

Тема работы:

Численное моделирование распространения мощных ультракоротких лазерных импульсов в нелинейной среде в режиме самовоздействия.

Состав коллектива:

Гейнц Юрий Эльмарович, д.ф.-м.н., г.н.с. ИОА СО РАН;
Землянов Александр Анатольевич, д.ф.-м.н., г.н.с. ИОА СО РАН;
Булыгин Андрей Дмитриевич, к.ф.-м.н., н.с. ИОА СО РАН;
Минина Ольга Владимировна, м.н.с. ИОА СО РАН

Финансовая поддержка:

РНФ № 16-17-10128 «Дальнее распространение мощного лазерного излучения ультракороткой длительности в атмосфере в режиме множественной филаментации», рук. Ю.Э. Гейнц (ИОА), 2016-2018.

Научное содержание работы:

1. Цель исследований

Теоретические исследования по созданию кучного распределения филаментов в зоне мишени при помощи профилирования лазерного пучка и фазовой коррекции его пространственных зон. Обобщение разработанной методологии управляемой филаментации на случай распространения мощного фемтосекундного лазерного излучения тераваттной мощности в воздухе.

2. Современное состояние проблемы

Атмосферное распространение мощного ультракороткого лазерного излучения на километровые дистанции впервые наблюдалось франко-немецкой научной группой в рамках международного лидарного проекта "Teramobile" (*H. Wille et al., European Physical Journal - Applied Physics, 2002*). В опубликованных на рубеже прошедшего и нынешнего столетий работах сообщается о наблюдении нелинейных трансформаций пучка тераваттного Ti:Sapphire-лазера (длина волны 800 нм, длительность импульса 100 фс, пиковая мощность до 3 ТВт, диаметр пучка 3 см) вплоть до 2-х км на вертикальной атмосферной трассе. Эти трансформации выражались в каналировании центральной части лазерного пучка вблизи нелинейного фокуса и были идентифицированы авторами как филаментация излучения. Возникающее при этом широкополосное излучение («белый свет») регистрировалось с расстояний порядка 20 км астрономическим телескопом. Авторы сообщают о развитии хаотичной множественной филаментации пучка излучения и регистрации до 400 индивидуальных высокоинтенсивных каналов на дистанции от 100 м до 320 м в зависимости от глубины начального chirпирования импульсов (*Bejot et al., Appl. Phys. Lett., 2007*).

Важным аспектом проблемы дальнейшей передачи высокой мощности ультракороткого лазерного излучения является рассмотрение внутренней структуры филаментированного пучка и ее динамических характеристик вдоль трассы распространения. Предварительные исследования, выполненные в работах канадской (*Hosseini et al., Appl. Phys. B, 2004; Luo et al., Appl. Opt., 2005*) и франко-немецкой групп (*Berge et. al., Phys. Rev. Lett., 2004*), показали, что в режиме множественной филаментации происходит взаимодействие отдельных филаментов внутри пучка. Причем это взаимодействие может носить характер конкуренции, или же кооперации в борьбе за энергию «резервуара» пучка. Близко расположенные филаменты эффективно взаимодействуют через интерференцию концентрических колец,

окружающих каждый из филаментов (*Aközбек et al., J. Modern Opt., 2002*), что приводит к генерированию новых нелинейных фокусов в режиме «оптической турбулентности». Если филаменты пространственно рассеяны по сечению светового пучка, то каждый из них развивается по своему, достаточно изолированному сценарию, однако воздействие на «соседей» проявляется посредством керровской нелинейности, способствующей забору энергии пучка из широкой области вокруг филамента. От того, как протекает взаимодействие филаментов, зависит общая протяженность области филаментации, а также суммарная передаваемая мощность атмосферной трассы (*Mejean et al., Phys. Rev. E, 2005*). Следовательно, контроль над динамикой множественной филаментации мощного лазерного импульса, управление числом и взаимным расположением филаментов имеют первостепенное значение для решаемой в проекте задачи.

3. Подробное описание работы, включая используемые алгоритмы.

В основу сценария управления самофокусировкой мощного импульсного лазерного излучения в атмосфере положена концепция физической природы филаментации, разработанная в авторском коллективе. Она отличается от таковых, принятых в других научных коллективах. Практически для всех моделей филамент рассматривается как некоторая волновая структура. В нашей концепции основной «активный элемент» – дифракционно-лучевая трубка, внутри которой сформирован филамент. Взаимодействие между различными трубками в режиме множественной филаментации определяет конфигурацию области филаментации. Управление конфигурацией филаментарной структуры позволяет создавать экстремальные для атмосферы световые поля в прогнозируемом месте пространства. Авторами проекта также используется подход нахождения критериев подобия физических явлений, протекающих в лабораторных условиях и в реальной атмосфере.

Теоретические исследования в рамках проекта проводились в нескольких направлениях. Первое из них связано с моделированием нелинейного самовоздействия мощного импульсного излучения на воздушной трассе с частотно-зависимым поглощением. Были исследованы закономерности филаментации импульсов с длиной волны в ближней и в средней ИК областях спектра с целью оценки перспективности их использования в атмосферно-оптических приложениях.

В качестве эволюционного уравнения для оптического поля лазерного импульса в нелинейной среде рассматривалось уравнение однонаправленного распространения комплексной огибающей в 4D-мерной области пространственно-временных частот. Полная задача описания множественной филаментации лазерного импульса заключается в расчете пространственной динамики оптического поля по всем координатным осям в условиях действия оптической нелинейности среды (эффект Керра), ее фотоионизации и образования плазменных областей. Исходная система уравнений помимо линейных эффектов (дифракция, поглощение) позволяет корректно учесть «временную память» среды распространения, связанную с частотной дисперсией временного профиля светового импульса, инерционностью кубичной нелинейности (комбинационным саморассеянием) и нестационарностью плазменной дефокусировки. В данном представлении постоянная распространения волны содержит всю необходимую информацию о дифракции пучка, а также о частотной дисперсии групповой скорости спектрально ограниченного волнового пакета – импульса. Для задания хроматической дисперсии показателя преломления воздуха в окнах прозрачности атмосферы была использована формула Коши. В среднем ИК диапазоне излучения в присутствии сильных полос поглощения атмосферных составляющих (от 2 до 8 мкм) мы воспользовались атласом молекулярных линий HITRAN.

Вычисления проводились для целого набора параметров лазерного излучения и среды распространения (длина волны, радиус пучка, длительность импульса, форма амплитуды и фазы, модель оптической нелинейности среды). Как правило, использовались счетные конфигурации с 24-мя, или 48-ю процессорными ядрами и до 200 Гб оперативной памяти.

4. Полученные результаты.

Проведено численное моделирование филаментации в воздухе лазерного импульса с регулярной пространственной модуляцией и параметрами, соответствующими проведенными в научной группе экспериментами. Для этого использовались две различных модели филаментации излучения, одна из которых основана на численной реализации однонаправленного уравнения Максвелла для полного четырехмерного поля (с учетом высокочастотной несущей), а другая использует 3D-версию нелинейного уравнения Шредингера для усредненной по времени огибающей. При моделировании для получения дополнительной модуляции амплитуды исходного пучка использовались программно сгенерированные амплитудные маски, состоящие из квадратных ячеек с полным пропусканием и шириной d , разделенных узкими крестообразными полосками, полностью блокирующими излучение, что имитирует металлическую сетку с диаметром нитей 100 нм. Для устранения краевой дифракции на границах блокирующих излучение областей, эти границы формировались не ступенчато, а с помощью сглаживающего супергауссовского профиля.

В рамках обоих подходов нами обнаружено восстановление пространственной осевой симметрии филамента, сформировавшегося в сегментированном квадратной сеткой пучке, что может быть следствием известного эффекта «очистки пространственной моды» пучка при его филаментации. При этом для умеренной энергии оптического импульса на определенных дистанциях до филаментации (зависящих от размера модулирующей сетки) профиль пучка демонстрирует характерную дифракционную картину Талбота, являющуюся конформным отображением исходной сетки.

Поперечные профили лазерного пучка при его распространении в воздухе показаны на рис. 1. Расчеты представлены для двух модулирующих сеток с размером ячеек 3 мм и 1 мм, причем для наглядности распределения плотности энергии импульса (флюенса) нормированы на свой максимум. Как видно, начальная стадия распространения модулированного пучка проходит в квазилинейном режиме, когда на дистанции, приблизительно соответствующей длине Талбота, можно наблюдать формирование повторяющихся дифракционных паттернов, представляющих собой самоизображения перекрестий сетки (рис. 1б и 1е). Однако, в дальнейшем в игру вступает керровская нелинейность воздуха, что разрушает дифракционный «ковёр Талбота» и приводит к самофокусировке пучка на дистанции $z \approx 65$ м для сетки с 3 мм ячейками и $z \approx 85$ м для сетки с ячейками 1 мм (рис. 1в и 1и). В зоне филаментации профиль пучка приобретает осевую симметрию и теряет информацию об исходной модуляции (рис. 1г и 1з).

На рис. 2 приведена зависимость пиковой интенсивности I_{\max} лазерного импульса, модулированного различными масками, при филаментации в воздухе. Для наглядности на данном рисунке, координаты начала филаментации отмечены стрелками. Если сравнивать положение участка филаментации со случаем немодулированного гауссовского излучения (по mesh), то видно, что мелкая ячейчатая амплитудная маска ($d \leq 3$ мм) значительно удаляет старт филаментации, а более крупная сетка ($d = 5$ мм), наоборот, может ее приблизить к началу трассы распространения.

5. Иллюстрации, визуализация результатов

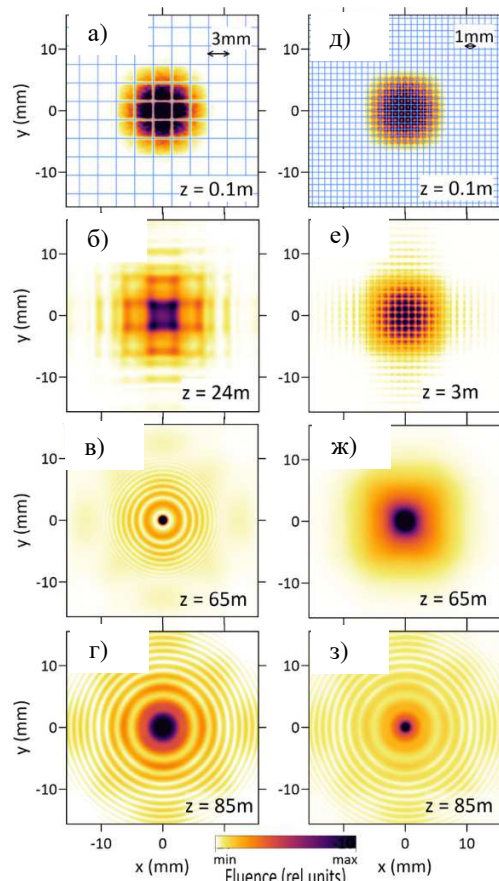


Рис. 1. Поперечные профили флюенса (нормированного на максимальное значение) на различных расстояниях в воздухе при модуляции сетками с $d = 3$ мм (левая колонка, а-г) и 1 мм (правая колонка, д-и). Сеточные амплитудные маски показаны синими линиями.

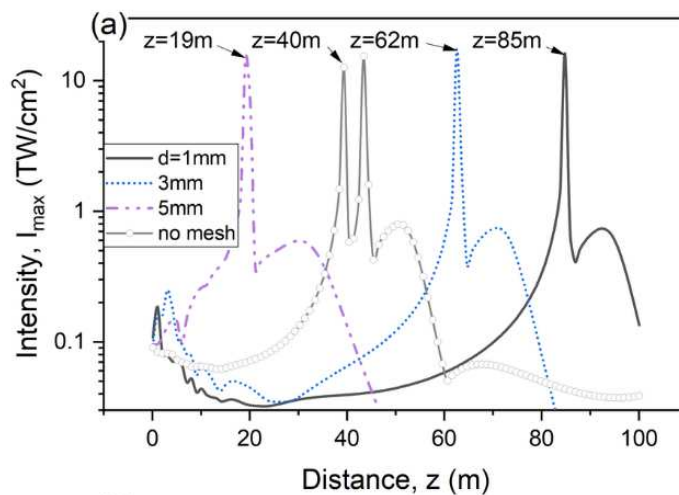


Рис. 2. Зависимость пиковой интенсивности импульса I_{\max} от дистанции распространения при филаментации в воздухе после сеточных масок различного размера d .

Эффект от использования кластера в достижении целей работы

Необходимость использования вычислительного кластера связана с необходимостью численно решить четырехмерное уравнение Шредингера для комплексной огибающей э/м

поля световой волны в нелинейной среде. Задача требует высокой дискретизации пространства-времени и, соответственно, как больших ресурсов оперативной памяти, так и высокой производительности CPU, чего невозможно достичь на обычных рабочих станциях.

Перечень публикаций, содержащих результаты работы

1. Yu.E. Geints, A.A. Zemlyanov. Diffraction-ray optics of laser-pulse filamentation // Phys. Rev. A. 2018. V.98. № 023846. P.023846-1 – 023846-12. [https://DOI:10.1103/PHYSREVA.98.023846](https://doi.org/10.1103/PHYSREVA.98.023846) .
Импакт-фактор журнала SJR 2022 = 1.29.
2. D.V. Apeksimov, Yu.E. Geints, A.A. Zemlyanov, A.M. Kabanov, V.K. Oshlakov, A.V. Petrov, G.G. Matvienko. Controlling TW-laser pulse long-range filamentation in air by a deformable mirror // Applied Optics. 2018. V.57. №34. 10 p. DOI: <https://doi.org/10.1364/AO.99.099999>.
Импакт-фактор журнала SJR 2022 = 0.58.
3. Geints Yu. E., Zemlyanov A. A., Minina O. V. Propagation of phase-modulated high-power femtosecond laser pulses in the self-channeling and filamentation mode in air. // Atmospheric and Oceanic Optics. 2022. V. 35. No. 05. P. 475–484.
Импакт-фактор журнала SJR 2022 = 0.452.
4. D. V. Apeksimov, Yu. E. Geints, G. G. Matvienko, V. K. Oshlakov, and A. A. Zemlyanov, Experimental study of high-intensity light channels produced on an extended air path by phase and amplitude modulated femtosecond laser pulses // Appl. Opt. 2022. V. 61, No. 6. P. 1300-1306
Импакт-фактор журнала SJR 2022 = 0.58.
5. Y. Geints, O. Minina, and A. Zemlyanov, Self-channeling of spatially modulated femtosecond laser beams in the post-filamentation region // J. Opt. Soc. Am. 2022. V. B39, No. 6. P. 1549-1556.
Импакт-фактор журнала SJR 2022 = 0.59.
6. Апексимов Д. В., Гейнц Ю. Э., Кабанов А. М., Петров А. В., Хорошаева Е. Е. Закономерности филаментации фемтосекундного лазерного излучения в воздухе в режиме абберационной фокусировки // Оптика атмосферы и океана. 2022. Т. 35. № 04. С. 298–306.
Импакт-фактор журнала SJR 2022 = 0.452.