

На правах рукописи

Панов Николай Андреевич

**Множественная филаментация
мощных фемтосекундных лазерных импульсов**

Специальность: 01.04.21 – лазерная физика

Автореферат диссертации
на соискание ученой степени кандидата
физико-математических наук

Москва – 2009

Работа выполнена на кафедре общей физики и волновых процессов физического факультета Московского университета имени М.В. Ломоносова

Научный руководитель: доктор физико-математических наук,
профессор Кандидов Валерий Петрович

Официальные оппоненты: доктор технических наук,
профессор Валуев Виктор Васильевич

доктор физико-математических наук
Чекалин Сергей Васильевич

Ведущая организация: Санкт-Петербургский
государственный университет
информационных технологий,
механики и оптики

Защита состоится 19 марта 2009 г. в 16⁰⁰ часов на заседании диссертационного совета Д 501.001.31 в МГУ имени М.В. Ломоносова по адресу: 119991, Москва, ГСП-1, Ленинские горы, МГУ, ул. Академика Хохлова, дом 1, стр. 62, корпус нелинейной оптики, аудитория имени С.А. Ахманова

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке физического факультета Московского университета имени М.В. Ломоносова

Автореферат разослан « ____ » _____ 2009 г.

Ученый секретарь диссертационного совета Д 501.001.31
кандидат физико-математических наук, доцент

Ильинова Т.М.

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы

Явление филаментации мощных фемтосекундных лазерных импульсов состоит в локализации энергии лазерного излучения, которая сохраняется на значительном расстоянии в тонкой нити филамента под действием самофокусировки и нелинейности самонаведенной лазерной плазмы, ограничивающей коллапс пучка. Филамент является тонким и протяженным, его длина (длина области, где интенсивность достаточна для ионизации среды) много больше его дифракционной длины. Например, в воздухе длина филаментов достигает десятков метров, а диаметр — порядка 100 мкм. Филаментация наблюдается в газообразных, жидких и твердых телах.

Распространение фемтосекундных импульсов с пиковой мощностью, превышающей критическую мощность самофокусировки в десять и более раз, приводит к образованию нескольких филаментов, т.е. множественной филаментации. Современные эксперименты по множественной филаментации в атмосфере ведутся с импульсами мощностью 1 — 5 ТВт и более, что превышает критическую мощность самофокусировки в воздухе (~5 ГВт) более чем в 100 раз. В таких условиях множественная филаментация мощных фемтосекундных лазерных импульсов развивается неизбежно и носит стохастический характер, т.е. филаменты образуются и исчезают случайным образом как в продольном, так и в поперечном направлении. К причинам такой нерегулярности явления можно отнести флуктуации амплитуды и фазы электрического поля на выходе лазерной системы, а также флуктуации показателя преломления и поглощения среды (в газах это связано с турбулентными флуктуациями показателя преломления, аэрозолем, в твердых телах — с различными дефектами, примесями и т.д.).

Таким образом, стохастическая множественная филаментация мощных фемтосекундных импульсов является скорее ординарным, чем необычным явлением. В то же время, на момент начала работ по теме диссертации (2002 г.) теоретического изучения образования и развития множества филаментов, генерации суперконтинуума от них и т.д. проведено практически не было, хотя в экспериментах множественная филаментация наблюдалась еще с середины 90-х гг.

Явление филаментации является чрезвычайно интересным с прикладной точки зрения. Это связано с возможностью удаленного широкополосного зондирования окружающей среды излучением филаментов, транспортировки электромагнитного излучения различных частотных диапазонов (от постоянного тока до СВЧ волн, включая

удаленное управление атмосферным электричеством) по плазменным каналам филаментов, создания модификаций в твердых прозрачных диэлектриках и т.д.

В силу этого представляется важной задача управления множественной филаментацией мощных фемтосекундных лазерных импульсов в целях увеличения энергии излучения суперконтинуума, сигнала флуоресценции при зондировании, концентрации электронов в плазменных каналах филаментов, а также образования филаментов в заданных положениях как в продольном, так и в поперечном направлениях.

Цели и задачи диссертационной работы

Цель настоящей работы состоит в исследовании физических процессов, определяющих формирование и эволюцию множества филаментов, плазменных каналов и генерацию суперконтинуума, а также в анализе возможности управления множественной филаментацией.

Для этого будут исследованы следующие проблемы:

- взаимодействие филаментов и модельный сценарий их эволюции;
- пространственные распределения суперконтинуума при множественной филаментации в длинноволновой и коротковолновой частях спектра;
- управление множественной филаментацией методом масштабирования лазерного пучка;
- образование пучка филаментов на определенном расстоянии при совместном действии отрицательной фазовой модуляции и масштабировании пучка;
- применение периодического линзового массива как средства создания упорядоченного пучка филаментов в условиях турбулентной атмосферы.

Научная новизна работы

1. Предложен сценарий множественной филаментации мощных фемтосекундных лазерных импульсов, состоящий из следующих этапов: независимое развитие «родительских» филаментов из начальных возмущений на профиле импульса; возникновение возмущений при интерференции колец, расходящихся вокруг филаментов; зарождение из них «дочерних» филаментов; «конкуренция» филаментов; «выживание» одного или нескольких филаментов в результате «конкуренции».
2. Показано, что множественная филаментация мощных фемтосекундных лазерных импульсов является нестабильной — небольшие различия в распределении

интенсивности на входе в нелинейную среду приводят к качественным отличиям в формировании множества филаментов.

3. Установлено, что поперечное распределение плотности энергии излучения суперконтинуума, сопровождающего множественную филаментацию мощных фемтосекундных лазерных импульсов, в длинноволновой области генерируется на осях филаментов, а в коротковолновой — представляет собой интерференционную картину колец конической эмиссии, расходящихся вокруг каждого из филаментов.
4. Показана возможность управления множественной филаментацией мощных фемтосекундных лазерных импульсов с помощью масштабирования пучка на выходе лазерной системы, совместного введения фазовой модуляции импульса и масштабирования пучка, а также использования линзового массива, через который распространяется импульс.

Практическая ценность работы

1. Показана возможность увеличения сигнала флуоресценции молекулярного и однократно ионизированного азота при множественной филаментации мощных фемтосекундных лазерных импульсов посредством уменьшения диаметра пучка на выходе лазерной системы.
2. Установлено, что совместное действие уменьшения размеров пучка на выходе лазерной системы и отрицательной фазовой модуляции фемтосекундного импульса приводит к росту сигнала флуоресценции и увеличению расстояния образования филаментов от выхода лазерной системы.
3. Предложен метод пространственного (как поперечного, так и продольного) упорядочивания (регуляризации) пучка филаментов при использовании линзового массива на выходе лазерной системы. Установлен критерий удовлетворительного качества регуляризации при филаментации мощного фемтосекундного лазерного импульса в случайно неоднородной среде.

Полученные результаты могут найти применение при разработке фемтосекундных лидаров для удаленного экологического зондирования, систем транспортировки лазерной энергии и систем передачи электромагнитных волн различных частотных диапазонов по плазменным каналам филаментов.

Защищаемые положения

1. При множественной филаментации мощных фемтосекундных лазерных импульсов образуются «родительские» филаменты из начальных возмущений в поперечном распределении интенсивности, затем зарождаются «дочерние» на возмущениях, возникающих при интерференции полей, расходящихся в результате дефокусировки в лазерной плазме, далее происходит «конкуренция» филаментов, которая проявляется в перекачке энергии между ними, и в результате нее «выживает» один филамент.
2. Множественная филаментация является пространственно нестабильной вследствие сильной чувствительности взаимного расположения «дочерних» филаментов к геометрии начальных возмущений интенсивности в плоскости поперечного сечения импульса. Нестабильность множественной филаментации является причиной флуктуаций сигнала флуоресценции при дистанционном зондировании.
3. В условиях множественной филаментации пространственное распределение излучения суперконтинуума в длинноволновой части спектра представляет собой совокупность пиков с центрами на осях филаментов, в коротковолновой — результат интерференции колец конической эмиссии, которые расходятся вокруг каждого из них.
4. При уменьшении поперечных размеров импульса, пиковая мощность которого в десятки и более раз превосходит критическую мощность самофокусировки, энергия, локализованная в области флуоресценции, возрастает, что позволяет увеличить и стабилизировать сигнал флуоресценции при фемтосекундном зондировании. Одновременное изменение фазовой модуляции импульса и его поперечного размера позволяет управлять расстоянием до образования плотного пучка филаментов и плазменных каналов.
5. Регуляризация пространственного положения множества филаментов с помощью линзового массива позволяет подавить влияние атмосферной турбулентности и сформировать упорядоченный их массив.

Апробация результатов работы

Основные результаты работы опубликованы в 10 научных статьях в журналах «Квантовая электроника», «Оптика атмосферы и океана», «Оптический журнал», «Physical Review A», «Applied Physics B», «New Journal of Physics», «Proceedings of SPIE»

и докладывались на конференциях: Международная конференция студентов, аспирантов и молодых ученых по фундаментальным наукам “Ломоносов” (Москва, Россия, 2003); Международная конференция молодых ученых и специалистов «Оптика», (Санкт-Петербург, Россия, 2003, 2005); Международная конференция «Фундаментальные проблемы оптики», (Санкт-Петербург, Россия, 2004, 2006); International Conference on Coherent and Nonlinear Optics / International Conference on Lasers, Applications, and Technologies (Санкт-Петербург, Россия, 2005, Минск, Белоруссия, 2007); SPIE International Symposium Photonics West (San-Jose, USA, 2005); International Conference “High Power Laser Beams” (Нижний Новгород, Россия, 2006); Русско-французский симпозиум для молодых ученых по лазерной физике (Houches, France, 2006); семинар кафедры общей физики и волновых процессов физического факультета и МЛЦ МГУ им. М.В. Ломоносова (2006, 2008).

Структура и объем работы

Диссертация состоит из шести глав, включая Введение, и списка цитируемой литературы. Объем работы составляет 136 страниц, включая 44 рисунка. Список цитируемой литературы содержит 113 наименований.

Личный вклад автора

Все использованные в диссертации результаты получены автором лично или при определяющем его участии. Автором опубликовано 15 статей в научных журналах, из них 10 по теме диссертации, 7 из которых опубликованы в журналах из списка ВАК России.

СОДЕРЖАНИЕ ДИССЕРТАЦИИ

В **Главе 1** представлен обзор экспериментальных и теоретических работ, посвященных филаментации мощных фемтосекундных лазерных импульсов.

В **параграфе 1.1** показана неизбежность стохастической множественной филаментации мощных фемтосекундных лазерных импульсов. Обоснована новизна и актуальность темы диссертации.

В **параграфе 1.2** изложен детальный обзор экспериментальных исследований филаментации фемтосекундных импульсов в газах и конденсированных средах, а также сопровождающих ее явлений. Представлены результаты основных экспериментов,

посвященных множественной филаментации и методам управления ею.

В **параграфе 1.3** изложены проблемы четырехмерного ($3D + t$) моделирования множественной филаментации, связанные с огромными объемами оперативной памяти для хранения массивов значений электрического поля на расчетной сетке. Получены оценки объемов массивов, минимально необходимых для удовлетворительного качества моделирования. Дан обзор методов редукции четырехмерной задачи моделирования множественной филаментации мощных фемтосекундных лазерных импульсов к трехмерной.

В **параграфе 1.4** определены цели и задачи работы.

В **параграфе 1.5** представлены публикации автора по теме диссертационной работы.

В **параграфе 1.6** сформулированы защищаемые положения.

В **Главе 2** обоснована и изложена математическая модель распространения мощного фемтосекундного лазерного импульса в объеме прозрачного диэлектрика. Последовательно проанализированы линейные и нелинейные эффекты, определяющие развитие и взаимодействие множества филаментов. Изложена методика численного интегрирования модели.

В **параграфе 2.1** представлено описание керровской нелинейности сплошной среды. Показано, что для фемтосекундных импульсов, распространяющихся в воздухе, к основным ее механизмам относятся ангармонизм электронного отклика и вынужденное комбинационное рассеяние на вращательных переходах молекул воздуха.

В **параграфе 2.2** описано влияние фотоионизации в газах и перехода электрона из валентной зоны в зону проводимости в конденсированных средах на распространение импульса, определяющее его дефокусировку и поглощение энергии излучения. Рассмотрены два механизма нелинейной фотоионизации — полевой (многофотонный и туннельный) и лавинный. Для описания нелинейной полевой ионизации использована модель Переломова-Попова-Теренььева с учетом экспериментальных данных по эффективному заряду атомного остова. Показано, что в газовых средах при описании явления филаментации можно пренебречь лавинным механизмом ионизации. Представлены кинетические уравнения для концентрации свободных электронов в газе и электронов в зоне проводимости в конденсированной среде.

В **параграфе 2.3** дано описание дисперсии импульсов и дифракции пучков в прозрачных средах.

В **параграфе 2.4** сформулирована математическая модель распространения мощного фемтосекундного лазерного импульса в объеме прозрачной среды. Нелинейное параболическое уравнение для медленно меняющейся амплитуды электрического поля

$E(x, y, z, t)$ имеет вид

$$2ik \left(\frac{\partial}{\partial z} + \frac{1}{v_g} \frac{\partial}{\partial t} \right) E = \Delta_{\perp} E - kk'' \frac{\partial^2 E}{\partial t^2} + \frac{2k^2}{n_0} \Delta n E - ik\alpha E. \quad (1)$$

В уравнении (1) k — волновое число, соответствующее центральной длине волны излучения, k'' — коэффициент дисперсии второго порядка, n_0 — невозмущенный показатель преломления на центральной длине волны. Величина Δn определяет добавку к показателю преломления, обусловленную влиянием керровской и плазменной нелинейностей, α — нелинейное поглощение, связанное с полевой ионизацией среды. Поперечный лапласиан в уравнении (1) записывается в виде

$$\Delta_{\perp} = \frac{\partial^2}{\partial x^2} + \frac{\partial^2}{\partial y^2}, \quad (2)$$

что позволяет описывать множественную филаментацию.

В **параграфе 2.5** представлена методика численного интегрирования уравнения (1), основанная на методе разделения по физическим факторам. Сетка в пространственной области (x, y) является неоднородной, ее шаг экспоненциально возрастает к краям, начиная с некоторого радиуса, внутри которого шаг постоянен. Такая расчетная сетка позволяет, с одной стороны, с хорошим разрешением (около 1 мкм) описать центральную область пучка, а с другой, сократить объемы используемых массивов более чем на порядок.

В **Главе 3** излагаются фундаментальные свойства множественной филаментации мощных фемтосекундных лазерных импульсов, качественно отличающие ее от случая образования одного филамента. Исследование распространения фемтосекундного импульса с начальными возмущениями на поперечном профиле импульса позволило сформулировать сценарий множественной филаментации, показать ее нестабильность, установить закономерности пространственных распределений излучения суперконтинуума многих филаментов на различных длинах волн.

В **параграфе 3.1** описан эксперимент (группа проф. С.Л. Чина, университет Лаваль, Квебек, Канада) по инициированной филаментами флуоресценции молекулярного N_2 и однократно ионизированного N_2^+ азота. В этом эксперименте установлена нестабильность сигнала флуоресценции от «выстрела к выстрелу», которая не связана с флуктуацией энергии на выходе лазерной системы. Поскольку в эксперименте наблюдалось образование нескольких филаментов, была высказана гипотеза, что ее природа определяется нестабильностью самого явления множественной филаментации.

В **параграфе 3.2** на основе моделирования распространения импульса в воде

сформулирован сценарий множественной филаментации мощных фемтосекундных лазерных импульсов, состоящий из следующих стадий: (1) независимое развитие начальных возмущений на пространственном профиле пучка в «родительские» филаменты, образующие кольцевые структуры, расходящиеся вокруг них; (2) интерференция колец и возникновение возмущений на поперечном распределении интенсивности в результате этой интерференции; (3) появление «дочерних» филаментов из образовавшихся возмущений; (4) «конкуренция» филаментов, проявляющаяся в перекачке энергии от одного филамента к другому; (5) «выживание» одного (или нескольких) филаментов в результате конкуренции. На рис. 1 представлена картина последовательного развития нескольких филаментов, в соответствии со стадиями этого сценария.

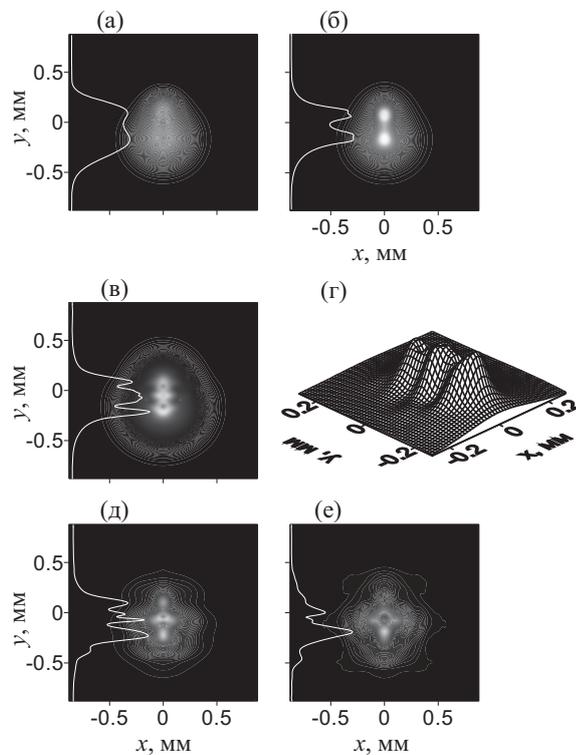


Рис. 1. Поперечные распределения плотности энергии на различных расстояниях z : (а) — $z = 0$ (начальное распределение), (б) — $z = 7.5$ см независимое развитие двух «родительских» филаментов, (в, г) — $z = 11.2$ см рождение «дочернего» филамента, как результат взаимодействия кольцевых структур «родительских» филаментов, (д) — $z = 16.9$ см начало «умирания» верхнего филамента, (е) — $z = 20.6$ см «гибель» верхнего филамента. Пиковая мощность превышает критическую мощность самофокусировки в 8 раз, длительность импульса 27 фс

В параграфе 3.3 установлена пространственная нестабильность множественной филаментации, которая состоит в следующем: небольшое стохастическое изменение положения начальных возмущений, и, как следствие, «родительских» филаментов качественно меняет процесс образования «дочерних» филаментов. В результате

множественная филаментация мощных фемтосекундных лазерных импульсов носит стохастический характер. Этим удалось объяснить результаты эксперимента, представленного в параграфе 3.1, поскольку от «выстрела к выстрелу» образуется различное число возбужденных молекул азота при различном пространственном расположении филаментов, и сигнал флуоресценции становится стохастическим.

В параграфе 3.4 показано, что нестабильность множественной филаментации приводит к существенной флуктуации интегральной по сечению (линейной) плотности самонаведенной лазерной плазмы.

В параграфе 3.5 установлено, что в фемтосекундном лазерном импульсе, не обладающем аксиальной симметрией в плоскости поперечного сечения, при образовании одного филамента излучение суперконтинуума восстанавливает осевую симметрию и в длинноволновой, и коротковолновой спектральных областях. На основной длине волны остаются отклонения от аксиальной симметрии в распределении спектральной интенсивности.

В параграфе 3.6 показано, что при множественной филаментации в коротковолновой части спектра излучение суперконтинуума распространяется как на осях филаментов, так и в форме интерференции полей конической эмиссии, расходится вокруг каждого из филаментов (рис. 2а). В длинноволновой области оно локализовано на осях филаментов (рис. 2б).

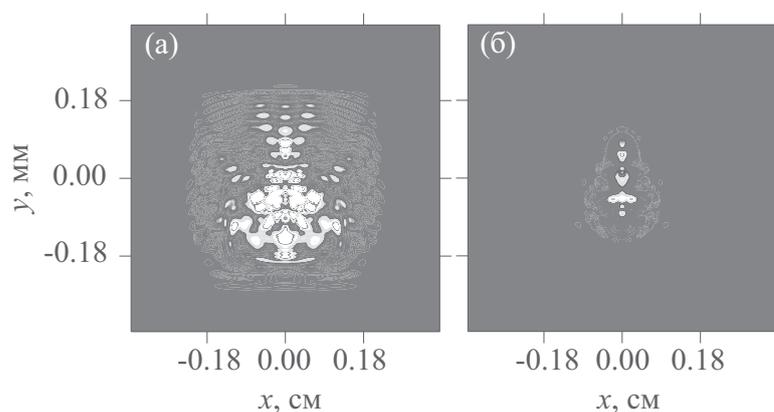


Рис. 2. Пространственные распределения плотности энергии излучения суперконтинуума (а) в коротковолновой части спектра (750 нм), (б) — в длинноволновой (850 нм). Центральная длина волны составляет 800 нм, энергия импульса — 5 мДж, его длительность — 27 фс

В параграфе 3.7 сформулированы выводы по Главе 3.

В Главе 4 показана возможность управления множественной филаментацией мощных фемтосекундных лазерных импульсов с помощью масштабирования пучка. Определено, что увеличение и стабилизация сигнала флуоресценции молекулярного N_2 и

однократно ионизированного N_2^+ азота при уменьшении диаметра пучка на выходе лазерной системы, наблюдаемое в эксперименте (группа проф. С.Л. Чина, университет Лаваль, Квебек, Канада), связано с увеличением и стабилизацией энергии в области флуоресценции. Установлено, что при уменьшении размеров пучка образуется более плотное множество плазменных каналов (т.е. протяженных в пространстве областей, в которых концентрация электронов после прохождения импульса существенно превосходит ее невозмущенное значение) большего диаметра.

В параграфе 4.1 дано описание эксперимента (группа проф. С.Л. Чина, университет Лаваль, Квебек, Канада) по увеличению и стабилизации сигнала флуоресценции молекулярного N_2 и однократно ионизированного N_2^+ азота при уменьшении диаметра пучка на выходе лазерной системы. При уменьшении диаметра пучка с 25 мм до 8 мм сигнал флуоресценции стабилизировался и возрастал примерно на 3 порядка. Представлена модель стохастического фемтосекундного импульса с крупномасштабными возмущениями, положение которых флуктуирует от «выстрела к выстрелу». Ввиду того, что $3D + t$ моделирование распространения пучков с характерным размером около 1 см не представляется возможным из-за огромных объемов оперативной памяти, были выбраны пучки диаметром 2.2 мм (большой) и 1.4 мм (меньший). Энергия импульсов составляет 7 мДж, длительность 45 фс. Установлено, что развитие филаментов подчиняется закономерностям, сформулированным в сценарии множественной филаментации мощных фемтосекундных лазерных импульсов.

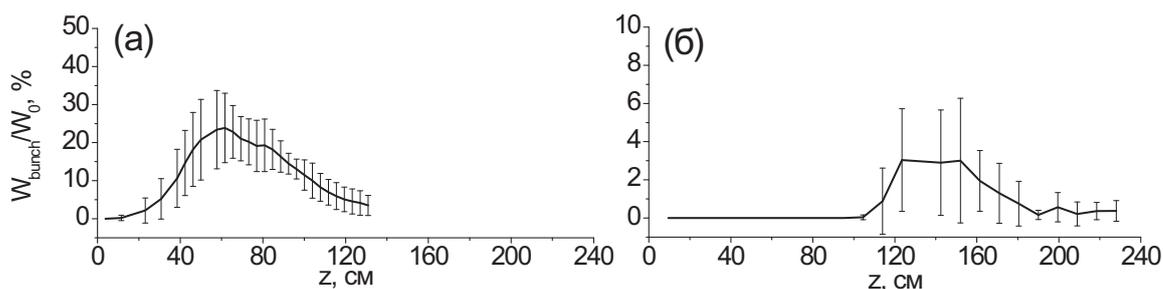


Рис. 3. Средняя по 12 реализация распределений интенсивности на выходе лазерной системы энергия, локализованная в области флуоресценции. (а) соответствует филаментации пучка меньшего диаметра, (б) — большего диаметра. Центральная длина волны составляет 800 нм, энергия импульса — 7 мДж, его длительность — 27 фс

В параграфе 4.2 методом статистических испытаний показано, что энергия в области флуоресценции, т.е. в той области, где высока плотность энергии, и, как следствие, наиболее интенсивно идут различные нелинейно-оптические процессы, в том числе, и вызывающие дальнейшую флуоресценцию среды, стабилизируется и возрастает.

Область флуоресценции Σ можно определить как область пучка, где плотность энергии больше половины максимальной плотности энергии. Для рассматриваемых параметров импульса эта величина составляет 0.75 Дж/см^2 . Тогда энергия в области флуоресценции записывается в виде

$$W_{bunch}(z) = \frac{c}{8\pi} \int_{-\infty}^{\infty} \iint_{\Sigma} |E(x, y, z, \tau)|^2 dx dy d\tau, \quad (3)$$

где $\tau = t - z/v_g$ — бегущее время. Так, при уменьшении диаметра 2.2 до 1.4 мм энергия в области флуоресценции возрастает от примерно 3% от начальной энергии импульса до примерно 25%. При этом ее относительный разброс уменьшается примерно вдвое: со 100% до 50% (см. рис. 3).

В **параграфе 4.3** показано, что средний диаметр плазменных каналов увеличивается при уменьшении характерных поперечных размеров пучка. Так, при рассматриваемых параметрах максимальный диаметр возрастает с 110 ± 10 до 150 ± 40 мкм.

В **параграфе 4.4** сформулированы выводы по Главе 4.

В **Главе 5** показана возможность управления множественной филаментацией мощных фемтосекундных лазерных импульсов при совместном изменении диаметра пучка и фазовой модуляции импульса со случайными возмущениями поперечного распределения интенсивности. Отрицательная фазовая модуляция позволяет увеличить энергию, локализованную в области флуоресценции, (см. формулу (3)) и интегральную по сечению (линейную) плотность плазмы. Сжатие пучка и отрицательная фазовая модуляция импульса приводят к увеличению расстояния образования филамента от выхода фемтосекундной лазерной системы, при этом также увеличивается энергия, локализованная в области флуоресценции, и линейная плотность самонаведенной плазмы.

В **параграфе 5.1** рассмотрена модельная среда с дисперсией, необходимой для того, чтобы эффекты начальной фазовой модуляции играли существенную роль при распространении пучков миллиметрового диаметра. Все остальные характеристики среды (показатель преломления, коэффициент керровской нелинейности, вероятность многофотонной ионизации и т.д.) совпадают с соответствующими характеристиками воздуха. В модельной среде k'' составил $2000 \text{ фс}^2/\text{м}$ (для воздуха он равен $16 \text{ фс}^2/\text{м}$). Представлена модель фемтосекундного импульса на выходе лазерной системы с квазигауссовым поперечным распределением интенсивности

$$E(x, y, z = 0, \tau) = E_0 \exp\left(-\frac{\tau^2}{2\tau_p^2} + i\frac{\delta\tau^2}{2}\right) \exp\left(-\frac{x^2 + y^2}{2a_0^2}\right) \cdot (1 + \tilde{\xi}(x, y)), \quad (3)$$

где τ_p — длительность фазомодулированного импульса, величина $\delta = -\tau_p^2 \sqrt{\tau_p^2/\tau_0^2 - 1}$

определяет отрицательную фазовую модуляцию, τ_0 — длительность спектрально ограниченного импульса, a_0 — радиус пучка, $\xi(x, y)$ представляет собой двумерную случайную величину с дисперсией $\sigma^2 = 0.01$ и радиусом корреляции $r_c = a_0/3$.

В параграфе 5.2 показано увеличение энергии в области флуоресценции и линейной плотности плазмы при использовании импульсов с отрицательной фазовой модуляцией по сравнению со спектрально ограниченными импульсами. Таким образом, установлено, что фазомодулированный импульс является более эффективным средством создания лазерной плазмы и возбуждения молекулярного азота.

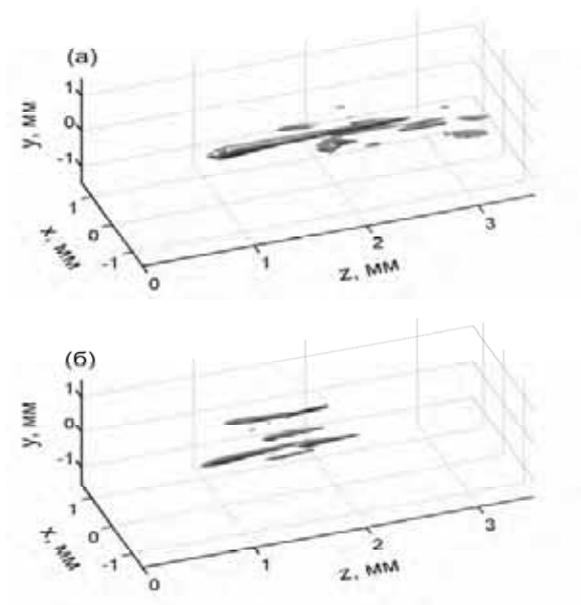


Рис. 4. Плазменные каналы многих филаментов в рассматриваемой модельной среде с увеличенной дисперсией (а) узкого длинного импульса ($\tau_p = 200$ фс, $\tau_0 = 27$ фс, $a_0 = 1$ мм), (б) широкого короткого импульса ($\tau_p = 100$ фс, $\tau_0 = 27$ фс, $a_0 = 1.5$ мм). Наиболее протяженный и широкий канал соответствует случаю (а)

В параграфе 5.3 установлена возможность образования филаментов на одном расстоянии при распространении фазомодулированных фемтосекундных импульсов различного диаметра и длительности. Были выбраны два импульса: большой радиус пучка $a_0 = 1.5$ мм и небольшая фазовая модуляция $\tau_p = 100$ фс (широкий короткий импульс) и меньший радиус $a_0 = 1$ мм и большая фазовая модуляция $\tau_p = 200$ фс (узкий длинный импульс). Длительность спектрально ограниченного импульса в обоих случаях равнялась $\tau_0 = 27$ фс. Плазменные каналы, полученные в результате численного моделирования в обоих случаях, показаны на рис. 4. Начало каналов находится примерно на одинаковом расстоянии от выхода из лазерной системы $z \approx 0.7$ м. При этом каналы в случае широкого короткого импульса образуются практически независимо относительно далеко друг от

друга, в то время как в случае длинного имеет место плотный пучок филаментов.

При распространении узкого длинного импульса происходит рост энергии, локализованной в области флуоресценции, (см. формулу (3)) в области флуоресценции (рис. 5а) и линейной плотности плазмы (рис. 5б) по сравнению с широким коротким.

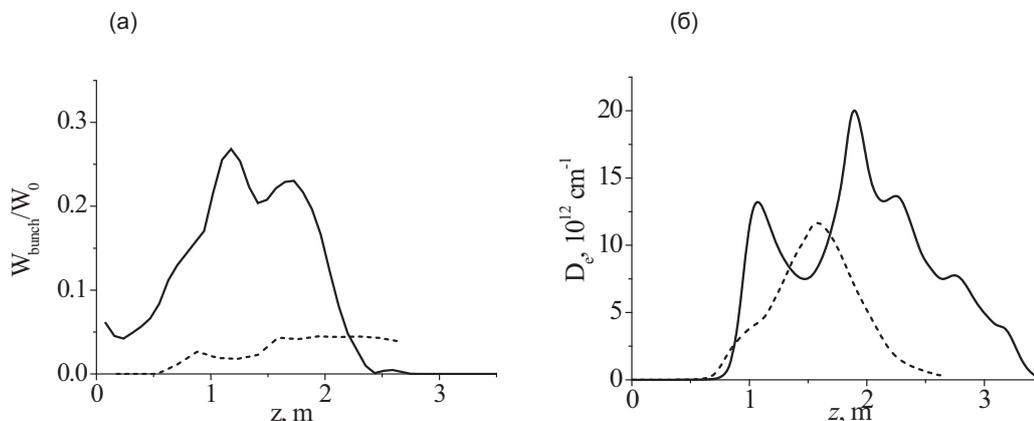


Рис. 5. (а) — энергия в области флуоресценции в зависимости от расстояния z , (б) — линейная плотность плазмы в зависимости от расстояния z . Сплошная кривая на обоих рисунках соответствует узкому длинному импульсу ($\tau_p = 200$ фс, $\tau_0 = 27$ фс, $a_0 = 1$ мм), штриховая — широкому короткому импульсу ($\tau_p = 100$ фс, $\tau_0 = 27$ фс, $a_0 = 1.5$ мм)

В параграфе 5.4 сформулированы выводы по Главе 5.

В **Главе 6** показана возможность формирования множества филаментов, упорядоченного в плоскости поперечного сечения посредством линзового массива при распространении импульса в турбулентной атмосфере. Получен критерий удовлетворительного качества регуляризации. Установлено, что оптимизация параметров линзового массива, элементы которого расположены на концентрических окружностях, позволяет сформировать множество филаментов, которые образуются на одном и том же расстоянии от выходной апертуры лазерной системы.

В **параграфе 6.1** обоснована возможность редукции полной модели распространения мощного фемтосекундного лазерного импульса (1) к модели начальной стадии филаментации, на которой можно пренебречь влиянием самонаведенной лазерной плазмы при рассмотрении зарождения филаментов. В этом случае комплексная амплитуда электрического поля в случайно неоднородной среде описывается уравнением

$$2ik \frac{\partial E}{\partial z} = \Delta_{\perp} E + 2k^2 (\Delta n_{kerr} + \tilde{n}(x, y, z)) E, \quad (4)$$

где Δn_{kerr} определяет добавку к показателю преломления, обусловленную керровской нелинейностью, $\tilde{n}(x, y, z)$ — турбулентные флуктуации показателя преломления воздуха, моделируемые методом фазовых экранов на основе модифицированного спектра фон Кармана. Необходимость редукции обусловлена характерными размерами исследуемых

пучков — около 50 см (с такими пучками в настоящее время проводятся эксперименты по филаментации мощных фемтосекундных импульсов в атмосфере). В рамках модели (1) вычислительный эксперимент невозможен, поскольку в таком случае массивы для хранения огибающей электрического поля на сетке занимали бы около 1 Тб оперативной памяти. Представлена модель импульса, прошедшего через периодический линзовый массив с прямоугольной симметрией.

В параграфе 6.2 показана возможность регуляризации пучка филаментов в поперечном сечении импульса с помощью периодического линзового массива. Установлено, что филаменты образуются в окрестности центров элементов массива при слабой турбулентности (структурная постоянная атмосферной турбулентности $\sim 10^{-17} \text{ см}^{-2/3}$) и стохастически при сильной турбулентности (структурная постоянная атмосферной турбулентности $\sim 10^{-14} \text{ см}^{-2/3}$). Распределения интенсивности при различных значениях структурной постоянной приведены на рис. 6, на котором можно видеть последовательное снижение качества регуляризации с ростом структурной постоянной атмосферной турбулентности.

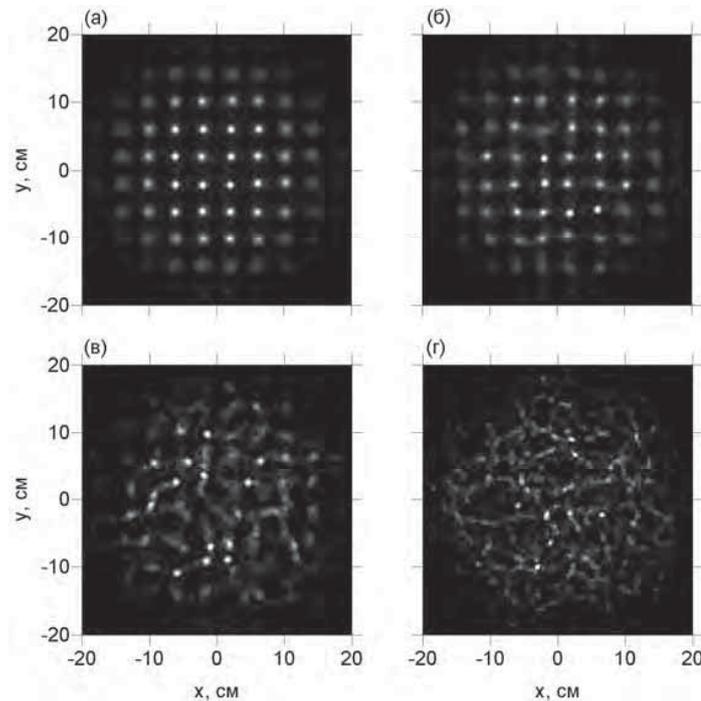


Рис. 6 Филаменты при различных значениях структурной функции атмосферной турбулентности C_n^2 . (а) соответствует $C_n^2 = 7.9 \cdot 10^{-17} \text{ см}^{-2/3}$, (б) — $C_n^2 = 7.9 \cdot 10^{-16} \text{ см}^{-2/3}$, (в) — $C_n^2 = 7.9 \cdot 10^{-15} \text{ см}^{-2/3}$, (г) — $C_n^2 = 7.9 \cdot 10^{-14} \text{ см}^{-2/3}$. Пиковая мощность импульса превышает критическую мощность самофокусировки в 100 раз. Радиус пучка составляет $a_0 = 16 \text{ см}$, поперечный размер линзы $d = 4 \text{ см}$, фокусное расстояние линзы $R_f = 7.5 \text{ км}$. При переходе от (а) к (г) последовательно теряется качество регуляризации множественной филаментации в турбулентной атмосфере при использовании линзового массива

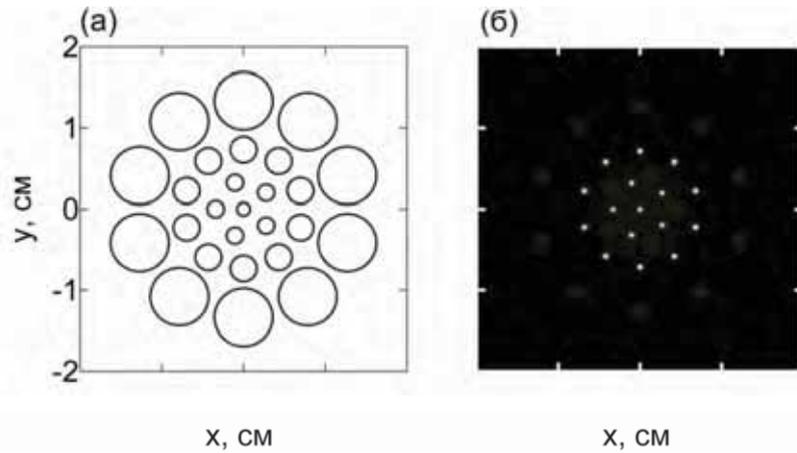


Рис. 7. Линзовый массив для одновременного образования филаментов как в центре, так и на периферии пучка (а), и филаменты, образованные этим массивом (б). Пиковая мощность импульса превышает критическую мощность самофокусировки в 100 раз. Радиус центральной линзы $r_0 = 1$ мм, ее радиус фокусировки 16.5 м

В параграфе 6.3 показано, что пучок филаментов регулируется и в продольном направлении, т.е. расстояние начала филаментации слабо зависит от структурной постоянной в области слабой турбулентности. Сопоставление областей удовлетворительной регуляризации в поперечном и продольном направлениях с фазовыми набегам на элементе линзового массива и в турбулентной атмосфере позволило сформулировать критерий удовлетворительного качества регуляризации

$$\Delta\varphi_{turb} < 10\Delta\varphi_{lens}, \quad (4)$$

где $\Delta\varphi_{turb}$ — усредненный фазовый набег в атмосферной турбулентности на расстоянии от выхода лазерной системы до образования филамента, $\Delta\varphi_{lens}$ — фазовый набег на элементе линзового массива.

В параграфе 6.4 предложен метод образования пучка филаментов на одном расстоянии от выхода лазерной системы с использованием непериодического линзового массива, элементы которого располагаются на концентрических окружностях. Кроме того, в центре пучка также располагалась линза. Радиусы концентрических окружностей и элементов массива подбирались из условия равенства энергии в каждом элементе энергии в центральном, в результате чего они возрастали к периферии пучка (см. рис. 7а). Затем итерационным алгоритмом определялись фокусные расстояния линз на различных концентрических окружностях так, чтобы расстояния образования филамента на окружности и в центральной линзе совпадали. Картина образовавшихся в результате филаментов изображена на рис. 7б.

В параграфе 6.5 сформулированы выводы по Главе 6.

РЕЗУЛЬТАТЫ РАБОТЫ

1. Предложен сценарий развития множественной филаментации мощных фемтосекундных лазерных импульсов из начальных возмущений интенсивности на пространственном профиле пучка. Этапы образования пучка многих филаментов состоят из независимого формирования «родительских» филаментов из начальных возмущений; интерференции колец в распределении интенсивности, расходящихся в плоскости поперечного сечения от первоначально образованных «родительских» филаментов; появления «дочерних» филаментов в результате этой интерференции; «конкуренции» филаментов, проявляющейся в перекачке энергии от одного филамента к другому; «выживания» одного (или нескольких) филаментов в результате «конкуренции».

2. При заданных параметрах импульса: энергии, длительности и диаметре входного импульса определяющим фактором формирования пучка многих филаментов является взаимное расположение первоначальных возмущений. Относительно небольшая флуктуация в расположении начальных возмущений приводит к качественным различиям в количестве и положениях филаментов, т.е. множественная филаментация мощных фемтосекундных лазерных импульсов носит нестабильный характер. Эта нестабильность множественной филаментации, связанная со стохастическим «рождением» и «гибелью» филаментов, является причиной флуктуаций сигнала флуоресценции молекулярного азота.

3. В режиме образования одного филамента как коротковолновое, так и длинноволновое крыло суперконтинуума, возникающего при филаментации импульса, приобретают осевую симметрию, вне зависимости от поперечного распределения интенсивности на основной длине волны лазерного излучения.

4. При множественной филаментации кольца конической эмиссии в коротковолновой части спектра, расходящиеся от каждого из филаментов, интерферируют, образуя спекл-картину. Поперечный размер интерференционной картины увеличивается при удалении от выхода из лазерной системы. В то же время, поперечное распределение интенсивности в длинноволновой части спектра представляет собой набор пиков, соответствующих положениям филаментов. Экспериментально зарегистрированные и расчетные пространственные распределения плотности энергии излучения суперконтинуума находятся в качественном соответствии.

5. Показано, что при постоянной энергии фемтосекундного лазерного излучения с пиковой мощностью, существенно превышающей критическую мощность самофокусировки в воздухе, энергия излучения, локализованная в области флуоресценции

(т.е. энергия в области, где наиболее активно происходят нелинейно-оптические взаимодействия, в том числе вызывающие флуоресценцию молекулярного и однократно ионизированного азота), зависит от поперечного размера входного пучка. Так, сжатие пучка в 1.4 раза приводит к увеличению энергии в области флуоресценции от 3 до 25% первоначальной энергии импульса, при этом флуктуация средней энергии в области флуоресценции уменьшается от 100% до 50% соответственно. Результаты численного моделирования стохастической задачи находятся в соответствии с экспериментальными данными по увеличению и стабилизации сигнала флуоресценции молекулярного азота при сжатии телескопом пучка на выходе из лазерной системы. Основная причина увеличения сигнала состоит в увеличении энергии в области флуоресценции. Средний диаметр плазменных каналов увеличивается при уменьшении диаметра пучка на выходе лазерной системы.

6. Показано, что отрицательная начальная фазовая модуляция импульсов приводит к увеличению энергии в области флуоресценции и интегральной по сечению плотности плазмы. Так, для рассматриваемых параметров импульса при увеличении длительности спектрально ограниченного импульса от 54 фс до 400 фс путем введения отрицательной начальной фазовой модуляции, получено более чем двукратное увеличение пиковой энергии в области флуоресценции и более чем трехкратное увеличение пиковой линейной плотности плазмы.

7. Одновременное управление фазовой модуляцией импульса и поперечными размерами пучка на выходной апертуре лазерной системы позволяет оптимизировать расстояние до начала множественной филаментации фемтосекундного импульса с начальными возмущениями интенсивности. При уменьшении поперечных размеров начального пучка и отрицательной фазовой модуляции импульса вместо разрозненных плазменных каналов образуется их плотное множество с относительно меньшими расстояниями между центрами и большей протяженностью. Так, для рассматриваемых параметров импульса протяженность плазменного образования и количество свободных электронов в канале увеличивается в два раза, а энергия в области флуоресценции — более чем в четыре раза при одновременном уменьшении диаметра пучка в 1.5 раза и увеличении длительности импульса с отрицательной фазовой модуляцией в 2 раза.

8. Показана возможность регуляризации множественной филаментации мощных фемтосекундных лазерных импульсов посредством периодической фазовой модуляции светового поля с использованием линзового массива в турбулентной атмосфере. Имеет место как продольная (по расстоянию образования первого филамента), так и поперечная (по стабилизации положения филамента на профиле импульса) регуляризация. Показано,

что регуляризация является удовлетворительной при условии того, что превышение фазового набег в турбулентной атмосфере над фазовым набегом на одном элементе линзового массива составляет не более одного порядка.

9. Для формирования многих филаментов на одном расстоянии от выходной апертуры лазерной системы предлагается применять массив, линзы которого расположены на концентрических окружностях. Выбирая размеры линз в центре и на периферии пучка таким образом, чтобы энергия импульса, протекающая через каждую линзу, была одинакова и, определяя фокусное расстояние для группы линз на каждой окружности, оказывается возможным создание мощного пучка филаментов на заданном расстоянии от выхода лазерной системы.

ПУБЛИКАЦИИ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

1. Панов Н.А., Косарева О.Г., Кандидов В.П., Акозбек Н., Скалора М., Чин С.Л. “Локализация плазменного канала при множественной филаментации в воздухе”, *Квантовая электроника* **37**, 1153 (2007).
2. Панов Н.А., Косарева О.Г., Муртазин И.Н. “Упорядоченные филаменты фемтосекундного импульса в объеме прозрачной среды” *Оптический журнал* **73**, 45 (2006).
3. Kosareva O.G., Panov N.A., Akozbek N., Kandidov V.P., Luo Q., Hosseini S.A., Liu W., Gravel J.-F., Roy G., Chin S.L. “Controlling a bunch of multiple filaments with a beam diameter”, *Applied Physics B* **82**, 111 (2006).
4. Косарева О.Г., Панов Н.А., Кандидов В.П. “Сценарий многофиламентации и генерации суперконтинуума мощного фемтосекундного лазерного импульса”, *Оптика атмосферы и океана* **18**, 223 (2005).
5. Кандидов В.П., Косарева О.Г., Шлёнов С.А., Панов Н.А., Федоров В.Ю., Дормидонов А.Е. “Динамическая мелкомасштабная самофокусировка фемтосекундного лазерного импульса”, *Квантовая электроника* **35**, 59 (2005).
6. Luo Q., Hosseini S.A., Liu W., Gravel J.-F., Kosareva O.G., Panov N.A., Aközbek N., Kandidov V.P., Roy G., Chin S.L., “Effect of beam diameter on the propagation of intense femtosecond laser pulses”, *Applied Physics B* **80**, 35 (2004).
7. Hosseini S.A., Luo Q., Ferland B., Liu W., Chin S.L., Kosareva O.G., Panov N.A., Aközbek N., Kandidov V.P. “Competition of multiple filaments during the propagation of intense femtosecond laser pulses”, *Physical Review A* **70**, 033802 (2004).
8. Liu W., Hosseini S.A., Luo Q., Ferland B., Chin S.L., Kosareva O.G., Panov N.A.,

- Kandidov V.P., “Experimental observation and simulations of the self-action of white light laser pulse propagating in air”, *New Journal of Physics* **6**, 6.1 (2004).
9. Panov N.A., Kosareva O.G., Kandidov V.P. “Regularization of multiple filaments in atmospheric turbulence”, *Proceedings of SPIE* **6255**, 212 (2006).
10. Panov N.A., Kosareva O.G., Kandidov V.P., Aközbeq N., Luo Q., Hosseini S.A., Liu W., Gravel J., Chin S.L. “Controlling the bunch of filaments formed by high-power femtosecond laser pulse in air”, *Proceedings of SPIE* **5708**, 91 (2005).