импульса.

Апробация результатов работы

Основные результаты диссертации были опубликованы в **4** статьях в рецензируемых журналах, индексируемых в базе данных Web of Science, а также в **11** трудах научных конференций. Список публикаций приведен на стр. 17.

Вошедшие в диссертационную работу положения и результаты были представлены на 15 международных и всероссийских научных конференциях: III молодежная научная школа «Современные проблемы физики и технологий», 10-13 апреля 2014 г., Москва, Россия; 16th International Conference “Laser Optics - 2014”, 30 июня – 4 июля 2014 г., Санкт-Петербург, Россия; 57-я научная конференция МФТИ с международным участием, посвященная 120-летию со дня рождения П.Л. Капицы, 24–29 ноября 2014 г., Долгопрудный, Россия; IX Международная конференция молодых ученых и специалистов «Оптика – 2015», 12-16 октября 2015 г., Санкт-Петербург, Россия; VI Всероссийская молодежная конференция по фундаментальным и инновационным вопросам современной физики, 15-20 ноября 2015 г., Москва, Россия; 22 Всероссийская научная конференция студентов физиков и молодых ученых "ВНКСФ-22", 21-28 апреля 2016 г., Таганрог/Ростов-на-Дону, Россия; 17th International Conference «Laser Optics 2016», 27 июня – 1 июля 2016 г., Санкт-Петербург, Россия; XIX Международный симпозиум «Оптика атмосферы и океана» 1-6 июля 2013 г., Барнаул, Россия; 18^a Международная школа по Квантовой электронике “Laser physics and applications”, 23 September – 03 October 2014 г., Созополь, Болгария; 25th Annual International Laser Physics Workshop “LPhys’16”, 11-15 июля 2016 г., Ереван, Армения; Международная конференция «ICONO/LAT». 26-30 сентября 2016 г., Минск, Беларусь; XXI Международный симпозиум «International Symposium on High Power Laser Systems and Applications», 6–9 сентября 2016, Гмунден, Австрия; XIII Международная конференция «AMPL-2017», 10-15 сентября 2017 года, г. Томск, Россия; 26th Annual International Laser Physics Workshop “LPhys’17”, 17-21 июля 2017 г., Казань, Россия; 18th International Conference on Laser Optics "ICLO-2018", 4-8 июня 2018 г., Санкт-Петербург, Россия.

Отдельные результаты, представленные в диссертационной работе и объединенные в цикл работ под названием «Филаментация сфокусированных

фемтосекундных лазерных импульсов и управление параметрами образующихся при этом плазменных каналов» были удостоены II Премии на конкурсе молодежных научных работ по оптике и лазерной физике (2015 г.) в составе научного коллектива: Д. В. Мокроусова и Е. С. Сунчугашева; объединенные в циклы работ под названием «Распространение сфокусированных фемтосекундных лазерных импульсов в воздухе и управление протяженностью плазменных каналов, образующихся при из филаментации» и «Увеличение зоны действия и пиковой интенсивности мощных ультракоротких лазерных импульсов для задач удаленного зондирования среды» были удостоены Премии им. Н. Г. Басова молодежного конкурса молодежных научных работ ФИАН в 2015 г. и в 2017 г. соответственно в составе научного коллектива: Д. В. Мокроусова и Е. С. Сунчугашева.

Структура и объем работы

Диссертация состоит из введения, пяти глав и заключения, списка публикаций автора по теме диссертации и списка цитируемой литературы. Объем работы составляет 124 страницы, включая 58 рисунков и список литературы из 129 наименований.

Личный вклад автора

Все используемые в диссертации экспериментальные результаты были получены автором лично или при его непосредственном участии. Автор участвовал в постановке задач исследований, создании и разработке большинства используемых в работе оптических схем. Автор непосредственно производил обработку и анализ полученных экспериментальных данных, участвовал в обсуждении и интерпретации полученных результатов, написании статей, выступал на конференциях с полученными научными результатами. Результаты численных расчетов, приведенные в диссертации, получены В. П. Кандидовым, С. А. Шленовым и А. А. Дергачевым; О. Г. Косаревой, Н. А. Пановым и Д. Е. Шипило из МГУ им. М. В. Ломоносова, и Ю. Э. Гейнцем и А. А. Земляновым из ИОА СО РАН.

КРАТКОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во *Введении* диссертационной работы обоснована актуальность работы, сформулированы цель, решаемые задачи, научная новизна, практическая значимость и сведения об апробации результатов, представленных в работе. Кроме того, во введении приведены защищаемые положения и личный вклад автора.

В *Главе 1* диссертационной работы дано общее представление о филаментации ультракоротких импульсов в воздухе, приведен краткий обзор работ, повлиявших на развитие филаментации, от начала обсуждения самофокусировки до первых наблюдений филаментации.

В разделе 1.1 описаны основные физические процессы, определяющие филаментацию, и модели, описывающие её. В разделе также обсуждаются особенности явления, такие как ограничение интенсивности и наличие резервуара энергии, приведены исследования лазерной плазмы, образующейся при филаментации, уделено внимание взаимодействию филаментов, приведен обзор исследований постфиламентационных каналов.

В разделе 1.2 приведены возможные применения филаментации, а также задачи, которые стоят перед исследователями, решить которые необходимо для эффективного использования филаментации в атмосфере.

Раздел 1.3 посвящен филаментации сфокусированных лазерных пучков: её особенностям, применениям и исследованиям, посвященным её изучению.

В разделе 1.4 представлены выводы по Главе 1.

Глава 2 посвящена описанию установки и методов исследования, примененных автором.

Раздел 2.1 рассказывает о созданном компанией «Авеста-Проект» источнике фемтосекундных лазерных импульсов, примененных в данной работе.

Раздел 2.2 посвящен основным приборам, использованным для получения результатов работы и методу измерения линейной плотности плазмы в филаменте.

В разделе 2.3 приведены методы определения длительности импульса и критической мощности самофокусировки, которые применялись в работе,

подробно описан процесс калибровки системы, использовавшейся для получения поперечных распределений лазерных пучков.

В *Главе 3* приведено описание экспериментов и полученные результаты по исследованию распространения резервуара энергии при филаментации ультракоротких импульсов вблизи геометрического фокуса.

Раздел 3.1 посвящен исследованию влияния диафрагмы на филаментацию сфокусированного излучения. Эксперименты [4, 5], проведенные с коллимированным излучением, показали, что при внесении на пути пучка диафрагмы, пропускающей высокоинтенсивный филамент, но поглощающей большую часть резервуара энергии, филаментация прекращается вскоре после диафрагмы. В данной работе описан эксперимент, направленный на исследование резервуара энергии вблизи геометрического фокуса. В процессе эксперимента лазерные импульсы фокусировались сферическим зеркалом, на оптической оси их распространения на различных расстояниях от зеркала помещалась диафрагма. Результаты, полученные для следующих параметров эксперимента: центральная длина волны импульса 744 нм, фокусное расстояние 51 см, размер диафрагмы около 300 мкм, энергия до диафрагмы 1.2 мДж, представлены на рис. 1.

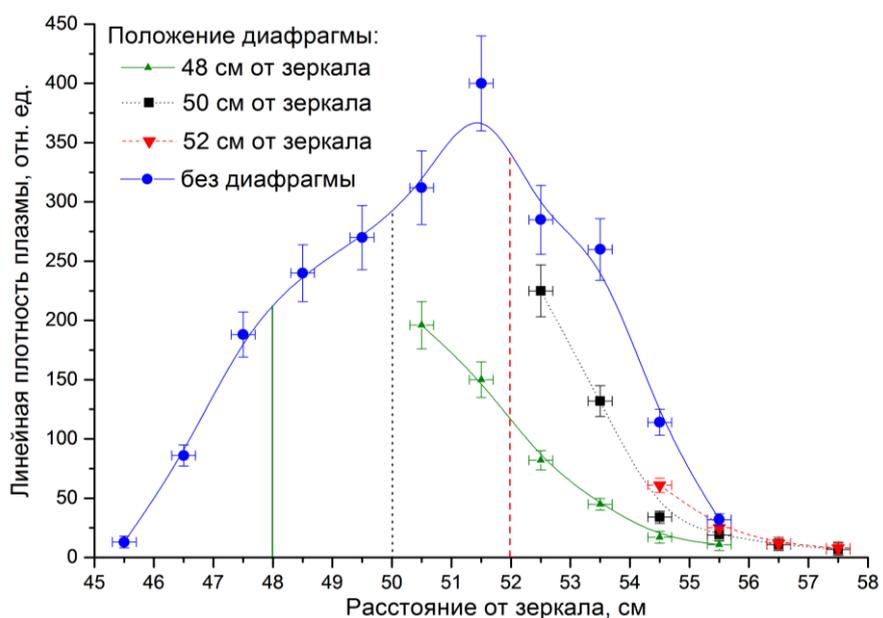


Рис. 1 Распределение линейной плотности плазмы при филаментации ИК лазерного импульса, сфокусированного сферическим зеркалом с фокусным расстоянием 51 см, при различных положениях диафрагмы диаметром около 300 мкм

За диафрагмой, помещенной вблизи фокуса зеркала (50 см и 52 см соответственно) длина образованного плазменного канала не изменялась по сравнению со случаем недиафрагмированного излучения. При этом энергия импульса после прохождения диафрагмы превышала 65% от начальной энергии. При внесении диафрагмы на расстоянии 48 см от зеркала, значительная часть резервуара энергии поглощалась, что подтверждается уменьшением энергии в импульсе на 50% после прохождения диафрагмы. Это в свою очередь приводило к заметному уменьшению длины плазменного канала, тем не менее, резкого прекращения филаментации за диафрагмой не наблюдалось.

При фокусировке зеркалами с фокусным расстоянием 26 см и 108 см наблюдалась аналогичная закономерность. Полученные результаты находятся в хорошем согласии с результатами компьютерного моделирования, проведенным А.А. Дергачевым, С.А. Шленовым и В.П. Кандидовым (МГУ). При фокусировке ($f=50$ см) УФ импульсов длиной волны 248 нм и использовании диафрагм трех различных размеров . 440 мкм, 320 мкм и 210 мкм, резкого прекращения филаментации за диафрагмой также не наблюдалось.

В разделе 3.2 проведено сравнение поперечных профилей пучка в двух случаях: при слабой фокусировке лазерного пучка ($f=5$ м) существенно перед фокусом зеркала и при более жесткой фокусировке ($f=108$ см) вблизи фокуса. Замечено, что в первом случае наблюдается яркий филамент и окружающая его «подставка» - резервуар энергии. Во втором случае отсутствует явное разделение пучка на резервуар и филамент.

Раздел 3.3 содержит основные выводы по главе: при фокусировке лазерного импульса, распространяющегося с надкритической мощностью в воздухе, вблизи геометрического фокуса в поперечном сечении пучка отсутствует четкое разделение излучения на низкоинтенсивный резервуар и высокоинтенсивный филамент. Резервуар и филамент составляют около 65% по энергии от полной энергии импульса. Периферия пучка (оставшиеся ~35%) в плазмообразовании не участвует. При всех рассмотренных фокусировках резервуар энергии локализован в области около 300 мкм. Таким образом, диаметры филамента и резервуара сравнимы. Поскольку четкое разделение

пучка на филамент и резервуар отсутствует, их диаметры и энергии сравнимы, то и интенсивности в филаменте и резервуаре также сравнимы.

В *Главе 4* описываются результаты исследования взаимодействия филаментов вблизи геометрического фокуса.

В разделе 4.1 приведены экспериментальные результаты исследования сложения четырех лазерных пучков.

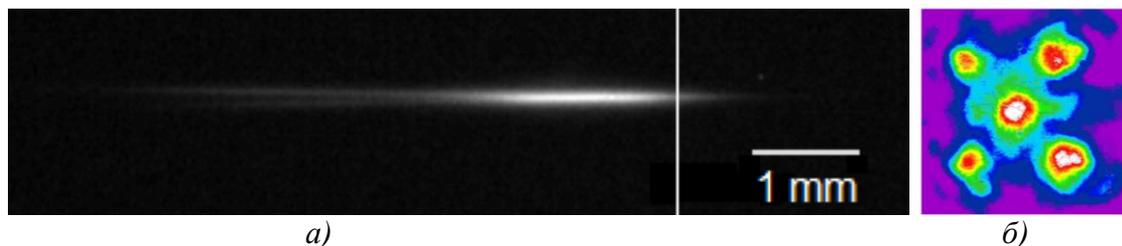


Рис. 2 Изображение плазменного канала при фокусировке четырех ИК лазерных пучков с общей энергией 1.7 мДж линзой с фокусным расстоянием 7.5 см, излучение распространяется слева направо.

На рис. 2а представлен профиль люминесценции плазменного канала, на котором можно видеть 4 филамента (2 задних находятся в тени от двух передних), сливающиеся в более яркий аксиальный филамент. При этом в поперечном распределении плотности энергии пучка после прохождения геометрического фокуса (зарегистрированном примерно на расстоянии двойного фокуса от зеркала), взаимодействие пучков проявляется в появлении яркого центрального максимума, не наблюдающегося в линейном режиме, и являющегося постфиламентационным каналом от аксиального филамента (рис. 2б).

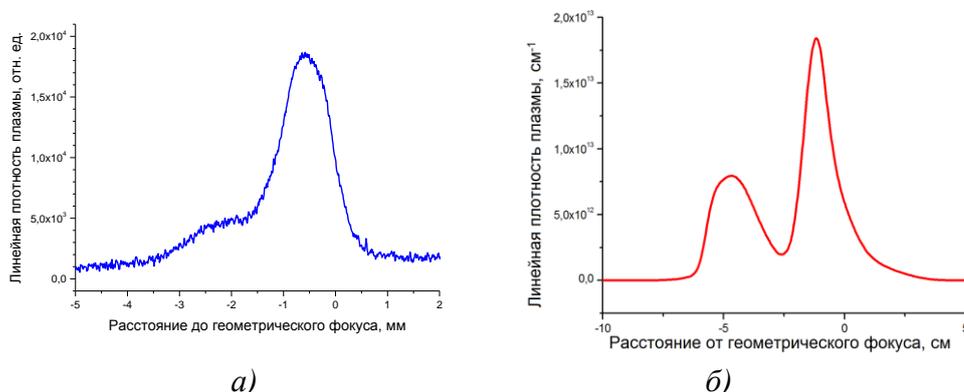


Рис. 3 Распределение линейной плотности плазмы вдоль оси распространения пучка а) эксперимент б) численное моделирование

Оцифровка профилей, полученных при помощи ПЗС-матрицы (рис. 2а), позволяет получить распределение линейной плотности плазмы вдоль оси распространения (рис. 3а). Также на рис. 3б приведена зависимость линейной плотности плазмы от расстояния, полученная в численном моделировании, проведенном Д. Е. Шипило под руководством Н. А. Панова и О. Г. Косаревой (МГУ). Плотность плазмы в суммарном филаменте в численном моделировании в 3 раза превышает плазму для случая одного филамента. По экспериментальным данным точную оценку дать затруднительно, но, исходя из рис. 3, разница будет еще более существенна, чем в моделировании.

В разделе 4.2 приведено сравнение сложения 3 или 4 лазерных пучков в ИК и УФ спектральных диапазонах, сфокусированных зеркалами с различными фокусными расстояниями. Наличие взаимодействия определялось по появлению яркого центрального максимума в поперечном распределении плотности энергии лазерного пучка, регистрируемом за фокусом зеркала. Результаты, полученные для ИК импульсов, повторяли результаты раздела 4.1. Для УФ импульсов такого сложения филаментов не наблюдалось. Это явление связано с тем, что, как показано в численном моделировании, суммарный филамент образуется за счет интерференции резервуаров энергии, окружающих отдельные филаменты, испытывающих дифракцию на плазме этих отдельных филаментов. Дифракция на плазме меньше выражена для УФ лазерных импульсов, чем для ИК, поэтому взаимодействие в УФ спектральном диапазоне происходит гораздо слабее.

Раздел 4.3 содержит выводы по главе. При фокусировке мощного регулярного ИК пучка наблюдается взаимодействие резервуаров энергии, окружающих отдельные филаменты, приводящее к их сложению и образованию центрального аксиального филамента. При этом линейная плотность плазмы в суммарном филаменте в 3 или более раз больше по сравнению с одиночным филаментом.

Глава 5 посвящена исследованию характеристик постфиламентационных каналов (ПФК), образующихся при филаментации геометрически сфокусированного излучения.

В Разделе 5.1 описаны эксперименты по исследованию постфиламентационных каналов при фокусировке сферическими зеркалами с различными фокусными расстояниями. Для этого исследовалось распространение излучения за геометрическим фокусом, а именно поперечные распределения плотности энергии на различных расстояниях от фокусирующего элемента. В экспериментах были измерены радиусы ПФК и пучка в целом, рассчитана их приведенная угловая расходимость (то есть измеренная в эксперименте угловая расходимость, отнесенная к начальной числовой апертуре пучка) в зависимости от энергии и числовой апертуры пучка.

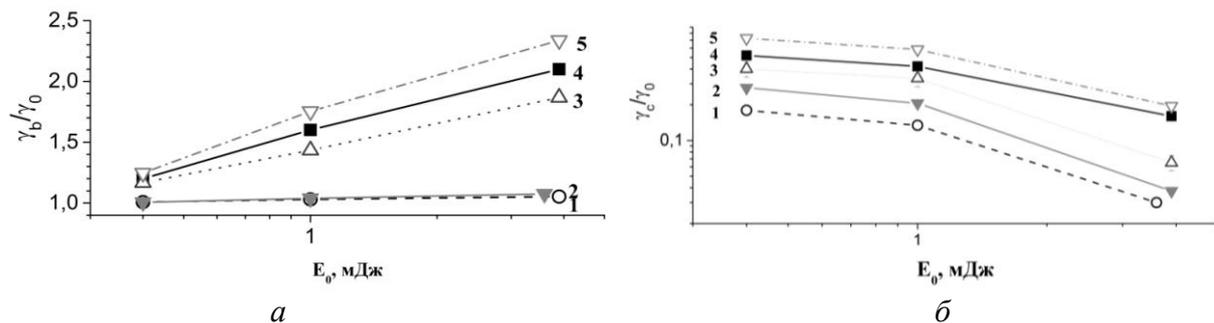


Рис. 4 Экспериментальные зависимости приведенных угловых расходимостей всего пучка (а) и постфиламентационного канала (б) от начальной энергии импульса. Различные кривые соответствуют фокусным расстояниям собирающих линз: (1) $f=18$ см (2) $f=25$ см (3) $f=52$ см (4) $f=108$ см (5) $f=295$ см

Полученные приведенные расходимости показаны на рис. 4а, б. Приведенные угловая расходимость пучка как целого растет при увеличении энергии для всех рассмотренных фокусировок (рис. 4а), а также растет при увеличении фокусного расстояния. Это связано с усилением рефракции вследствие увеличения количества плазмы при увеличении энергии. При этом, чем больше линейная расходимость, тем меньше относительный вклад плазмы в общую расходимость. Приведенная угловая расходимость постфиламентационных каналов уменьшается с увеличением энергии, в отличие от пучка как целого, и с уменьшением фокусного расстояния (рис. 3б). Расходимость постфиламентационных каналов столь мала вследствие влияния керровской самофокусировки и окружающего каналы резервуара энергии. Влияние низкоинтенсивных областей вокруг каналов было показано экспериментально: после области филаментации на пути распространения пучка ставилась диафрагма, пропускающая ПФК и поглощающая весь остальной

пучок; расходимость ПФК при внесении диафрагмы возросла примерно вдвое. Экспериментальные результаты находятся в хорошем согласии с результатами расчетов, полученных в компьютерном моделировании, выполненном Ю.Э. Гейнцем и А.А. Земляновым (ИОА СО РАН).

Эксперименты, проведенные для УФ импульсов, показали отсутствие качественных различий в образовании и распространении ПФК по сравнению с ИК импульсами.

В разделе 5.2 приведены основные выводы по главе. В работе впервые была экспериментально измерена угловая расходимость постфиламентационных каналов в зависимости от энергии при различных числовых апертурах пучка в ИК и УФ спектральных диапазонах. Диафрагмирование постфиламентационного канала показало, что окружающее постфиламентационные каналы низкоинтенсивное излучение значительно уменьшает расходимость канала, несмотря на отсутствие потерь энергии на плазмообразование.

В *Заключении* диссертационной работы сформулированы основные **научные результаты**, полученные в рамках данного исследования филаментации фемтосекундных (90 фс) импульсов.

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ

1. При фокусировке лазерных пучков с числовой апертурой порядка 10^{-2} , распространяющихся в воздухе с мощностью, превышающей критическую мощность самофокусировки в 4 раза, вблизи геометрического фокуса диаметры и интенсивности резервуара энергии и филамента сопоставимы, в отличие от случая филаментации коллимированного излучения, что связано с локализацией резервуара энергии вблизи оптической оси излучения.
2. Путем внесения диафрагмы вблизи геометрического фокуса на оптической оси лазерных пучков с числовой апертурой порядка 10^{-2} , распространяющихся в режиме одиночной филаментации, установлено, что резервуар энергии имеет поперечный масштаб ~ 300 мкм и содержит $\sim 65\%$ энергии лазерного импульса. Для диафрагм с аналогичным и бóльшим размером в указанных условиях не наблюдается заметного уменьшения длины плазменного канала после диафрагмы.

3. При геометрической фокусировке лазерного пучка с центральной длиной волны 744 нм, разделенного амплитудной маской на четыре меньших пучка, в результате взаимодействия резервуаров энергии образованных филаментов образуется центральный аксиальный филамент с плотностью плазмы более чем в 3 раза превышающей соответствующие значения для отдельных филаментов. В этих условиях за геометрическим фокусом системы в поперечном распределении пучка присутствует яркий центральный максимум, отсутствующий в линейном режиме распространения и являющийся постфиламентационным каналом от аксиального филамента.

4. Угловая расходимость постфиламентационного канала, образованного при филаментации сфокусированного излучения, меньше, чем расходимость пучка как целого, и меньше, чем геометрическая расходимость, обусловленная исходной числовой апертурой, при всех реализованных параметрах эксперимента (энергия лазерного импульса от 0.4 мДж до ~4 мДж, числовая апертура от 0.001 до ~0.02). При этом, несмотря на отсутствие плазмообразования и связанных с ним потерь, существенную роль в поддержании малой угловой расходимости постфиламентационного канала играет окружающий его низкоинтенсивный резервуар энергии.

5. Отношение угловой расходимости постфиламентационного канала к исходной числовой апертуре в ИК спектральном диапазоне, уменьшается от ~0.8 до ~0.03 при увеличении энергии с 0.4 мДж до ~4 мДж и увеличении числовой апертуры с 0.001 до ~0.02.

СПИСОК ПУБЛИКАЦИЙ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

Публикации автора в рецензируемых журналах, индексируемых в базе данных Web of Science:

1. A. A. Dergachev, A. A. Ionin, V. P. Kandidov, **D. V. Mokrousova**, L. V. Seleznev, D. V. Sinitsyn, E. S. Sunchugasheva, S. A. Shlenov, «The influence of the energy reservoir on the plasma channel in focused femtosecond laser beams», *Laser Physics* **25** (6), 065402 (2015).

2. D. E. Shipilo, N. A. Panov, E. S. Sunchugasheva, **D. V. Mokrousova**, V. A. Andreeva, O. G. Kosareva, L. V. Seleznev, A. B. Savel'ev, A. A. Ionin,

S. L. Chin, «Fusion of regularized femtosecond filaments in air: far field on-axis emission», *Laser Physics Letters* **13** (11), 116005 (2016).

3. Ю. Э. Гейнц, А. А. Землянов, А. А. Ионин, **Д. В. Мокроусова**, Л. В. Селезнев, Е. С. Сунчугашева «Исследования характеристик интенсивных световых каналов на постфиламентационной стадии эволюции ультракороткого лазерного излучения», *Оптика атмосферы и океана* **29** (12), 1023 (2016).

4. Yu. E. Geints, A. A. Ionin, **D. V. Mokrousova**, L. V. Seleznev, D. V. Sinitsyn, E. S. Sunchugasheva, A. A. Zemlyanov, «High intensive light channel formation in the post-filamentation region of ultrashort laser pulses in air », *Journal of Optics* **18** (9), 095503 (2016).

Публикации автора по теме диссертации в материалах конференций:

1. A. A. Ionin, D. V. Mokrousova, L. V. Seleznev, A. P. Shustikova, D. V. Sinitsyn, E. S. Sunchugasheva, A. A. Dergachev, V. P. Kandidov, S. A. Shlenov «Filamentation of focused femtosecond laser pulse and plasma channel formation in the vicinity of geometric focus», 2014 International Conference Laser Optics, Proceedings Paper, доклад ThR5-23. (DOI: 10.1109/LO.2014.6886340);

2. S. A. Shlenov, A. A. Dergachev, A. A. Ionin, V. P. Kandidov, D. V. Mokrousova, L. V. Seleznev, D. V. Sinitsyn, E. S. Sunchugasheva, A. P. Shustikova, “Femtosecond laser filament and plasma channels in focused beam in air”, *Proceedings SPIE* **9447**, 944717 (2015) (DOI:10.1117/12.2176327);

3. V. A. Andreeva, A. A. Ionin, O. G. Kosareva, D. V. Mokrousova, N. A. Panov, A. B. Savel'ev, L. V. Seleznev, D.E. Shipilo, E. S. Sunchugasheva, “Filamentation of four beams under focusing in air”, 2016 International Conference Laser Optics, Proceedings Paper, доклад WeR5-p10 (DOI: 10.1109/LO.2016.7549801);

4. Yu. E. Geints, A. A. Ionin, D. V. Mokrousova, L. V. Seleznev, D. V. Sinitsyn, E. S. Sunchugasheva, A. A. Zemlyanov, «Post-filamentation high-intensive light channels formation upon ultrashort laser pulses self-focusing in air», *Proceedings SPIE* **10254**, 102541F (2017) (DOI: 10.1117/12.2256006);

5. А. А. Дергачев, А. А. Ионин, В. П. Кандидов, Д. В. Мокроусова, Л. В. Селезнев, Д. В. Сеницын, Е. С. Сунчугашева, С. А. Шленов, «Формирование протяженных плазменных каналов в сфокусированных пучках фемтосекундного лазерного излучения при филаментации в воздухе», XIX

Международный симпозиум Оптика атмосферы и океана. Физика атмосферы: сборник докладов. Томск. Изд. ИАО СО РАН, В89-И92, 2013 г. (https://symp.iao.ru/files/symp/aoo/19/ru/abstr_5015.doc);

6. Д. В. Мокроусова, А. А. Ионин, Л. В. Селезнев, Д. В. Сеницын, Е. С. Сунчугашева, А. П. Шустикова, «Особенности филаментации сфокусированных ультракоротких импульсов вблизи геометрического фокуса», Тезисы докладов III международной молодежной научной школы-конференции «Современные проблемы физики и технологий», с.292, 2014 г.;

7. Д. В. Мокроусова, А. А. Ионин, Л. В. Селезнев, Д. В. Сеницын, Е. С. Сунчугашева, А. П. Шустикова «Особенности филаментации жесткосфокусированного лазерного УКИ вблизи геометрического фокуса», сборник трудов IX Международной конференции молодых ученых и специалистов «ОПТИКА – 2015» / Под ред. проф. В.Г. Беспалова, проф. С.А. Козлова. – СПб: Университет ИТМО, 2015. – 717 с:с ил., с.154.;

8. А. А. Ионин, Д. В. Мокроусова, Л. В. Селезнев, Д. В. Сеницын, Е. С. Сунчугашева, А. П. Шустикова, «Филаментация сфокусированных ультракоротких лазерных импульсов при внесении диафрагмы», Труды 57-й научной конференции МФТИ с международным участием, посвященной 120-летию со дня рождения П. Л. Капицы, Всероссийской научной конференции с международным участием "Актуальные проблемы фундаментальных и прикладных наук в области физики", Всероссийской молодежной научной конференции с международным участием "Актуальные проблемы фундаментальных и прикладных наук в современном информационном обществе". Общая и прикладная физика. –М.:МФТИ, 2014 – 115 с., стр. 63;

9. А. А. Ионин, Д. В. Мокроусова, Л. В. Селезнев, Д. В. Сеницын, Е. С. Сунчугашева, «Распространение сфокусированных фемтосекундных лазерных импульсов в воздухе и управление протяженностью плазменных каналов при их филаментации», Сборник трудов VI Всероссийской молодежной конференции по фундаментальным и инновационным вопросам современной физики, ФИАН, Москва, с. 24, 2015 г.;

10. Д. В. Мокроусова, А. А. Ионин, Л. В. Селезнев, Д. В. Сеницын, Е. С. Сунчугашева, «Распространение фемтосекундных лазерных импульсов в

воздухе вблизи и за геометрическим фокусом», Сборник тезисов, материалы Двадцать второй Всероссийской научной конференции студентов-физиков и молодых ученых (ВНКСФ-22, Ростов-на-Дону): материалы конференции, тезисы докладов: В 1 т. Т. 1 – Екатеринбург-Ростов-на-Дону: издательство АСФ России, стр. 280, 2016 г.;

11. Yu. E. Geints, A. A. Ionin, D. V. Mokrousova, L. V. Seleznev, D. V. Sinitsyn, E. S. Sunchugasheva, A. A. Zemlyanov, "Intense Light Channels Formation in Post-Filament Area of Focused Ultrashort Laser Pulse" ICONO/LAT Proceeding CD, доклад IThF5 (сборник тезисов конференции на CD-диске), 2016 г.

ЦИТИРУЕМАЯ В АВТОРЕФЕРАТЕ ЛИТЕРАТУРА

1. A. Couairon, A. Mysyrowicz, «Femtosecond filamentation in transparent media», *Phys. Rep.* **441**, 47 (2007);

2. A. Braun, G. Korn, X. Liu, D. Du, J. Squier, G. Mourou «Self-channeling of high-peak-power femtosecond laser pulses in air». *Opt. Lett.* **20** (1), 73 (1995);

3. Ю. Э. Гейнц, А. А. Землянов, А. А. Ионин, С. И. Кудряшов, Л. В. Селезнев, Д. В. Синицын, Е. С. Сунчугашева "Особенности филаментации остросфокусированных ультракоротких лазерных импульсов в воздухе", *ЖЭТФ* **138** (5.11), 822 (2010);

4. A. A. Dubietis, E. Gaizauskas, G. Tamosauskas, P. Di Trapani «Light filaments without self-channeling», *Phys. Rev. Lett.* **92** (25), 253903 (2004);

5. W. Liu, J. F. Gravel, F. Théberge, A. Becker, S. L. Chin «Background reservoir: its crucial role for long-distance propagation of femtosecond laser pulses in air», *Appl. Phys. B* **80**, 857 (2005);

6. В.П. Кандидов, О.Г. Косарева, А.А. Колтун «Нелинейно-оптическая трансформация мощного фемтосекундного лазерного импульса в воздухе», *Квант. Электрон.* **33**, 69 (2003);

7. M. Mlejnek, E. M. Wright, J. V. Moloney «Dynamic spatial replenishment of femtosecond pulses propagating in air», *Opt. Lett.* **23** (5), 382 (1998);

8. J.-F. Daigle, O. Kosareva, N. Panov, T.-J. Wang, S. Hosseini, S. Yuan, G. Roy, S.L. Chin «Formation and evolution of intense, post-filamentation, ionization-free low divergence beams», *Opt. Commun.* **284**, 3601 (2011)

9. H. Gao, W. Liu, S. L. Chin «Post-filamentation multiple light channel formation in air», *Las. Phys.* **24**, 055301 (2014);
10. O. G. Kosareva, W. Liu, N. A. Panov, J. Bernhardt, Z. Ji, M. Sharifi, R. Li, Z. Xu, J. Liu, Z. Wang, J. Ju, X. Lu, Y. Jiang, Y. Leng, X. Liang, V. P. Kandidov, S. L. Chin «Can We Reach Very High Intensity in Air with Femtosecond PW Laser Pulses?», *Las. Phys.* **19** (8), 1776 (2009);
11. S. A. Hosseini, Q. Luo, B. Ferland, W. Liu, S. L. Chin, O. G. Kosareva, N. A. Panov, N. Akozbek, V. P. Kandidov «Competition of multiple filaments during the propagation of intense femtosecond laser pulses», *Phys. Rev. A* **70**, 033802 (2004).