

Многофокусная структура мощного фемтосекундного лазерного излучения при филаментации в газах под давлением

Ю.Э. Гейнц¹, О.В. Минина^{1,2}

¹ Институт оптики атмосферы им. В.Е. Зуева СО РАН
634055, Томск, Россия, пл. Академика Зуева, 1

² Российский университет транспорта
127994, Москва, Россия, ул. Образцова, 9, ygeints@iao.ru, mov@iao.ru

Представлены результаты численных исследований распространения мощных фемтосекундных лазерных импульсов в режимах самофокусировки и филаментации в газах при варьировании давления среды. Такой подход позволяет использовать результаты, полученные в лабораторных условиях с аномально высоким давлением на расстояниях в несколько метров, для масштабирования на реальные атмосферные трассы протяженностью в сотни метров при нормальном давлении. Практическая значимость этих исследований связана с дистанционной диагностикой компонент атмосферы и доставкой энергии на протяженных трассах в атмосфере. С точки зрения проведения численных расчетов этот подход также имеет свои достоинства, поскольку позволяет сократить время проведения вычислений и уменьшить требуемые вычислительные мощности. Численное моделирование проводилось для случаев распространения мощных фемтосекундных импульсов титан-сапфирового лазера в режимах самофокусировки и филаментации в условиях 64-кратного увеличения давления воздуха. Детально рассмотрено формирование многофокусной структуры области филаментации, которое особенно наглядно проявляется в этих условиях.

Ключевые слова: фемтосекундный лазерный импульс, нелинейный фокус, самофокусировка, филаментация, газ повышенного давления, структура лазерного пучка; femtosecond laser pulse, nonlinear focus, self-focusing, laser filamentation, pressured gas, laser beam structure.

Введение

Проведение атмосферно-оптических исследований на основе последних достижений нелинейной фемтосекундной лазерной физики позволило получить оригинальные и перспективные результаты. В частности, были показаны возможности дистанционной диагностики аэрозольно-газовых компонент атмосферы, эффективной доставки энергии на протяженных трассах, «разряда» грозовых облаков. Их реализации основана на явлениях самофокусировки и филаментации [1] мощных ультракоротких лазерных импульсов.

После создания фемтосекундных лазеров [2] были исследованы различные аспекты, связанные с этими явлениями [3–5]. В тоже время некоторые вопросы, связанные с практическим использованием самофокусировки и филаментации мощного фемтосекундного лазерного излучения в атмосфере, остаются не до конца изученными. Причина этого заключается в сложности и дороговизне проводимых натурных экспериментов на протяженных трассах, ограниченности лабораторных условий и колоссальных вычислительных ресурсах, требуемых для проведения численного моделирования. Дополнительными факторами, которые осложняют проведение как натурных, так и численных исследований, являются большая протяженность атмосферных трасс, турбулентный характер среды распространения излучения и вариативность геометрии рассматриваемой задачи (например, горизонтальные, вертикальные, наклонные трассы) и начальных параметров лазерного излучения. Все это сделало востребованным создание новейших подходов для решения упомянутых практических задач.

В частности, в последние годы [6, 7] активно развиваются подходы на основе варьирования давления в среде распространения мощных фемтосекундных лазерных импульсов. Одна из причин этого — возможность масштабирования результатов, полученных в лабораторных условиях, на реальные протяженные атмосферные трассы [8]. С точки зрения проведения численных расчетов этот подход также имеет свои достоинства, поскольку позволяет сократить время проведения вычислений и уменьшить требуемые вычислительные мощности. Основной акцент в проводимых на настоящее время исследованиях в рамках указанных подходов сделан на изменении спектральных характеристик излучения, а вот динамика пространственной структуры лазерного пучка в этих условиях остается менее изученной. В этой связи на себя обращают особое внимание следующие факторы, определяющие эффективность распространения мощного фемтосекундного лазерного излучения в атмосфере: управление формированием структуры филаментов и плазменных каналов в заданной точке трассы, а также снижение расходимости пучка при распространении на протяженных трассах.

Численное моделирование распространения мощного фемтосекундного лазерного излучения при филаментации в газах под давлением

В качестве модели распространения мощного фемтосекундного лазерного излучения в оптической среде использовалось эффективное (интегрированное по времени) нелинейное уравнение Шредингера (НУШ) для огибающей оптического поля. Математическое описание нелинейного распространения мощного фемтосекундного лазерного излучения при генерации лазерной плазмы и филаментации в рамках такой редуцированной 3D модели НУШ подробно рассмотрены в [9–12]. В частности, в [10–12] кроме основных соотношений, используемых в рамках этой модели, рассматривается вопрос адекватности ее применения по сравнению с полной (3D+1) моделью НУШ. Анализ и сравнение результатов, полученных в [10–12] для полной (3D+1) и редуцированной 3D моделей НУШ, показали хорошее согласие результатов моделирования.

В рамках этого исследования моделирование распространения мощного фемтосекундного лазерного излучения с длиной волны $\lambda = 800$ нм проводилось для пучков с начальным радиусом R_0 , варьируемым в диапазоне от 0,5 до 2 мм (по уровню e^{-1}), и относительной пиковой мощностью $\eta = P_0/P_{cr}$ — от 1 до 24. Здесь P_0 — пиковая мощность в импульсе, $P_{cr} = 3,2$ ГВт [1] — критическая мощность самофокусировки. Давление среды p изменялось от 0,25 до 16 атм. Выбор параметров основан на условии эквивалентности, полученном в [8] при рассмотрении распространения мощного лазерного излучения в газах с относительными давлениями μ_1 и μ_2 : $\mu_1 L_{R1} = \mu_2 L_{R2}$. Здесь $L_{R1,2} = n_0 k_0 R_{1,2}^2/2$ — длина Рэлея для двух пучков с радиусами R_1 и R_2 . Отметим, что под эквивалентностью в [8] понимается равенство характерных масштабов проявления нелинейных преобразований пространственно-временной формы оптического импульса. В результате получается, что необходимо обеспечить выполнение следующего соотношения: $\mu_1/\mu_2 = R_2^2/R_1^2$.

На рис. 1 построена зависимость плотности плазмы ρ_e , нормированной на максимальное значение ρ_{e_max} , от дистанции распространения z , нормированной на длину Рэлея L_R пучка. Сопоставление кривых, представленных на рис. 1, с результатами [13] демонстрирует возможности управления структурой области филаментации за счет варьирования давления среды распространения.

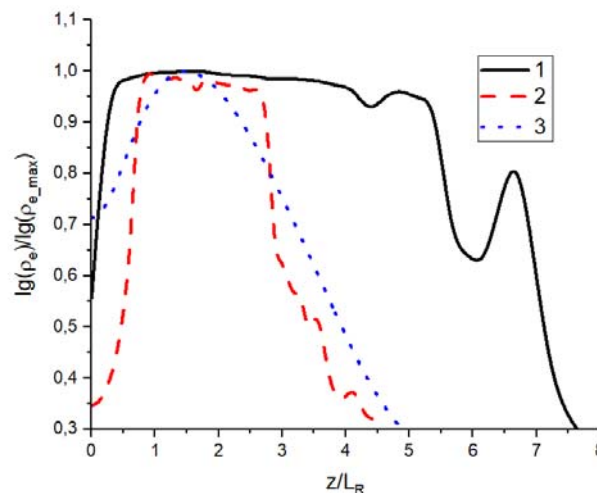


Рис. 1. Зависимость плотности плазмы от дистанции распространения в нормированных координатах. Кривая 1 построена для $p = 0,25$ атм, $R_0 = 2$ мм, $\eta = 16$; кривая 2 — $p = 1$ атм, $R_0 = 1$ мм, $\eta = 4$; кривая 3 — $p = 4$ атм, $R_0 = 0,5$ мм, $\eta = 1$

Отметим, что при различном давлении удастся сформировать плазменную область различной протяженности при сохранении ее сплошности (продольной непрерывности). Более детальное изучение пространственных характеристик области филаментации мощного фемтосекундного лазерного излучения показало фундаментальное отличие рассматриваемых случаев. Оно состоит в разном характере протекания основополагающего процесса, которым является формирование нелинейных фокусов. Его роль в становлении современной теории самофокусировки и филаментации мощного ультракороткого лазерного излучения можно проследить в [1, 14–16].

Формирование многофокусной структуры мощного фемтосекундного лазерного излучения в газах под давлением

Для детального изучения формирования нелинейных фокусов при распространении мощного фемтосекундного лазерного излучения при варьировании давления газа рассмотрим рис. 2.

Сравнение профилей пучка при различном давлении на рис. 2 показывает, что этот параметр может быть использован для управления филаментацией мощного фемтосекундного лазерного излучения и формирования заданной структуры плазменных зон на определенном расстоянии от начала трассы, что важно для

решения практических задач. Также на себя обращает внимание тот факт, что с увеличением давления газовой среды менее выраженной становится роль нелинейности.

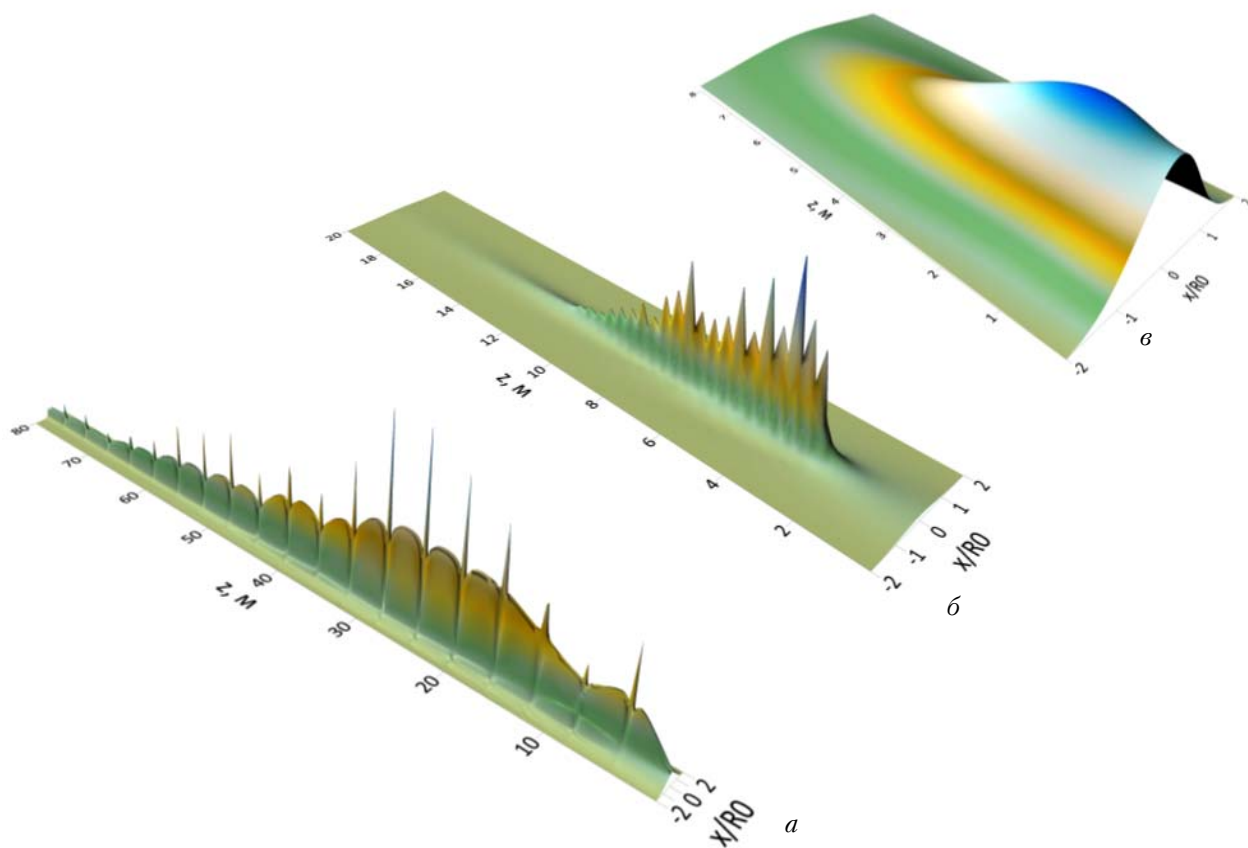


Рисунок 2 — Продольный профиль пучка для $p = 0,25$ атм, $R_0 = 2$ мм, $\eta = 16$ (а); $p = 1$ атм, $R_0 = 1$ мм, $\eta = 4$ (б); $p = 4$ атм, $R_0 = 0,5$ мм, $\eta = 1$ (в)

Угловая расходимость пучка мощного фемтосекундного лазерного излучения в газах под давлением

Как уже отмечалось выше, снижение расходимости пучка мощного фемтосекундного лазерного излучения при распространении на протяженных атмосферных трассах является важной задачей. Один из спосо-

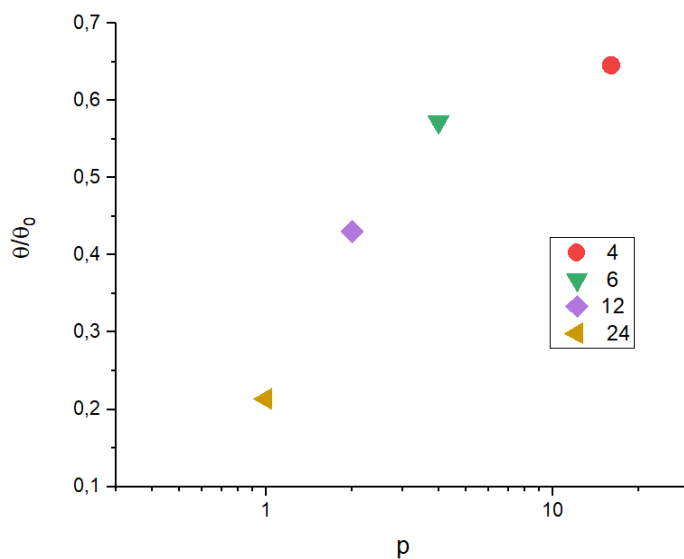


Рис. 3. Зависимость нормированной угловой расходимости пучка от давления в среде распространения для пучков с различной пиковой мощностью

бов ее решения – формирование постфиламентов [17, 18], которые характеризуются в разы и даже на порядок меньшей угловой расходимостью по сравнению со всем пучком. Кроме этого, эти каналы обладают большой протяженностью и высокой интенсивностью, а вот их количество в пучке сильно ограничено [18, 19]. При распространении широких лазерных пучков (сантиметрового и более радиуса) и мощности лазерного излучения порядка тера- и петаватт усиливается стохастический характер множественной филаментации, что приводит к дестабилизации параметров пучка, и в частности его угловой расходимости θ . На рис. 3 видно, что она возрастает в условиях повышения давления в среде распространения и сокращения пиковой мощности в импульсе. На рис. 3. θ_0 – дифракционная расходимость всего пучка. Характер зависимости нормированной угловой расходимости от мощности согласуется с результатами, полученными в [20].

Заключение

Результаты численного моделирования распространения мощных лазерных импульсов фемтосекундной длительности при реализации самофокусировки и филаментации коллимированного излучения в газах показали возможности формирования многофокусной структуры и управления расходимостью пучка в условиях варьирования давления среды распространения. В рамках законов масштабирования эти результаты планируется использовать для прогнозирования распространения мощного фемтосекундного лазерного излучения на реальных атмосферных трассах протяженностью в сотни метров и более.

Финансирование. Исследования выполнены при финансовой поддержке РНФ (№ 24-12-00056).

Список литературы

1. *Self-focusing: Past and Present. Fundamentals and Prospects* / R.W. Boyd, S.G. Lukishova, Y.R. Shen (eds.). Berlin: Springer, 2009. 605 p.
2. Braun A., Korn G., Liu X., Du D., Squier J., Mourou G. Self-channeling of high-peak-power femtosecond laser pulses in air // Optics Letters. 1995. V. 20, Iss. 1. P. 73–75.
3. 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.
4. Brodeur A., Chien C.Y., Ilkov F.A., Chin S.L., Kosareva O.G., Kandidov V.P. Moving focus in the propagation of ultrashort laser pulses in air // Optics Letters. 1997. V. 22, Iss. 5. P. 304–306.
5. 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.
6. Kompanets V.O., Shipilo D.E., Nikolaeva I.A., Panov N.A., Kosareva O.G., Chekalin S.V. Nonlinear Enhancement of Resonance Absorption at the Filamentation of a Mid-Infrared Pulse in High-Pressure Gases // JETP LETT. 2020. V. 111. P. 31–35.
7. Li S., Yu M., Cai X., Zhang H., Jin M., Wu J. Energy transmittance of focused femtosecond pulses at different air pressures // Optoelectron. Lett. 2023. V. 19, N 10. P. 605–613.
8. Geints Y.E. Pressure scaling of femtosecond laser filamentation in air: Prospects for long-range atmospheric propagation // Optics Communications. V. 573. 2024. P.131007.
9. Berge L., Skupin S., Lederer F., Méjean G., Yu J., Kasparian J., Salmon E., Wolf J.-P., Rodriguez M., Woste L., Bourayou R., Sauerbrey R. Multiple filamentation of terawatt laser pulses in air // Phys. Rev. Lett. 2004. V. 92. P. 225002.
10. Geints Y.E., Zemlyanov A.A. Dynamics of femtosecond synthesized coronary profile laser beam filamentation in air // J. Opt. 2021. V. 23, N 10. P. 105502.
11. Geints Yu.E., Minina O.V., Zemlyanov A.A. Self-channeling of spatially modulated femtosecond laser beams in the post-filamentation region // Journal of the Optical Society of America B. 2022. V. 39, N 6. P. 1549–1556.
12. Гейнц Ю.Э., Землянов А.А., Минина О.В. Распространение фазомодулированных мощных фемтосекундных лазерных импульсов в воздухе в режимах самоканалирования и филаментации // Оптика атмосферы и океана. 2022. Т. 35, № 5. С. 345–355.
13. Geints Yu.E., Minina O.V. Structured Filamentation of High-Power Femtosecond Laser Radiation Modulated by Amplitude Mesh Masks // Atmospheric and Oceanic Optics. 2024. V. 37, N 2. P. 183–191.
14. Couairon A., Mysyrowicz A. Femtosecond filamentation in transparent media // Physics Reports. 2007. V. 441. P. 47–189.
15. Кандидов В.П., Шленов С.А., Косарева О.Г. Филаментация мощного фемтосекундного лазерного излучения // Квантовая электроника. 2009. Т. 39, № 3. С. 205–228.
16. Гейнц Ю.Э., Землянов А.А., Минина О.В. Дифракционно-лучевая оптика филаментации: I. Формализм дифракционных лучей и световых трубок // Оптика атмосф. и океана. 2018. Т. 31. № 5. С. 364–371.
17. Mûchain G., Couairon A., André Y.-B., D'Amico C., Franco M., Prade B., Tzortzakis S., Mysyrowicz A., Sauerbrey R. Long-range self-channeling of infrared laser pulses in air: A new propagation regime without ionization // Appl. Phys. B. 2004. V. 79, N 3. P. 379–382.
18. Daigle J.-F., Kosareva O.G., Panov N.A., Wang T.-J., Hosseini S., Yuan S., Roy G., Chin S.L. Formation and evolution of intense, post-filamentation, ionization-free low divergence // Optics Communications. 2011. V. 284, N 14. P. 3601–3606.
19. Апексимов Д.В., Гейнц Ю.Э., Землянов А.А., Кабанов А.М., Матвиенко Г.Г., Ошлаков В.К. Управление характеристиками множественной филаментации фемтосекундных лазерных импульсов в воздухе // Оптика атмосферы и океана. 2019. Т. 32, № 9. С. 717–725.

20. 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.

Y.E. Geints, O.V. Minina. **Multifocal structure of high-power femtosecond laser radiation during filamentation in pressured gases.**

The results of numerical simulation of self-focusing and filamentation of high-power femtosecond laser pulses with varying pressure of the gas medium in which the radiation propagates are presented. The use of this approach is associated with the possibility of using the results obtained in laboratory conditions with abnormally high pressure at distances of several meters for scaling to real atmospheric paths hundreds of meters long at normal pressure. The practical significance of these studies is the possibility of remote diagnostics of atmospheric components and delivering energy along extended paths in the atmosphere. This approach also has its advantages in carrying out numerical calculations, since it allows reducing the time of calculations and decreasing the required computing power. The modeling is carried out for cases of propagation of high-power femtosecond laser pulses in the self-focusing and filamentation mode under conditions of increased pressure (by 64 times). The formation of the filamentation multifocal structure is considered in detail. This case is much in evidence under conditions of increased pressure of the propagation medium. The angular beam divergence is estimated for cases of different peak pulse power with varying gas pressure of the propagation medium.