

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

На правах рукописи

Сунчугашева Елена Сергеевна

**ФИЛАМЕНТАЦИЯ ФЕМТОСЕКУНДНОГО ЛАЗЕРНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ
ПРИ ЖЕСТКОЙ ФОКУСИРОВКЕ В ВОЗДУХЕ**

01.04.21 - Лазерная физика

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
кандидата физико-математических наук

Москва – 2016

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

Официальные оппоненты:

Желтиков Алексей Михайлович

доктор физико-математических наук, профессор
международного учебно-научного лазерного центра
(МГУ им. М.В. Ломоносова, г. Москва)

Компанец Виктор Олегович

кандидат физико-математических наук
старший научный сотрудник (ИСАН, г. Троицк)

Ведущая организация: Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт общей физики им. А.М. Прохорова Российской академии наук (ИОФАН, г. Москва)

Защита диссертации состоится «__» ____ 2016 года в __:__ часов на заседании диссертационного совета Д 002.023.03 при ФИАН, расположенном по адресу: 119991, г. Москва, Ленинский пр-т, 53.

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

Отзывы и замечания по автореферату в двух экземплярах, заверенные печатью, просьба направлять по вышеуказанному адресу.

Автореферат разослан «__» __ 2016 г.

Учёный секретарь

диссертационного совета Д 002.023.03

доктор физико-математических наук

Казарян М.А.

I. ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы.

Работа посвящена исследованию распространения в условиях жесткой фокусировки мощного лазерного излучения в прозрачной среде, которое сопровождается филаментацией лазерного излучения – пространственно-временной локализацией энергии излучения и образованием плазменных каналов. Филаментация коллимированного и слабосфокусированного излучения исследовалась теоретически, экспериментально и численно многими научными группами [1] [2] [3]. При этом основное внимание уделялось протяженным филаментам, распространяющимся на десятки и более метров. В данной диссертации предметом исследования являются менее протяженные мини-филаменты, которые формируются при распространении жесткофокусированного излучения. Жесткой геометрической фокусировкой в данной диссертационной работе называется фокусировка пучка оптическим элементом на расстоянии много меньшем (как минимум на порядок), чем расстояние до коллапса пучка при самофокусировке коллимированного излучения. Исследования жесткофокусированного излучения в воздухе начали проводиться сравнительно недавно. В этих работах авторы не пришли к единому мнению о том, что происходит при филаментации сфокусированного излучения. Более того, в работе [4] утверждалось, что при жесткой фокусировке филаментации не происходит, а образуется только плотная плазма в фокальной области. Явление филаментации лазерного излучения в условиях жесткой фокусировки, а также недостаточность информации о происходящих при этом физических процессах, привлекли научный интерес нашей экспериментальной группы.

Понимание процессов, характерных для филаментации сфокусированного излучения, а также определение параметров излучения и образованных

плазменных каналов может иметь прикладное применение. Например, для поверхностного микро- и наноструктурирования нужна большая плотность энергии излучения, которая достигается при жесткой фокусировке излучения. При этом необходимо знать не только уровень интенсивности и размеры области концентрации энергии, но и понимать, образуется ли плазма до поверхности образца, чтобы подбирать необходимый режим воздействия излучения. Кроме того, сведения о параметрах образованных при филаментации плазменных каналов могут быть полезны в задаче коммутации высоковольтных электрических разрядов.

Цели и задачи диссертационной работы

Целью диссертационной работы являлось экспериментальное исследование распространения в воздухе фемтосекундного излучения и образующихся в процессе филаментации плазменных каналов при жесткой фокусировке лазерного излучения.

Поставлены и решены следующие конкретные задачи:

1. Исследование влияния числовой апертуры фокусировки лазерного излучения на его интенсивность и параметры плазменных каналов, образующихся при филаментации.
2. Определение спектрально-угловых характеристик генерации конической эмиссии и третьей гармоники фундаментального ИК излучения.
3. Проведение сравнительного анализа процесса филаментации импульсов в ультрафиолетовом (УФ, 248 нм) и инфракрасном (ИК, 744 нм) спектральных диапазонах.
4. Исследование влияния модуляций волнового фронта различных типов на самофокусировку и образование плазменных каналов.

Научная новизна работы

1. Экспериментально обнаружено, что при увеличении жесткости фокусировки фемтосекундного лазерного излучения выше значений числовой апертуры $2-4 \times 10^{-2}$ в процессе филаментации происходит стабилизация как интенсивности излучения, так и электронной плотности и поперечного размера плазменного канала.
2. Для широкого набора числовых апертур фокусирующих оптических систем определены значения электронной концентрации и геометрические параметры плазменных каналов, образующихся при филаментации фемтосекундных лазерных импульсов.
3. Экспериментально зарегистрировано распространение третьей гармоники, полученной при филаментации лазерного излучения, в угол, не превосходящий геометрическую расходимость пучка.
4. Экспериментально обнаружен и исследован факт влияния апертурных диафрагм разного профиля, внесенных в область распространения пучка, на протяженность образованного при филаментации плазменного канала.
5. Установлено, что сферические aberrации и астигматизм пучка приводят к удлинению плазменного канала при филаментации лазерных импульсов УФ и ИК оптических диапазонах.
6. Экспериментально исследована динамическая модуляция волнового фронта фемтосекундного лазерного импульса излучения путем внесения прозрачного твердого диэлектрика в оптический путь системы.

Практическая ценность работы

Полученные результаты и установленные закономерности могут быть использованы для решения следующих задач:

1. Эффективная передача мощности излучения на заданное расстояние.

2. Лазерная обработка материалов фемтосекундными импульсами большой интенсивности.
3. Формирование излучения ультракороткой длительности в ультрафиолетовом диапазоне в малом объеме среды при филаментации сфокусированного фемтосекундного лазерного излучения в инфракрасном диапазоне.
4. Управление протяженностью образованных при филаментации лазерного излучения плазменных каналов для задач коммутации высоковольтных разрядов.

Защищаемые положения

1. Увеличение числовой апертуры оптической системы выше значений $2-4 \times 10^{-2}$ приводит к стабилизации значения интенсивности ИК фемтосекундных лазерных импульсов, а также электронной плотности и поперечного размера плазменного канала, образованного при филаментации излучения.
2. Генерация третьей гармоники при филаментации сфокусированного лазерного излучения происходит с расходимостью, существенно меньшей угловой расходимости конической эмиссии и не превышает геометрическую расходимость основного излучения после фокусировки (NA). При этом, в отличие от коллимированного излучения, на оптической оси не наблюдается распространение суперконтинуума.
3. Амплитудная или фазовая модуляция пространственного профиля фемтосекундного лазерного импульса приводит к увеличению длины плазменного канала, образующегося при филаментации. Такое поведение характерно как для ИК, так и для УФ излучения.
4. Динамическая модуляция волнового фронта фемтосекундного импульса излучения путем внесения в лазерный пучок плоскопараллельной прозрачной пластинки приводит к удлинению плазменного канала. При

этом смещение положения начала филаментации в направлении, противоположном распространению излучения, происходит ввиду динамического нелинейного набега фазы в оптически более плотной среде (динамическая керровская линза), а положение окончания плазменного канала остается неизменным.

Апробация результатов работы

Вошедшие в диссертационную работу положения и результаты были опубликованы в 11 научных статьях в журналах: Журнал экспериментальной и теоретической физики, Laser Physics, Оптика атмосферы и океана, Квантовая электроника, Journal of the Optical Society of America B, Laser Physics Letters. Полный перечень статей представлен на стр. 22. Полученные результаты были представлены автором лично на международных и всероссийских научных конференциях, список которых приведен на стр. 23, а также на научных семинарах Отделения квантовой радиофизики ФИАН. Циклы работ отмечались наградами на следующих научных конкурсах: Премия молодежного конкурса им. академика Н.Г. Басова Учебно-научного комплекса ФИАН (2013 г.), Премия молодёжного конкурса научных работ по оптике и лазерной физике Отделения квантовой радиофизики ФИАН (2013 г), Премия Физического института им. П. Н. Лебедева РАН в составе научного коллектива: В. Д. Зворыкин, А. А. Ионин, С. И. Кудряшов, А. О. Левченко, Л. В. Селезнев, Д. В. Сеницын, И. В. Сметанин, Е. С. Сунчугашева, Н. Н. Устиновский, А. В. Шутов (2013 г.), Именная стипендия Президента Российской Федерации (2014 г.), Стипендия Президента Российской Федерации молодым ученым и аспирантам (2015-2017 гг.), Премия им. Н. Г. Басова молодежного конкурса молодежных научных работ ФИАН совместно с Д.В. Мокроусовой (2015 г.), Премия на конкурсе молодежных научных работ по оптике и лазерной физике совместно с Д.В. Мокроусовой (2015 г.).

Структура и объем работы

Диссертация состоит из введения, четырех глав, заключения, списка публикация автора по теме диссертации и списка цитируемой литературы. Объем работы составляет 121 страницу, включая 62 рисунка. Список цитируемой литературы содержит 134 наименования.

Личный вклад автора

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

II. КРАТКОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во **Введении** обоснована актуальность выбранной темы, определены цели и задачи диссертационной работы, сформулированы научная новизна, показана практическая значимость работы и представлены выносимые на защиту научные положения.

В **Главе 1** «Филаментация лазерных импульсов в прозрачных средах» описаны основные физические процессы, происходящие при филаментации мощного ультракороткого лазерного излучения, а также приведен обзор

экспериментальных и теоретических работ, посвященных исследованию филаментации и сопутствующих ей явлений.

В разделе 1.1 дан краткий обзор истории открытия и экспериментального подтверждения явлений самофокусировки и филаментации, а также даны ссылки на большие обзоры по данной теме.

Раздел 1.2 посвящен основным физическим механизмам, обуславливающим процесс филаментации мощного лазерного излучения при его распространении в прозрачных средах. Приведены некоторые модели, описывающие филаментацию, а также описана физика явления уширения спектра и появления гармоник исходного излучения при его филаментации.

В разделе 1.3 представлен литературный обзор экспериментальных, теоретических и численных исследований в научных статьях, непосредственно относящихся к теме работы автора.

В разделе 1.4 приведены выводы о состоянии исследования филаментации на настоящее время.

В **Главе 2** «Экспериментальная установка» описаны принципы действия основных приборов, используемых для создания мощного лазерного излучения в целях исследования его распространения в прозрачных средах.

Раздел 2.1 посвящен описанию источника фемтосекундных лазерных импульсов – титан-сапфировой системе, преобразователя частоты излучения для получения лазерного излучения в УФ диапазоне.

В разделе 2.2 приведены характеристики измерительных приборов и схема регистрации линейной плотности плазмы электрической системой, которая использовалась во многих экспериментах.

В Главе 3 «Филаментация фемтосекундных импульсов при жесткой фокусировке» представлены результаты исследования филаментации мощного ультракороткого лазерного излучения различных длин волн в воздухе при жесткой фокусировке. Полученные результаты можно применять для эффективной передачи мощности излучения на заранее заданное расстояние, определения интенсивности импульсов для лазерной обработки материалов, формирования излучения ультракороткой длительности в ультрафиолетовом диапазоне в малом объеме среды при филаментации сфокусированного фемтосекундного лазерного излучения в инфракрасном диапазоне. Основные результаты главы опубликованы в работах [1] – [5], [10], [11] из списка публикаций автора.

В разделе 3.1 интенсивность фемтосекундного излучения УФ и ИК диапазонов при жесткой фокусировке при разных давлениях определялась методом, аналогичным методу клина. При этом из зависимости площади ожога на фотобумаге на одинаковом уровне почернения от варьируемой энергии восстанавливалось поперечное распределение плотности энергии импульса и оценивалось среднее значение интенсивности. На Рис. 1 показано, что при увеличении числовой апертуры фокусирующей системы интенсивность импульсов росла при распространении излучения как в линейном режиме, так и в нелинейном.

Однако при значении числовой апертуры 0,02 и более интенсивность практически не изменялась. В экспериментах интенсивность УФ излучения достигала значения $I_{\max} = 1,5 \times 10^{13} \text{ Вт/см}^2$ для $NA = 0,06$, а максимум интенсивности ИК излучения составлял $I_{\max} = 1,6 \times 10^{14} \text{ Вт/см}^2$ для $NA = 0,03$.

Раздел 3.2 был посвящен определению параметров плазменных каналов при филаментации жесткофокусированного. Определены зависимости геометрических размеров и значение электронной плотности плазменных каналов от фокусировки излучения (величины числовой апертуры).

Геометрические параметры определялись при непосредственном их наблюдении в микроскоп, зависимости радиуса и длины плазменного канала от жесткости фокусировки приведены на Рис. 2.

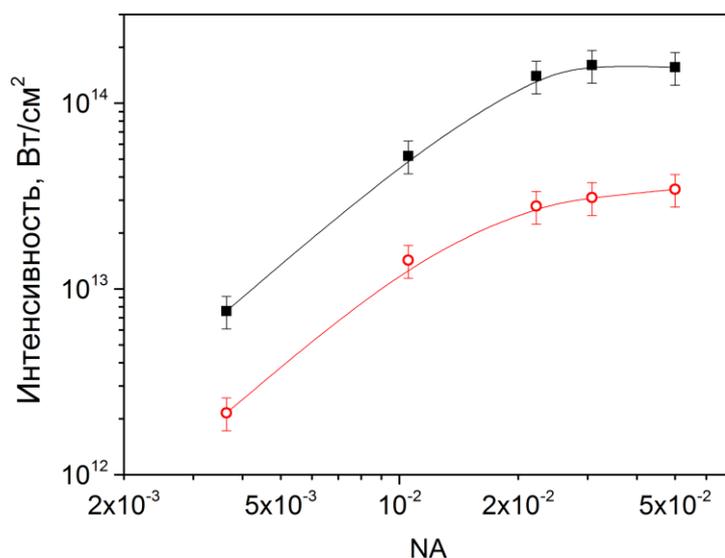


Рис. 1. Зависимость интенсивности лазерного излучения от числовой апертуры фокусируемого пучка при мощности 3 ГВт (1) и 0,3 ГВт (2)

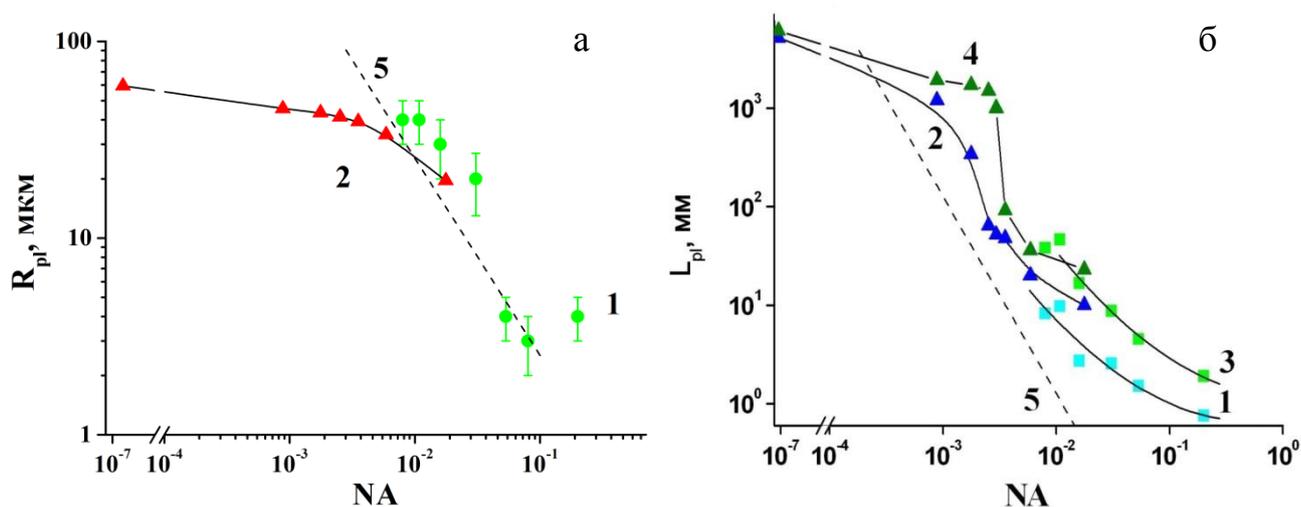


Рис. 2. Экспериментальная (1, 3) и расчетная (2, 4) зависимости а) среднего радиуса плазменного канала и б) средней длины плазменного канала от числовой апертуры фокусируемого пучка, (5) – а) радиус и б) длина фокальной перетяжки пучка

Слабосфокусированное и коллимированное ИК излучение формировали канал радиусом 40÷60 мкм. При увеличении числовой апертуры фокусирующей

системы геометрические размеры плазменного канала уменьшались. При жесткой фокусировке лазерного пучка ($NA > 0,03$) уменьшение поперечного размера плазменного канала прекращалось на уровне $R_{pl} \approx 2 \div 4$ мкм. К незначительному уменьшению длины канала приводило уменьшение параметра числовой апертуры при умеренной фокусировке излучения ($NA < 10^{-3}$). Увеличение жесткости фокусировки приводило к более сильному уменьшению длины плазменного канала, а при $NA < 5 \times 10^{-4}$ длина канала становилась меньше протяженности линейной перетяжки пучка. При жесткой фокусировке ($NA = 0,09$) длина плазменного канала составляла доли миллиметра.

Определение электронной плотности плазмы проводилось двумя методами. В первом коэффициент преломления среды может быть определен по углу рефракции излучения на плазме, который зависит от плотности электронов. Другим методом определения плотности плазмы был предложенный в [5], метод эмиссионной спектроскопии, в котором определялось уширение линий атомарного кислорода. Оба метода показали, что при увеличении числовой апертуры фокусирующей системы происходил рост плотности плазмы вплоть до $3 \times 10^{18} \text{ см}^{-3}$. Полученные экспериментальные данные хорошо согласуются с расчетами.

Таким образом, в разделах 3.1 и 3.2 показано, что при увеличении числовой апертуры фокусирующей системы выше нескольких единиц 10^{-2} происходит стабилизация интенсивности лазерного излучения, а также поперечного размера и электронной плотности плазменного канала. Это может происходить вследствие сильной рефракции излучения на образованном канале с высокой плотностью плазмы.

В разделе 3.3 обсуждалось обогащение спектрального состава излучения ввиду нелинейных процессов, сопровождающих филаментацию лазерного излучения. Уширение спектра ИК излучения происходит ввиду его фазовой самомодуляции при распространении в воздухе, а генерация третьей гармоники

происходит ввиду высокой интенсивности излучения. На Рис. 3 приведены спектрально-угловые характеристики излучения после его филаментации.

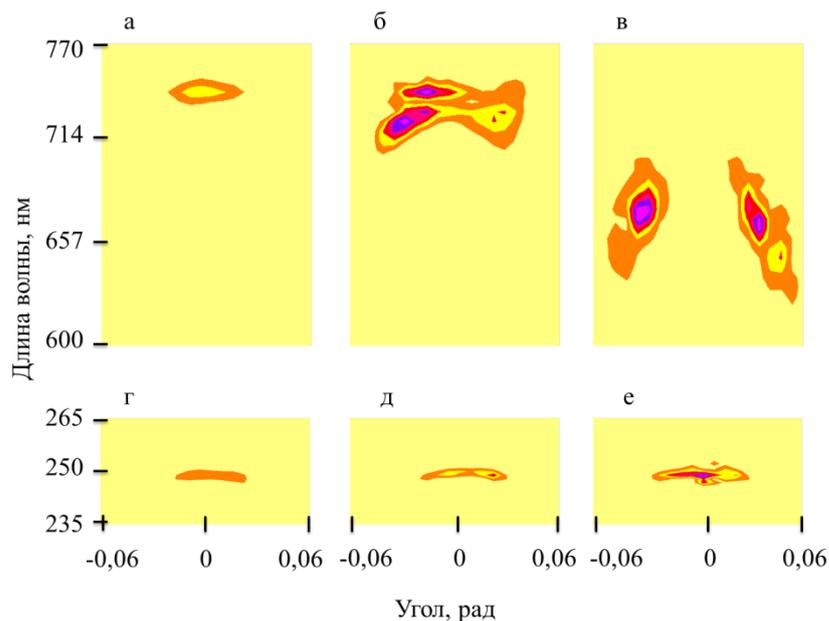


Рис. 3. Угловые спектральные распределения конической эмиссии (а-в) и третьей гармоники (г-е) для различных мощностей УКИ: (а) и (г) – 0,4 ГВт, (б) и (д) – 4,5 ГВт, (в) и (е) – 23 ГВт. На рис. (г) яркость изображения увеличена в 20 раз, спектр (в) получен с фильтром на 744 нм, предотвращающим повреждение матрицы спектрометра.

В эксперименте было получено, что даже при докритической мощности фундаментального излучения (1 ГВт) при жесткой фокусировке наблюдалась генерация третьей гармоники. Ширина спектра составляла около 3 нм, причем увеличение энергии до 70 ГВт не приводило к ее увеличению. Отмечено, что угловая расходимость третьей гармоники существенно меньше угловой расходимости конической эмиссии. В экспериментах угловая расходимость третьей гармоники соответствовала геометрической расходимости лазерного пучка после фокусировки ($NA = 0.03$) и составляла ≈ 30 мрад. При этом коническая эмиссия всегда распространялась в углах более 30 мрад. Наблюдалось отсутствие генерации суперконтинуума на оси излучения, что не характерно для коллимированного излучения. Рост мощности излучения приводил к увеличению энергии генерируемой при филаментации третьей

гармоники. Максимум эффективности преобразования энергии основной частоты в третью гармонику достигал $\sim 1,55 \times 10^{-3}$ при числовой апертуре $NA = 0,06$ и мощности излучения 4,5 ГВт.

Раздел 3.4 посвящен исследованию филаментации излучения УФ и ИК диапазонов. Проведено сравнение параметров плазменного канала, образованного излучением в ИК и УФ диапазонах. Распределение линейной плотности плазмы было получено с помощью электрической системы. Экспериментально исследован факт прохождения плазменных каналов за линейный фокус для обоих диапазонов. При этом УФ излучение создает плазменный канал, который плавно протягивается за геометрический фокус пучка, а в случае ИК импульса происходит рефокусировка излучения.

В разделе 3.5 сформулированы основные выводы по третьей главе.

Глава 4 «Филаментация амплитудно- и фазовомодулированных лазерных пучков» посвящена исследованию влияния различных модуляций лазерного импульса на режим филаментации. В главе предложен метод управления протяженностью образованных при филаментации фемтосекундных импульсов плазменных каналов с помощью амплитудной модуляции (путем внесения апертурных диафрагм в область распространения пучка) и фазовой модуляции (внесение aberrаций в профиль пучка, а так же динамического искажения его фазы) волнового фронта пучка. Основные результаты главы опубликованы в работах [6]-[9] из списка публикаций автора.

В разделе 4.1 исследовалась амплитудная модуляция поперечного профиля излучения. Для этого в область распространения пучка вносились апертурные диафрагмы различного профиля: кругового, треугольного, сегментированного (состоящего из четырех отверстий в углах квадрата) и гауссова, исходного профилей. Плазменные каналы, образующиеся при филаментации фемтосекундных импульсов, детектировались с помощью ПЗС-камеры. Она

позволяла получать изображение сбоку люминесценции плазменных каналов и изображение поперечного сечений пучка вдоль оси распространения излучения. Также для определения линейной плотности образованной плазмы использовалась электрическая система детектирования. Распределения пиковой плотности энергии вдоль оси распространения излучения для различных апертур приведены на Рис. 4.

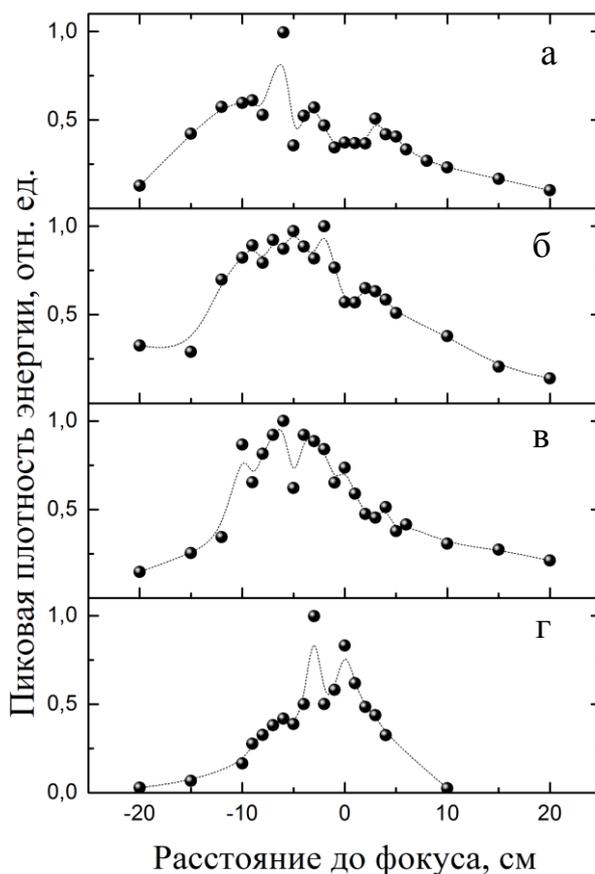


Рис. 4. Экспериментально полученные распределения пиковой плотности энергии импульса для различных диафрагм: а) круглая, б) треугольная, в) сегментированная, г) гауссов профиль без диафрагмы. Данные для наглядности аппроксимированы сплайном.

Экспериментально получено, что при наложении апертурных диафрагм наибольшей длиной плазменного канала обладают пучки треугольного и кругового профиля интенсивности, однако, наиболее протяженным до фокуса является плазменный канал, образованный сегментированным пучком. Пучок с гауссовым профилем начинает филаментировать ближе к фокусу, чем пучки с

круговым и треугольным профилями, несмотря на несколько большую энергию в импульсе исходного профиля.

Раздел 4.2 посвящен изучению влияния различных фазовых модуляций поперечного профиля плазменного канала.

В подразделе 4.2.1 было исследовано влияние сферической aberrации, внесенной в волновой фронт импульса деформируемым зеркалом. Изменения распределения плотности плазменных каналов также детектировались с помощью ПЗС-камеры, помещенной сбоку от плазменного канала или внесенной в область распространения излучения для определения поперечного размера пучка. Экспериментально показано, что такая модуляция излучения приводит к удлинению плазменного канала при филаментации УФ и ИК лазерных импульсов (Рис. 5). В экспериментах наличие максимальной сферической aberrации приводит к более чем двукратному удлинению канала. При этом, согласно экспериментам и численному моделированию, увеличение протяженности канала сопровождается уменьшением плотности плазмы.

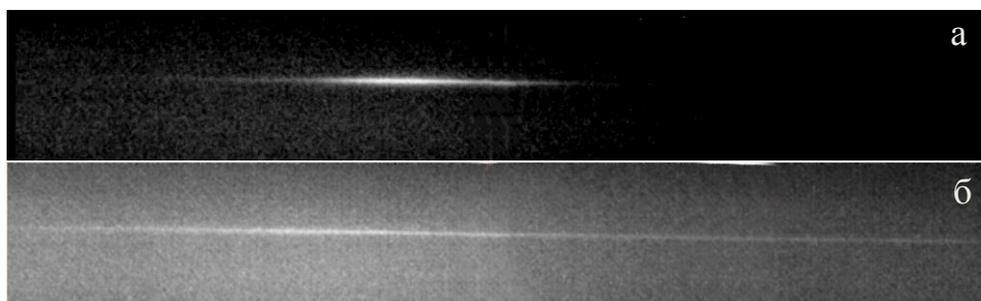


Рис. 5. Профили плазменных каналов вдоль распространения излучения, полученные с помощью съемки филаментов сбоку для различных значений амплитуды aberrации: а) $A_z = 0$ мкм, б) $A_z = 0,18$ мкм. Ширина (по горизонтали) каждого изображения 35 мм.

В подразделе 4.2.2 представлены экспериментальные исследования искажения волнового фронта пучка путем внесения астигматизма с помощью поворота сферического зеркала. Профили распределения плотности плазмы были получены с помощью ПЗС-камеры и электрической системы детектирования. Показано, что распространение излучения в условиях

астигматизма также приводит к увеличению протяженности плазменного канала по сравнению с распространением неискаженного пучка. При жесткой фокусировке при увеличении угла поворота сферического зеркала, то есть степени астигматизма, более 11° однородное распределение плотности плазмы распадается на два максимума, расположенных около меридионального и сагиттального фокусов зеркала. Максимальное полученное удлинение области плазмообразования составляет около двух раз при фокусировке зеркалом $f = 25$ см и угле поворота $\alpha = 45^\circ$. Увеличение фокусного расстояния зеркала приводит к уменьшению влияния степени астигматизма на общую протяженность канала (Рис. 6).

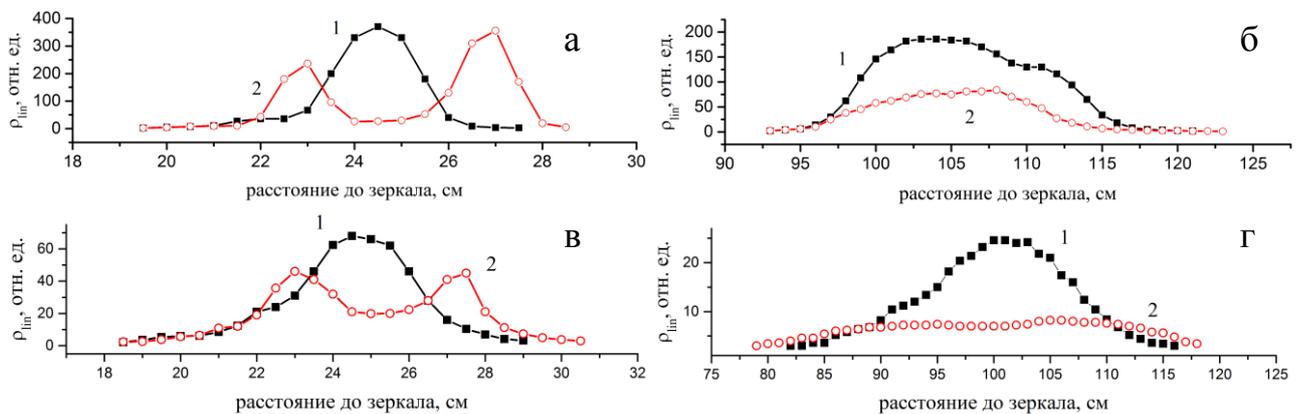


Рис. 6. Экспериментальные значения распределения линейной плотности плазменных каналов вдоль пути распространения ИК (а, б) и УФ (в, г) лазерного импульса для разных параметров фокусировки $f_0 = 25$ см ($NA = 0,012$) (а, в) и 110 см ($NA = 0,003$) (б, г). Энергия в ИК импульсе составляла 1,7 мДж, в УФ импульсе 115 мкДж, а параметр астигматизма $\Delta f/f_0 = 0,017$ (1) и 0,16 (2).

Подраздел 4.2.3 освещает экспериментальное изучение влияния проходной оптики на самофокусировку и плазмообразование при распространении мощного ИК лазерного излучения. Для этого в коллимированный и сфокусированный пучки помещались плоскопараллельные кварцевые пластинки различной толщины. При этом из-за эффекта Керра лазерный импульс приобретает в оптически более плотной среде пластинки нелинейный набег фазы, который меняется не только в сечении пучка, но и во времени. В случае коллимированного излучения расстояние коллапса пучка от лазерной системы

определялось с помощью анализа площади поперечного сечения вдоль распространения импульса. В случае фокусировки изменялась протяженность плазменного канала в зависимости от толщины внесенной пластинки. Это происходило ввиду того, что более интенсивные, центральные временные слои импульса фокусируются ближе к фокусирующему элементу из-за большего нелинейного набега в оптически плотной среде, а менее интенсивные временные слои импульса испытывают более слабую фазовую самомодуляцию и фокусируются на прежнем расстоянии, не зависящем от толщины пластинки. Таким образом, внесение прозрачной пластинки в область распространения пучка нельзя рассматривать как просто дополнительную линзу, поскольку в этом случае происходит динамическая фокусировка излучения (образование динамической керровской линзы). Изменение распределения плотности электронной плазмы детектировалось с помощью электрической системы. Экспериментально получено удлинение плазменного канала до 30% от исходного значения.

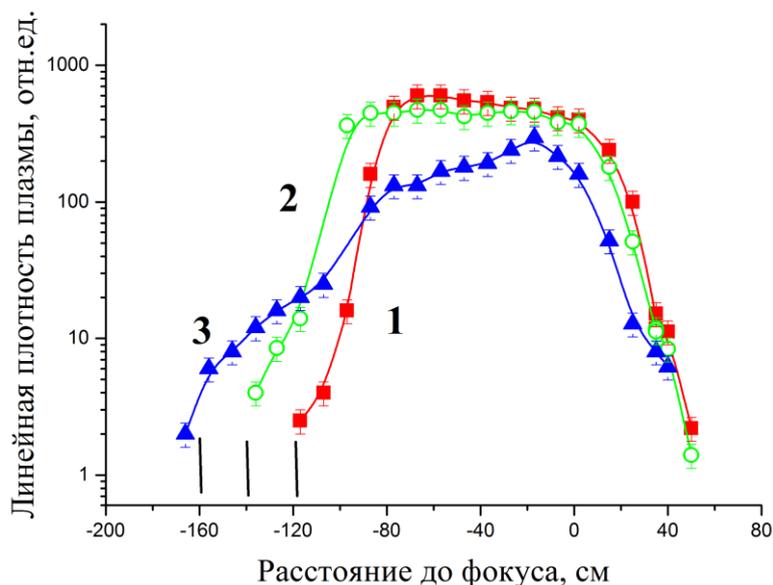


Рис. 7. Экспериментально измеренные зависимости линейной электронной концентрации для различных толщин пластинок: 1) 0 мм, 2) 4,5 мм, 3) 10,5 мм. Вертикальные линии в левом нижнем углу соответствуют положению начала филаментации, регистрируемого с помощью пробной пластинки.

В разделе 4.3 сформулированы основные выводы по четвертой главе.

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ

В **Заключении** диссертационной работы приведены основные результаты экспериментальных исследований филаментации фемтосекундного лазерного излучения при его распространении в воздухе в условиях геометрической фокусировки, включая жесткую фокусировку. В работе определены интенсивность излучения ИК и УФ оптических диапазонов при разных давлениях воздуха, геометрические размеры и электронная плотность образованного при филаментации импульса плазменного канала, исследованы условия рефокусировки лазерного излучения после геометрического фокуса. Получены характерные значения уширения спектра фундаментального излучения, а так же значения эффективности его преобразования в третью гармонику, сопутствующие филаментации. Исследованы методы управления протяженностью области филаментации с помощью модуляций волнового фронта лазерного импульса: амплитудной и фазовой.

Основные научные результаты состоят в следующем:

1. Экспериментально показано, что увеличение числовой апертуры NA фокусирующей оптической системы приводит к увеличению интенсивности ИК лазерного излучения при его распространении как в линейном режиме, так и в режиме самофокусировки и плазмообразования, однако при достижении числовой апертуры $NA = 0,02$ интенсивность излучения значительно не изменяется. Максимальная полученная интенсивность излучения составляет $I = 1,6 \times 10^{14}$ Вт/см² ($NA = 0,03$). Уменьшение давления воздуха на порядок не приводит к значительному увеличению интенсивности. Это свидетельствует о том, что плотность плазмы в воздухе составляет величину не более $2,7 \times 10^{18}$ см⁻³.
2. Экспериментально определены параметры образованного при филаментации плазменного канала. Радиус канала для $NA < 10^{-2}$ составляет 40-50 мкм, для более жесткофокусированного излучения радиус

уменьшается с увеличением числовой апертуры и достигает 2-4 мкм ($NA > 0,05$). При увеличении числовой апертуры оптической системы протяженность плазменных каналов также уменьшается, от нескольких десятков миллиметров ($NA = 10^{-2}$) до долей миллиметра ($NA = 0,2$), а плотность лазерной плазмы увеличивается до $3 \times 10^{18} \text{ см}^{-3}$. Экспериментальные данные хорошо согласуются с имеющимися в литературе результатами моделирования.

3. Показано, что при превышении числовой апертурой значения $2-4 \times 10^{-2}$ происходит стабилизация интенсивности лазерного излучения, поперечного размера и электронной плотности образованного плазменного канала.
4. Экспериментально установлено, что угловая расходимость третьей гармоники, образованной при филаментации излучения, соответствует геометрической расходимости пучка после линзы, в то время как коническая эмиссия распространяется в больший угол. Распространение суперконтинуума на оси излучения не происходит.
5. Проведено сравнение распространения ИК и УФ импульсов с мощностью, в одинаковое количество раз превышающей критическую. При этом происходит образование плазменных каналов с похожими профилями распределения линейной плотности плазмы. Наблюдается факт прохождения плазменных каналов за линейный фокус линзы. Характер прохождения зависит от длины волны излучения: в случае УФ излучения плазменный канал непрерывно протягивается за геометрический фокус пучка, а в случае ИК импульса происходит рефокусировка (резкое уменьшение плотности плазмы в фокальной области, после чего на некотором расстоянии образуется второй максимум плотности).
6. Экспериментально продемонстрировано, что амплитудная модуляция импульса при внесении в область распространения пучка апертурных диафрагм приводит к удлинению плазменного канала, при этом наибольшей

длиной плазменного канала из рассмотренных апертур обладают пучки треугольного и кругового профиля интенсивности.

7. Получено, что увеличение протяженности плазменного канала при филаментации фемтосекундных УФ и ИК лазерных импульсов происходит при внесении фазовой модуляции волнового фронта импульса в виде сферической аберрации. Наблюдалось двукратное удлинение плазменного канала.
8. Продемонстрировано, что увеличение протяженности плазменного канала достигается с помощью фазовой модуляции импульса при распространении пучка в условиях астигматизма. Максимальное полученное удлинение области плазмообразования составляет около двух раз. В обоих ИК и УФ диапазонах излучения при жесткой фокусировке и сильном астигматизме происходит образование двух максимумов в распределении плотности плазмы, тогда как увеличение фокусного расстояния зеркала приводит к уменьшению влияния степени астигматизма на общую протяженность канала.
9. Экспериментально установлено, что увеличение протяженности плазменного канала происходит при увеличении толщины внесенной в область распространения пучка плоскопараллельной кварцевой пластинки. При этом формирование плазменного канала начинается ближе к пластинке ввиду динамической керровской линзы, а окончание плазменного канала определяется геометрической фокусировкой и не зависит от толщины пластинки. Наблюдается удлинение плазменного канала до 30% от исходного значения.

СПИСОК ПУБЛИКАЦИЙ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

Основные результаты диссертации отражены в следующих статьях:

1. Гейнц Ю.Э., Землянов А.А., Ионин А.А., Кудряшов С.И., Селезнев Л.В., Сеницын Д.В., Сунчугашева Е.С., «Особенности филаментации остророфокусированных ультракоротких лазерных импульсов в воздухе», Журнал экспериментальной и теоретической физики, т. 138 (5), с. 822-829, 2010.
2. Ionin A.A., Kudryashov S.I., Seleznev L.V., Sinitsyn D.V., Sunchugasheva E.S., Fedorov V.Y. “Third harmonic generation by ultrashort laser pulses tightly focused in air”, Laser Physics, т. 21 (3), с. 500-504, 2011.
3. Ионин А.А., Гейнц Ю.Э., Землянов А.А., Кудряшов С.И., Селезнев Л.В., Сеницын Д.В., Сунчугашева Е.С. «Особенности фокусированного распространения мощных лазерных импульсов фемтосекундной длительности в воздухе при пониженном давлении», Оптика атмосферы и океана, т. 25 (1), с. 18-25, 2012.
4. Гейнц Ю.Э., Землянов А.А., Ионин А.А., Кудряшов С.И., Селезнев Л.В., Сеницын Д.В., Сунчугашева Е.С. «Нелинейное распространение мощного фокусируемого фемтосекундного лазерного импульса в воздухе при атмосферном и пониженном давлении», Квантовая электроника, т. 42 (4), с. 319-326, 2012.
5. Дергачев А.А., Ионин А.А., Кандидов В.П., Селезнев Л.В., Сеницын Д.В., Сунчугашева Е.С., Шленов С.А. «Филаментация фемтосекундных ИК и УФ импульсов при фокусировке в воздухе», Квантовая электроника, т. 43 (1), с. 29-36, 2013.
6. Ionin A.A., Iroshnikov N.G., Kosareva O., Larichev A., Mokrousova D., Panov N.A., Seleznev L.V., Sinitsyn D.V., Sunchugasheva E.S. “Filamentation of femtosecond laser pulses governed by variable wavefront distortions via a deformable mirror”, Journal of the Optical Society of America B: Optical Physics, т. 30 (8), с. 2257, 2013.

7. Гейнц Ю.Э., Землянов А.А., Изюмов Н.А., Ионин А.А., Кудряшов С.И., Селезнев Л.В., Сеницын Д.В., Сунчугашева Е.С. «Самофокусировка профилированных световых пучков ультракороткого лазерного излучения в воздухе», Журнал экспериментальной и теоретической физики, т. 143 (2), с. 228-237, 2013.
8. Дергачев А.А., Ионин А.А., Кандидов В.П., Д.В. Мокроусова, Селезнев Л.В., Сеницын Д.В., Сунчугашева Е.С., Шленов С.А., Шустикова А.П. «Плазменные каналы при филаментации в воздухе фемтосекундного лазерного излучения с астигматизмом волнового фронта», Квантовая электроника, т. 44 (12), с. 1085-1090, 2014.
9. Dergachev A. A., Ionin A.A., Kandidov V. P., Mokrousova D. V., Seleznev L.V., Sinitsyn D.V., Sunchugasheva E.S., Shlenov S. A., Shustikova A. P. “Effect of nonlinearity in the pass-through optics on femtosecond laser filament in air”, Laser Physics Letters, т. 12 (1), с. 015403, 2015.
10. Ionin A.A., Seleznev L.V. and Sunchugasheva E.S., “Formation of plasma channels in air under filamentation of focused ultrashort laser pulses”, Laser Physics, т. 25, с. 033001, 2015.
11. Гейнц Ю.Э., Землянов А.А., Ионин А.А., Мокроусова Д.В., Селезнев Л.В., Сеницын Д.В., Сунчугашева Е.С. «Сравнительный анализ постфокальной филаментации сфокусированных лазерных импульсов УФ и ИК излучения в воздухе», Квантовая электроника, т. 45 (4), с. 321–329, 2015.

Основные результаты представлены на международных и всероссийских конференциях:

1. IV Всероссийская школа для студентов, аспирантов, молодых ученых и специалистов по лазерной физике и лазерным технологиям (26-29 апреля 2010 г., Саров, Россия)
2. International Conference ICONO/LAT 2010 (August 23-27 2010, Kazan, Russia)

3. XIII школа молодых ученых «Актуальные проблемы физики» и IV школа–семинар «Инновационные аспекты фундаментальных исследований» (14-19 ноября 2010 г., Звенигород – Москва, Россия)
4. 53-я научная конференция МФТИ (24-29 ноября 2010 г., Долгопрудный, Московская обл., Россия)
5. IV Всероссийская школа для студентов, аспирантов, молодых ученых и специалистов по лазерной физике и лазерным технологиям (26-29 апреля 2011 г., Саров, Россия)
6. International Conference "Nonlinear Optics: East-West Reunion" (September 21-23 2011, Suzdal, Russia)
7. ISTC-GSI Young Scientists School “Ultra-High Intensity Light Science and Applications” (October 10-15 2011, Darmstadt, Germany) (при финансовой поддержке Международного научно-технического центра и Института тяжёлых ионов GSI Helmholtzzentrum für Schwerionenforschung GmbH)
8. VII Международная конференция молодых ученых и специалистов «Оптика-2011» (17-21 октября 2011 г., Санкт – Петербург, Россия)
9. 54 научная конференция МФТИ (22-26 ноября 2011 г., Долгопрудный, Московская обл., Россия)
10. 4 Всероссийская молодежная конференция «Инновационные аспекты фундаментальных исследований по актуальным проблемам физики» (14-16 ноября 2011 г., Москва, Россия)
11. XIV школа молодых ученых «Актуальные проблемы физики» (11-15 ноября 2012 г., Звенигород – Москва, Россия)
12. 55 научная конференция МФТИ (19-25 ноября 2012 г., Долгопрудный, Московская обл., Россия)
13. International Conference ICONO/LAT (June 18-22 2013, Moscow, Russia)
14. OPTO Meeting for Young Researchers 2013 & IONS-14 (July 3-6 2013, Torun, Poland)

15. 5 Всероссийская молодежная конференция «Инновационные аспекты фундаментальных исследований по актуальным проблемам физики» (10-15 ноября 2013 г., Москва, Россия)
16. 56 научная конференция МФТИ (25-30 ноября 2013 г., Долгопрудный, Московская обл., Россия)
17. 16th International Conference on Laser Optics 2014 (June 30-July 4 2014, Saint-Petersburg, Russia)
18. XV школа молодых ученых «Актуальные проблемы физики» (16-20 ноября 2014 г., Москва, Россия)
19. 57 научная конференция МФТИ (24–29 ноября 2014 г., Долгопрудный, Московская обл., Россия)

ЦИТИРУЕМАЯ В АВТОРЕФЕРАТЕ ЛИТЕРАТУРА

- [1] Boyd R.W., Lukishova S.G., Shen Y.R., Self-focusing: Past and Present, New York: Springer Science+Business Media, LLC, 2009.
- [2] Couairon A., Mysyrowicz A., «Femtosecond filamentation in transparent media,» *Phys. Rep.*, т. 441, p. 47, 2007.
- [3] Chin S.L., Hosseini S.A., Liu W., Luo Q., Theberge F., Aközбек N., Becker A., Kandidov V.P., Kosareva O.G., Schroeder H., «The propagation of powerful femtosecond laser pulses in optical media: physics, applications, and new challenges,» *Can. J. of Phys.*, т. 83, p. 863, 2005.
- [4] Liu W., Luo Q., Chin .S.L., «Competition between multiphoton or tunnel ionization and filamentation induced by powerful femtosecond laser pulses in air,» *Chin. Opt. Lett.*, т. 1, p. 56, 2003.
- [5] Bernhardt J., Liu W., Theberge F., Xu H.L., Daigle J.F., Chateaufneuf M., Dubois J., Chin S.L., «Spectroscopic analysis of femtosecond laser plasma filament in air,» *Opt. Commun.*, т. 281, № 5, p. 1268–1274, 2008.