

СТРУКТУРИРОВАННАЯ ФИЛАМЕНТАЦИЯ МОЩНЫХ ФЕМТОСЕКУНДНЫХ ЛАЗЕРНЫХ ИМПУЛЬСОВ В ВОЗДУХЕ. ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ

Ю.Э. Гейнц, О.В. Минина

Институт оптики атмосферы им. В.Е. Зуева Сибирского отделения Российской академии наук, Томск, Россия, mov@iao.ru

STRUCTURED FILAMENTATION OF HIGH-POWER FEMTOSECOND LASER PULSES IN AIR. NUMERICAL SIMULATION

Yu.E. Geints, O.V. Minina

V.E. Zuev Institute of Atmospheric Optics of Siberian Branch of the Russian Academy of Science, Tomsk, Russia, mov@iao.ru

Аннотация. Представлены результаты численного моделирования распространения структурированного мощного фемтосекундного лазерного излучения в режиме самофокусировки и филаментации в воздухе. Элементом, формирующим мульти-модальную структуру излучения, являлась металлическая сетчатая маска. Показано, что координатой начала филаментации можно управлять в широких пределах за счет варьирования размера ячеек сетки и смещения перекрестий относительно центра лазерного пучка. При использовании сетчатых масок, в целом, сокращается общая длина области филаментации. Модуляция всего пучка (а не только его центральной части) приводит к увеличению длины области филаментации.

Ключевые слова: численное моделирование, фемтосекундное лазерное излучение, амплитудная модуляция, сетчатая маска, самофокусировка, лазерная филаментация, постфиламент.

Abstract. The results of numerical simulation of the propagation of structured high-power femtosecond laser radiation in the self-focusing and filamentation mode in air are presented. The multimodal radiation structure is formed by a metal mesh mask. It is shown that the filamentation start coordinate can be controlled over a wide range by varying the mesh cells size and the displacement of the crosshairs relative to the laser beam center. In general, the total length of the filamentation region decreases when mesh masks are used. Modulation of the entire beam (not just its central part) provides an increase in the filamentation length.

Keywords: numerical simulation, femtosecond laser radiation, amplitude modulation, mesh mask, self-focusing, laser filamentation, post-filament.

ВВЕДЕНИЕ

По мере внедрения фемтосекундных лазерных технологий в научные исследования возрастает число новых достижений и прорывных результатов в разных направлениях. Одно из таких направлений — атмосферная оптика [Багаев, Матвиенко, 2010]. К настоящему времени в ее рамках рассматриваются фундаментальные и прикладные аспекты распространения мощных фемтосекундных лазерных импульсов (МФЛИ) на протяженных горизонтальных и вертикальных трассах, а также способы управления характеристиками излучения в этих случаях.

Перечисленные аспекты влияют на эффективность использования МФЛИ для решения прикладных задач, например, для генерации терагерцового излучения, зондирования атмосферы и направленной передачи энергии [Багаев, Матвиенко, 2010]. Один из перспективных методов решения этих задач — это использование структурированного МФЛИ [Shroeder, Chin, 2004; Kandidov et al., 2005; Апексимов и др., 2021]. Проведенные ранее исследования [Geints et al., 2022; Гейнц, Минина, 2024] показали, что этот метод минимизирует нежелательные эффекты и обеспечивает более контролируемую филаментацию.

1. АМПЛИТУДНАЯ МОДУЛЯЦИЯ МОЩНОГО ФЕМТОСЕКУНДНОГО ЛАЗЕРНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ СЕТЧАТОЙ МАСКОЙ. РЕДУЦИРОВАННАЯ ВЕРСИЯ НЕЛИНЕЙНОГО УРАВНЕНИЯ ШРЕДИНГЕРА

В текущей работе модуляционным элементом являлись амплитудные сетчатые маски, которые разделяют изначально унимодальный (в рассматриваемом

случае гауссовский) лазерный пучок на пространственно обособленные субпучки. Это приводит к увеличению дифракционного взаимодействия между различными частями пучка, а степень этого взаимодействия контролируется путем изменения числа n и размеров d ячеек сетчатой маски. Изменение параметра n по одной из координатных осей обеспечивает смещение перекрестия маски относительно центра лазерного пучка. Так перекрестие может перекрывать центр, разбивая исходный пучок на 4 менее мощных субпучка, или выделять квазисупергауссов пучок. Далее для обозначения этих случаев будут использоваться символы "+" и "#" соответственно.

Численные исследования распространения мощных фемтосекундных лазерных импульсов в воздухе проводились на основе (3D+1) нелинейного уравнения Шредингера (НУШ) [Self-focusing: Past and Present. 2009]. Для сокращения требуемых вычислительных ресурсов и времени проведения расчетов использовалась его редуцированная 3D версии [Berge et al., 2004], получаемая после интегрирования исходного уравнения по времени. Достоинства этого подхода и точность получаемых в его рамках результатов рассматривались в [Geints, Zemlyanov, 2021]. Детали математической модели и задания сеток представлены в [Гейнц, Минина, 2024].

2. УПРАВЛЕНИЕ ПАРАМЕТРАМИ РАСПРОСТРАНЕНИЯ СТРУКТУРИРОВАННОГО МОЩНОГО ФЕМТОСЕКУНДНОГО ЛАЗЕРНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ В ВОЗДУХЕ

Численное моделирование филаментации МФЛИ выполнялось для коллимированного

излучения с несущей длиной волны $\lambda = 744$ нм. Моделью среды распространения была смесь кислорода и азота (20% + 80%). Начальный радиус пучка по уровню e^{-1} составлял $R_0 = 1$ и 4 мм. Расчеты при $R_0 = 1$ мм выполнялись для детального исследования формирования постфиламентов (см. раздел 2.2). Для рассмотрения различных сценариев филаментации моделирование проводилось для значительной относительной пиковой мощности в импульсе $\eta = P_0/P_{cr}$, варьируемых от 5 до 15. Здесь P_0 – пиковая мощность в импульсе, $P_{cr} = 3.2$ ГВт [Boyd et al., 2009] — критическая мощность самофокусировки.

2.1 КООРДИНАТА НАЧАЛА ФИЛАМЕНТАЦИИ

Первая из рассматриваемых характеристик — координата нелинейного фокуса z_{fil} при самофокусировке, которая определяет начало филаментации. Зависимость этой величины от размера ячеек сетки представлена на рис. 1.

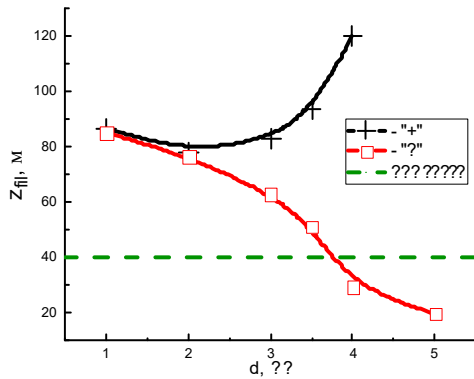


Рис. 1. Зависимость координата начала филаментации z_{fil} от размера ячейки d сетки «+»- и «#»-типов

Из рис. 1 видно, что при распространении МФЛИ через сетки «+»-типа характерна последовательная конструктивная интерференция 4 субпучков небольшой мощности. Для сеток «#»-типа преобладает дифракция излучения на резких границах апертуры для одного мощного субпучка. Это изменяет характер филаментации МФЛИ тем сильнее, чем больше параметр d . Для мелкоячеистых сеток отдельных субапертур становится слишком много, чтобы их распределение по энергии было чувствительным к конкретному положению перекрестия сетки, поэтому черная и красная кривые на рис. 1 для $d/R_0 \leq 0.5$ практически совпадают. Крупноячеистая сетка ($d/R_0 > 1$) в свою очередь сокращает z_{fil} .

2.2 ДЛИНА ОБЛАСТИ ФИЛАМЕНТАЦИИ И ПРОСТРАНСТВЕННОЕ ПОЛОЖЕНИЕ ВЫСОКОИНТЕНСИВНЫХ СВЕТОВЫХ КАНАЛОВ

Рассмотрим закономерности распространения МФЛИ через сетчатые маски, связанные с длиной области филаментации L_{fil} , в рамках анализа трассовых зависимостей пиковой интенсивности. При малой мощности излучения (рис. 2а) величина L_{fil}

уменьшается при использовании сетчатой маски. Это происходит из-за сокращения числа последовательных рефокусировок вдоль трассы, которым соответствуют максимумы интенсивности.

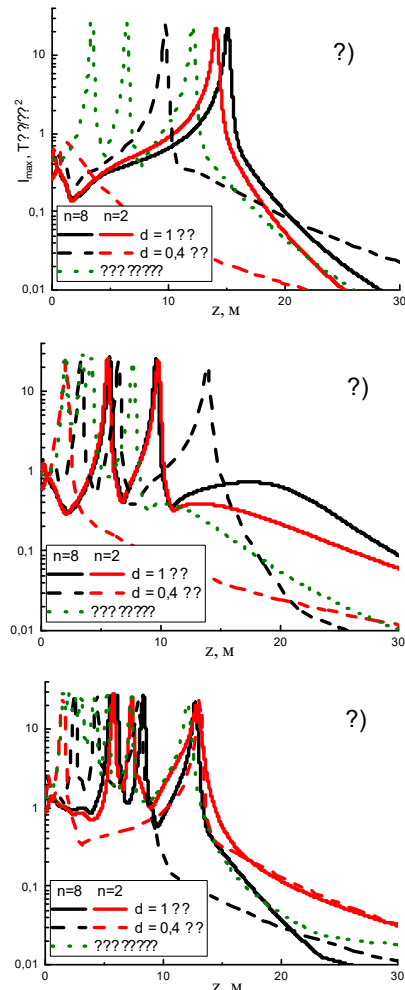


Рис. 2. Зависимость пиковой интенсивности I_{max} от дистанции распространения z для импульсов с $\eta = 5$ (а), 10 (б), 15 (в) для сеток «+»-типа с размером ячейки $d = 1$ и 0.4 мм, а также без сетки

Управление филаментацией также реализуется при изменении площади перекрытия лазерного пучка сетчатой маской. Так увеличение z_{fil} происходит для масок с большим размером ячеек, перекрывающих весь пучок (сплошные кривые на рис. 2). Когда общий размер маски оказывается меньше размера пучка (штриховые кривые на рис. 2), реализуется частичная модуляция излучения. В этом случае для маломощного излучения ($\eta = 5$) филаментация может не реализоваться (черная штриховая кривая на рис. 2а).

Уменьшение влияния стохастического характера множественной филаментации иллюстрирует рис.3, на котором построены поперечные сечения лазерного пучка, полученные без сетки (рис. 3а, г) и для сеток при $d = 0,2$ (рис. 3б, д) и 1 (рис. 3в, е) на расстояниях $z = 5$ и 20 м, когда формировались филаменты (рис. 3а–в) и постфиламенты (рис. 3г–е), соответственно.

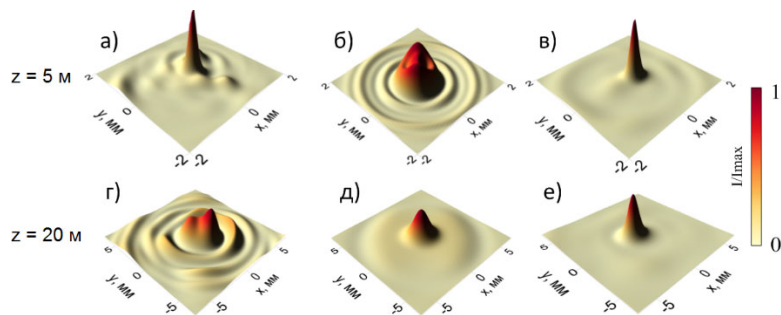


Рис. 3. Поперечные сечения лазерного пучка, полученные без использования сетки (а, г) и для сеток «□»-типа с размером ячейки $d = 0.2$ (б, д) и 1 (в, е) мм при $\eta = 15$

Свидетельством этого уменьшения является наличие симметричной дифракционной кольцевой структуры на рис. 3б, в и рис. 3д, е вокруг центрального максимума.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Рассмотрено распространение МФЛИ в воздухе при использовании амплитудных сетчатых масок. Такой тип наложенной модуляции амплитуды волны обеспечивает контроль за филаментами и постфиламентами за счет разделения исходного лазерного пучка на отдельные субпучки с меньшей энергии. Это приводит к сокращению длины области филаментации для структурированного излучения в общем случае. Наибольшая длина области филаментации обеспечивается при полной модуляции лазерного пучка. Минимизировать стохастический характер рассматриваемых процессов удастся при использовании мелкоячеистых сеток.

Исследования выполнены при финансовой поддержке Российского Научного Фонда (№ 24-12-00056).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

Апексимов Д.В., Бабушкин П.А., Гейнц Ю.Э. и др. Закономерности распространения амплитудно-

модулированного мощного фемтосекундного лазерного излучения в воздухе // Оптика атмосферы и океана. 2021. Т. 34, № 11. С. 837–841.

Гейнц Ю.Э., Минина О.В. Структурированная филаментация мощного фемтосекундного лазерного излучения при модуляции амплитудными сетчатыми масками // Оптика атмосферы и океана. 2024. Т. 37, № 1. С. 32–40.

Фемтосекундная атмосферная оптика / ред. Багаев С.Н., Матвиенко Г.Г. Новосибирск: Изд-во СО РАН, 2010. 238 с.

Berge L., Skupin S., Lederer F. et al. Multiple filamentation of terawatt laser pulses in air // Phys. Rev. Lett. 2004. V. 92. P. 225002.

Geints Yu.E., Minina O.V., Geints I.Yu. et al. Nonlinear propagation and filamentation on 100 meter air path of femtosecond beam partitioned by wire mesh // Sensors. 2022. V. 22, N 17. P. 1–13.

Geints Y.E., Zemlyanov A.A. Dynamics of femtosecond synthesized coronary profile laser beam filamentation in air // J. Optics. 2021. V. 23, N 10. P. 105502.

Kandidov V.P., Aközbek N., Scalora M. et al. Towards a control of multiple filamentation by spatial regularization of a high-power femtosecond laser pulse // App. Phys. B. 2005. V. 80. P. 267–275.

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

Shroeder H., Chin S.L. Visualization of the evolution of multiple filaments in methanol // Optics Communications. 2004. V. 234. P. 399–406.