На правах рукописи

Alexel -

Минина Ольга Владимировна

СВЕТОВЫЕ СТРУКТУРЫ ПРИ РАСПРОСТРАНЕНИИ МОЩНЫХ ФЕМТОСЕКУНДНЫХ ЛАЗЕРНЫХ ИМПУЛЬСОВ В ВОЗДУХЕ

Специальность 01.04.05 - Оптика

Автореферат диссертации на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук

Томск – 2019

Работа выполнена в Федеральном государственном бюджетном учреждении науки Институте оптики атмосферы им. В.Е. Зуева Сибирского отделения Российской академии наук и в федеральном государственном автономном образовательном учреждении высшего образования «Национальный исследовательский Томский государственный университет»

Научный	доктор физико-математических наук, профессор
руководитель:	Землянов Александр Анатольевич
Научный	доктор физико-математических наук
консультант:	Гейнц Юрий Эльмарович

Официальные Кандидов Валерий Петрович, доктор физикооппоненты: математических наук, профессор, Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова», кафедра общей физики и волновых процессов, профессор

> Шандаров Станислав Михайлович, доктор физикоматематических наук, профессор, Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Томский государственный университет систем управления и радиоэлектроники», кафедра электронных приборов, заведующий кафедрой

Ведущая Федеральное государственное бюджетное учреждение организация: науки Институт лазерной физики Сибирского отделения Российской академии наук

Защита состоится 27 декабря 2019 г. в 14 часов 30 минут на заседании диссертационного совета Д 003.029.01, созданного на базе Института оптики атмосферы им. В.Е. Зуева СО РАН, по адресу: 634055, г. Томск, пл. Академика Зуева, 1.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке и на сайте Института оптики атмосферы им. В.Е. Зуева СО РАН,

http://www.iao.ru/files/iao/theses/thesis102/text.pdf

Автореферат разослан «___» ____ 2019 г.

Ученый секретарь диссертационного совета, доктор физико-математических наук

6 Ланина Е.К. Панина

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность

Изучение распространения мощных фемтосекундных лазерных импульсов в атмосфере – одно из новейших направлений в современной атмосферной оптике. Яркими проявлениями взаимодействия импульсов данного класса с воздухом являются явления самофокусировки и филаментации, благодаря которым лазерный пучок разбивается на структуры, содержащие экстремальную интенсивность света. Интерес ученых из разных стран мира к данным исследованиям связан в первую очередь с задачами передачи лазерной энергии и дистанционного зондирования окружающей среды.

Самофокусировка света была предсказана Г.А. Аскарьяном в 1962 году. Он также указал на практическую привлекательность данного явления – снижение геометрической и дифракционной расходимости лазерных пучков при их нелинейном распространении. Большой вклад в разработку фундаментальных основ самофокусировки света на начальном этапе внесли лауреаты Нобелевской премии Ч. Таунс, А.М. Прохоров, а также С.А. Ахманов, В.Е. Захаров, Р.В. Хохлов, В.Н. Луговой, В.В. Коробкин, В.И. Таланов, Н.Ф. Пилипецкий, А.П. Сухоруков.

Современный этап исследований самофокусировки и филаментации начался после создания фемтосекундных лазеров, что позволило проводить эксперименты для коллимированного излучения в атмосфере [1-4]. Выполнение данных исследований потребовало развития существующих теоретических представлений. Одним из эффективных разработчиков современных моделей филаментациии лазерных импульсов является научный коллектив под руководством В.П. Кандидова [5]. В международном сборнике трудов [6] приведены результаты исследований, полученные до середины 2000-х годов коллективами из различных научных центров мира.

Дальнейшее развитие фемтосекундных лазерных технологий в атмосферно-оптических исследованиях требует дополнительных (относительно уже известных, установленных в экспериментальных условиях или модельных численных экспериментах) знаний. Наиболее эффективно такие знания могут быть получены в комплексных (натурных, лабораторных, теоретических) исследованиях. В Институте оптики атмосферы им. В.Е. Зуева Сибирского отделения Российской академии наук (ИОА СО РАН) такие исследования ведутся с использованием стенда с титан-сапфировым лазером на 140 метровой воздушной трассе.

Результаты натурных экспериментов по филаментации фемтосекундных лазерных импульсов показали, что для интерпретации полученных данных необходима дополнительная информация о характеристиках формируемых световых структур, например, о границах области филаментации, числе филаментов вдоль трассы и др.; об особенностях множественной филаментации при различных энергетических условиях; о зависимости режимов филаментации от длительности импульса; об особенностях филаментации при телескопировании лазерного пучка. Немаловажной является возможность планирования и прогнозирования результатов экспериментов. Для этого необходимо расширить и развить известные представления и модели распространения мощных фемтосекундных лазерных импульсов на воздушной трассе, поскольку они были разработаны для определенных ситуаций и конкретного набора входных параметров.

Упомянутый выше термин «световая структура» применительно к проблеме филаментации в работе трактуется как область в лазерном пучке, для выполнимость определенных характерна энергетических которой соотношений. Например, дифракционно-лучевая трубка (ДЛТ) является изолированной энергетической системой, она не обменивается энергией с другими трубками. Филамент является открытой энергетической системой – в него поступает дополнительная энергия извне. Таким образом, основываясь на энергетических представлениях можно выделить два типа световых структур: ДЛТ и филаменты. С их помощью удается описать характерные стадии филаментации, включающие предфиламентационное распространение, саму филаментацию, а также формирование постфиламентационных каналов (ПФК). Все эти стадии протекают по-разному в зависимости от параметров лазерного излучения.

В основе анализа динамики и энергетики световых структур лежит амплитудно-фазовый подход в теории распространения излучения. Учет фазы волны при расчете картины самовоздействия позволяет через локальный наклон фазового фронта определить направление тока мощности в различных пространственных областях лазерного пучка – в ДЛТ. В режиме одиночной филаментации в рамках метода ДЛТ лазерный пучок представляет из себя набор вложенных друг в друга трубок, которые не пересекаются в пространстве и не обмениваются энергией. Изменение формы данных трубок распространении позволяет судить физических 0 процессах, при происходящих с излучением в среде. Данный метод является конструктивным для описания одиночной филаментации [7], и его возможно использовать для множественной филаментации.

Резюмируя вышесказанное, можно сформулировать **цель работы** как разработку модели одиночной филаментации коллимированного излучения титан-сапфирового лазера фемтосекундной длительности в воздухе на основе метода дифракционно-лучевых трубок. Достижение данной цели включает следующие **основные задачи**:

1. развитие метода анализа численных решений нелинейного уравнения распространения фемтосекундных лазерных импульсов в воздухе, основанного на амплитудно-фазовом подходе;

2. определение характеристик световых структур при самофокусировке и филаментации фемтосекундных лазерных импульсов в воздухе при вариации начального радиуса пучка, пиковой мощности и длительности импульса;

3. применение метода дифракционно-лучевых трубок для исследования актуальных вопросов атмосферной фемтосекундной оптики.

Научная новизна

• На основе амплитудно-фазового подхода развит метод дифракционно-лучевых трубок для анализа численных решений нелинейного уравнения Шредингера задач распространения фемтосекундных лазерных импульсов в воздухе. Фундаментальной основой метода является понятие эффективной диэлектрической проницаемости, которое было расширено на случай нестационарной нелинейности и дисперсии среды. Это позволило провести численный и качественный анализ формирования и эволюции световых структур в воздухе при самофокусировке и филаментации излучения.

• Получено уравнение для эффективного квадрата радиуса дифракционно-лучевой трубки. Численные решения указанного уравнения показали существование трех стадий эволюции дифракционно-лучевых трубок в условиях филаментации: формирование нелинейного фокуса, филаментация, постфиламентационное распространение. Известное уравнение для эффективного квадрата радиуса всего пучка является частным случаем установленного соотношения.

• Установлено, что для субмиллиметровых лазерных пучков характерны большие энергетические затраты на плазмообразование при филаментации, запасенная световая энергия в энергетически пополняющей трубке может уменьшаться в 2–10 раз при вариации пиковой мощности в импульсе от 6 до 15 ГВт. Длина области филаментации составляет величину от нескольких единиц до десяти и более длин Рэлея. В филаментации участвует практически весь пучок.

• Показано, что для миллиметровых лазерных пучков и длительностей импульса, когда можно не учитывать дисперсию, длина области филаментации не превышает нескольких длин Рэлея, в филаментации участвует узкая приосевая часть пучка, а энергозатраты на ее протекание в разы меньше, чем в случае субмиллиметровых пучков. Найдено, что доля энергии в постфиламентационных каналах слабо зависит от начальных параметров импульса.

• Установлено, что условия проявления дисперсионных искажений в нелинейно-фокусирующей среде изменяются: сокращается дистанция проявления дисперсии. Это может приводить к срыву самофокусировки и филаментации при увеличении начального радиуса лазерного пучка даже при высоких уровнях сверхкритической мощности. • Показано, что координата начала области множественной филаментации фемтосекундных импульсов субтераваттной мощности для сантиметровых лазерных пучков совпадает с координатой начала одиночного филамента для миллиметровых пучков с гигаваттной мощностью в импульсе. Неоднородности интенсивности в исходном профиле лазерного пучка, которые формируют область множественной филаментации сантиметровых лазерных пучков субтераваттной мощности, имеют различный радиус и мощность.

Теоретическая значимость работы состоит развитии в представлений о распространении фемтосекундных лазерных импульсов в воздухе, в частности, существенно расширено понятие эффективной диэлектрической проницаемости на случай нестационарных нелинейных сред, обладающих дисперсией; установлены энергетические характеристики структур, формируемых при одиночной филаментации световых фемтосекундных лазерных импульсов в воздухе; определены основные закономерности характеристик распространения фемтосекундных лазерных импульсов в условиях нормальной дисперсии в нелинейной керровской среде; введена эффективная дисперсионная длина; в рамках стационарного приближения выполнено моделирование филаментации фемтосекундных импульсов для лазерных пучков сантиметрового радиуса.

Практическая значимость результатов работы, полученных для одиночной филаментации, обусловлена возможностью их использования для интерпретации экспериментальных данных по множественной филаментации фемтосекундных лазерных импульсов и обеспечения прогнозирования их распространения для решения прикладных задач атмосферной оптики, в частности, для передачи энергии на протяженных трассах, зондирования атмосферных характеристик, лазерной локации и связи.

Материалы, представленные в диссертации, были использованы при научно-исследовательских работ выполнении (в том числе по государственным заданиям) в рамках программы II.10.3. СО РАН проект «Когерентные и нелинейные световые структуры в атмосфере» (2012-2016 гг.); программы президиума РАН «Экстремальные световые поля и их приложения» «Распространение высокоэнергетического проект фемтосекундного лазерного излучения в атмосфере» (2014 г.); программы Президиума фундаментальных исследований I.31Π PAH проект «Фундаментальные проблемы взаимодействия мощного лазерного излучения ультракороткой длительности в диапазоне длин волн от ближнего УФ до среднего ИК с оптическими элементами в атмосфере» (2016 г.); программы ФНИ СО РАН II.10.3. проект «Когерентные и нелинейные оптические явления в атмосфере» (2017-2019 гг.).

Методология исследования основана на численном моделировании распространения фемтосекундных лазерных импульсов в воздухе. Основой

для моделирования являлось уравнение для медленно меняющейся комплексной амплитуды электрического поля световой волны (нелинейное уравнение Шредингера (НУШ)). Программа была разработана в лаборатории нелинейно-оптических взаимодействий ИОА СО РАН. Для проведения моделирования использовались ресурсы Сибирского суперкомпьютерного центра СО РАН. Анализ результатов численного моделирования проводился на основе метода дифракционно-лучевых трубок.

Положения, выносимые на защиту

1. Компенсацию энергопотерь на плазмообразование на протяжении всего жизненного цикла филамента осуществляет световая структура энергетически пополняющая дифракционно-лучевая трубка, являющаяся таким образом его энергетическим резервуаром, а после окончания филаментации трансформирующаяся в постфиламентационный световой канал. Энергетическое пополнение филамента осуществляется за счет поперечного притока мощности из прилегающей трубки.

2. Филаментация лазерных пучков с субмиллиметровыми радиусами характеризуется большими энергетическими потерями, связанными с плазмообразованием, формированием длинных филаментов в десятки рэлеевских длин с квазинепрерывным плазменным наполнением вдоль трассы. При увеличении радиуса лазерного пучка в области миллиметровых значений возрастают аберрации его профиля, что приводит к нестабильности размера области филаментации, длина которой сопоставима с длиной Рэлея, вдоль трассы, уменьшению потерь на филаментацию и снижению энергетических затрат в пополняющей трубке, требуемых для обеспечения филаментации.

3. Для миллиметровых лазерных пучков наблюдается значительная локализация света в дифракционно-лучевых трубках вблизи области фокуса для центральных временных слоев лазерного импульса, что объясняет эффект подобия в зависимости нормированной на длину Рэлея координаты начала филаментации от отношения пиковой мощности к критической для различных начальных радиусов пучка.

4. Угловая расходимость постфиламентационного светового канала уменьшается на порядок при увеличении начального радиуса лазерного пучка от субмиллиметровых до миллиметровых значений, и для последних составляет около 20–25 мкрад; средняя мощность в данном канале слабо зависит от начальных параметров импульса и не превышает значения критической мощности самофокусировки *P*_{cr}, составляя (0,6–0,9)*P*_{cr}.

5. В условиях проявления эффекта нормальной дисперсии групповой скорости в воздухе при возрастании дисперсионных искажений реализуется увеличение координаты начала филаментации и сокращение длины

филамента, что обусловлено выравниванием значений мощности на переднем фронте и в центре импульса. С увеличением начального радиуса лазерного пучка в следствии фактора усиления дисперсионных искажений в условиях самофокусировки может происходить срыв филаментации даже при больших сверхкритических мощностях.

Достоверность полученных результатов подтверждается ИХ непротиворечивостью физической И согласованием имеющимися с физическими представлениями о распространении фемтосекундных лазерных импульсов, сформированными на основе результатов натурных, лабораторных и численных экспериментов, выполненных в независимых научных коллективах. При проведении моделирования достоверность обеспечивалась тестированием результатов численных расчетов на примерах известных решений, а также качественным и количественным сопоставлением численных решений ланными экспериментальных исследований. с проведенных в ИОА СО РАН и других научных организациях.

Апробация результатов работы

Основные результаты диссертационного исследования изложены в 22 работах, из которых 6 статей опубликованы в рецензируемых периодических журналах из перечня ВАК.

Основные результаты были представлены на 10-и международных и всероссийских конференциях: Всероссийской конференции студенческого научно-исследовательского инкубатора (Томск. 2014 г.). 53-ей Международной научной студенческой конференции «Студент и научнотехнический прогресс» (Новосибирск, 2015 г.), Международном симпозиуме «Оптика атмосферы и океана. Физика атмосферы» (Томск, Иркутск, 2016-2018 гг.), Международной научно-практической конференции «Актуальные проблемы радиофизики» (Томск, 2015, 2019 г.), XXV Всероссийской открытой конференции «Распространение радиоволн» (Томск, 2016 г.). VII Международной конференции по фотонике и информационной оптике (Москва, 2018 г.), 24 Всероссийской научной конференции студентов-физиков и молодых ученых (Томск, 2018 г.).

Структура и объем работы

Диссертация состоит из введения, 4 глав, заключения, списка сокращений и условных обозначений, списка литературы. Общий объем работы составляет 134 страницы, включая 39 рисунков и 3 таблицы. Список литературы содержит 143 наименования.

Личный вклад автора состоит в проведении, обработке и анализе выполненных в работе расчетов, в представлении результатов диссертационного исследования на конференциях и в подготовке основных публикации по теме диссертации. Постановка задач диссертации, а также развитие метода, предложенного научным руководителем, проводилась совместно с ним. Полученные результаты обсуждались автором с научным руководителем и научным консультантом.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении дана общая характеристика диссертационной работы: обоснована актуальность темы исследования, определены цель и задачи работы, аргументированы научная новизна, теоретическая и практическая значимость, указаны положения, выносимые на защиту, приведена информация о достоверности полученных результатов и их апробации, а также о личном вкладе автора.

В первой главе проанализированы результаты теоретических и экспериментальных исследований по распространению фемтосекундных лазерных импульсов в оптических средах. Описаны физические процессы, определяющие формирование и эволюцию световых структур при самофокусировке и филаментации лазерных импульсов.

Во **второй главе** представлена теоретическая концепция нестационарной дифракционно-лучевой оптики мощных фемтосекундных лазерных импульсов, в рамках которой мощность пучка распространяется по специфическим локализованным световым структурам – ДЛТ.

В разделе 2.1 приведены основные соотношения дифракционнолучевой оптики. Они получены в рамках амплитудно-фазового подхода, в основе которого лежит переход от комплексной амплитуды электрического поля U(x, y, z; t) световой волны к действительным амплитуде A(x, y, z; t) и возмущению фазы $\varphi(x, y, z; t)$ волны: $U = Ae^{i\varphi}$, где x, y – координаты поперечного вектора \mathbf{r}_{\perp} ; z – продольная координата; t – время. Комплексная амплитуда электрического поля световой волны U, для которой записано НУШ [6], связана с его напряженностью E соотношением

 $E(x, y, z; t) = U(x, y, z; t)\exp(-i\omega_0 t + ik_0 z),$

где ω_0 , k_0 – центральные частота и волновое число лазерного излучения. Начальный профиль поперечного распределения амплитуды лазерного излучения с плоским фазовым фронтом задавался гауссовской функцией

$$U(\mathbf{r}_{\perp}, z=0, t) = U_0 \exp\left[-\left(\frac{t}{2t_p}\right)^2 - \left(\frac{|\mathbf{r}_{\perp}|}{2R_0}\right)^2\right],$$

где U_0 – начальное значение комплексной амплитуды электрического поля. Значения длительности импульса t_p и начального радиуса пучка R_0 определялись по уровню e^{-1} .

При переходе к действительным характеристикам возникают два связанных друг с другом уравнения для A и φ , которые в рамках амплитуднофазового подхода записываются с использованием характеристических дифференциальных уравнений для переменных \mathbf{R}_{d} , z, τ_{dis} . В результате, уравнения для мгновенного дифракционного \mathbf{R}_d и «временно́го» τ_{dis} лучей представляются в виде

$$\frac{d^{2}\mathbf{R}_{d}}{dz^{2}} = \frac{1}{2}\nabla_{\perp}\widetilde{\varepsilon}_{ef}\left(\mathbf{R}_{d}, z; \tau_{dis}\right), \quad \frac{d^{2}\tau_{dis}}{dz^{2}} = -k_{\omega}''\frac{k_{0}}{2}\frac{\partial\widetilde{\varepsilon}_{ef}\left(\mathbf{R}_{d}, z; \tau_{dis}\right)}{\partial t}.$$

Здесь $k_{\omega}^{"}$ – коэффициент дисперсии групповой скорости; $\tilde{\epsilon}_{ef} = \epsilon_{ef} / \epsilon_0 - 1 - возмущение эффективной диэлектрической проницаемости <math>\epsilon_{ef} = \epsilon_0 + \epsilon_n + \epsilon_d + \epsilon_{dis}$, где ϵ_0 – ее невозмущенное значение, ϵ_n , ϵ_d и ϵ_{dis} – компоненты, возникающие вследствие нелинейности среды, дифракции и дисперсии групповой скорости волнового пакета, соответственно.

Каждый дифракционный луч (ДЛ) определяет пространственную траекторию, касательная к которой совпадает с направлением нормированного на интенсивность волны вектора Умова-Пойнтинга. Множество близкорасположенных ДЛ образует ДЛТ. Временные лучи показывают направление перераспределения интенсивности между временными слоями внутри импульса при его распространении.

В разделе 2.2 с помощью метода характеристик модифицированы уравнения для интенсивности и плотности энергии изучения. Получено уравнение для мощности в ДЛТ. Установлено соотношение для баланса мощностей различных процессов в области филаментации

$$2\pi R_{fil} I_{fil} \left(R_{fil} \left(\frac{dR_{fil}}{dz} - \frac{dR_d(R_{fil})}{dz} \right) = -2\pi \int_0^{R_{gl}} \frac{\partial S_t}{\partial t} R dR + \left\langle \alpha_n \right\rangle_{\sigma} P_{cr},$$

где $R_{\rm fil}$, $I(R_{\rm fil})$ – поперечный размер области филаментации и интенсивность на ее на границе, соответственно; $S_t = k_{\omega}^{"}I \frac{\partial \varphi}{\partial t}$ – функция источника, характеризующая изменение плотности потока энергии, запасенной за счет дисперсии в предыдущих временных слоях импульса; $\langle \alpha_n \rangle_{\sigma}$ – усредненный по сечению области филаментации нелинейный коэффициент поглощения; $P_{\rm cr}$ – критическая мощность самофокусировки.

В разделе 2.3 рассмотрено усредненное описание ДЛТ. Получено уравнение для усредненных по времени ДЛ R_{dw}

$$\frac{d^2 \mathbf{R}_{dw}}{dz^2} = \frac{1}{2} \left\langle \nabla_{\perp} \widetilde{\mathbf{\epsilon}}_{ef} \right\rangle_t$$

и уравнение эффективных квадратов радиусов ДЛТ $R_{\rm ed}$, которое в цилиндрических координатах имеет вид

$$\frac{d^{2}\langle R_{ed}^{2}\rangle}{dz^{2}} = 2\left(\theta_{d}^{2} + \theta_{\phi}^{2}\right) + \frac{2\pi}{W}\int_{0}^{R_{dw}}\int_{-\infty}^{\infty} R^{2}\frac{\partial\varepsilon_{n}}{\partial R}dRdt + \frac{2\pi}{W}\int_{0}^{R_{dw}}\int_{-\infty}^{\infty} R^{2}\frac{\partial\varepsilon_{dis}}{\partial R}dRdt - \frac{4\pi}{Wk_{0}}\int_{0}^{\infty}\int_{-\infty}^{\infty} R^{2}\alpha_{n}\frac{\partial\varphi}{\partial r}IdRdt + \frac{4\pi}{W}\int_{0}^{R_{dw}}\int_{-\infty}^{\infty} R^{2}\alpha_{n}\frac{\partial\varphi}{\partial r}IdRdt - \frac{4\pi}{dz}\left[\frac{2\pi}{W}\int_{0}^{R_{dw}}\int_{-\infty}^{\infty} R^{3}\alpha_{n}IdRdt - \frac{2\pi}{W}\int_{0}^{R_{dw}}\int_{-\infty}^{\infty} R\alpha_{n}I\langle R_{ed}^{2}\rangle dRdt\right],$$

где θ_d , θ_{ϕ} – дифракционная и фазовая составляющие угловой расходимости излучения в ДЛТ, W – энергия в ДЛТ. Получение данных уравнений обусловлено практической необходимостью, поскольку экспериментальные исследования ведутся для усредненных характеристик.

В **разделе 2.4** приведены пороговые соотношения для нестационарной филаментации в рамках безаберрационного приближения.

В разделе 2.5 приведены примеры построения дифракционнолучевых картин (рисунок 1), а также их использования в задаче филаментации фемтосекундных лазерных импульсов. На рисунке 1 параметры излучения взяты следующими: длина волны $\lambda_0 = 800$ нм, длительность импульса $t_p = 100$ фс, относительная пиковая мощность $\eta = P_0/P_{cr} = 6$ (здесь P_0 начальная пиковая мощность, $P_{cr} = 3,2$ ГВт), начальный радиус пучка $R_0 = 1$ мм.



Рисунок 1 – Зависимость корня из эффективного квадрата радиуса ДЛТ, нормированного на начальный радиус пучка, вдоль трассы при филаментации фемтосекундных лазерных импульсов

В третьей главе определены пространственные и энергетические характеристики световых структур, формируемых в воздухе при самофокусировке и филаментации фемтосекундных лазерных импульсов с различными начальными параметрами.

В разделе 3.1 рассмотрена динамика ДЛТ при распространении фемтосекундных лазерных импульсов и показаны отличия, характерные для ДЛТ в различных временных слоях импульса $\tau = (t-z/v_g)/t_p$, где v_g – групповая скорость импульса. Показано, что в рамках дифракционно-лучевой оптики процесс самовоздействия излучения выражается в нерегулярном изменении поперечного сечения усредненных ДЛТ, когда часть из них сжимается за счет эффекта самофокусировки, а часть, наоборот, расходится, обеспечивая глобальную расходимость всего пучка.

В **разделе 3.2** определены отличия, характерные для самофокусировки и филаментации субмиллиметровых и миллиметровых лазерных пучков (рисунок 2).

Так для субмиллиметровых пучков (рисунок 2а) характерны большие энергетические затраты на плазмообразование; длина квазинепрерывной области филаментации составляет от нескольких единиц до десяти и более длин Рэлея; в филаментации участвует практически весь пучок. На рисунке 2 радиус ДЛТ R_d нормирован на начальный радиус пучка R_0 , продольная координата z – на длину Рэлея $L_R = k_0 R_0^2/2$.



Рисунок 2 – Зависимость относительных радиусов ДЛТ для центрального временного слоя импульса вдоль трассы для пучков радиусом $R_0 = 0,18$ (a) и 1 мм (б)

Для миллиметровых пучков (рисунок 2б) длина области филаментации не превышает нескольких длин Рэлея, в филаментации участвует узкая приосевая часть пучка, а энергозатраты на плазмообразование в разы меньше, чем в случае субмиллиметровых пучков. Также для миллиметровых лазерных пучков реализуется локализации света, которая состоит в уменьшении радиуса нелинейного фокуса относительно радиуса всего пучка (рисунок 3). При этом наблюдается стабилизация относительной координаты фокуса $z_{\rm f}/L_{\rm R}$.



Рисунок 3 – Зависимость нормированного радиуса (а) и относительной координаты (б) нелинейного фокуса от начального радиуса ДЛТ для пучков с различным начальным радиусом и относительной пиковой мощностью η = 6

В разделе 3.3 установлены зависимости радиуса и мощности энергетически пополняющей ДЛТ, которая на начальном этапе обеспечивает самофокусировку пучка, а затем поддерживает существование филамента и ПФК, касаясь области филаментации в разные моменты времени в различных точках трассы, для пучков различного начального радиуса и пиковой мощности при фиксированной длительности импульса (рисунок 4а,б). Это позволило проанализировать зависимость нормированной координаты начала филаментации, определяемой по положению нелинейного фокуса энергетически пополняющей ДЛТ, от начальных параметров излучения (рисунок 4в).



Рисунок 4 – Зависимость нормированного начального радиуса (а) и относительной мощности (б) энергетически пополняющей ДЛТ, а также нормированной координаты начала филаментации (в) от относительной начальной пиковой мощности импульса для пучков различного радиуса

Так из рисунка 4в видно, что в нормированных координатах (η ; $z_{\rm f}/L_R$) приближение начала области филаментации к источнику излучения происходит не только при увеличении начальной пиковой мощности импульса, но и при увеличении начального радиуса лазерного пучка с субмиллиметровых до миллиметровых значений.

В разделе 3.4 показано, что энергетические затраты излучения на филаментацию снижаются при увеличении радиуса пучка (рисунок 5).



Рисунок 5 – Зависимость энергии в энергетически пополняющей ДЛТ от дистанции распространения (а) и от начальной энергии в лазерных импульсах (б)

На этапе постфиламентационного распространения импульса доля энергии излучения в энергетически пополняющей ДЛТ $W_{\rm ft}$, которая определяет границы ПФК, составляет около 0,22–0,32 мДж (серая область на рисунке 5а). При пересчете на мощность это соответствует значениям $(0,6-0,9)P_{\rm cr}$, т.е. средняя мощность в ПФК не превышает критическую мощность самофокусировки для гауссова пучка и слабо зависит от начальных параметров импульса.

В разделе 3.5 при рассмотрении постфиламентационной стадии распространения излучения установлено, что угловая расходимость ПФК уменьшается с увеличением начального радиуса пучка с субмиллиметровых до миллиметровых значений R_0 , составляя для последних около 20–25 мкрад (рисунок 6).



Рисунок 6 – Зависимость угловой расходимости ПФК от начального радиуса пучка для лазерных импульсов с различной относительной пиковой мощностью

В четвертой главе представлены примеры применения дифракционно-лучевой модели филаментации фемтосекундных лазерных импульсов к задачам атмосферной оптики.

В **разделе 4.1** рассмотрено влияние нормальной дисперсии на распространение лазерных импульсов различной длительности в воздухе. Сравнение значений нормированной координаты нелинейного фокуса энергетически пополняющей ДЛТ для импульсов длительностью 100 и 20 фс (рисунок 7) показало, что при уменьшении длительности импульса данная координата растет при увеличении начального радиуса миллиметровых лазерных пучков (область II на рисунке 7). При этом влияние дисперсии для импульсов длительностью 20 фс проявляется даже в случаях, когда длина дисперсии не является наименьшим масштабом из всех характерных продольных масштабов задачи.



Рисунок 7 – Зависимость нормированной координаты нелинейного фокуса от начального радиуса лазерного пучка с относительной пиковой мощностью $\eta = 6$

Показано, что при учете дисперсии начальный радиус энергетически пополняющей ДЛТ и угловая расходимость ПФК увеличиваются; координата нелинейного фокуса слабо варьируется для разных временных слоев лазерного импульса (сплошные кривые на рисунке 8а); при увеличении начального радиуса пучка может реализоваться бесфиламентационное распространение (рисунок 8б).



Рисунок 8 – Зависимость нормированной координаты нелинейного фокуса для разных временных слоев лазерного импульса (а) и зависимость максимальной концентрации свободных электронов от начального радиуса пучка (б) с относительной пиковой мощностью η = 6

Для проведения оценок влияния нормальной дисперсии на самофокусировку и филаментацию фемтосекундных лазерных импульсов получено выражение для эффективной длины дисперсии.

В разделе 4.2 рассмотрена эволюция световой структуры, которая формируется из локализованной неоднородности интенсивности на волновом фронте, при филаментации широкоапертурных лазерных пучков в воздухе. Указанная неоднородность моделировалась гауссовым пучком с начальным

радиусом $r_0 = 3,5$ мм, относительной пиковой мощностью $\eta = 6$ и длительностью импульса $t_p = 100$ фс (рисунок 9).



Рисунок 9 – Зависимость эффективного радиуса световой неоднородности *R*_{ef}, поперечного масштаба плотности энергии неоднородности по уровню e⁻¹ *R*_w и эффективного радиуса световой структуры *R*_{ed} вдоль трассы. Серая область соответствует радиусу высокоинтенсивных пятен в поперечном профиле пучка в области филаментации, взятому из работы [8]

Показано, что начало области филаментации для сантиметрового пучка субтераваттной мощности (эксперимент) и миллиметрового пучка гигаваттной мощности (расчет) приходится на одинаковое расстояние от источника лазерных импульсов (рисунок 9). При этом состоящая из отдельных филаментов область множественной филаментации формируется при самофокусировке и филаментации отдельных неоднородностей интенсивности светового поля с различными начальными радиусами и мощностью.

В разделе 4.3 выполнены оценки поперечного размера и мощности неоднородности интенсивности светового поля, которая формирует начало области множественной филаментации. Анализ экспериментальных данных из работ [9–14] и результатов численного моделирования показал, что в формировании области филаментации на большем расстоянии от источника лазерных импульсов участвуют неоднородности с большим начальным радиусом и меньшей мощностью (рисунок 10). При этом для радиуса неоднородностей характерны значения в несколько миллиметров, а для мощности – в десятки гигаватт.



Рисунок 10 – Зависимость координаты начала филаментации от мощности η в неоднородностях различного начального радиуса. Числа у линий соответствуют радиусу неоднородности *r*₀

В разделе 4.4 на основе результатов, полученных для ближней ИК-области спектра ($\lambda_0 = 800$ нм), сделаны оценки для лазерных импульсов УФ-, видимого и среднего ИК-диапазонов, из которых следует, что радиус неоднородности интенсивности можно определить, как $r_0 \sim 10^3 \lambda$.

4.5 представлены В разделе результаты моделирования филаментации фемтосекундных импульсов для лазерных пучков сантиметрового радиуса. Поскольку численное решение НУШ для данного класса пучков требует значительных вычислительных ресурсов. моделирование проводилось в рамках стационарного приближения [15]. Расчет, проведенный для пучка радиусом $R_0 = 1,25$ см (рисунок 11), показал, что при увеличении начальной пиковой мощности поперечный размер фокуса возрастает. Это говорит о тенденции формирования большего числа филаментов в поперечном сечении лазерного пучка, что наблюдалось в экспериментах [9, 12, 13]. При этом нормированная координата начала филаментации приближается к источнику излучения.



Рисунок 11 – Зависимость относительного эффективного радиуса лазерного пучка гауссовой формы вдоль трассы при различной начальной пиковой мощности импульса

В заключении сформулированы основные результаты исследования:

1. Установлена фундаментальная роль эффективной диэлектрической проницаемости среды, формирующейся под действием мощного фемтосекундного лазерного импульса в воздухе, в явлениях самофокусировки и филаментации распространяющегося излучения. Данное понятие использовалось в качестве ключевого для разработки метода ДЛТ для задач фемтосекундной лазерной самофокусировки и филаментации.

2. Проведен качественный анализ основных процессов, сопровождающих распространение мощных фемтосекундных лазерных импульсов в воздухе при вариации входных параметров задачи. Для этой цели были модифицированы с помощью метода характеристик уравнения для интенсивности, плотности энергии излучения; получено уравнение для мощности в ДЛТ; установлено соотношение для баланса мощностей различных процессов в области филаментации. Получено уравнение для среднего по времени квадрата радиуса ДЛТ, численное решение которого позволило подтвердить существование трех стадий эволюции световой энергетически пополняющей структуры ДЛТ: дофиламентационное распространение, филаментация и постфиламентационное каналирование.

3. Численным расчетом показано, что существование световой структуры филамента обеспечивается за счет части энергии лазерного пучка. Она содержится в ДЛТ с начальной пиковой мощностью, превышающей критическую мощность для гауссова пучка при стационарной самофокусировке. филаменте, связанные Потери энергии в с плазмообразованием, компенсируются притоком энергии из прилегающей ДЛТ.

4. На основе численных экспериментов установлены следующие закономерности:

а) При увеличении начального радиуса лазерного пучка с субмиллиметровых до миллиметровых значений происходит сокращение энергетических потерь, связанных с плазмообразованием, уменьшение длины области филаментации, нормированной на длину Рэлея, относительного начального радиуса и пиковой мощности в энергетически пополняющей ДЛТ, угловой расходимости ПФК, а также наблюдается локализация света в ДЛТ вблизи области фокуса.

б) При увеличении пиковой мощности в импульсе относительный начальный радиус энергетически пополняющей ДЛТ уменьшается, пиковая мощность в данной трубке увеличивается, координата начала области филаментации приближается к началу трассы.

в) Для миллиметровых лазерных пучков мощность в ПФК слабо зависит от начальных параметров лазерных импульсов и в среднем не превышает критическую мощность самофокусировки *P*_{cr}, составляя (0,6-0,9)*P*_{cr}; угловая расходимость ПФК составляет около 20-25 мкрад.

5. Численным путем и качественным анализом установлено проявление дисперсии в случае, когда дисперсионная длина не является наименьшим масштабом из всех характерных продольных масштабов задачи. Показано, что при уменьшении длительности импульса со 100 до 20 фс нормированный радиус энергетически пополняющей ДЛТ, относительная координата начала филаментации в центральных временных слоях импульса и угловая расходимость ПФК увеличиваются, длина области филаментации сокращается; при увеличении начального радиуса лазерного пучка может произойти срыв филаментации. Получено выражение для характерного эффективного дисперсионного масштаба, с помощью которого проводится оценка влияния нормальной дисперсии на распространение фемтосекундных лазерных импульсов в воздухе.

6. Численными расчетами. а также на основе анализа экспериментальных данных установлено, что для сантиметровых лазерных пучков область множественной филаментации фемтосекундных импульсов субтераваттной мощности, состоящая из отдельных филаментов, формируется из различных миллиметровых неоднородностей интенсивности в профиле исходного пучка, содержащих гигаваттную мощность. Показано, что при множественной филаментации лазерных импульсов увеличение начальной пиковой мощности приводит к увеличению радиуса фокуса, что говорит о формировании большего числа филаментов в поперечном сечении лазерного пучка.

ОСНОВНЫЕ ПУБЛИКАЦИИ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

Статьи в журналах, включенных в Перечень рецензируемых научных изданий, в которых должны быть опубликованы основные научные результаты диссертаций на соискание ученой степени кандидата наук, на соискание ученой степени доктора наук:

1. Землянов А.А., Булыгин А.Д., Гейнц Ю.Э., Минина О.В. Динамика световых структур при филаментации фемтосекундных лазерных импульсов в воздухе // Оптика атмосферы и океана. 2016. Т. 29. № 5. С. 359–368.

2. Гейнц Ю.Э., Землянов А.А., Минина О.В. Дифракционно-лучевая оптика филаментации: І. Формализм дифракционных лучей и световых трубок // Оптика атмосферы и океана. 2018. Т. 31. № 5. С. 364–371.

3. Гейнц Ю.Э., Землянов А.А., Минина О.В. Дифракционно-лучевая оптика филаментации: П. Дифракционно-лучевая картина филаментации лазерного импульса // Оптика атмосферы и океана. 2018. Т. 31. № 7. С. 515–522.

4. Гейнц Ю.Э., Землянов А.А., Минина О.В. Моделирование самофокусировки фемтосекундных лазерных импульсов в воздухе методом

дифракционно-лучевых трубок // Оптика атмосферы и океана. 2019. Т. 32. № 2. С. 120–130.

5. Гейнц Ю.Э., Землянов А.А., Минина О.В. Моделирование самофокусировки фемтосекундных лазерных импульсов при нормальной дисперсии в воздухе методом дифракционно-лучевых трубок // Оптика атмосферы и океана. 2019. Т. 32. № 5. С. 337–345.

6. Землянов А.А., Гейнц Ю.Э., Минина О.В. Оценка характеристик области множественной филаментации фемтосекундных лазерных импульсов в воздухе на основе модели одиночной филаментации // Оптика атмосферы и океана. 2019. Т. 32. № 8. С. 601–608.

Geints Yu.E., Minina O.V., Zemlyanov A.A. Diffraction-ray tubes analysis of ultrashort high-intense laser pulse filamentation in air // Journal of the Optical Society of America B. 2019. (*в печати*).

СПИСОК ЦИТИРУЕМОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. Braun A., Korn G., Liu X., Du D., Squier J., Mourou G. Self-channeling of high-peak-power femtosecond laser pulses in air // Opt. Lett. 1995. V. 20. Iss. 1. P. 73–75.

2. Nibbering E.T.J., Curley P.F., Grillon G., Prade B.S., Franco M.A., Salin F., Mysyrowicz A. Conical emission from self-guided femtosecond pulses in air // Opt. Lett. 1996. V. 21. Iss. 1. P. 62–64.

3. 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 // Opt. Lett. 1997. V. 22. Iss. 5. P. 304–306.

4. Mlejnek M., Wright E.M., Moloney J.V. Dynamic spatial replenishment of femtosecond pulses propagating in air// Opt. Lett. 1998. V. 23. P. 382–384.

5. Чекалин С.В., Кандидов В.П. От самофокусировки световых пучков – к филаментации лазерных импульсов // УФН. 2013. Т. 183. № 2. С. 133–152.

6. Self-focusing: Past and Present. Fundamentals and Prospects / R.W. Boyd, S.G. Lukishova, Y.R. Shen (eds.). Berlin: Springer, 2009. 605 p.

7. Geints Y.E., Bulygin A.D., Zemlyanov A.A. Model description of intense ultra-short laser pulse filamentation: multiple foci and diffraction rays // Applied Physics B. 2012. V. 107. Iss. 1. P. 243–255.

8. Апексимов Д.В., Землянов А.А., Иглакова А.Н., Кабанов А.М., Кучинская О.И., Матвиенко Г.Г., Ошлаков В.К., Петров А.В., Соколова Е.Б. Локализованные световые структуры с высокой интенсивностью при множественной филаментации фемтосекундного импульса титансапфирового лазера на воздушной трассе // Оптика атмосферы и океана. 2017. Т. 30. № 11. С. 910–914.

9. Méchain G., D'Amico C., André Y.-B., Tzortzakis S., Franco M., Prade B., Mysyrowicz A., Couairon A., Salmon E., Sauerbrey R. Range of plasma filaments created in air by a multi-terawatt femtosecond laser // Optics Communications. 2005. V. 247. Iss. 1–3. P. 171–180.

10. Daigle J.-F. Filamentation in air: evolution, control and applications. Dis. Ph. D. Quebec, 2012. 132 p.

11. Апексимов Д.В., Букин О.А., Голик С.С., Землянов А.А., Иглакова А.Н., Кабанов А.М., Кучинская О.И., Матвиенко Г.Г., Ошлаков В.К., Петров А.В., Соколова Е.Б., Хорошаева Е.Е. Пространственные характеристики области филаментации гигаваттных лазерных импульсов при их различной фокусировке на атмосферной трассе // Оптика атмосферы и океана. 2014. Т. 27. № 12. С. 1042–1046.

12. Апексимов Д.В., Землянов А.А., Иглакова А.Н., Кабанов А.М., Кучинская О.И., Матвиенко Г.Г., Ошлаков В.К., Петров А.В. Филаментация тераваттных лазерных импульсов на стометровой атмосферной трассе // Оптика атмосферы и океана. 2015. Т. 28. № 3. С. 274–277.

13. Апексимов Д.В., Землянов А.А., Иглакова А.Н., Кабанов А.М., Кучинская О.И., Матвиенко Г.Г., Ошлаков В.К., Петров А.В. Множественная филаментация лазерных пучков различного диаметра в воздухе на трассе длиной 150 м // Оптика атмосферы и океана. 2016. Т. 29. № 1. С. 51–55.

14. Апексимов Д.В., Землянов А.А., Иглакова А.Н., Кабанов А.М., Кучинская О.И., Матвиенко Г.Г., Ошлаков В.К., Петров А.В. Глобальная самофокусировка и особенности множественной филаментации излучения субтераваттного титан-сапфирового лазера с сантиметровым диаметром выходной апертуры на 150-метровой трассе // Оптика атмосферы и океана. 2017. Т. 30. № 9. С. 727–732.

15. Апексимов Д.В., Гейнц Ю.Э., Землянов А.А., Кабанов А.М., Матвиенко Г.Г., Ошлаков В.К. Филаментация фемтосекундных лазерных импульсов в воздухе / под общей ред. д.ф.-м.н., проф. А.А. Землянова. Томск: Изд-во ИОА СО РАН, 2017. 162 с.