

Косарева Ольга Григорьевна

Филаментация фемтосекундного лазерного излучения в прозрачных средах

Специальность 01.04.21 – лазерная физика

Автореферат

диссертации на соискание ученой степени  
доктора физико-математических наук

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

**Научный консультант:**

доктор физико-математических наук,  
профессор

Кандидов Валерий Петрович

**Официальные оппоненты:**

доктор физико-математических наук,  
профессор

Ионин Андрей Алексеевич,  
Физический институт им. П.Н. Лебедева РАН,  
г.Москва

доктор физико-математических наук,  
профессор

Козлов Сергей Аркадьевич,  
Санкт-Петербургский государственный  
университет информационных  
технологий, механики и оптики,  
г. Санкт-Петербург

доктор физико-математических наук,  
профессор

Федоров Михаил Владимирович  
Институт общей физики им. А.М. Прохорова РАН,  
г.Москва

**Ведущая организация:**

Учреждение Российской академии наук  
Институт прикладной физики РАН  
г.Нижний Новгород

Защита состоится « 17 » мая \_\_\_\_\_ 2012 г в 15.00 на заседании диссертационного совета Д 501.001.31 при Московском государственном университете имени М.В. Ломоносова по адресу: Россия, 119991, Москва, Ленинские горы, МГУ, ул. Академика Хохлова, д. 1, стр. 62, корпус нелинейной оптики, аудитория имени С.А.Ахманова.

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

Автореферат разослан « \_\_\_ » \_\_\_\_\_ 2012 г

Ученый секретарь диссертационного совета Д 501.001.31,  
доцент

Т.М. Ильинова

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

### Актуальность темы

Явление филаментации мощного фемтосекундного лазерного излучения состоит в локализации энергии светового поля в тонкой протяженной нити филамента под действием самофокусировки в среде и нелинейности в самонаведенной лазерной плазме, ограничивающей коллапс пучка. Филаментация наблюдается в газообразных, жидких и твердых прозрачных диэлектриках и сопровождается формированием плазменных каналов, сверхуширением частотного и углового спектров импульса, генерацией терагерцового излучения, компрессией импульса и другими нелинейно-оптическими эффектами. Длина филамента, то есть области, где интенсивность достаточна для ионизации среды, много больше его дифракционной длины. Например, в воздухе длина филаментов достигает нескольких метров и более, а диаметр — порядка 100 мкм.

Самофокусировка излучения является основной физической причиной формирования протяженных световых нитей — филаментов. Явление самофокусировки электромагнитных волн в общей форме было предсказано в 1962 году в Москве в Физическом институте академии наук Г.А. Аскарьяном. В статье, посвященной этому явлению, он писал: «Воздействие луча на среду может быть настолько сильным, что создается перепад свойств среды в луче и вне луча, что вызовет волноводное распространение луча и устранил геометрическую и дифракционную расходимость. Это интересное явление можно назвать самофокусировкой электромагнитного луча». Первое достаточно общее теоретическое объяснение этого явления появились в 1964 году в работах В.И. Таланова и С.Н. Townes с сотрудниками. В 1965 году Н.Ф. Пилипецким и С.Р. Рустамовым самофокусировка впервые зарегистрирована в Московском государственном университете имени М.В. Ломоносова.

Первые расчеты самофокусировки световых пучков проведены В.И. Талановым и Р.Л. Kelley. С.А. Ахмановым, А.П. Сухоруковым и Р.В. Хохловым развита теория стационарной самофокусировки и найдено в безабберационном приближении аналитическое решение параболического уравнения для медленно меняющихся амплитуд светового поля. Уникальные эксперименты по нестационарной самофокусировке импульсного излучения выполнены А.М. Прохоровым и В.В. Коробкиным, М.Т. Lou и Y.R. Shen. Самофокусировка мощного пикосекундного лазерного импульса в воздухе на расстоянии 25 м от выхода из лазерной системы зарегистрирована Н.Г. Басовым, Н.Г. Крюковым, Ю.В. Сенатским, С.В. Чекалиным. Самофокусировка является пороговым эффектом, для ее наблюдения необходимо превышение мощности излучения над

критической мощностью самофокусировки, которая изменяется от нескольких мегаватт в конденсированной среде до гигаваттного уровня в газах атмосферной плотности.

С развитием фемтосекундных лазерных систем высокой мощности стало возможным наблюдение самофокусировки и филаментации коллимированного излучения в атмосферном воздухе. Первые эксперименты по филаментации в воздухе излучения титан-сапфировой лазерной системы выполнены в лаборатории профессора G. Mourou в университете штата Мичиган (США), в лаборатории профессора A. Mysyrowicz в Политехнической школе Палезо (Франция) и в Центре оптики, фотоники и лазеров университета Laval (Квебек, Канада) совместной канадско-русской группой Международного учебно-научного лазерного центра МГУ имени М.В. Ломоносова и Центра оптики, фотоники и лазеров университета Laval (Квебек, Канада) под руководством профессоров В.П. Кандидова и S.L. Chin. В этих экспериментах с импульсами длительностью 100-150 фс и пиковой мощностью порядка 10 ГВт на длине волны 775 – 800 нм зарегистрировано образование филамента протяженностью 10 – 50 м и формирование цветных колец конической эмиссии в видимом спектральном диапазоне. В лаборатории профессора S.L. Chin впервые обнаружен эффект рефокусировки излучения в филаменте.

К началу работ по теме диссертации (1995 — 1997 год) были опубликованы четыре пионерские работы, соавтором двух из которых является автор диссертации. В это время не существовало адекватной интерпретации экспериментальных результатов по филаментации фемтосекундного лазерного излучения и сопутствующих ей эффектов. При активном участии автора диссертации в постановке и исследовании фундаментальных проблем явления филаментации канадско-русской группой создана самосогласованная физическая картина филаментации мощного фемтосекундного лазерного излучения в газах и конденсированных средах, которая объясняет динамическую локализацию энергии в узком протяженном филаменте, генерацию суперконтинуума и конической эмиссии, образование множества филаментов при повышении пиковой мощности излучения и другие эффекты. Автор диссертации участвовала в экспериментах, проводимых в лаборатории профессора S.L. Chin в Квебеке (Канада), проводила теоретические исследования совместно с профессором В.П. Кандидовым в МГУ имени М.В. Ломоносова в Москве и создала пакет программ для численного моделирования явления филаментации лазерных импульсов высокой пиковой мощности в прозрачной среде. Созданная автором картина филаментации формировалась параллельно с экспериментальными и теоретическими исследованиями франко-германской, американской групп и другими научными коллективами в ведущих центрах мира. Эта

картина принята научным сообществом, стимулировала и стимулирует исследования по филаментации лазерного излучения в ведущих научных лабораториях многих стран. Основные положения, сформулированные в работах автора, стали неотъемлемой частью современных физических представлений о явлении филаментации фемтосекундного лазерного излучения и вошли в монографии и обзоры, изданные в России и за рубежом.

В работе рассмотрены, сформулированы и обоснованы основополагающие представления о явлении фемтосекундной филаментации, такие как модель движущихся фокусов в условиях ионизации среды, рефокусировка излучения и резервуар энергии в протяженном филаменте, динамика и нестабильность множественной филаментации импульса высокой мощности, сверхуширение частотного спектра и образование колец конической эмиссии. В работе рассмотрены особенности совместного влияния геометрической фокусировки и нелинейной самофокусировки на филаментацию импульса, интерференции излучения конической эмиссии при множественной филаментации, предложены временные и пространственные методы управления филаментами. Следствием сверхуширения частотного спектра импульса в филаменте является возможность компрессии импульса. В связи с этим совместно с лабораторией профессора А.Б. Савельева-Трофимова Центра коллективного пользования мощной фемтосекундной лазерной системой на кристалле титаната сапфира Международного учебно-научного лазерного центра МГУ имени М.В. Ломоносова создана экспериментальная схема оптического компрессора фемтосекундного импульса в филаменте, экспериментально и численно получен импульс длительностью менее четырех периодов колебаний светового поля. Совместно с лабораторией нелинейной поляризационной оптики кафедры общей физики и волновых процессов физического факультета МГУ имени М.В. Ломоносова профессора В.А. Макарова теоретически предсказано и экспериментально продемонстрировано двулучепреломление излучения пробного импульса в мощном световом поле филамента.

В диссертации обобщены результаты, полученные автором в течение более 15 лет совместной работы с экспериментальной лабораторией профессора S.L. Chin мощного сверхбыстрого лазерного излучения Центра оптики, фотоники и лазеров университета Лаваль (Квебек, Канада). Результаты получены автором лично или под его непосредственным руководством с 1995 по 2011 год. Они опубликованы в 65 статьях в реферируемых журналах, представлены на более, чем 50, международных конференциях.

## **Цели и задачи диссертационной работы**

Цель настоящей работы состоит во всестороннем изучении явления филаментации мощного фемтосекундного лазерного излучения, генерации суперконтинуума и конической эмиссии, процесса множественной филаментации, самосжатия импульсов в филаменте и поляризационных эффектов при филаментации, а также в анализе возможности управления формированием филаментов.

Постановка конкретных задач, рассмотренных в диссертации, определялась тенденциями развития исследований явления фемтосекундной филаментации в ведущих научных центрах. В процессе работы над темой диссертации осуществлялось планирование новых экспериментов в лаборатории профессора S.L. Chin, анализ и интерпретация получаемых результатов, построение физических моделей зарегистрированных эффектов.

Диссертационная работа включает результаты исследования следующих задач:

- формирование протяженного филамента с высокой плотностью энергии в условиях самонаведенной лазерной плазмы при распространении мощного фемтосекундного лазерного импульса в прозрачном диэлектрике;
- влияние геометрической фокусировки излучения на процесс филаментации;
- образование множества филаментов и сценарий их эволюции;
- генерация излучения суперконтинуума и конической эмиссии в условиях формирования одного или нескольких филаментов;
- управление и пространственная регуляризация филаментации фемтосекундного лазерного импульса пиковой мощностью в десятки и более раз превышающей критическую мощность самофокусировки;
- образование импульсов, сжатых до нескольких колебаний поля, при филаментации, оптимизация длительности и энергии таких импульсов;
- влияние поляризации светового поля лазерного излучения на формирование и эволюцию филамента;
- поляризационное кроссвзаимодействие слабого поля второй гармоники в сильном поле основного излучения, формирующего филамент.

## **Научная новизна работы**

1. Получена фундаментальная физическая картина явления филаментации фемтосекундного лазерного излучения в прозрачной среде и сопровождающих его эффектов.
2. Впервые развит сценарий множественной филаментации фемтосекундного

импульса с пиковой мощностью, в десять и более раз превышающей критическую мощность самофокусировки в прозрачной среде.

3. Предложена оригинальная модель формирования конической эмиссии суперконтинуума, которая впервые дала физическую интерпретацию результатам численного и лабораторных экспериментов по сверхуширению частотно-углового спектра фемтосекундного лазерного излучения в условиях филаментации.
4. Исследованы новые методы пространственного и временного управления локализацией множества филаментов и их плазменных каналов, которые могут найти применение как при удаленном зондировании атмосферы, так и в фемтосекундных лазерных системах формирования элементов микрооптики.
5. Развита автором векторная модель филаментации фемтосекундного лазерного излучения и распространения пробного импульса в филаменте позволяет теоретически и численно исследовать эффекты двулучепреломления, индуцированные филаментом.

#### **Научная и практическая значимость**

1. Обобщенная модель движущихся фокусов фемтосекундного филамента позволяет дать физическую интерпретацию эффектам, наблюдаемым при филаментации фемтосекундного лазерного импульса, осуществлять планирование новых экспериментальных исследований и обосновать возможность практического применения явления филаментации.
2. Методы пространственного и временного управления локализацией множества филаментов и их плазменных каналов могут найти применение в фемтосекундных лазерных системах формирования элементов микрооптики.
3. Возможность увеличения сигнала флуоресценции молекулярного и однократно ионизированного азота при множественной филаментацией мощных фемтосекундных лазерных импульсов за счет уменьшения диаметра пучка на выходе лазерной системы может быть использована в фемтосекундных лидарах для удаленной диагностики атмосферы.
4. Исследования поляризационного кроссвзаимодействия второй и основной гармоник при филаментации могут позволить оптимизировать параметры терагерцового излучения, которое генерируется в процессе четырехволнового смешения этих гармоник.

### **Защищаемые положения**

1. Обобщенная модель движущихся фокусов фемтосекундного лазерного излучения в условиях нелинейной рефракции в самонаведенной лазерной плазме, воспроизводит образование протяженного филамента с высокой плотностью энергии, процесс ограничения интенсивности в филаменте, образование колец в поперечном распределении интенсивности излучения и объясняет эффект рефокусировки, который состоит в немонотонном изменении плотности энергии вдоль филамента.
2. Сверхширение частотно-углового спектра и образование конической эмиссии суперконтинуума при филаментации является результатом пространственно-временной самомодуляции фемтосекундного лазерного излучения.
3. Динамический сценарий множественной филаментации фемтосекундного лазерного излучения высокой мощности состоит в образовании «родительских» филаментов, зарождающихся на возмущениях интенсивности в сечении пучка лазерной системы, образовании «дочерних» филаментов, перекачке энергии между ними и «выживании» одного или нескольких из них.
4. Изменение фазовой модуляции лазерного излучения и пространственного распределения интенсивности в сечении пучка импульсного излучения позволяет управлять положением пучка филаментов, их плазменных каналов и осуществлять компрессию импульса.
5. В фемтосекундном филаменте создается оптическая анизотропия прозрачного изотропного диэлектрика.

### **Апробация результатов работы**

Всего опубликовано 135 работ, по теме диссертации – 132 работы, из них 65 статей в рецензируемых журналах из списка ВАК Российской Федерации.

Основные результаты работы опубликованы в 65 научных статьях в журналах «Квантовая электроника», «Письма в журнал теоретической и экспериментальной физики», «Оптика и спектроскопия», «Оптика атмосферы и океана», «Оптический журнал», «Physical Review A», «Applied Physics B», «New Journal of Physics», «Optics Letters», «Laser Physics», «Laser Physics Letters», «Optics Communications», «Journal of the Optical Society of America B», «Optics Express», «Applied Physics Letters», и докладывались на более, чем пятидесяти российских и международных конференциях.

## Структура и объем работы

Диссертация состоит из восьми глав, Введение, и списка цитируемой литературы. Объем работы составляет 237 страниц, включая 74 рисунка. Список цитируемой литературы содержит 283 наименования.

## Личный вклад автора

Все использованные в диссертации результаты получены автором лично или при определяющем его участии.

## СОДЕРЖАНИЕ ДИССЕРТАЦИИ

Во «**Введении**» обозначены основные этапы исследований по самофокусировке и филаментации лазерного излучения, место настоящей диссертации среди других работ, приоритет автора в исследованиях филаментации мощных фемтосекундных лазерных импульсов. Обоснована актуальность и новизна темы диссертационной работы, сформулированы ее цели и задачи, представлены защищаемые положения.

В **Главе 1** представлен обзор экспериментальных и теоретических исследований, посвященных филаментации мощных фемтосекундных лазерных импульсов, начиная с середины 1990-х годов и по настоящее время. Рассмотрены фундаментальные представления о филаментации как о нестационарном коллапсе лазерного излучения в условиях дефокусирующей нелинейности самонаведенной лазерной плазмы.

В **параграфе 1.1** представлены основные фундаментальные представления о филаментации мощного фемтосекундного лазерного излучения. Определено, что филамент — узкая протяженная область лазерного излучения, интенсивность в котором определяется динамическим балансом керровской и плазменной нелинейностей. Обоснован пренебрежимо малый вклад высших порядков керровской нелинейности.

В **параграфе 1.2** показана неизбежность стохастической множественной филаментации фемтосекундных лазерных импульсов при превышении пиковой мощности импульса над критической мощностью самофокусировки в  $\sim 10$  и более раз.

В **параграфе 1.3** представлен детальный обзор экспериментальных исследований филаментации фемтосекундных импульсов в газах и конденсированных средах, а также сопровождающих ее явлений (формирование плазменного канала, генерация суперконтинуума, в т.ч. в форме конической эмиссии, самокомпрессии импульсов, генерации терагерцового излучения, формирования перестраиваемых сверхкоротких импульсов за счет четырехволнового смешения при наличии затравочного импульса и

т.д.). Представлены результаты основных экспериментов, посвященных множественной филаментации, методам управления филаментацией и ее приложениям.

В **параграфе 1.4** изложены различные модели филаментации, основанные как на уравнениях для огибающей электрического поля, так и на полевых уравнениях, учитывающих осциллирующую на оптической частоте компоненту. Обоснован выбор модели — уравнения для огибающей с учетом волновой нестационарности. Изложены проблемы четырехмерного ( $3D + t$ ) моделирования множественной филаментации, связанные с огромными затратами оперативной памяти. Получены оценки минимально необходимых массивов для хранения электрического поля на расчетной сетке. Дан обзор оптимизации расчетных сеток и методов редукции четырехмерной задачи моделирования множественной филаментации мощных фемтосекундных лазерных импульсов к трехмерной.

В **Главе 2** сформулирована математическая модель распространения мощного фемтосекундного лазерного излучения в объеме прозрачного диэлектрика. Последовательно проанализированы линейные и нелинейные эффекты, определяющие развитие и взаимодействие одного или нескольких филаментов. Представлена методика численного исследования модели, развитая автором.

В **параграфе 2.1** представлено описание керровской нелинейности в объеме 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 азота и кислорода.

В **параграфе 2.2** рассмотрена фотоионизация в газах и переход электрона из валентной зоны в зону проводимости в конденсированных средах под действием фемтосекундного лазерного импульса. 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** представлено математическое описание материальной дисперсии среды и дифракции пучков, используемое в модели филаментации.

В **параграфе 2.4** сформулирована самосогласованная нелинейно-оптическая модель

распространения мощного фемтосекундного лазерного излучения в объеме прозрачной среды. Нелинейное параболическое уравнение для огибающей электрического поля  $E(x, y, z, \tau)$ , где  $\tau$  – бегущее время,

$$2ik_0 \frac{\partial E}{\partial z} = \hat{T}^{-1} \Delta_{\perp} E - k_0 \sum_{n=2}^{\infty} \frac{1}{(i^n n!)} \frac{\partial^n k}{\partial \omega^n} \Big|_{\omega=\omega_0} \frac{\partial^n E}{\partial \tau^n} + 2k_0^2 (\hat{T} \Delta n_{Kerr} + \hat{T}^{-1} \Delta n_{plasma}) E - ik_0 \alpha E, \quad (1)$$

получено в приближении метода медленно меняющихся амплитуд. В (1)  $\hat{T} = 1 - i/\omega_0 \partial/\partial \tau$  — оператор волновой нестационарности,  $\omega_0$  – центральная частота излучения,  $k(\omega)$  — волновое число,  $k_0 = 2\pi/\lambda_0$ ,  $\lambda_0 = 2\pi c/\omega_0$  — центральная длина волны излучения,  $n_0$  — показатель преломления. Величины  $\Delta n_{Kerr}$ ,  $\Delta n_{plasma}$  определяют добавку к показателю преломления, обусловленную влиянием керровской и плазменной нелинейностей,  $\alpha$  — нелинейное поглощение, связанное с полевой ионизацией среды. Поперечный лапласиан  $\Delta_{\perp}$  в уравнении (1) может быть записан в приближении аксиальной симметрии для описания формирования и развития одного филамента в центре пучка. Поперечный лапласиан  $\Delta_{\perp}$ , записанный декартовых координатах, позволяет описывать множественную филаментацию.

В параграфе 2.5 представлена методика численного интегрирования уравнения (1), основанная на методе расщепления уравнения для огибающей электрического поля по физическим факторам. При моделировании множественной филаментации 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. Для исследования формирования и развития одного филамента на оси пучка применялась однородная сетка по пространственной координате  $r$  с таким же разрешением.

В Главе 3 представлены результаты исследований формирования и развития филамента. Дано обобщение модели движущихся фокусов на случай формирования лазерной плазмы и рассеяния на ней заднего фронта импульса. Исследовано явление рефокусировки импульса. Изучено влияние геометрической фокусировки на формирование и развитие филамента.

В параграфе 3.1 представлено обобщение модели движущихся фокусов на явление филаментации фемтосекундного лазерного излучения в условиях генерации лазерной плазмы. Установлено, что временные слои импульса на переднем фронте, распространяясь в невозмущенной среде, фокусируются согласно модели движущихся

фокусов. При увеличении интенсивности в нелинейном фокусе возрастает вероятность генерации лазерной плазмы, рефракция в которой вызывает ограничение роста интенсивности и в последующем дефокусировку излучения. В результате, временные слои на заднем фронте импульса эволюционируют в условиях рассеяния на самонаведенной лазерной плазме. Вследствие абберационной дефокусировки в наведенной лазерной плазме на хвосте импульса формируются в распределении интенсивности кольцевые структуры, расходящиеся вокруг филамента (см. рис. 1а —г).

Результаты численного моделирования находятся в соответствии с предложенным автором экспериментом по наблюдению колец, расходящихся от филаментов, при распространении импульса лазера на кристалле титаната сапфира на лабораторной трассе длиной 100 м в воздухе. Кольца, расходящиеся от одного филамента (кольца большого диаметра на рис. 1д, е), и интерференция колец двух филаментов (полосы на рис. 1д, е) описываются простой моделью интерференции плоских волн, распространяющихся под углом друг к другу.

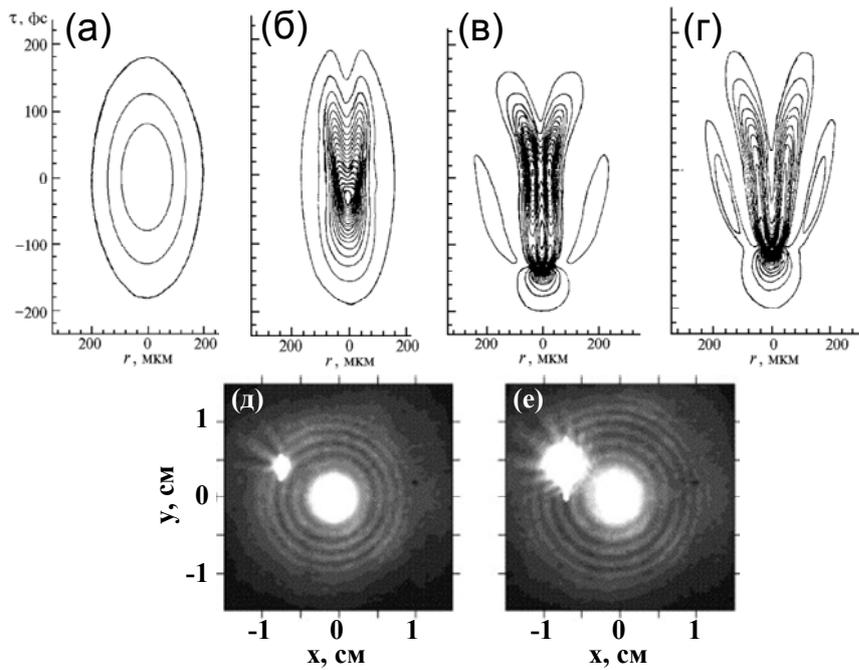


Рис. 1. Пространственно-временная эволюция импульса в филаменте: линии равной интенсивности на плоскости  $(r, \tau)$ : (а) —  $z = 0$ ; (б) — 26 м; (в) — 32 м; (г) — 42 м. Интервал интенсивности между контурами составляет  $0.25 \cdot 10^{13}$  Вт/см<sup>2</sup>. Излучение распространяется сверху вниз. (д,е) Кольца, расходящиеся от двух филаментов в эксперименте на лабораторной трассе в воздухе, для импульсов от двух различных выстрелов титан-сапфирового лазера.

В параграфе 3.2 исследовано явление рефокусировки, которое состоит в немонотонном изменении пиковой интенсивности при филаментации с двумя и более числом ярких максимумов. Рефокусировка является результатом повторной самофокусировки светового поля во временных слоях импульса, испытавших дефокусировку в лазерной плазме. Во временных слоях переднего фронта импульса

интенсивность на оси уменьшается, фотоионизация прекращается и исчезает отрицательный вклад лазерной плазмы в приращение показателя преломления. При этом во временных слоях с кольцевым распределением интенсивности после плазменной дефокусировки может содержаться достаточно большая мощность для керровской самофокусировки, что приводит к стягиванию колец к оси, и интенсивность в филаменте возрастает. В эксперименте рост интенсивности во временных слоях импульса при рефокусировке регистрируется как немонотонное изменение плотности энергии вдоль филамента.

В эксперименте, в котором впервые наблюдалось это явление, лазерный импульс на длине волны 800 нм пиковой мощностью 33 ГВт, длительностью 230 фс и диаметром 7 мм формировал филамент. Исследована эволюция с расстоянием энергии  $E_{n.a.}$  излучения, прошедшего через вырезающую центральную часть пучка апертуру диаметром 500 мкм, по отношению к полной энергии  $E_{total}$ . Экспериментально измеренная зависимость  $E_{n.a.}/E_{total}$  представлена на рис. 2. В ней хорошо выделяются два ярких максимума, интерпретированных как рефокусировка. Результаты эксперимента находятся в удовлетворительном согласии с результатами моделирования.

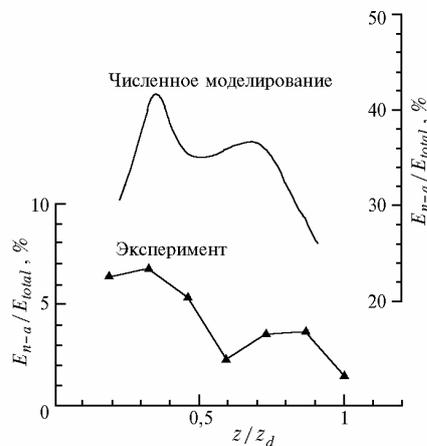


Рис. 2. Изменение с расстоянием  $z$  приосевой энергии (энергии филамента), отнесенной к полной энергии импульса. Кривая, отмеченная треугольными символами, — эксперимент (левая вертикальная ось); сплошная кривая — численное моделирование (правая вертикальная ось),  $z_d$  — дифракционная длина.

В параграфе 3.3 изучено влияние геометрической фокусировки на формирование филамента и генерацию суперконтинуума при распространении фемтосекундного импульса в воде. Численное моделирование проведено для условий лабораторного эксперимента, схема которого приведена на рис. 3. Распространение лазерных импульсов проходило в воде. Длительность лазерных импульсов составляла  $\tau_0 = 27$  фс, их энергия  $W_0 = 0.2$  — 3 мкДж, что соответствует пиковой мощности  $(1 — 15)P_{cr}$ , где  $P_{cr} = 4.2$  МВт — критическая мощность самофокусировки в воде, радиус геометрической фокусировки —

$F = 16.9 — 73.5$  мм при начальном радиусе пучка 1.77 см. В эксперименте измерялся в зависимости от фокусного расстояния линзы сигнал фотодиода, пропорциональный энергии излучения суперконтинуума. Установлено, что с увеличением фокусного расстояния линзы этот сигнал возрастает.

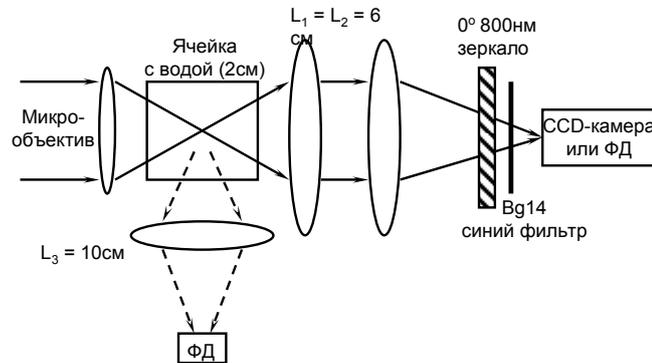


Рис. 3. Схема экспериментальной установки по филаментации в воде лазерного импульса в сфокусированном пучке

Согласно численному моделированию преобразование энергии лазерного импульса в энергию суперконтинуума также возрастает с увеличением фокусного расстояния. Полученная в эксперименте зависимость для энергии суперконтинуума от геометрической фокусировки объясняется тем, что при увеличении фокусного расстояния линзы  $R_f$  возрастает протяженность плазменного канала филамента, что приводит к "накоплению" белого света вдоль его длины. Для иллюстрации на рис. 4 показаны распределения в координатах  $(r, z)$  плотности энергии лазерного излучения (нулевое расстояние соответствует геометрическому фокусу линзы). При росте  $R_f$  с 16.9 до 73.5 мм протяженность области, в которой происходит генерация суперконтинуума, увеличивается с 0.1 до 0.7 мм.

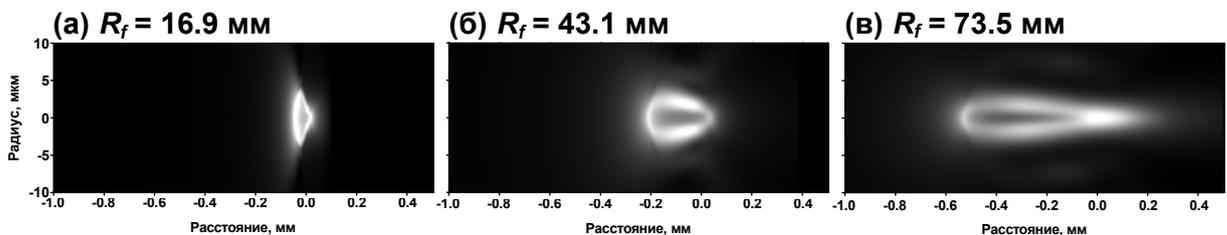


Рис. 4. Динамика радиальных распределений плотности энергии с расстоянием  $z$  при фокусировке импульса титан-сапфирового лазера в ячейку с водой при энергии лазерного импульса 0.4 мкДж

В параграфе 3.4 сформулированы выводы по Главе 3.

В Главе 4 исследуется множественная филаментация мощного фемтосекундного

лазерного излучения, развивающаяся вследствие пространственной неустойчивости интенсивности светового поля в среде с кубичной нелинейностью. Обобщение результатов численного исследования излучения с начальными возмущениями на поперечном профиле импульса позволили сформулировать сценарий множественной филаментации, показать ее нестабильность. Установлено, что нестабильность множественной филаментации является причиной стохастического замирания сигнала флуоресценции молекулярного азота, накачиваемого множеством филаментов мощного фемтосекундного лазерного излучения.

**В параграфе 4.1** на основе численного моделирования распространения лазерного излучения в воде сформулирован сценарий множественной филаментации мощного фемтосекундного лазерного излучения, состоящий из следующих стадий: (1) независимое развитие начальных возмущений интенсивности на пространственном профиле пучка в развитые филаменты, образующие кольцевые структуры, расходящиеся вокруг них; (2) интерференция колец, которые расходятся в плоскости поперечного сечения от первоначально образованных «родительских» филаментов 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. 5 представлена картина последовательного развития нескольких филаментов, в соответствии со стадиями изложенного сценария.

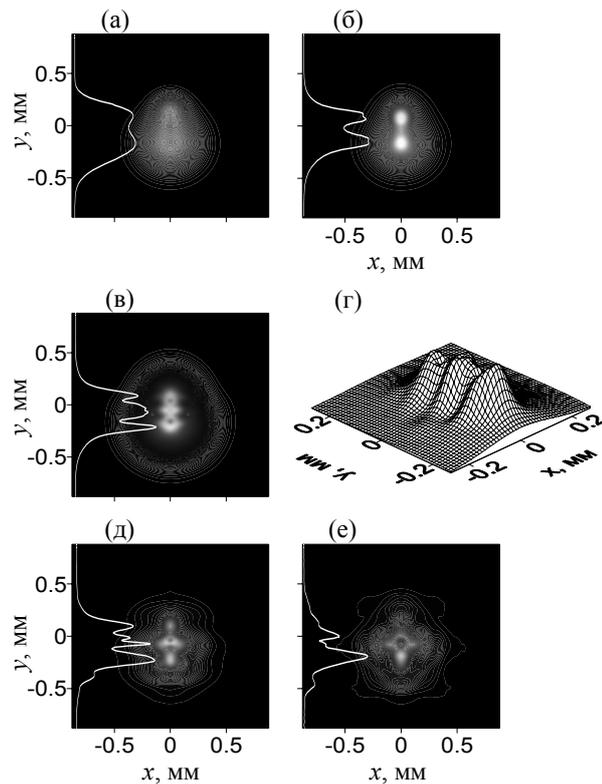


Рис. 5. Поперечные распределения плотности энергии на различных расстояниях  $z$ : (а) —  $z = 0$  (начальные условия), (б) —  $z = 0.2l_{difr}$  независимое развитие двух «родительских» филаментов, (в, г) —  $z = 0.3l_{difr}$  рождение «дочернего» филамента, как результат взаимодействия кольцевых структур «родительских» филаментов, (д) —  $z = 0.45l_{difr}$  начало «умирания» верхнего филамента, (е) —  $z = 0.55l_{difr}$  «гибель» верхнего филамента. Величина  $l_{difr}$  составляет 37.5 см

В параграфе 4.2 рассмотрена нестабильность множественной филаментации. Постановка этих исследований связана с экспериментом по инициированной филаментами флуоресценции молекулярного  $N_2$  и однократно ионизированного  $N_2^+$  азота. В эксперименте обнаружена нестабильность сигнала флуоресценции от выстрела к выстрелу. Схема эксперимента представлена на рис. 6. Лазерный импульс на длине волны 800 нм длительностью по половине высоты 45 фс, энергией 40 мДж и диаметром 25 мм после выходного окна вакуумного компрессора системы усиления на титан-сапфире распространялся на трассе длиной около 100 м внутри здания (см. рис. 6). Скоростной фотоприемник, временная разрешающая способность которого составляет 1 нс, что позволяет определять положение источника излучения с точностью 30 — 60 см, использовался для измерения сигнала флуоресценции молекулярного азота (линии в окрестности 400 нм) с расстояний до 100 м. Обнаружено стохастическое изменение сигнала флуоресценции от уровня шумов до максимального значения, которое, как оказалось, не связано с флуктуацией энергии лазерного излучения на выходе системы усиления.

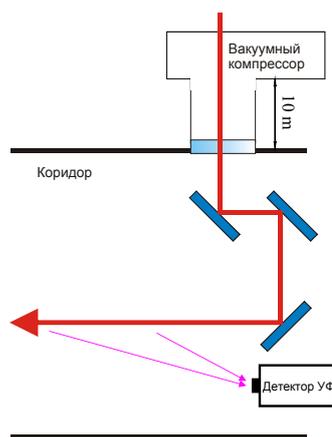


Рис. 6. Эксперимент по наблюдению нестабильности сигнала флуоресценции молекулярного азота, сопровождающей филаментацию фемтосекундного импульса на длине волны 800 нм длительностью 45 фс, энергией 40 мДж и диаметром 25 мм

На основе результатов численного моделирования лабораторного эксперимента установлено, что стохастическое изменение сигнала флуоресценции объясняется множественной филаментацией в воздухе, которая развивается следующим образом: небольшое стохастическое изменение положения начальных возмущений на профиле пучка (и, как следствие, «родительских» филаментов) качественно меняет процесс образования «дочерних» филаментов, причем это изменение носит стохастический характер. Поскольку возбуждение молекул азота происходит в областях высокой интенсивности светового поля в филаментах, то от выстрела к выстрелу образуется различное число возбужденных молекул и ионов азота в случайно расположенных областях. В результате, и флуоресценция этих молекул будет проходить стохастическим образом. Таким образом, удалось объяснить результаты эксперимента, изложенные выше..

В **параграфе 4.3** показано, что нестабильность множественной филаментации приводит к существенной флуктуации интегральной по сечению (линейной) плотности самонаведенной лазерной плазмы.

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

В **Главе 5** приведены результаты изучения генерации суперконтинуума при филаментации мощных фемтосекундных лазерных импульсов. Изложена физическая картина формирования конической эмиссии как следствие фазовой самомодуляции светового поля в пространстве и времени. Исследованы частотно-угловые спектры суперконтинуума при множественной филаментации.

В **параграфе 5.1** исследован частотно-угловой спектр излучения фемтосекундного импульса в филаменте. Схема эксперимента приведена на рис. 7. Апертура диаметром 4 мм размещалась на оси пучка на расстоянии  $z = z_0$  от выхода лазерной системы. Она блокировала излучение конической эмиссии, генерация которой происходила при  $z < z_0$ .

На расстоянии  $z = z_0 + 2$  м располагался непрозрачный экран, в роли которого выступало лезвие бритвы. Он прерывал филамент, не оказывая влияние на распространение излучения в форме конической эмиссии. Измерения угла расходимости конической эмиссии проводились на расстоянии  $z = z_0 + 20$  м от выхода лазерной системы, где размещался белый экран, перед которым размещались интерференционные светофильтры для выделения конкретной длины волны  $\lambda$ . Измерения проводились при  $\lambda = 500, 550, 600, 650, 700, 750$  нм. Установлено, что угол расходимости излучения конической эмиссии в антистоксовой области спектра возрастает с уменьшением длины волны в качественном согласии с экспериментальными данными. В стоксовом спектральном диапазоне  $\lambda > 800$  нм кольцевых структур не наблюдалось. При численном моделировании также получены кольцевые структуры для излучения конической эмиссии на разных длинах волн в антистоксовой области, причем угол, под которым распространяется это излучение, возрастает с уменьшением длины волны излучения (см. рис. 8).

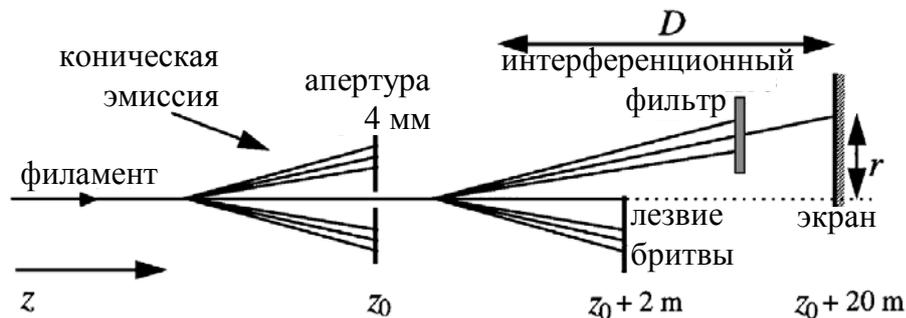


Рис. 7. Экспериментальная схема для определения частотно-углового спектра излучения суперконтинуума, сопровождающего филаментацию

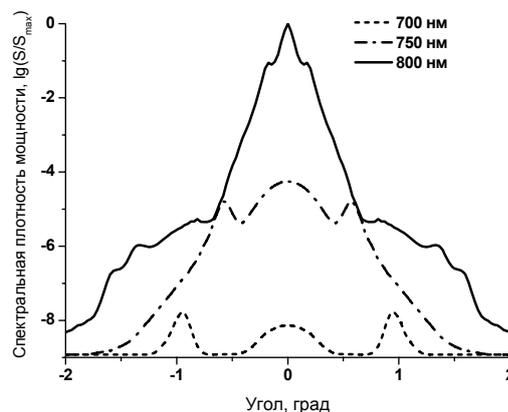


Рис. 8. Угловые распределения частотных компонент спектра лазерного импульса длительностью 138 фс и энергией 8.1 мДж в воздухе на расстоянии  $z = 50$  м, соответствующих длинам волн 700 нм (штрихи), 750 нм (штрихпунктирная кривая) и 800 нм (сплошная кривая). Спектральная плотность мощности приведена в логарифмическом масштабе  $\lg(S(\lambda, \theta)/S_{\max})$ , где  $S_{\max}$  — ее максимальное значение при  $\lambda = 800$  нм

В параграфе 5.2 показано, что излучение суперконтинуума распространяется как в

форме конической эмиссии, так и на оси филамента (см. рис. 8). Установлена связь между временными и пространственными градиентами фазы излучения, как источниками пространственного и спектрального уширения импульса.

В **параграфе 5.3** показано, что при множественной филаментации происходит интерференция колец конической эмиссии коротковолновой части спектра излучения суперконтинуума, расходящихся вокруг каждого из филаментов (рис. 9а). В длинноволновой области оно распространяется в центрах филаментов (рис. 9б). Результаты эксперимента находятся в качественном согласии с экспериментом по распространению мощного фемтосекундного импульса в воздухе. В эксперименте наблюдалось формирование множества филаментов, каждый из которых был источником излучения суперконтинуума, которое детектировалось *CCD*-камерой. Перед ней располагался светофильтр для регистрации излучения суперконтинуума на конкретной длине волны.

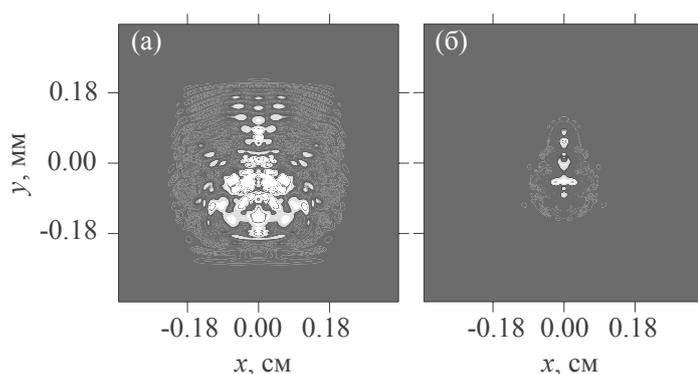


Рис. 9. Пространственные распределения плотности энергии излучения суперконтинуума (а) в коротковолновой части спектра (750 нм), (б) — в длинноволновой (850 нм). Центральная длина волны составляет 800 нм

В **параграфе 5.4** сформулированы выводы по Главе 5.

В **Главе 6** рассмотрены возможности управления филаментацией с помощью масштабирования пучка, при совместном изменении диаметра пучка и фазовой модуляции импульса. Исследован метод формирования упорядоченной квадратной матрицы филаментов в условиях амплитудно-фазовых искажений фронта пучка посредством наложения на излучение поглощающей сетки квадратного сечения.

В **параграфе 6.1** дано описание эксперимента, проведенного в условиях аналогичной представленной на рис. 6 эксперимента, 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 в три раза сигнал флуоресценции стабилизировался и возрос примерно на 3 порядка (см. рис. 10)

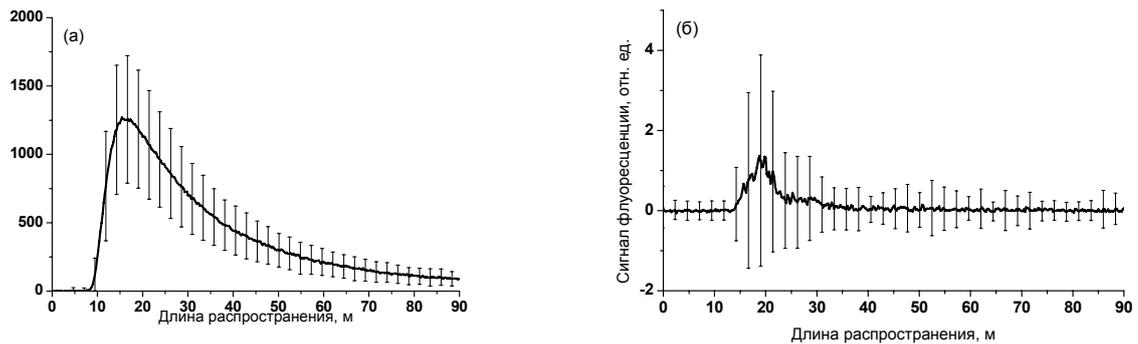


Рис. 10. Усредненный по 300 выстрелам лазерной системы сигнал флуоресценции молекулярного и однократно ионизированного азота. (а) — большой пучок (диаметр 25 мм), (б) — меньший пучок (диаметр 8 мм)

При моделировании 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. Так, при уменьшении диаметра пучка от 2.2 до 1.4 мм энергия филамента в приосевой области возрастает от примерно 3% от энергии начального импульса до примерно 25%. При этом ее относительный разброс уменьшается примерно втрое: со 100% до 30% (см. рис. 11). Количество филаментов как в случае большего, так и меньшего пучков не меняется, однако при уменьшении размеров пучка возрастает средний диаметр филамента. Это качественно объясняет обнаруженный в эксперименте рост сигнала флуоресценции при уменьшении диаметра пучка.

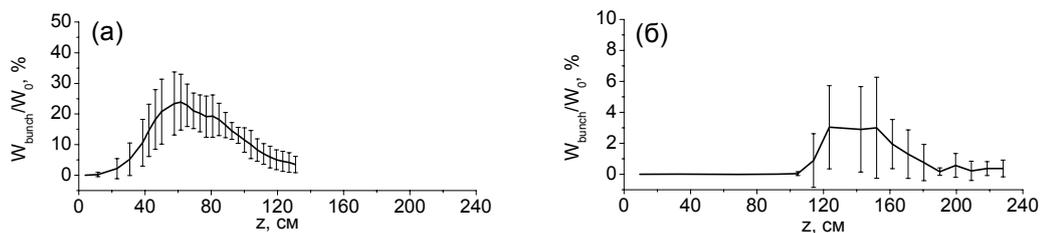


Рис. 11. Средняя энергия в области флуоресценции. (а) соответствует филаментации пучка меньшего диаметра, (б) — большего диаметра

В параграфе 6.2 установлена возможность позиционирования филаментов на заданном расстоянии при распространении фазомодулированных фемтосекундных импульсов различного диаметра и длительности. Для конкретности выбраны два импульсных излучения: большой радиус пучка  $a_0 = 1.5$  мм и небольшая фазовая модуляция  $\tau_p = 100$  фс (широкий короткий импульс), другой, с меньшим радиусом

$a_0 = 1$  мм, и большей длительностью  $\tau_p = 200$  фс (узкий длинный импульс). Длительность спектрально ограниченного импульса для обоих случаев была одинаковой и составляла  $2\tau_0 = 54$  фс. Плазменные каналы, полученные в результате численного моделирования в обоих случаях, показаны на рис. 12. 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 импульса образуется плотный пучок филаментов. При распространении излучения в виде длинного импульса с малым диаметром пучка происходит рост энергии в области флуоресценции и линейной плотности плазмы по сравнению со случаем короткого импульса с большим диаметром пучка.

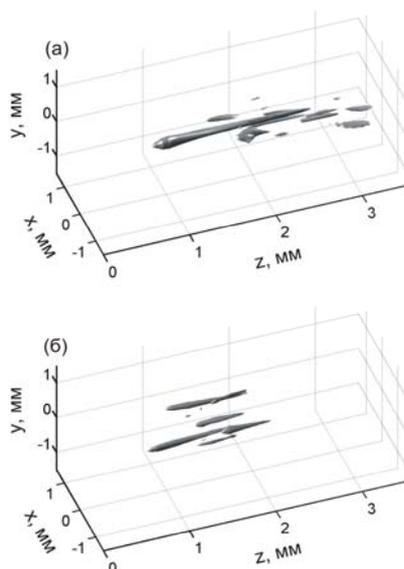


Рис. 12. Плазменные каналы многих филаментов для (а) узкого длинного импульса, и (б) широкого короткого импульса. Наиболее протяженный и широкий канал соответствует случаю (а)

В параграфе 6.3 продемонстрирована возможность пространственной регуляризации пучка филаментов в поперечном сечении импульса при использовании поглощающей сетки после выхода лазерной системы. Эксперимент (см. рис. 13) проведен на установке университета Лаваль в Канаде. Излучение титан-сапфирового лазера на длине волны 810 нм длительностью импульсов 42 фс, энергией до 15 мДж, радиусом пучка 4 мм распространялось в кювете с метанолом длиной 1 см. Для регистрации филаментов на выходном окне кюветы использовалась *CCD*-камера, перед которой помещалось узкополосное диэлектрическое зеркало, отсекающее излучение на длине волны лазера, и фильтр для выделения коротковолновой ветви направленного излучения суперконтинуума, сопровождающего филаментацию. Для получения случайных возмущений интенсивности перед входным окном кюветы на расстоянии 102 — 120 мм

располагался рандомизатор из полиэтиленовой пленки со случайным распределением коэффициента пропускания. Относительные флуктуации интенсивности после рандомизатора достигали в среднем 60%, их пространственный масштаб лежал в интервале 25 — 140 мкм. Пространственная регуляризация множественной филаментации осуществлялась сеточным транспарантом с периодом 240 мкм и штрихами шириной 20 мкм. Расстояние между сеткой и входным окном кюветы менялось от 5.5 до 43 мм с шагом 2 мм. Установлено, что филаменты образуются в окрестности центров ячеек сетки как в отсутствие, так и при наличии амплитудно-фазовых возмущений (см. рис. 14).

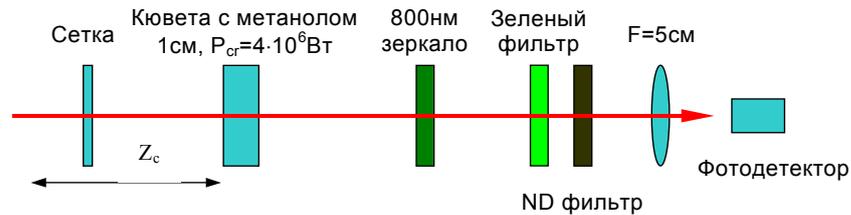


Рис. 13. Экспериментальная установка по наблюдению формирования упорядоченной картины множественной филаментации при использовании поглощающей сетки на выходе лазерной системы

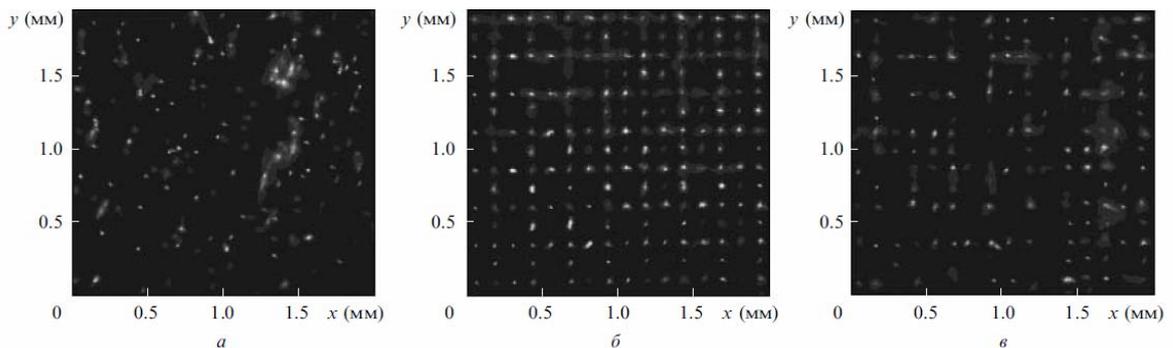


Рис. 14. Картина расположения филаментов в поперечном сечении импульса энергией 2 мДж, длительностью 42 фс, регистрируемая в зеленом свете на выходном окне кюветы с метанолом: «стохастическая» множественная филаментация с рандомизатором на расстоянии 102 мм перед кюветой (а), «периодическая» — с сеточным транспарантом на расстоянии 13.5 мм перед кюветой (б), «регуляризованная» — с рандомизатором и сеткой на указанных выше расстояниях (в)

**В параграфе 6.4** сформулированы выводы по Главе 6.

В **Главе 7** исследовано явление нелинейного самосжатия импульса до нескольких колебаний светового поля при филаментации. Определена оптимальная апертура для регистрации сжатого импульса. Показана возможность устойчивой генерации сверхкоротких импульсов при оптимизации диаметра апертуры на выходе лазерной системы и давления газовой среды, в которой развивается филаментация.

В **параграфе 7.1** представлено описание эксперимента, поставленного на основе предварительного численного моделирования автором процесса распространения импульса в филаменте и генерации суперконтинуума в воздухе. Схема эксперимента

представлена на рис. 15. Формирующий филамент спектрально ограниченный лазерный импульс имел параметры: длина волны  $\lambda_0 = 805$  нм, длительность  $(55 \pm 5)$  фс, спектральная ширина  $(23 \pm 2)$  нм, энергия  $W_0 = 4$  мДж, (эти параметры будут использованы при моделировании). С помощью телескопа, состоящего из линзы с фокусным расстоянием 4.56 м и сферического диэлектрического зеркала с фокусным расстоянием  $-1$  м, излучение сжималось до диаметра  $1.2 \pm 0.2$  мм по уровню  $1/2$  от максимума плотности энергии излучения и выводилось на воздушную трассу (ее начало  $z = 0$  соответствует поверхности сферического зеркала телескопа) для формирования одиночного филамента. Длина трассы составляла 7 м. Установлено, что энергия суперконтинуума в апертуре регистрации сначала возрастает, а затем уменьшается в связи с расходимостью излучения в форме конической эмиссии.

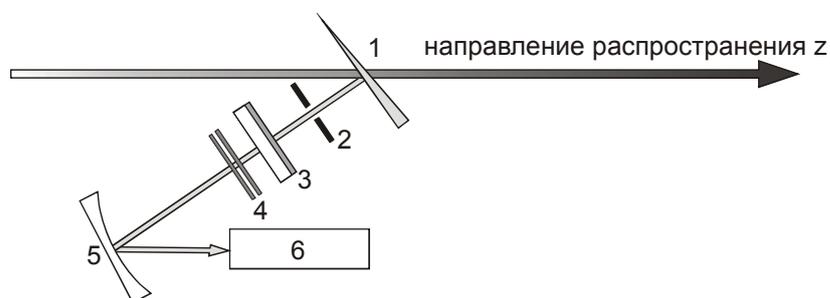


Рис. 15. Схема измерения спектра излучения в филаменте: 1 — кварцевый клин, 2 — диафрагма, 3 — диэлектрическое зеркало, отражающее излучение в диапазоне 750 — 850 нм, 4 — нейтральные светофильтры, 5 — внеосевое параболическое зеркало с алюминиевым покрытием, 6 — волоконный спектрометр или пироэлектрический датчик

В параграфе 7.2 приведены результаты численного моделирования процесса формирования импульса длительностью  $\sim 5$  фс с плоским распределением фазы спектральных компонент в диапазоне около 80 нм с центральной длины волны 800 нм. Установлено, что оптимальным диаметром апертуры для регистрации самосжатого в филаменте импульса является 100 мкм. Для иллюстрации этого на рис. 16 показана зависимость длительности импульса при апертуре регистрации 100 мкм (а) и 200 мкм (б). В первом случае длительность импульса в апертуре практически не отличается от его длительности на оси, достигая 5 фс, тогда как во втором удается добиться минимальной длительности около 20 фс.

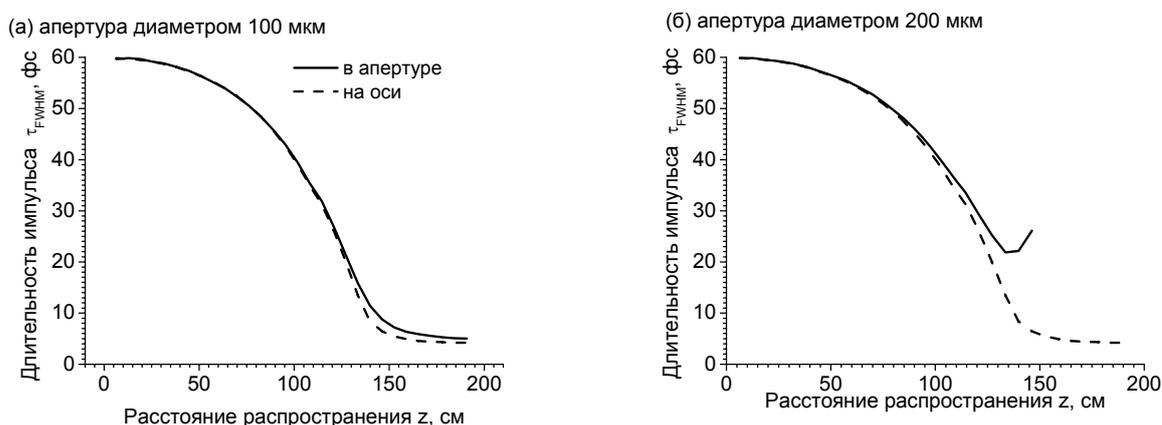


Рис. 16. (а, б) — зависимость длительности (сплошная немаркированная кривая) и от расстояния  $z$  для апертур диаметром 100 и 200 мкм соответственно. Также на (а, б) штриховой кривой показана зависимость длительности импульса на оси филамента (при  $r = 0$ )

В параграфе 7.3 на основе результатов эксперимента и численного моделирования показана возможность устойчивого детектирования импульсов из нескольких колебаний поля при оптимизации давления аргона в кювете. Оптимальной с точки зрения регистрации сжатых в филаменте импульсов является апертура минимального диаметра на выходе лазерной системы, после прохождения через которую в импульсе содержится 1 — 3 критических мощности самофокусировки. Это приводит к формированию одного филамента, уединенный сжатый импульс в котором существует десятки сантиметров. Обнаружено удовлетворительное согласие экспериментальных и расчетных (в условиях эксперимента) результатов.

В параграфе 7.4 сформулированы выводы по Главе 7.

В Главе 8 разработана модель поляризационного самовоздействия и кроссвзаимодействия световых полей в филаменте. Проведено сравнение характеристик создаваемых излучением с линейной и циркулярной поляризацией. Показана устойчивость этих поляризационных состояний. Исследовано формирование и развитие эллиптической поляризации в импульсе второй гармоники, распространяющемся совместно с формирующим филамент импульсом основной частоты.

В параграфе 8.1 разработана векторная (в циркулярном базисе) модель распространения, самовоздействия и кроссвзаимодействия световых полей в филаменте. Модель, построенная на основе огибающей, позволяет описывать двулучепреломление при вырожденном четырехволновом смешении импульсов первой (формирующей филамент) и второй гармоник фемтосекундного лазерного излучения.

В параграфе 8.2 показано, что в высокоинтенсивном филаменте линейное и циркулярное состояния поляризации устойчивы: при небольших отклонениях степени эллиптичности они восстанавливаются. Интенсивность в филаменте, сформированном

импульсом с циркулярной поляризацией, примерно в 1.5 раза выше, чем в случае линейной поляризации (120 и 180 ТВт/см<sup>2</sup> соответственно).

В параграфе 8.3 исследовано наведенное полем филамента (первая гармоника) двулучепреломление второй гармоники. Обнаружено явление кроссфокусировки излучения второй гармоники полем филамента (см. рис. 17а, б). Показано, что изменение состояния поляризации излучения импульса второй гармоники сначала развивается в центре пучка (см. рис. 17г, д, и, к). После окончания филамента поле с измененной поляризацией дифрагирует на периферию пучка (см. рис. 17е, ж, л, м).

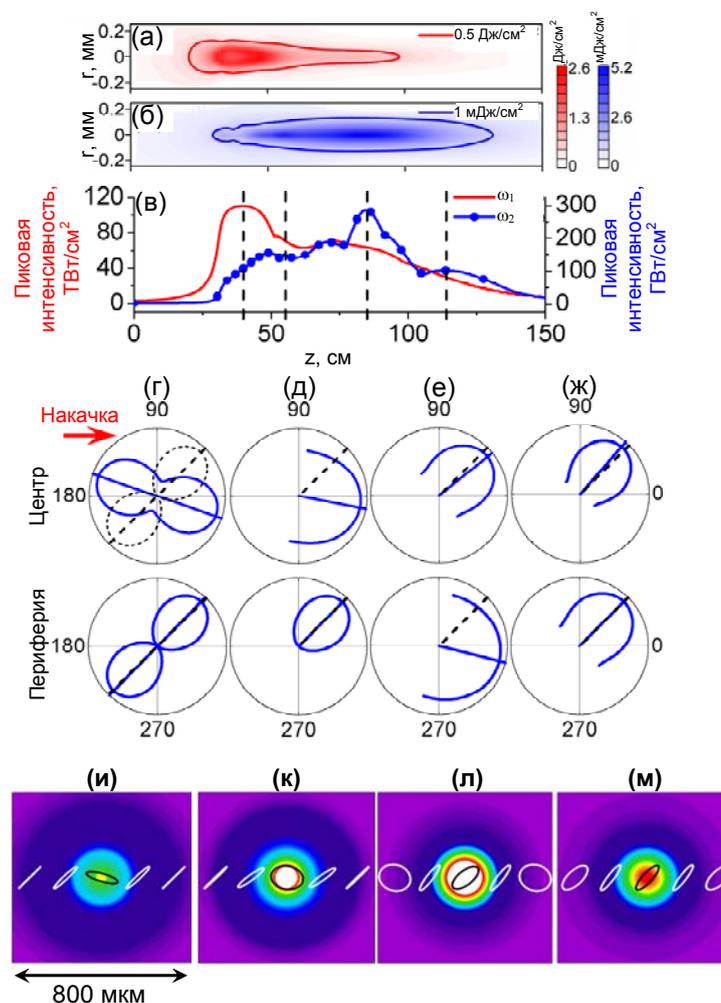


Рис. 17. (а, б) — распределения плотности энергии первой и второй гармоник, соответственно, в координатах  $(r, z)$ . (в) — зависимость пиковой интенсивности импульса накачки (красная кривая) и пробного (синяя кривая) от расстояния  $z$ . Вертикальными штриховыми прямыми показаны расстояния  $z = 40, 55, 85$  и  $112$  см, на которых анализируется состояние поляризации на (г — ж) и (и — м). На (г — ж) в верхнем ряду показаны распределения плотности энергии в зависимости от угла анализатора в центре пучка ( $0 \leq r \leq 100$  мкм), в нижнем ряду — в периферийном кольце ( $320 \leq r \leq 370$  мкм), штриховые кривые показывают начальное состояние поляризации. (и — м) — эллипсы поляризации в различных положениях на профиле пучка

Установлено, что энергия второй гармоники с поляризацией, перпендикулярной исходной, достигает своего максимума при начальном угле между векторами

электрического поля первой и второй гармоник, равно  $45^\circ$ , и оказывается равной равна для углов  $45^\circ \pm \alpha$ , где  $0 < \alpha \leq 45^\circ$  (рис. 19 а, кривая, отмеченная звездами).

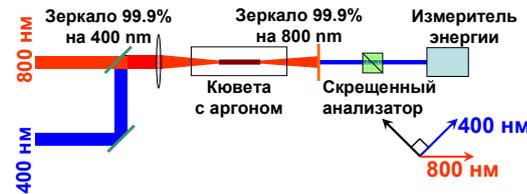


Рис. 18. Схема эксперимента для измерения наведенного филаментом двулучепреломления в кювете с аргоном

Для сравнения с теоретическими предсказаниями был поставлен эксперимент, схема которого изображена на рис. 18. Излучение первой (800 нм, накачка, формирует филамент) и второй (400 нм, пробный импульс) гармоник смешивалось в кювете с аргоном, где и происходило изменение состояния поляризации пробного импульса. Угол между векторами электрического поля импульсов первой и второй гармоник варьировался в диапазоне от  $0$  до  $90^\circ$ . После выхода из кюветы накачка блокировалась зеркалом, а пробный импульс, проходя через анализатор, попадал на измеритель энергии. Варьируя ось анализатора, определялось состоянии поляризации пробного импульса. На рис. 19 показана зависимость энергии пробных импульсов после анализатора, полученная численно (черная штриховая кривая), и экспериментально (синяя сплошная кривая, маркированная звездами).

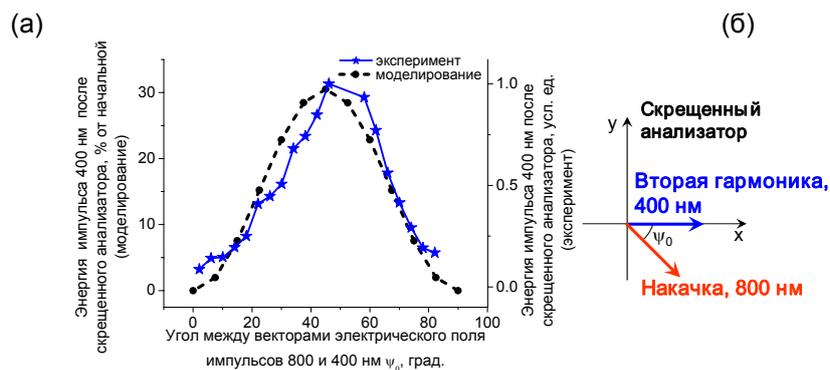


Рис. 19. (а) — энергия импульса второй гармоники (400 нм), прошедшего скрещенный анализатор (б), в зависимости от угла между направлениями электрического поля накачки (800 нм) и второй гармоники (400 нм). Кривая, отмеченная звездами, — эксперимент, черная штриховая, отмеченная кругами, — теория

**В параграфе 8.4 сформулированы выводы по Главе 8.**

## РЕЗУЛЬТАТЫ РАБОТЫ

1. Создана физическая модель образования протяженного филамента с высокой

концентрацией энергии фемтосекундного лазерного излучения на основе обобщения на нестационарную самофокусировку в условиях нелинейной рефракции в самонаведенной лазерной плазме модели движущихся фокусов. Обобщенная модель воспроизводит протяженный филамент с высокой плотностью энергии, формирование в поперечном сечении пучка колец в распределении интенсивности, образующихся вследствие абберационной дефокусировки в самонаведенной лазерной плазме, эффект рефокусировки, который состоит в немонотонном изменении плотности энергии вдоль филамента. Высокая плотность энергии в протяженном филаменте является результатом концентрации светового поля в непрерывной последовательности нелинейных фокусов, создаваемой временными слоями на переднем фронте импульса.

2. Показано, что динамический сценарий множественной филаментации фемтосекундного лазерного излучения высокой мощности состоит в образовании «родительских» филаментов из начальных возмущений в поперечном распределении интенсивности, зарождении «дочерних» на возмущениях, возникающих при интерференции кольцевых структур светового поля, расходящихся от осей родительских филаментов, перекачке энергии между филаментами и «выживании» одного или нескольких из них.

3. Установлено, что образование суперконтинуума и конической эмиссии при филаментации фемтосекундного лазерного излучения является результатом его пространственно-временной самомодуляции, при которой сверхуширение частотного спектра возникает вследствие временного градиента фазы светового поля, а углового спектра - вследствие пространственного градиента фазы. Высокочастотные компоненты спектра образуют расходящуюся под малым углом коническую эмиссию суперконтинуума, тогда как излучение низкочастотных распространяется преимущественно вдоль оптической оси.

4. Определено, что одновременное изменение фазовой модуляции светового поля и поперечного размера пучка фемтосекундного лазерного излучения создает плотное множество филаментов и плазменных каналов на заданном расстоянии. Это позволяет повысить стабильность и уровень регистрируемого сигнала флюоресценции атмосферного азота, что имеет большое значения для дистанционного зондирования.

5. Показано, что периодическая амплитудная модуляции светового поля в поперечном сечении лазерного пучка позволяет осуществить пространственную регуляризацию стохастического множества филаментов в условиях амплитудно-фазовых флуктуаций начального излучения.

6. Установлено, что в филаменте осуществляется самокомпрессия лазерного

импульса. При оптимизации диаметра выходной апертуры и давления газа возможно формирование на длине волны 800 нм самосжатого до  $\sim 5$  фс импульса с плоским распределением фазы спектральных компонент шириной около 80 нм.

7. Показано, что фемтосекундный филамент линейно-поляризованного лазерного излучения создает оптическую анизотропию в объеме изотропной прозрачной среды. Вследствие наведенного двулучепреломления линейно-поляризованное пробное излучение в филаменте эволюционирует в эллиптически поляризованное.

#### ПУБЛИКАЦИИ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

1. Бирюков А.А., Панов Н.А., Волков М.В., Урюпина Д.С., Волков Р.В., **Косарева О.Г.**, Савельев А.Б. «Особенности филаментации фемтосекундного лазерного излучения с негауссовым поперечным пространственным профилем», *Квантовая электроника* **41**, 958-962 (2011).
2. **Kosareva O.G.**, Panov N.A., Volkov R.V., Andreeva V.A., Borodin A.V., Esaulkov M.N., Chen Y., Marceau C., Makarov V.A., Shkurinov A.P., Savel'ev A.B., Chin S.L. "Analysis of Dual Frequency Interaction in the Filament with the Purpose of Efficiency Control of THz Pulse Generation", *Journal of Infrared, Millimeter and Terahertz Waves* **32**, 1557-1567 (2011).
3. Yuan S., Wang T.-J., **Kosareva O.**, Panov N., Makarov V., Zeng H., Chin S.L. "Measurement of birefringence inside a filament", *Physical Review A* **84**, 013838 (2011).
4. Панов Н.А., **Косарева О.Г.**, Андреева В.А., Савельев А.Б., Урюпина Д.С., Волков Р.В., Макаров В.А., Шкуринов А.П. «Угловое распределение интенсивности терагерцовой эмиссии плазменного канала фемтосекундного филамента», *Письма в журнал теоретической и экспериментальной физики* **93**, 715 (2011).
5. Daigle J.-F., **Kosareva O.**, Panov N., Wang T.J., Hosseini S., Yuan S., Roy G., Chin S.L. "Formation and evolution of intense, post-filamentation, ionization-free low divergence beams", *Optical Communications* **284**, 3601 (2011).
6. **Kosareva O.**, Daigle J.-F., Panov N., Wang T., Hosseini S., Yuan S., Roy G., Makarov V., Chin S.L. "Arrest of self-focusing collapse in femtosecond air filaments: higher order Kerr or plasma defocusing?", *Optics Letters* **36**, 1035 (2011).
7. Панов Н.А., Косарева О.Г., Савельев-Трофимов А.Б., Урюпина Д.С., Пережогин И.А.,

- Макаров В.А. «Особенности филаментации фемтосекундных импульсов гауссовой формы с эллиптической поляризацией, близкой к линейной или циркулярной», *Квантовая электроника* **41**, 160 (2011).
8. **Kosareva O.**, Panov N., Makarov V., Perezhogin I., Marceau C., Chen Y., Yuan S., Wang T., Zeng H., Savel'ev A., Chin S.L. "Polarization rotation due to femtosecond filamentation in an atomic gas", *Optics Letters* **35**, 2904 (2010).
  9. Bérubé J.-P., Vallée R., Bernier M., **Kosareva O.G.**, Panov N.A., Kandidov V.P., Chin S.L. "Self and forced periodic arrangement of multiple filaments in glass", *Optics Express* **18**, 1801 (2010).
  10. Uryupina D., Kurilova M., Mazhorova A., Panov N., Volkov R., Gorgutsa S., **Kosareva O.**, Savel'ev A., Chin S.L. "Few-cycle optical pulse production from collimated femtosecond laser beam filamentation", *Journal of the Optical Society of America B* **27**, 667 (2010).
  11. Курилова М.В., Урюпина Д.С., Мажорова А.В., Волков Р.В., Горгуца С.Р., Панов Н.А., **Косарева О.Г.**, Савельев А.Б. «Формирование оптических импульсов длительностью до 8 фс при филаментации коллимированного фемтосекундного лазерного излучения в аргоне», *Квантовая электроника* **39**, 879 (2009).
  12. **Kosareva O.G.**, Liu W., Panov N.A., Bernhardt J., Ji Z., Sharifi M., Li R., Xu Z., Liu J., Wang Z., Ju J., Lu X., Jiang Y., Leng Y., Liang X., Kandidov V.P., Chin S.L. "Can we reach very high intensity in air with femtosecond PW laser pulses?", *Laser Physics* **19**, 1776 (2009).
  13. Панов Н.А., Саввин А.Д., **Косарева О.Г.**, Савельев-Трофимов А.Б., Кандидов В.П., Потанин С.А., Польских С.Д., «Фемтосекундные филаменты как новый тип опорных лазерных источников для астрономической адаптивной оптики», *Квантовая электроника* **39**, 560 (2009).
  14. Курилова М.В., Урюпина Д.С., Мажорова А.В., Горгуца С.Р., Волков Р.В., **Косарева О.Г.**, Савельев А.Б. «Исследование трансформации спектра фемтосекундного лазерного излучения при его филаментации в газовой среде», *Оптика и спектроскопия*, **107**, 459 (2009).
  15. Chen Y., Wang T., Marceau C., Theberge F., Chateaufneuf M., Dubois J., **Kosareva O.**, Chin S.L. "Characterization of terahertz emission from a dc-biased filament in air", *Applied Physics Letters* **95**, 101101 (2009).
  16. Кандидов В.П., Шлёнов С.А., **Косарева О.Г.** «Филаментация мощного

фемтосекундного лазерного излучения» *Квантовая электроника* **39**, 205 (2009).

17. Chin S., Xu H., Luo Q., Théberge F., Liu W., Daigle J., Kamali Y., Simard P., Bernhardt J., Hosseini S., Sharifi M., Méjean G., Azarm A., Marceau C., **Kosareva O.**, Kandidov V., Aközbek N., Becker A., Roy G., Mathieu P., Simard J., Châteauneuf M., Dubois J. “Filamentation “remote” sensing of chemical and biological agents/pollutants using only one femtosecond laser source”, *Applied Physics B* **95**, 1 (2009).
18. Daigle J.-F., **Kosareva O.G.**, Panov N.A., Begin M., Lessard F., Marceau C., Kamali Y., Roy G., Kandidov V.P., Chin S.L. “A simple method to significantly increase filaments’ length and ionization density”, *Applied Physics B* **94**, 249 (2009).
19. Chin S.L., Chen Y., **Kosareva O.G.**, Kandidov V.P., Théberge F. “What is a Filament?”, *Laser Physics* **18**, 962 (2008).
20. Chen Y., Théberge F., Marceau C., Xu H., Aközbek N., **Kosareva O.G.**, Chin S.L. “Observation of filamentation-induced continuous self-frequency down shift in air”, *Applied Physics B* **91**, 219 (2008).
21. **Kosareva O.G.**, Panov N.A., Uryupina D.S., Kurilova M.V., Mazhorova A.V., Savel’ev A.B., Volkov R.V., Kandidov V.P., Chin S.L. “Optimization of a femtosecond pulse self-compression region along a filament in air”, *Applied Physics B* **91**, 35 (2008).
22. Chin S.L., Liu W., **Kosareva O.G.**, Kandidov V.P. “The Physics of Intense Femtosecond Laser Filamentation”, Self-focusing: Past and Present, *Topics in Applied Physics* **114**, 3491. Boyd R.W., Lukishova S.G., Shen Y.R. Editors, Springer, (2008).
23. Kandidov V.P., Dormidonov A.E., **Kosareva O.G.**, Chin S.L., Liu W. “Self-focusing and Filamentation of Powerful Femtosecond Laser Pulses”, Self-focusing: Past and Present, *Topics in Applied Physics* **114**, 371. Boyd R.W., Lukishova S.G., Shen Y.R. Editors, Springer, (2008).
24. Kandidov V.P., Dormidonov A.E., **Kosareva O.G.**, Aközbek N., Scalora M., Chin S.L. “Optimum small-scale management of random beam perturbations in a femtosecond laser pulse”, *Applied Physics B* **87**, 29 (2007).
25. **Kosareva O.G.**, Murtazin I.N., Panov N.A., Savel’ev A.B., Kandidov V.P., Chin S.L. “Pulse shortening due to filamentation in transparent medium”, *Laser Physics Letters* **4**, 126 (2007).
26. 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).

27. Chen Y., Théberge F., **Kosareva O.G.**, Panov N.A., Kandidov V.P., Chin S.L. “Evolution and termination of a femtosecond laser filament in air”, *Optics Letters* **32**, 3477 (2007).
28. Shlenov S.A., Kandidov V.P., **Kosareva O.G.**, Bezborodov A.E., Fedorov V.Yu. “Spatio-temporal control of femtosecond laser pulse filamentation in the atmosphere”. *Proceedings of SPIE*, **6733**, 67332M (2007).
29. **Kosareva O.G.**, Nguyen T., Panov N.A., Liu W., Saliminia A., Kandidov V.P., Akozbek N., Scalora M., Vallee R., Chin S.L. “Array of femtosecond plasma channels in fused silica”, *Optics Communications* **267**, 511 (2006).
30. Panov N.A., **Kosareva O.G.**, Kandidov V.P. “Regularization of multiple filaments in atmospheric turbulence”, *Proceedings of SPIE* **6255**, 212 (2006).
31. Панов Н.А., **Косарева О.Г.**, Муртазин И.Н. “Упорядоченные филаменты фемтосекундного импульса в объеме прозрачной среды” *Оптический журнал* **73**, 45 (2006).
32. **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).
33. **Косарева О.Г.**, Григорьевский А.В., Кандидов В.П. “Формирование протяженных плазменных каналов в конденсированной среде в результате аксиконной фокусировки фемтосекундного лазерного импульса”, *Квантовая электроника* **35**, 1013 (2005).
34. **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).
35. Panov N.A., **Kosareva O.G.**, Kandidov V.P., Aközбек 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).
36. 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).
37. Tang X.P., Becker A., Liu W., Sharifi M., **Kosareva O.**, Kandidov V.P., Agostini P., Chin S.L. “Enhanced fragmentation of toluene through linear and nonlinear increase of

- the focal spot area of an ultrashort laser pulse”, *Physical Review A* **71**, 045401 (2005).
38. Tang X.P., Becker A., Liu W., Sharifi M., **Kosareva O.G.**, Kandidov V.P., Agostini P., Chin S.L. “Self-action effects in ionization and fragmentation of toluene by femtosecond laser pulses”, *Applied Physics B* **80**, 547 (2005).
39. Kandidov V.P., Aközbek N., Scalora M., **Kosareva O.G.**, Nyakk A.V., Luo Q., Hosseini S.A., Chin S.L. “Towards a control of multiple filamentation by spatial regularization of a high-power femtosecond laser pulse”, *Applied Physics B* **80**, 267 (2005).
40. 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 (2005).
41. Кандидов В.П., Акозбек Н., Скалора М., **Косарева О.Г.**, Някк А.В., Луо Ч., Хоссейни С.А., Чин С. “Метод пространственной регуляризации пучка филаментов в фемтосекундном лазерном импульсе”, *Квантовая электроника* **34**, 879 (2004).
42. 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).
43. Кандидов В.П., Голубцов И.С., **Косарева О.Г.** “Источники суперконтинуума в мощном фемтосекундном лазерном импульсе при распространении в жидкости и газе”, *Квантовая Электроника* **34**, 348 (2004).
44. W 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).
45. Голубцов И.С., Кандидов В.П., **Косарева О.Г.** “Начальная фазовая модуляция мощного фемтосекундного лазерного импульса как средство управления его филаментацией и генерацией суперконтинуума в воздухе”, *Квантовая Электроника* **33**, 525 (2003).
46. Кандидов В.П., **Косарева О.Г.**, Колтун А.А. “Нелинейно-оптическая трансформация мощного фемтосекундного лазерного импульса в воздухе”, *Квантовая Электроника* **33**, 69 (2003).
47. Liu W., Chin S.L., **Kosareva O.**, Golubtsov I.S., Kandidov V.P., “Multiple refocusing of a femtosecond laser pulse in a dispersive liquid (methanol)”, *Optics Communications* **225**,

- 193 (2003).
48. Liu W., **Kosareva O.**, Golubtsov I.S., Iwasaki A., Becker A., Kandidov V.P., Chin S.L. “Femtosecond laser pulse filamentation versus optical breakdown in H<sub>2</sub>O”, *Applied Physics B* **76**, 215 (2003).
49. Kandidov V.P., **Kosareva O.G.**, Golubtsov I.S., Liu W., Becker A., Akozbek N., Bowden C.M., Chin S.L. “Self-transformation of a powerful femtosecond laser pulse into a white-light laser pulse in bulk optical media (or supercontinuum generation)”, *Applied Physics B* **77**, 149 (2003).
50. Chin S.L., Talebpour A., Yang J., Petit S., Kandidov V.P., **Kosareva O.G.**, Tamarov M.P. “Filamentation of femtosecond laser pulses in turbulent air”, *Applied Physics B* **74**, 67 (2002).
51. Liu W., **Kosareva O.**, Golubtsov I.S., Iwasaki A., Becker A., Kandidov V.P., Chin S.L. “Random deflection of the white light beam during self-focusing and filamentation of a femtosecond laser pulse in water” *Applied Physics B* **75**, 595 (2002).
52. Голубцов И.С., **Косарева О.Г.** “Влияние различных физических факторов на генерацию конической эмиссии при распространении мощных фемтосекундных лазерных импульсов в воздухе”, *Оптический журнал* **69**, 21 (2002).
53. . Chin S.L., Petit S., Liu W., Iwasaki A., Nadeu M.-C., Kandidov V.P., **Kosareva O.G.**, Andrianov K.Yu. “Interference of transverse rings in multifilamentation of powerful femtosecond laser pulses in air”, *Optics Communications* **210**, 329 (2002).
54. Голубцов И.С., Кандидов В.П., **Косарева О.Г.** “Коническая эмиссия мощного фемтосекундного лазерного импульса в атмосфере”, *Оптика атмосферы и океана* **14**, 335 (2001).
55. Golubtsov I.S., **Kosareva O.G.**, Mozhaev E.I. “Nonlinear-optical spectral transformation of the powerful femtosecond laser pulse in air”, *Physics of Vibrations* **8**, 73 (2000).
56. Кандидов В.П., **Косарева О.Г.**, Можаяев Е.И., Тамаров М.П. “Фемтосекундная нелинейная оптика атмосферы”, *Оптика атмосферы и океана* **13**, 429 (2000).
57. Кандидов В.П., **Косарева О.Г.**, Тамаров М.П., Броде А., Чин С. “Зарождение и блуждание филаментов при распространении мощного лазерного излучения в турбулентной атмосфере”, *Квантовая Электроника* **29**, 73 (1999).
58. Chin S.L., Brodeur A., Petit S., **Kosareva O.G.**, Kandidov V.P. “Filamentation and supercontinuum generation during the propagation of powerful ultrashort laser pulses in

- optical media (white light laser)", *Journal of Nonlinear Optical Physics & Materials* **8**, 121 (1999).
59. Brodeur A., Chien C.Y., Ilkov F.A., Chin S.L., **Kosareva O.G.**, Kandidov V.P. "Moving focus in the propagation of ultrashort laser pulses in air", *Optics Letters* **22**, 304 (1997).
60. **Kosareva O.G.**, Kandidov V.P., Brodeur A., Chien C.Y., Chin S.L. "Conical emission from laser-plasma interactions in the filamentation of powerful ultrashort laser pulses in air", *Optics Letters* **22**, 1332 (1997).
61. Кандидов В.П., **Косарева О.Г.**, Бродер А., Чин С.Л. "Состояние исследований по филаментации мощных субпикосекундных лазерных импульсов в газах", *Оптика атмосферы и океана* **10**, 1539 (1997)
62. **Kosareva O.G.**, Brodeur A., Kandidov V.P., Chin S.L. "From filamentation in condensed media to filamentation in gases", *Journal of Nonlinear Optical Physics & Materials* **6**, 485 (1997).
63. Кандидов В.П., **Косарева О.Г.**, Шлёнов С.А. "Пространственно-временная неустойчивость мощного субпикосекундного лазерного импульса в газах", *Квантовая Электроника* **24**, 453 (1997).
64. Кандидов В.П., **Косарева О.Г.**, Шлёнов С.А. "Влияние нестационарной самодефокусировки на распространение мощных фемтосекундных лазерных импульсов в газах в условиях ионизации", *Квантовая Электроника* **21**, 971 (1994).
65. Кандидов В.П., **Косарева О.Г.**, Шленов С.А. "Влияние кубичной нелинейности и многофотонной ионизации на пространственно-временные характеристики субпикосекундного лазерного импульса в воздухе", *Оптика атмосферы и океана* **6**, 79 (1993).