

На правах рукописи

ГОЛУБЦОВ ИЛЬЯ СЕРГЕЕВИЧ

**ГЕНЕРАЦИЯ СУПЕРКОНТИНУУМА ПРИ РАСПРОСТРАНЕНИИ
МОЩНОГО ФЕМТОСЕКУНДНОГО ЛАЗЕРНОГО ИМПУЛЬСА
В ВОЗДУХЕ И ЖИДКИХ СРЕДАХ**

Специальность 01.04.21 – лазерная физика

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
кандидата физико-математических наук

Москва, 2004

Работа выполнена на кафедре общей физики и волновых процессов физического факультета Московского государственного университета им. 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,
профессор Федоров Михаил Владимирович

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

Защита состоится « _____ » _____ 2004 года в _____ часов на заседании диссертационного совета Д 501.001.31 в Московском государственном университете им. М. В. Ломоносова по адресу: 119992 ГСП-2, Москва, Ленинские горы, МГУ, Корпус нелинейной оптики, аудитория им. С.А. Ахманова

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке физического факультета МГУ

Автореферат разослан « _____ » _____ 2004 года

Ученый секретарь
диссертационного совета Д 501.001.31,
доцент

Т. М. Ильинова

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы

Активное развитие техники генерации мощного пико– и фемтосекундного лазерного излучения в 90–х годах прошлого века, ознаменованное созданием экспериментальных установок тераваттной мощности, способных воспроизводить импульсы длительностью менее 100 фс, привело к возрождению интереса у исследователей к проблемам генерации суперконтинуума при распространении мощного лазерного излучения в сплошных оптических средах.

Мощные фемтосекундные лазерные импульсы в газообразных средах обладают уникальными свойствами. При распространении в газах импульсы благодаря своей малой длительности не испытывают воздействия тепловой дефокусировки и оптического пробоя, тогда как эффект Керра приводит к самофокусировке излучения. Следствием такого нелинейно–оптического взаимодействия излучения и среды является формирование филаментов – тонких длинных нитей с высокой концентрацией световой энергии. Филаментация лазерного импульса сопровождается сужением его частотного спектра или иначе, генерацией излучения суперконтинуума, что представляет несомненный интерес как с точки зрения фундаментальных исследований, так и практического применения.

Образуемое излучение суперконтинуума имеет непрерывную спектральную полосу, покрывающую видимый и инфракрасный диапазоны длин волн, и обладает узкой направленностью. Оно характеризуется большой спектральной яркостью и высокой степенью когерентности входящих в его состав спектральных компонент. Возможность получения световых импульсов с подобными характеристиками открыла серьезные перспективы применения лазерного излучения в задачах мониторинга и зондирования атмосферы. В настоящее время созданы первые широкополосные фемтосекундные лидары тераваттной мощности, позволяющие получать данные о составе атмосферы в диапазоне длин волн от 400 нм до 4 мкм без необходимости перестраивать несущую частоту излучения, что принципиально расширяет информативность лазерного зондирования.

Следствием нелинейно–оптического взаимодействия излучения с веществом при филаментации является не только трансформация лазерного импульса и его спектра, но и изменение характеристик среды. В филаменте интенсивность излучения

достигает величин $10^{13} - 10^{14}$ Вт/см², что приводит к генерации лазерной плазмы. Эта особенность позволяет получать управляемый газовый разряд, локализация которого определяется положением филамента в пространстве. Одним из практических применений дистанционного формирования газового разряда может стать создание, так называемого, управляемого громоотвода, позволяющего обеспечить сток атмосферного электричества.

В конденсированных средах под воздействием высокоинтенсивного лазерного излучения происходит многофотонное поглощение и оптический пробой, что может быть использовано в задачах локальной модификации показателя преломления прозрачных диэлектриков для создания логических и запоминающих оптических элементов микронных размеров.

Таким образом, за последние десять лет в области взаимодействия мощных фемтосекундных лазерных импульсов со сплошными прозрачными средами были получены результаты, имеющие важное теоретическое значение для нелинейной оптики и лазерной физики и представляющие практический интерес для развития фемтосекундных лазерных технологий в зондировании окружающей среды, в управлении электрическим разрядом, в микрофотонике. Вместе с тем многие физические аспекты генерации суперконтинуума и распространения мощных фемтосекундных лазерных импульсов в оптически прозрачных сплошных средах не ясны и нуждаются в детальном теоретическом исследовании.

Цели и задачи диссертационной работы

1. Разработка адекватной экспериментальным данным физической модели нестационарного самовоздействия мощного фемтосекундного лазерного излучения в воздушной среде и жидкостях, учитывающей инерционность кубичной восприимчивости, вклад нелинейности лазерной плазмы, влияние материальной дисперсии, эффект волновой нестационарности.
2. Исследование физической природы пространственной концентрации энергии фемтосекундных лазерных импульсов, приводящей к формированию протяженного филамента. Изучение влияния нелинейно-оптических и волновых эффектов самофокусировки, генерации плазмы, материальной дисперсии и

дифракции на пространственные и временные характеристики лазерного импульса при его филаментации в воздухе и жидких средах.

3. Исследование частотно-углового спектра лазерного импульса при филаментации. Изучение физических механизмов генерации спектральных компонент суперконтинуума и роли нелинейных и волновых эффектов в трансформации спектра. Определение местоположения источников спектральных компонент суперконтинуума в лазерном импульсе.
4. Анализ возможности управления филаментацией и генерацией суперконтинуума путем изменения начальных параметров лазерного импульса – фазовой модуляции и радиуса геометрической фокусировки. Разработка методов оптимизации начальных параметров лазерного импульса в целях достижения максимального выхода энергии суперконтинуума.

Научная новизна работы

1. Впервые произведен детальный анализ физических механизмов трансформации частотно-углового спектра мощного фемтосекундного лазерного импульса при филаментации в воздухе и жидких средах. Показано, что формирование суперконтинуума и конической эмиссии в коротковолновой области спектра является результатом фазовой самомодуляции светового поля в условиях высокой пространственно-временной локализации излучения. Построены спектральные карты лазерного импульса в филаменте, демонстрирующие локализацию источников суперконтинуума.
2. Установлено, что кольца интенсивности на заднем фронте лазерного импульса и наблюдаемые экспериментально кольца плотности энергии являются следствием интерференции в поперечном сечении пучка двух встречных потоков энергии, из которых один, расходящийся, обусловлен плазменной дефокусировкой, другой, сходящийся, - керровской самофокусировкой излучения на периферии пучка.
3. Дано расширение понятия филамента от известных представлений как о непрерывной узкой области большой протяженности с высокой концентрацией энергии на последовательность разнесенных по длине локальных областей с высокой плотностью энергии. Показано, что распад непрерывного филамента на

локальные области возможен при сильном проявлении материальной дисперсии и, в частности, в импульсах с начальной фазовой модуляцией.

4. Показано, что начальная фазовая модуляция импульса влияет на геометрические параметры филамента и эффективность генерации суперконтинуума в воздухе. Отрицательная фазовая модуляция импульса приводит к увеличению расстояния от выходной апертуры лазерной системы до начала филамента, росту его протяженности в среде с нормальной дисперсией и повышению энергетического выхода суперконтинуума.

Практическая ценность работы

1. Показана возможность управления филаментацией и генерацией суперконтинуума с помощью изменения начальных параметров лазерного импульса. Построена диаграмма эффективности генерации суперконтинуума в воздухе, которая позволяет прогнозировать его энергетический выход на основе данных о начальных параметрах излучения.
2. Установлено, что энергия суперконтинуума накапливается вдоль филамента. Энергия импульса суперконтинуума зависит как от степени локализации излучения лазерного импульса в области нелинейно-оптического взаимодействия, так и от протяженности филамента. Выход энергии суперконтинуума при слабой фокусировке пучка с $R_f/d \approx 2$ в 7 – 10 раз больше, чем при фокусировке с $R_f/d \approx 0,5$, где R_f - радиус фокусировки, d - диаметр пучка.
3. Продемонстрировано, что материальная дисперсия может существенно влиять на геометрические параметры филамента. В условиях, когда дисперсионная длина лазерного импульса сравнима с протяженностью области нелинейно-оптического взаимодействия филамент распадается на последовательность локализованных областей с большой плотностью энергии и высокой концентрацией электронов в лазерной плазме.

Полученные результаты могут найти применение при разработке фемтосекундных лидаров, систем транспортировки лазерной энергии в атмосфере и водных средах, а также устройств дистанционного формирования очагов плазмы.

Защищаемые положения

1. Нелинейно-оптическая модель взаимодействия фемтосекундных лазерных импульсов с воздухом и жидкостями, включающая дифракцию, материальную дисперсию в приближении третьего порядка, нестационарную кубичную восприимчивость, нелинейность самонаведенной лазерной плазмы и волновую нестационарность, адекватно описывает явления филаментации и генерации суперконтинуума, наблюдаемые в современных экспериментах с лазерными импульсами гига- и тераваттной мощности.
2. Генерация суперконтинуума при филаментации фемтосекундных лазерных импульсов в сплошной прозрачной среде является следствием самомодуляции фазы светового поля в условиях сильной его локализации в пространстве и времени. Сверхширение частотного спектра является результатом возникновения временного градиента фазы, углового спектра – пространственного градиента. Высокочастотные компоненты спектра образуют коническую эмиссию суперконтинуума, тогда как излучение низкочастотных гармоник распространяется преимущественно вдоль оптической оси.
3. Локализация энергии лазерного импульса в филаменте диаметром около 100 мкм и протяженностью до 100 м в воздухе происходит в результате непрерывного притока энергии с периферии пучка к его оси. Интерференция полей, расходящихся от филамента вследствие плазменной дефокусировки и сходящихся из периферии из-за керровской самофокусировки, приводит к образованию динамической кольцевой структуры в распределениях интенсивности и плотности энергии в плоскости поперечного сечения лазерного импульса.
4. Филамент может представлять собой как непрерывную узкую протяженную область значительной концентрации излучения, так и последовательность небольшого числа локализованных в пространстве областей с высокой плотностью энергии и большой концентрацией электронов в лазерной плазме. Распад филамента на последовательность локальных областей имеет место в том случае, если дисперсионная длина лазерного импульса сравнима с протяженностью области нелинейно-оптического взаимодействия.
5. Существует возможность управления геометрическими параметрами филамента и эффективностью преобразования в суперконтинуум с помощью изменения

начальных параметров лазерного излучения – фазовой модуляции и геометрической фокусировки пучка. Отрицательная фазовая модуляция импульса приводит в среде с нормальной дисперсией к росту расстояния от выходной апертуры лазерной системы до начала филамента, увеличению его протяженности и росту эффективности генерации суперконтинуума. Геометрическая фокусировка позволяет управлять положением начала филамента.

Апробация результатов работы

Основные результаты работы опубликованы в 10 научных статьях в журналах «Квантовая электроника», «Optics Communications», «Applied Physics B», «Оптический журнал», «Оптика атмосферы и океана», «Physics of Vibrations», «Proceedings SPIE» и докладывались на международных конференциях: “Lasers Applications in Science and Technology LASE 2004” (Сан-Хосе, США, 2004), “XI Conference on Laser Optics” (Санкт-Петербург, 2003), “Lasers Applications in Science and Technology LASE 2003” (Сан-Хосе, США, 2003), Вторая конференция “Фундаментальные проблемы оптики” (Санкт-Петербург, 2003), Вторая научная молодежная школа “Оптика - 2002” (Санкт-Петербург, 2002), “11-th International Laser Physics Workshop” (Братислава, Словакия, 2002), 2-nd Russian-Italian Symposium “Nonlinear Processes in Laboratory and Astrophysical Plasmas” (Москва, 2002), Вторая международная конференция молодых ученых и специалистов “Оптика - 2001” (Санкт-Петербург, 2001), “Scientific Workshop on Ultrafast Nonlinear Optics and Semiconductor Lasers” (Корк, Ирландия, 2001), “XVII International Conference on Coherent and Nonlinear Optics” (Минск, Беларусь, 2001), Научная молодежная школа “Оптика - 2000” (Санкт-Петербург, 2000) и семинарах кафедры общей физики и волновых процессов физического факультета и Международного лазерного центра МГУ им. М. В. Ломоносова.

Структура и объем работы

Диссертация состоит из введения, пяти глав, заключения, приложения и списка цитируемой литературы. Объем работы составляет 143 страницы, включая 40 рисунков. Список цитируемой литературы содержит 133 наименований, включая 10 авторских публикаций.

Личный вклад автора

Все использованные в диссертации результаты получены автором лично или при его определяющем участии в разработке физической и математической моделей нелинейно-оптического взаимодействия лазерного импульса с газами и жидкостями, в интерпретации экспериментальных результатов.

СОДЕРЖАНИЕ ДИССЕРТАЦИИ

Во **введении** обоснована актуальность темы диссертационной работы, сформулированы ее цели и задачи, сформулированы научная новизна и практическая ценность работы, представлены защищаемые положения.

В **первой главе** дан краткий обзор развития представлений самофокусировки лазерного излучения от первых экспериментов с микро- и наносекундными импульсами в конденсированных средах до современных работ по филаментации фемтосекундных лазерных импульсов в воздухе. Рассмотрено состояние современных исследований по филаментации и генерации суперконтинуума при распространении мощных фемтосекундных лазерных импульсов в воздухе и жидкостях.

В **параграфе 1.1** дан обзор экспериментальных и теоретических работ, посвященных исследованию явления филаментации в конденсированных средах.

В **параграфе 1.2** подробно изложено состояние исследований филаментации мощного фемтосекундного лазерного излучения в воздухе, опубликованных с середины 1990-х годов до настоящего времени. Описаны экспериментальные исследования филаментации мощного лазерного излучения фемтосекундной длительности инфракрасного и ультрафиолетового диапазонов. Приведен обзор теоретических работ, выводом которого является представление о том, что существование филаментов в воздухе объясняется моделью движущихся фокусов, учитывающей влияние ионизации газа.

В **параграфе 1.3** приведен обзор литературы, посвященной исследованиям генерации суперконтинуума и конической эмиссии как составляющей его части при распространении мощного лазерного излучения в сплошных прозрачных средах. Показано развитие взглядов исследователей на явление сверхуширения спектра. Продемонстрирована тесная связь явления генерации частотно-углового суперконтинуума и пространственной самофокусировки лазерного излучения,

сопровождающейся нелинейным обострением лазерного импульса. Приведены различные гипотезы, объясняющие генерацию конической эмиссии суперконтинуума.

В **параграфе 1.4** рассмотрена проблема управления филаментацией и генерацией суперконтинуума при распространении мощных фемтосекундных лазерных импульсов в сплошных прозрачных средах.

Во **второй главе** дано физическое обоснование и математическая формулировка модели нелинейно-оптического взаимодействия мощных фемтосекундных лазерных импульсов с воздухом и жидкостями, описывающей явление филаментации. Последовательно анализируются нелинейные и волновые эффекты, определяющие процесс распространения импульса в рассматриваемых средах.

В **параграфе 2.1** представлено описание керровской нелинейности сплошной среды. Показано, что в воздухе для импульсов фемтосекундной длительности основными механизмами, определяющими керровскую нелинейность, являются ангармонизм электронного отклика и вынужденное комбинационное рассеяние излучения на вращательных переходах молекул воздуха.

В работе нелинейный отклик среды описывается на основе модели затухающего осциллятора и данных экспериментальных измерений, с помощью которых в литературе выполнена аппроксимация функции отклика воздуха.

В **параграфе 2.2** описан вклад плазменной нелинейности в показатель преломления воздуха и жидких сред – воды и метанола. Рассмотрены механизмы фотоионизации, ударной ионизации и объемной рекомбинации, приводящие к изменению концентрации свободных электронов в течение импульса. Для описания фотоионизации используется модель Переломова-Попова-Герентьева с экспериментальной оценкой для величины эффективного заряда атомного остатка. Приведены кинетические уравнения для концентрации свободных электронов, позволяющие найти ее значение в любой точке пространства и времени.

В **параграфе 2.3** рассмотрена материальная дисперсия среды и ее влияние на характеристики лазерного излучения. Показано, что для точного описания динамики формы и спектра лазерного импульса при филаментации необходим учет дисперсии

высших порядков. Для описания филаментации в воздухе используется третье приближение теории дисперсии.

В **параграфе 2.4** сформулирована математическая модель нелинейно-оптического взаимодействия мощных фемтосекундных лазерных импульсов с воздухом и жидкостями, описывающей явления филаментации и генерации суперконтинуума. Из скалярного волнового уравнения – прямого следствия системы уравнений Максвелла – получено уравнение для огибающей светового поля, описывающего однонаправленное распространение лазерного импульса в прозрачных диэлектриках:

$$2ik_0 \frac{\partial A}{\partial z} = \left(1 - \frac{i}{\omega_0} \frac{\partial}{\partial t}\right)^{-1} \Delta_{\perp} A - k_0 k'' \frac{\partial^2 A}{\partial t^2} + \frac{i}{3} k_0 k''' \frac{\partial^3 A}{\partial t^3} +$$

$$+ \frac{2k_0^2}{n_0} \left[\left(1 - \frac{i}{\omega_0} \frac{\partial}{\partial t}\right) \Delta n_k + \left(1 + \frac{i}{\omega_0} \frac{\partial}{\partial t}\right) \text{Re}(\Delta n_p) + i \text{Im}(\Delta n_p) \right] A - ik_0 \alpha A \quad (1)$$

где $A(x, y, z, t)$ - амплитуда огибающей светового поля, $\Delta n_k(x, y, z, t)$ и $\Delta n_p(x, y, z, t)$ - приращения показателя преломления, обусловленные воздействием керровской и плазменной нелинейностей. В уравнении (1) первое слагаемое правой части описывает дифракцию пучка, второе и третье – дисперсию импульса в третьем приближении теории дисперсии, четвертое – действие керровской и плазменной нелинейностей, и последнее – поглощение излучения в процессе многофотонной ионизации. Операторы $\pm \frac{i}{\omega_0} \frac{\partial}{\partial t}$ описывают волновую нестационарность, в англоязычной литературе известную как эффект укручения фронта. Модификация метода медленно меняющихся амплитуд при введении этих операторов позволяет применять полученное уравнение к лазерным импульсам длительностью вплоть до нескольких периодов колебаний светового поля.

В **параграфе 2.5** обоснована возможность рассмотрения аксиально симметричной задачи, в которой размерность уравнения (1) снижается до $2D + 1$ при подстановке $\Delta_{\perp} = \frac{\partial^2}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r}$.

В **параграфе 2.6** приведена схема численного решения уравнения (1), в которой используются метод расщепления по физическим факторам, метод

линеаризации нелинейного уравнения, метод прогонки для решения дифракционного уравнения по абсолютно устойчивой процедуре интегрирования Кранка–Николсона.

В **параграфе 2.7** представлены и систематизированы параметры вычислительных экспериментов, выполненных в диссертационной работе. Эти параметры соответствуют натурным экспериментам по филаментации и генерации суперконтинуума при распространении фемтосекундных лазерных импульсов на длине волны 800 и 810 нм в воздухе, воде и метаноле с примесью кумарина, выполненных в Университете Лаваль в Канаде.

В **параграфе 2.8** сформулированы основные выводы по второй главе.

В **третьей главе** приведены результаты численного моделирования процесса распространения в воздухе коллимированного лазерного импульса длительностью 21 – 138 фс, энергией 8 – 60 мДж, радиуса 3,5 мм – 3 см и сфокусированного длительностью 21 – 24 фс, энергией 0,2 – 3 мкДж, радиуса 1,8 см - в воде и метаноле.

Демонстрируется определяющая роль керровской и плазменной нелинейностей в формировании филамента. Показывается необходимость учета в модели филаментации материальной дисперсии и эффекта волновой нестационарности. Изучается динамика лазерного импульса при его жесткой фокусировке в воду. Исследуется явление эффекта многократной рефокусировки лазерного излучения в метаноле, объясняются его физические механизмы.

В **параграфе 3.1** определяется понятие филамента как траектории движущегося фокуса или иначе, непрерывной последовательности нелинейных фокусов различных временных слоев импульса. На основе численного моделирования уравнения (1) совместно с кинетическими уравнениями для концентрации свободных электронов изучается процесс распространения в воздухе лазерного импульса мощностью 33 ГВт, длительностью 138 фс на длине волны 800 нм.

Филамент характеризуется высокой плотностью энергии и концентрацией свободных электронов в приосевой зоне пучка. В диапазоне расстояний $z = 0,3L_{\text{оиф}} \div 0,8L_{\text{оиф}}$ такие параметры излучения и среды как пиковая интенсивность, максимальная концентрация электронов, радиус филамента, меняются незначительно. При этом типичные характеристики излучения филамента следующие: пиковая интенсивность на оси пучка - $I_0 = 10^{14}$ Вт/см², диаметр пучка – 100 мкм, концентрация свободных электронов на оси пучка - $0,1 \times N_0$.

Изучается роль керровской и плазменной нелинейностей в процессе филаментации. На основе анализа нелинейных вкладов в показатель преломления среды формулируется положение, согласно которому плазменная нелинейность приводит к ограничению роста интенсивности и концентрации свободных электронов на оси, тогда как керровская фокусировка периферийных областей пучка позволяет компенсировать уход излучения из области взаимодействия и стабилизировать параметры филамента.

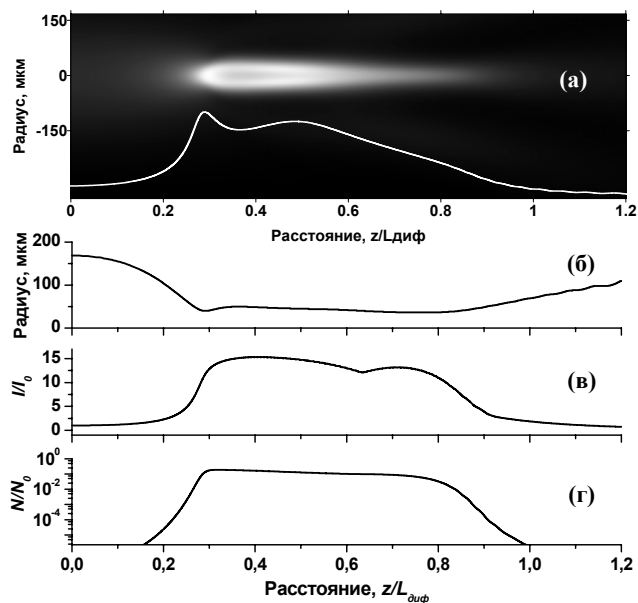


Рис. 1. (а) Тоновое изображение радиального распределения плотности энергии лазерного излучения в зависимости от расстояния вдоль оси z . Во вставке – зависимость плотности энергии на оси пучка от расстояния вдоль оси z .

(б) Зависимость радиуса филамента от расстояния вдоль оси z .

(в) Зависимость максимальной интенсивности на оси пучка от расстояния вдоль оси z . Интенсивность I нормирована на величину $I_0 = 10^{13}$ Вт/см².

(г) Зависимость максимальной концентрации свободных электронов на оси пучка от расстояния вдоль оси z . Концентрация N нормирована на концентрацию нейтральных молекул воздуха $N_0 = 2,7 \times 10^{19}$ см⁻³ и приведена в логарифмическом масштабе.

В **параграфе 3.2** анализируется трансформация в пространстве и времени амплитуды и фазы огибающей электрического поля при филаментации лазерного импульса в воздухе. На начальной стадии филаментации основное влияние на процесс распространения импульса оказывает самофокусировка, что приводит к концентрации его энергии вблизи оси пучка с сохранением унимодальной формы в пространственно-временном распределении интенсивности. На больших расстояниях абберационная дефокусировка заднего фронта в лазерной плазме приводит к

образованию системы колец в хвостовой части импульса. Дальнейшая динамика лазерного импульса включает рефокусировку его кольцевой структуры и образование второго пика в распределении интенсивности.

Образование кольцевой структуры на заднем фронте импульса связано с интерференцией в поперечном сечении пучка двух встречных потоков энергии, существование которых обусловлено влиянием керровской самофокусировки и плазменной дефокусировки. В минимумах кольцевой структуры образуются краевые фазовые дислокации, что является следствием амплитудно-фазовой конверсии излучения в условиях нелинейности.

В **параграфе 3.3** показана необходимость учета влияния материальной дисперсии и волновой нестационарности.

При филаментации нелинейный характер самофокусировки приводит к существенному увеличению крутизны переднего фронта, в формировании которого существенную роль играет материальная дисперсия. Она ограничивает нелинейное укручение переднего фронта импульса, перераспределяя энергию излучения между соседними временными слоями. Кроме того, дисперсия является причиной трансформации лазерного импульса в последовательность пичков.

Влияние эффекта волновой нестационарности становится значимым в областях высокого временного градиента показателя преломления среды и/или комплексной амплитуды электрического поля. Анализ временных распределений интенсивности лазерного импульса показывает, что волновая нестационарность в керровской среде приводит к самоукручению заднего фронта импульса и уменьшению крутизны переднего фронта.

В **параграфе 3.4** численно исследована филаментация мощного фемтосекундного лазерного импульса в воде в условиях геометрической фокусировки пучка.

Показано, что в условиях геометрической фокусировки распределение плотности энергии филамента в плоскости (r, z) имеет серповидную структуру. Это связано с тем, что после прохождения лазерным импульсом точки нелинейного фокуса происходит формирование плазменного канала вследствие лавинной и многофотонной ионизации. Высокая концентрация свободных электронов на оси пучка приводит к дефокусировке излучения, которое повторно фокусируется в

окрестности геометрического фокуса. При этом образуется высококонтрастная кольцевая структура в пространственно-временном распределении интенсивности.

Геометрическая фокусировка существенно влияет на характеристики филамента: с увеличением радиуса фокусировки филамент удлиняется, уменьшается поперечный размер плазменного канала, уменьшается концентрация электронов в геометрическом фокусе линзы.

В **параграфе 3.5** численно исследовано распространение мощного фемтосекундного лазерного импульса на длине волны 810 нм, длительностью 24 фс, энергией 0,8 – 2,5 мкДж, радиуса 1,8 см в метаноле с примесью кумарина при слабой геометрической фокусировке.

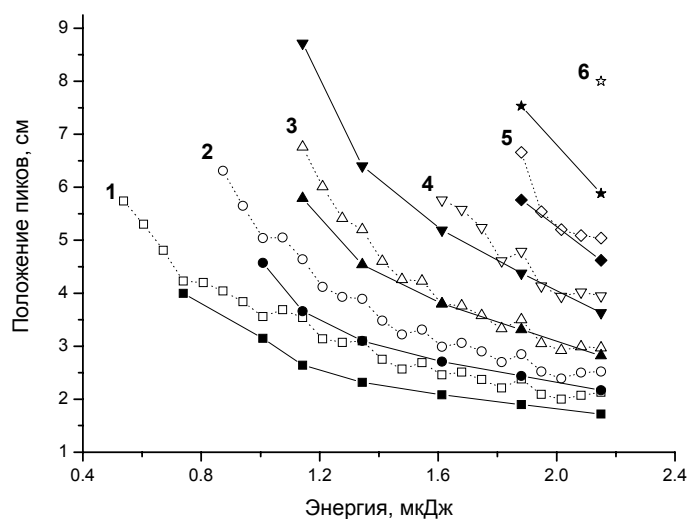


Рис. 2. Положение пиков сигнала флуоресценции в зависимости от энергии лазерного импульса. Цифрами рядом с соответствующими графиками обозначены порядковые номера пиков. Экспериментальные зависимости изображены с помощью пустых символов, расчетные – с помощью закрашенных.

В этих условиях филамент представляет собой набор локализованных в пространстве областей с высокой концентрацией энергии, число которых увеличивается с ростом энергии импульса. Такая локализация энергии лазерного импульса получила название многократной рефокусировки. Физически многократная рефокусировка объясняется совместным проявлением материальной дисперсии среды, керровской и плазменной нелинейностей и трехфотонного поглощения излучения молекулами кумарина.

При достижении точки нелинейного фокуса рост интенсивности излучения прекращается за счет воздействия плазменной нелинейности, поглощения излучения

молекулами кумарина и проявлением материальной дисперсии среды. Последняя перераспределяет световую мощность между высоко- и низкоинтенсивными временными слоями. После прохождения нелинейного фокуса временные слои лазерного импульса могут сохранять мощность, превышающую критическую мощность самофокусировки в метаноле, несмотря на сильные амплитудно-фазовые искажения. Следствием этого является повторная фокусировка лазерного излучения и образование новой области на оси пучка с высокой концентрацией энергии. При высокой мощности импульса число рефокусировок может достигать пяти.

Сравнение положения пиков в распределениях сигнала флюоресценции, полученных экспериментально в Университете Лаваль (Канада) и при численном моделировании, демонстрирует уверенное согласие результатов (рис. 2).

В **параграфе 3.6** сформулированы основные выводы по третьей главе.

В **четвертой главе** представлены результаты исследования генерации суперконтинуума при филаментации коллимированного мощного фемтосекундного лазерного импульса длительностью 138 фс, энергией 8 мДж, радиуса 3,5 мм в воздухе и сфокусированного длительностью 27 фс, энергией 0,2 – 3 мкДж, радиуса 1,8 см в воде. Дается физическое объяснение процесса сверхуширения частотно-углового спектра импульса и генерации конической эмиссии. Определяется влияние инерционности керровской нелинейности, материальной дисперсии и эффекта волновой нестационарности на уширение спектра. Построены спектральные и угловые карты источников суперконтинуума.

В **параграфе 4.1** на основе экспериментальных данных приведено обоснование того, что в условиях сильного проявления керровской и плазменной нелинейностей ведущую роль в генерации новых спектральных компонент играет фазовая самомодуляция лазерного импульса в пространстве и времени. Частотный сдвиг излучения в каждой точке пространства и времени определяется величиной временного градиента фазы:

$$\Delta\omega(r,t) = \frac{\partial\varphi(r,t)}{\partial t}, \quad (2)$$

а направление распространения - величиной пространственного градиента фазы:

$$\theta(r,t) = \arctg \left[-\frac{1}{k} \frac{\partial\varphi(r,t)}{\partial r} \right]. \quad (3)$$

В **параграфе 4.2** проанализирована динамика частотно-углового спектра лазерного импульса при филаментации коллимированного пучка в воздухе.

Первоначально гауссов спектр импульса в процессе филаментации претерпевает серьезную трансформацию. К расстоянию $z = 0,36L_{\text{диф}}$ спектр непрерывно уширен в коротковолновую и длинноволновую области (рис. 3). Уширение спектра сопровождается генерацией конической эмиссии, которая в начале филамента существует в коротковолновой области, а затем – и в длинноволновой. При дальнейшем распространении лазерного импульса одновременно с формированием второго пика в его распределении интенсивности имеют место генерация коническая эмиссия в длинноволновой области спектра, а также повторная генерация конической эмиссии.

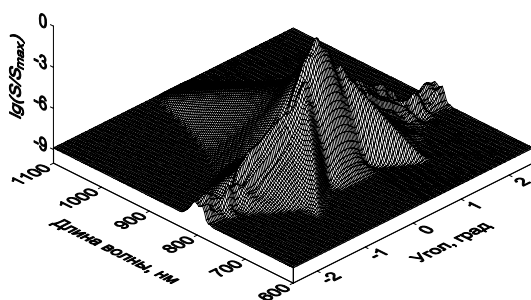


Рис. 3. Частотно-угловые распределения спектральной плотности мощности лазерного импульса в воздухе на расстоянии $z = 0,44L_{\text{диф}}$. Спектральная плотность мощности приведена в логарифмическом масштабе $\lg S(\theta, \lambda)/S_{\text{max}}$, где S_{max} – ее максимальное значение.

Описанная выше динамика лазерного импульса находится в хорошем качественном соответствии с экспериментальными наблюдениями.

В **параграфе 4.3** исследованы физические механизмы генерации конической эмиссии. На основе рассмотрения пространственно-временных распределений интенсивности и фазы лазерного импульса показано, что генерация конической эмиссии является следствием пространственно-временной фазовой самомодуляции лазерного импульса в окрестности краевых фазовых дислокаций, образованных в кольцевой структуре лазерного импульса при сильной оптической нелинейности в условиях высокой пространственно-временной локализации излучения.

В **параграфе 4.4** изучено влияние материальной дисперсии, инерционности керровской нелинейности и волновой нестационарности на уширение спектра.

Проведено сравнение частотно-угловой зависимости конической эмиссии в высокочастотной области спектра с экспериментальными данными. Совпадение экспериментальных и расчетных значений углов направленности различных коротковолновых компонент конической эмиссии продемонстрировало адекватность используемой модели. Показано, что учет третьего приближения теории дисперсии приводит к увеличению угла расходимости конического излучения, а инерционность керровской нелинейности подавляет уширение спектра импульса вследствие уменьшения временных градиентов фазы. Волновая нестационарность при формировании второго пика в распределении интенсивности приводит к существенному уширению спектра в высокочастотную область, а генерируемые компоненты распространяются преимущественно вдоль оптической оси.

В **параграфе 4.5** произведен анализ положения источников спектральных компонент на плоскости (r, t) , построены спектральные и угловые карты лазерного импульса.

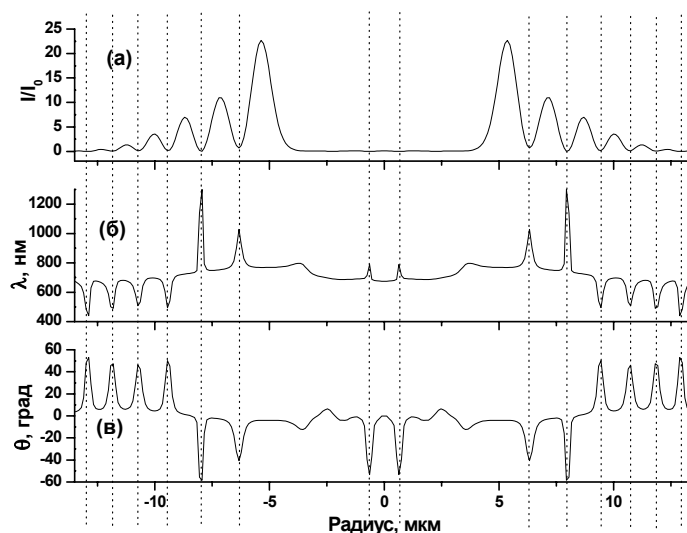


Рис. 4. Радиальные распределения для интенсивности лазерного импульса (а), для длины волны источников суперконтинуума (б) и для угла направленности их излучения (в) во временном слое $\tau = 0$ лазерного импульса длительностью 27 фс и энергией 3 мкДж в кювете с водой на расстоянии 40 мкм перед геометрическим фокусом линзы с фокусным расстоянием 16,9 мм. Отрицательные значения угла θ соответствуют сходимости излучения к оптической оси, положительные – расходимости. Шкала интенсивности нормирована на величину $I_0 = 10^{12}$ Вт/см².

Представление о том, что суперконтинуум является следствием фазовой самомодуляции лазерного импульса при нелинейном набеге фазы в пространстве и времени, позволило определить пространственную локализацию источников спектральных компонент и их угловую расходимость на основе выражений (2) и (3).

Получены радиальные распределения для интенсивности, для длины волны источников суперконтинуума и для угла направленности их излучения лазерного импульса длительностью 27 фс и энергией 3 мкДж, сфокусированного в кювету с водой (рис. 4). Источники низкочастотных компонент находятся у колец интенсивности, ближайших к оптической оси, и их излучение направлено к оси. Источники наиболее высокочастотных компонент локализованы у периферийных колец, и их излучение направлено от оси. В результате излучение коротковолновой части спектра обладает угловой расходимостью, тогда как низкочастотные гармоники распространяются преимущественно вдоль оптической оси, что соответствует экспериментальным данным.

Высокочастотные компоненты лазерного импульса генерируются преимущественно в окрестности фазовых дислокаций лазерного импульса, а также на заднем фронте лазерного импульса. Генерация низкочастотных компонент спектра тоже происходит в окрестности фазовых дислокаций, но также и на переднем фронте лазерного импульса.

В **параграфе 4.6** сформулированы основные выводы по четвертой главе.

В **пятой главе** рассматривается возможность управления геометрическими параметрами филамента и эффективностью преобразования лазерного излучения в суперконтинуум. Исследуется влияние начальной фазовой модуляции лазерного импульса и геометрической фокусировки пучка на локализацию энергии излучения в пространстве и на выход энергии суперконтинуума. Получены практические рекомендации по оптимизации параметров лазерного импульса.

В **параграфе 5.1** обоснована принципиальная возможность управления процессами филаментации и генерации суперконтинуума путем изменения начальных параметров излучения.

В **параграфе 5.2** для лазерного импульса в коллимированном режиме излучения показано, что посредством изменения ФМ импульса можно эффективно управлять геометрическими параметрами филамента в воздухе: отрицательная ФМ

импульса «затягивает» по расстоянию локализацию световой энергии, в результате чего увеличиваются расстояние от выходной апертуры лазерной системы до начала филамента и его протяженность. Наибольшее увеличение геометрических размеров филамента достигается, если длина компрессии ФМ-импульса в воздухе превышает длину его самофокусировки, но совпадает с ней по порядку величины. При распространении импульсов с отрицательной начальной ФМ филамент теряет непрерывную структуру и распадается на совокупность областей с высокой концентрацией энергии. Причиной этого является существенная роль материальной дисперсии.

Результаты численного моделирования показывают, что увеличение энергетического выхода суперконтинуума возможно в средах с нормальной дисперсией при использовании импульсов с отрицательной ФМ. «Временная» фокусировка излучения, вызванная дисперсией таких импульсов в среде, приводит к увеличению концентрации энергии в области нелинейного взаимодействия и, следовательно, повышает эффективность генерации суперконтинуума. При этом эффективность генерации суперконтинуума максимальна, если длина компрессии импульса с начальной ФМ равна или незначительно превышает длину нелинейной фокусировки.

В **параграфе 5.3** на основе численного моделирования распространения лазерного импульса на длине волны 810 нм, длительностью 27 фс, энергией 0,2 – 3,0 мкДж, радиуса 1,8 см в воде, изучается влияние геометрической фокусировки на спектральные и энергетические параметры филамента.

Определено, что геометрическая фокусировка пучка подавляет уширение спектра лазерного импульса в филаменте. Меньшая длина филамента при более жесткой фокусировке приводит также к уменьшению энергетического выхода суперконтинуума. Для угла направленности конического излучения сфокусированного импульса справедлива оценка, согласно которой его величина равна сумме расходимости пучка в дальней зоне и угла направленности конической эмиссии при филаментации коллимированного пучка.

В **параграфе 5.4** показано, что утверждение, согласно которому для коллимированного режима излучения лазерных импульсов с начальной отрицательной ФМ эффективность генерации суперконтинуума максимальна, если

длина компрессии близка к длине самофокусировки, справедливо и в случае сфокусированного пучка.

Проведено несколько серий численных экспериментов по филаментации лазерных импульсов в воздухе при различных начальных параметрах излучения. На основе полученных данных о выходе энергии суперконтинуума построена диаграмма эффективности генерации суперконтинуума (рис. 5), которая позволяет спрогнозировать эффективность генерации суперконтинуума в филаменте на основе данных о начальных параметрах излучения и оптимизировать параметры лазерного импульса для достижения максимального энергетического выхода суперконтинуума при определенных условиях эксперимента.

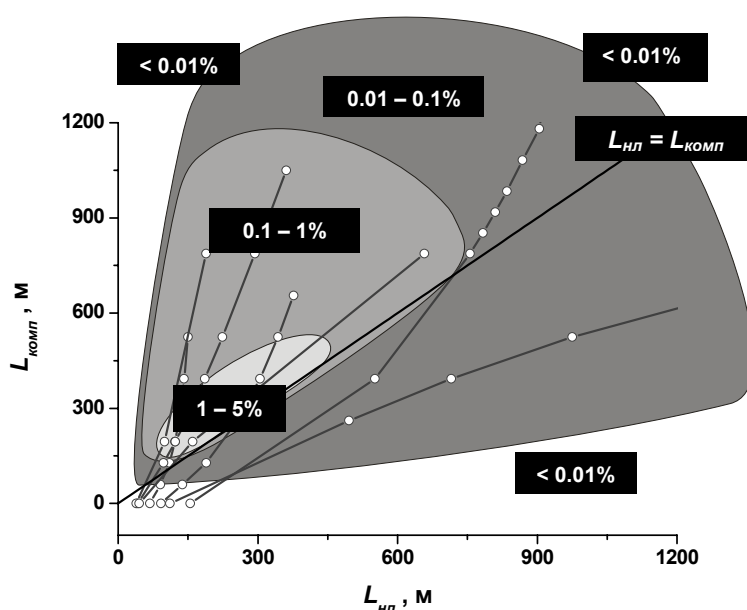


Рис. 5. Диаграмма эффективности генерации суперконтинуума в воздухе. На графике изображены зависимости длины компрессии импульса от длины нелинейной фокусировки пучка при изменении величины начальной фазовой модуляции лазерного импульса. Различные кривые соответствуют импульсам с различными начальными условиями. Цифрами обозначены характерные величины выхода суперконтинуума в типичных областях изменения параметров $L_{\text{комп}}$ и $L_{\text{нл}}$, изображенных оттенками серого цвета.

В **параграфе 5.5** сформулированы основные выводы по пятой главе.

В **заклучении** сформулированы основные результаты работы.

В **приложении** дан детальный вывод уравнения для огибающей светового поля, описывающего однонаправленное распространение лазерного импульса в прозрачных диэлектриках.

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ РАБОТЫ

1. Разработана физическая модель нестационарного самовоздействия мощного фемтосекундного лазерного излучения в сплошной нелинейной среде, учитывающая инерционность кубичной восприимчивости, вклад материальной дисперсии в приближении третьего порядка, эффект волновой нестационарности и вклад нелинейности лазерной плазмы, возникающей в результате процессов многофотонной и лавинной ионизации.
2. Численно исследована филаментация мощного фемтосекундного лазерного импульса в воздухе в коллимированном режиме, в воде при различной геометрической фокусировке $R_f/d = 0,5 \div 2$, в метаноле в условиях слабой фокусировки пучка $R_f/d = 270$. Показано, что характеристики филаментации существенно зависят от начальных параметров излучения и оптических свойств среды. При распространении в воздухе коллимированного лазерного излучения длительностью 138 фс энергией 8,1 мДж филамент представляет собой непрерывную протяженную область с высокой концентрацией энергии. При жесткой фокусировке $R_f/d = 0,5$ лазерного излучения в воду распределение плотности энергии в филаменте содержит ярко выраженную серповидную структуру, образование которой сопровождается интенсивной генерацией лазерной плазмы на оси пучка. При распространении лазерного импульса в метаноле, характеризующемся сильной материальной дисперсией, имеет место проявление эффекта многократной рефокусировки.
3. Определена физическая природа эффекта многократной рефокусировки при филаментации фемтосекундных лазерных импульсов. Показано, что в условиях, когда дисперсионная длина лазерного импульса сравнима с протяженностью филамента, последний утрачивает непрерывную структуру и превращается в последовательность локализованных в пространстве областей с высокой концентрацией энергии.
4. Определено, что при филаментации имеет место уширение спектра в коротковолновую и длинноволновую области, которое сопровождается генерацией конической эмиссии, которая в начале филамента существует в коротковолновой области, а затем – и в длинноволновой. Угол расходимости

коротковолнового крыла суперконтинуума в воздухе составляет $0,1^\circ$ при начальном радиусе коллимированного пучка 3,5 мм. В фокусированных импульсах угол расходимости суперконтинуума может быть оценен как сумма дифракционной расходимости и расходимости конической эмиссии коллимированного пучка.

5. Показано, что генерация суперконтинуума и конической эмиссии при распространении мощного фемтосекундного лазерного импульса в сплошной среде объясняется самомодуляцией фазы светового поля в пространстве и времени, которая происходит при сильной оптической нелинейности в условиях высокой пространственно-временной локализации излучения.
6. Построены спектральные и угловые карты лазерного импульса, позволяющие определить местоположение источников спектральных компонент суперконтинуума, исследовать угловую расходимость их излучения. Определено, что высокочастотные компоненты лазерного импульса генерируются преимущественно в окрестности фазовых дислокаций лазерного импульса, а также на заднем фронте лазерного импульса. Генерация низкочастотных компонент спектра тоже происходит в окрестности фазовых дислокаций, но также и на переднем фронте лазерного импульса.
7. Рассмотрена возможность управления филаментацией и генерацией суперконтинуума при распространении в сплошной среде лазерного импульса с фиксированной шириной спектра путем изменения его начальных параметров – фазовой модуляции и радиуса фокусировки пучка. Определено, что отрицательная фазовая импульса приводит к увеличению расстояния от выходной апертуры лазерной системы до начала филамента и его протяженности и росту эффективности генерации суперконтинуума.
8. Построена диаграмма эффективности генерации суперконтинуума в воздухе, которая позволяет прогнозировать эффективность генерации суперконтинуума в филаменте на основе данных о начальных параметрах излучения, оптимизировать параметры лазерного импульса для достижения максимального энергетического выхода суперконтинуума при определенных условиях эксперимента.

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ ОПУБЛИКОВАНЫ В РАБОТАХ

1. И.С. Голубцов, В.П. Кандидов, О.Г. Косарева. “Источники суперконтинуума в мощном фемтосекундном лазерном импульсе при распространении в жидкости и газе”. Квантовая электроника, **34**, 348 – 354 (2004).
2. W. Liu, S.L Chin, O. Kosareva, I.S. Golubtsov, V.P. Kandidov. “Multiple refocusing of a femtosecond laser pulse in a dispersive liquid (methanol)”. Optics Communications, **225**, 193 – 209 (2003).
3. V.P. Kandidov, O.G. Kosareva, I.S. Golubtsov, W. Liu, A. Becker, N. Akozbek, C.M. Bowden, and S.L Chin. “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 – 165 (2003).
4. И.С. Голубцов, В.П. Кандидов, О.Г. Косарева. “Начальная фазовая модуляция мощного фемтосекундного лазерного импульса как средство управления его филаментацией и генерацией суперконтинуума в воздухе”. Квантовая электроника, **33**, 525 – 530 (2003).
5. I.S. W. Liu, O. Kosareva, I.S. Golubtsov, A. Iwasaki, A. Becker, V.P. Kandidov, and S.L. Chin. “Femtosecond laser pulse filamentation versus optical breakdown in H₂O”. Applied Physics B, **76**, 215 – 229 (2003).
6. W. Liu, O. Kosareva, I.S. Golubtsov, A. Iwasaki, A. Becker, V.P. Kandidov, S.L. Chin. “Random deflection of the white light beam during self-focusing and filamentation of a femtosecond laser pulse in water”. Applied Physics B, **75**, 595 – 599 (2002).
7. И.С. Голубцов, О.Г. Косарева. “Влияние различных физических факторов на генерацию конической эмиссии при распространении мощных фемтосекундных лазерных импульсов в воздухе”. Оптический журнал, **69**, 21 – 27 (2002).
8. И.С. Голубцов, В.П. Кандидов, О.Г. Косарева. “Коническая эмиссия мощного фемтосекундного лазерного импульса в атмосфере”. Оптика атмосферы и океана, **14**, 303 – 315 (2001).
9. I.S. Golubtsov, O.G. Kosareva, E.I. Mozhaev. “Nonlinear-optical spectral transformation of the powerful femtosecond laser pulse in air”. Physics of Vibrations, **8**, 73 – 78 (2000).
10. O.G. Kosareva, V.P. Kandidov, I.S. Golubtsov, S.L. Chin. "Conversion of high-power femtosecond laser pulse to supercontinuum in atmospheric air". Proceedings SPIE, **4976**, 159 – 170 (2003).