

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:

Программа ФНИ государственных академий наук «П.10.3.1. Когерентные и нелинейные оптические явления в атмосфере» (№ 0368-2019-0001), рук. А.А. Землянов (ИОА), 2016-2025 гг.

Научное содержание работы:

1. Цель исследований

Разработка новых способов формирования лазерных пучков с управляемыми энергетическими, фазовыми и когерентными характеристиками, а также теоретическое и экспериментальное исследование трансформации оптических пучков с заданной пространственной структурой в неоднородных средах (в том числе в турбулентной атмосфере).

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 (*Aközbebek 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.*

Е, 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 результате проведенных теоретических и экспериментальных исследований было установлено, что на этапе постфиламентационного распространения на воздушной оптической трассе с низким уровнем турбулентности мощное лазерное излучение самоорганизуется в пространственно локализованные световые каналы, которые являются наиболее интенсивной частью всего пучка и характеризуются рядом особенностей. К ним относятся сниженная по сравнению с пучком в целом угловая расходимость, уширенный по сравнению с начальным спектральный состав с преобладанием низкочастотных составляющих, наличие нелинейной фазовой модуляции и сокращенная длительность. Оказалось, что энергия излучения, локализованного в форме ПФК в результате филаментации лазерных импульсов с различной начальной энергией (0.5...2 мДж), приблизительно одинакова и составляет ~ 0.4 мДж. Однако спектральные характеристики ПФК при этом имеют существенные различия. Показано, что высокая интенсивность ($> 0.1 \text{ ТВт/см}^2$), направленность и широкий спектр ПФК позволяют использовать это излучение для получения сверхуширенного суперконтинуума путем филаментации в материале с сильной оптической нелинейностью, например, в пластинке кварцевого стекла.

В качестве эволюционного уравнения для оптического поля лазерного импульса в нелинейной среде использовалось 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.

В ходе наших исследований использовалось импульсное излучение основной гармоники титан-сапфирового лазера на длине волны 744 нм. Исходное излучение имело близкий к гауссовскому пространственно-временной профиль с длительностью импульсов (по полувысоте) 100 фс, частоте следования 10 Гц и начальным диаметром 3.2 мм. Энергия в импульсах не превышала 2 мДж. После выхода из лазерной системы излучение посредством зеркала с фокусным расстоянием 114 см направлялось в лабораторный воздух, где испытывало филаментацию в области линейного фокуса. Зона филаментации имела среднюю протяженность порядка десяти сантиметров. На расстоянии 2 м от фокусирующего зеркала излучение перехватывалось ирисовой диафрагмой с переменной апертурой, что позволяло выделить из всего пучка только зону ПФК. Сразу за диафрагмой размещалась кварцевая пластинка различной толщины, где происходила филаментация ПФК. Лазерное излучение, попадая в массив стекла, испытывало филаментацию и создавало внутри стеклянной пластинки плазменные области, свечение которых в видимом спектре регистрировалось фотокамерой.

В качестве примера на рис. 1(а, б) представлены зафиксированные на различных расстояниях от линейного фокуса поперечные профили лазерного пучка. Энергия в импульсе излучения соответствовала примерно шестикратному превышению пиковой мощности импульса над критическим уровнем самофокусировки на данной длине волны (~ 3 ГВт). Как видно, после окончания филаментации в воздухе пространственная структура излучения состоит из яркой приосевой области – ПФК (отмечена на рис. 1а пунктирной окружностью), которая имеет достаточно резко очерченные границы и окружена хроматическими кольцами, представляющими собой весь остальной пучок (штриховая окружность). Угловая расходимость γ этих двух структурных образований также оказывается различной. Как следует из рис. 1б, с увеличением энергии импульса, расходимость ПФК уменьшается и имеет тенденцию к насыщению на уровне порядка 0.2 мрад. В то же время, параметр расходимости всего пучка при этом, наоборот, возрастает.

На рис. 2(а) показан спектральный состав излучения ПФК (спектральная мощность S) при вариации начальной энергии в импульсе, полученный по результатам экспериментальных измерений и теоретического моделирования. Здесь же приведен спектр гауссовского импульса, имевшего энергию 0.42 мДж, близкую к типичной энергии ПФК. Мощность такого излучения была порядка критической мощности самофокусировки, поэтому его филаментации в воздухе не происходило, а свечение плазмы наблюдалось только в линейном фокусе.

Как видно из сравнения спектров ПФК и гауссовского импульса, спектральный состав ПФК всегда шире и имеет к тому же смещение в область больших длин волн. Это следует из углового распределения конической эмиссии суперконтинуума в результате филаментации пучка, когда угол отклонения от оси спектральных компонент возрастает при уменьшении длины волны излучения (рис. 1б). Интересным оказалось то, что при увеличении энергии исходного импульса спектральный контур ПФК не только уширяется, но и увеличивает свое «красное» смещение. По нашему мнению это является следствием увеличения длины активной самомодуляции фазы излучения, т.е. протяженности участка филаментации, с ростом энергетика импульса, что обогащает спектральный состав излучения. Поскольку ПФК является приосевой пространственной частью лазерного пучка, то он содержит наиболее длинноволновые компоненты спектра импульса, имеющие наименьший угол распространения с осью пучка. Как следует из данных на рис. 1б, чем выше энергия излучения, тем сильнее различие в углах расходимости всего пучка и ПФК, что неизбежно увеличит долю в нем наиболее длинноволновых составляющих.

Спектры ПФК и гауссовского пучка после филаментации в 20 мм кварцевой пластинке приведены на рис. 2б. Из сравнения этих кривых следует, что спектральный состав ПФК оказывается значительно шире. На врезке к рис. 2б показана эффективная ширина спектра $\delta\lambda$ рассматриваемых типов излучения, которая вычислялась как среднеквадратичная величина от профиля спектральной интенсивности. Цифрами около экспериментальных точек указана энергия начального импульса. Как видно, при приблизительном равенстве энергий в ПФК и гауссовском импульсе излучение ПФК дает кратно более широкий суперконтинуальный спектр

Таким образом, мощное фемтосекундное лазерное излучение в процессе филаментации в нелинейной среде претерпевает масштабные спектрально-угловые трансформации, в результате чего на постфиламентационной стадии распространения в лазерном пучке формируются интенсивные пространственно локализованные световые структуры – постфиламентационные каналы. Были получены оригинальные эмпирические данные по основным характеристикам ПФК, образующихся при филаментации импульсов излучения титан-сапфирового лазера в воздухе. Исследована угловая расходимость, спектральный состав, мощностные параметры при различной энергии в исходном лазерном импульсе. Изучен режим каскадной филаментации излучения, при котором ПФК, образовавшиеся в воздухе, повторно испытывают филаментацию в твердом диэлектрике (кварц).

5. Иллюстрации, визуализация результатов

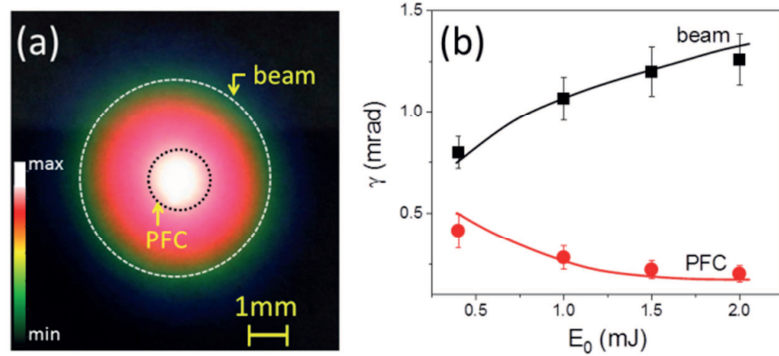


Рис. 1. (а) Поперечный профиль лазерного излучения после филаментации в воздухе на расстоянии 2 м от фокусирующего зеркала. Показаны области всего пучка (штрих) и ПФК (пунктир); (б) Зависимость угловой расходимости γ различных областей пучка от энергии импульса (точки – эксперимент, кривые – численное моделирование).

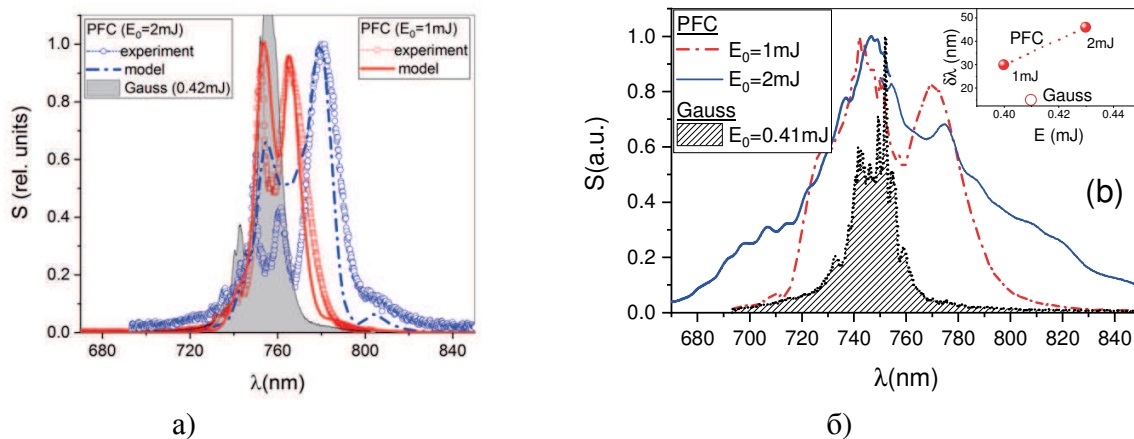


Рис. 2. (а) Спектр всего пучка и ПФК при различной начальной энергии импульса: 1 мДж и 2 мДж; (б) Экспериментальные спектры ПФК (на рисунках – PFC) и гауссовского пучка (Gauss) после филаментации в 20 мм кварце; на врезке – ширина спектра в зависимости от энергии.

Эффект от использования кластера в достижении целей работы

Необходимость использования вычислительного кластера связана с необходимостью численно решить четырехмерное уравнение однонаправленного распространения комплексного 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. Y.E. Geints, A.A. Ionin, D.V. Mokrousova, G.E. Rizaev, L.V. Selesnev, E.S. Sunchugasheva, A.A. Zemlyanov. Energy, spectral and angular properties of post-filamentation channels during propagation in air and condensed media // JOSA B. 2019. V. 36. No. 10. pp. G19-G24. <https://doi.org/10.1364/JOSAB.36.000G19>
Импакт-фактор журнала SJR 2019 = 0.85.
2. Y.E. Geints, O.V. Minina, A.A. Zemlyanov. Diffraction-ray tube analysis of ultrashort high-intense laser pulse filamentation in air // JOSA B. 2019. V. 36. No. 10. pp. 1-9. <https://doi.org/10.1364/JOSAB.36.003209>
Импакт-фактор журнала SJR 2019 = 0.85.
3. S.I. Kudryashov, A.A. Samokhvalov, Y.E. Geints, E.I. Ageev and V. P. Veiko. Femtosecond laser filaments in gold colloidal solutions: supercontinuum and ultrasonic tracing // JOSA B. 2019. V. 36. No.2. pp. 125-130. <https://doi.org/10.1364/JOSAB.36.00A125>
Импакт-фактор журнала SJR 2019 = 0.85.
4. 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. № 05. С. 337–345. DOI: 10.15372/AOO20190205
Импакт-фактор журнала SJR 2019 = 0.32.
5. 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. № 08. С. 601–608. DOI: 10.15372/AOO20190801
Импакт-фактор журнала SJR 2019 = 0.32.
6. Апекусов Д.В., Бабушкин П. А., Гейнц Ю. Э., Землянов А. А., Кабанов А. М., Матвиенко Г. Г., Ошлаков В. К., Петров А. В., Рябцев В. М. Исследования эмиссионного свечения твердого вещества и антропогенных аэрозолей в поле мощного фемтосекундного лазерного излучения при его самофокусировке в воздухе для целей дистанционного зондирования атмосферы. // Оптика атмосферы и океана. 2020. Т. 33. № 09. С. 698–704. DOI: 10.15372/AOO20200906.
Импакт-фактор журнала SJR 2019 = 0.32.
7. 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. № 02. С. 120–130. DOI: 10.15372/AOO20190501
Импакт-фактор журнала SJR 2019 = 0.32.
8. Babushkin P.A., Bulygin A.D., Kuchinskaya O.I., Minina O.V., Petrov A.V. Formation of the scattering phase function in the interaction of ultrashort laser pulses with a drop in a nonlinear mode // Book Series: 7th International Congress "Energy Fluxes and Radiation Effects" (IEEE Xplore Digital Library). 2020. Pp. 989-992. DOI: 10.1109/EFRE47760.2020.9242158
9. Geints Y.E., Ionin A.A., Mokrousova D.V., Rizaev G.E., Seleznev L.V., Sunchugasheva E.S., Zemlyanov A.A. Filaments and post-filaments formation during high-power Ti:sapphire laser pulses propagation in air and optical glasses // Proceedings SPIE. V. 11539. CID: 115390H.; DOI: 10.1117/12.2566799.