

## **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 № 24-12-00056 «Управляемая высотная атмосферная филаментация структурированного мощного фемтосекундного лазерного излучения», рук. Ю.Э. Гейнц (ИОА), 2024-2026.

## **Научное содержание работы:**

### ***1. Цель исследований***

Продолжение теоретических исследований по управлению филаментами 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. Подробное описание работ, включая используемые алгоритмы.***

Моделирование распространения мощного фемтосекундного лазерного излучения в воздухе проводилось на основе редуцированной (в 3D-пространстве) версии нелинейного уравнения Шредингера (НУШ), получаемая после интегрирования исходного (3D+1) НУШ по временной координате. Подробное описание численной модели представлено в известной литературе. Внешняя модуляция фазы волны реализовывалась за счет использования фазовых масок, состоящих из 9, 6 и 4 элементов (рисунок 1). Они обеспечивали задаваемый разрыв фазы волны на границах соседних элементов в диапазоне от  $-2\pi$  до  $2\pi$ . Для удобства дальнейшего анализа результатов фазовые маски пронумерованы латинскими цифрами от I до VI в соответствии с порядком следования, показанным на рисунке 1. Также для удобства скачок фазы пластинки  $\Delta\phi$  выразим в единицах  $\pi$ , для чего введем безразмерную величину  $\phi_0 = \Delta\phi/\pi$ .

Для определенности все расчеты проведены для пучков титан-сапфирового лазера с начальным радиусом (по уровню  $e^{-1}$  от максимума интенсивности)  $R_0 = 1$  мм и длительностью импульса  $t_p = 50$  фс. Относительная пиковая мощность в импульсе  $\eta = P_0/P_{cr}$  варьировалась в диапазоне от 5 до 25, где  $P_{cr} = 3.2$  ГВт – критическая мощность самофокусировки излучения.

Результаты численного моделирования для масок I-IV при  $\eta = 5$  и 15 показаны на рисунке 2. Из его анализа следует, что использование масок, в целом, приводит к сокращению дистанции самофокусировки импульса по сравнению с немодулированным пучком ( $\phi_0 = 0$ ), которое тем больше, чем выше фазовый сдвиг  $\phi$ . Это связано с сильным влиянием на керровскую самофокусировку дифракционных эффектов, протекающих на масштабах отдельных субапертур пучка. Однако, для некоторых фазовых масок старт

филаментации пучка происходит на бóльших расстояниях  $z_{\text{start}}$  от начала трассы по сравнению со случаем, когда маска не использовалась ( $\varphi_0 = 0$ ). На рисунке 2а указанные конфигурации соответствуют значениям  $\varphi_0 = -2, -0,5$  и  $2$ . Следует отметить, что при  $\varphi_0 = -0,5$  также наблюдается существенное (в разы) увеличение длины области филаментации  $L_{\text{fil}}$  (рисунок 2б).

Еще одним исследуемым параметром была угловая расходимость излучения  $\theta_0$  на стадии постфиламентационного каналирования (рисунок 2в). Здесь значение  $\theta_0$  определяет угловую расходимость постфиламентационного канала (ПФК), сформированного при  $\varphi_0 = 0$ . Из рисунка 2в следует, что в целом независимо от значения фазы первого элемента и наличия/отсутствия центрального элемента фазовой маски, угловая расходимость ПФК уменьшается при увеличении мощности всего пучка. Это согласуется с ранее опубликованными результатами. В ряде случаев использование фазовой маски позволяет получить ПФК с меньшей угловой расходимостью, чем у аналогичных каналов, полученных без него,  $\theta < \theta_0$ . Такими примерами являются случаи, полученные для масок с  $\varphi_0 = -0,5$  и  $\eta = 9$ , а также  $\varphi_0 = -1$  и  $\eta = 20$  (маска I), в которых отношение расходимости  $\theta/\theta_0$  не превосходит 0,4.

Результаты численного моделирования для масок с различным числом элементов (9, 6 и 4) представлены на рисунке 3. Их сравнение показывает, что с уменьшением количества элементов фазомодулирующих масок происходит более поздний старт филаментации (синяя кривая), поскольку в этом в этом случае происходит увеличение размеров отдельных субпучков, формируемых после прохождения масок. Также для масок с меньшим количеством элементов наблюдается более высокая интенсивность ( $>0,1$  ТВт/см<sup>2</sup>) в ПФК (синяя кривая), которая сохраняется на расстояниях, в несколько раз превышающих длину Рэлея  $L_R$ .

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.

### **3. 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.

На основе численного решения усредненного по времени нелинейного уравнения Шредингера проведено численное моделирование распространения мощных фемтосекундных лазерных импульсов для различных начальных конфигураций фазомодулирующих масок, числа составляющих их элементов и начальной мощности импульса. Показано, что для определенных типов фазовой модуляции импульса можно

добиться увеличения координаты начала филаментации и ее общей протяженности (по сравнению с немодулированным импульсом), а также снижения угловой расходимости постфиламентов. Для масок с меньшим количеством фазовых элементов область филаментации формируется на большем расстоянии от начала трассы, а также наблюдается более высокая интенсивность в ПФК.

#### 4. Иллюстрации, визуализация результатов

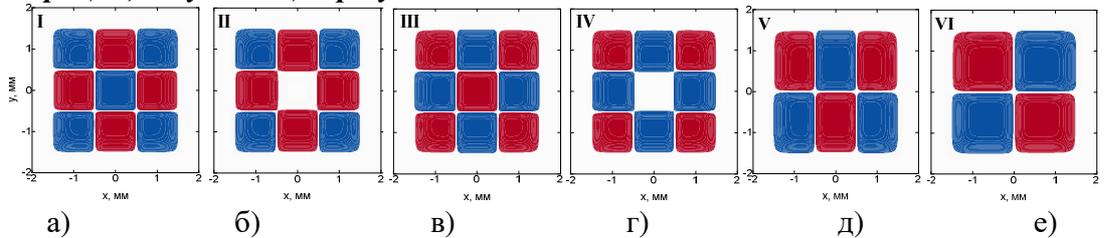


Рисунок 1 – Используемые в численном моделировании фазомодулирующие маски, состоящие из 9 (а-г), 6 (д) и 4 (е) элементов, с разностью фаз между соседними элементами  $\varphi_0 = -1$  (а,б,д,е) и 1 (в,г), в случаях с модулированным (а,в) и немодулированным (б, г) центром

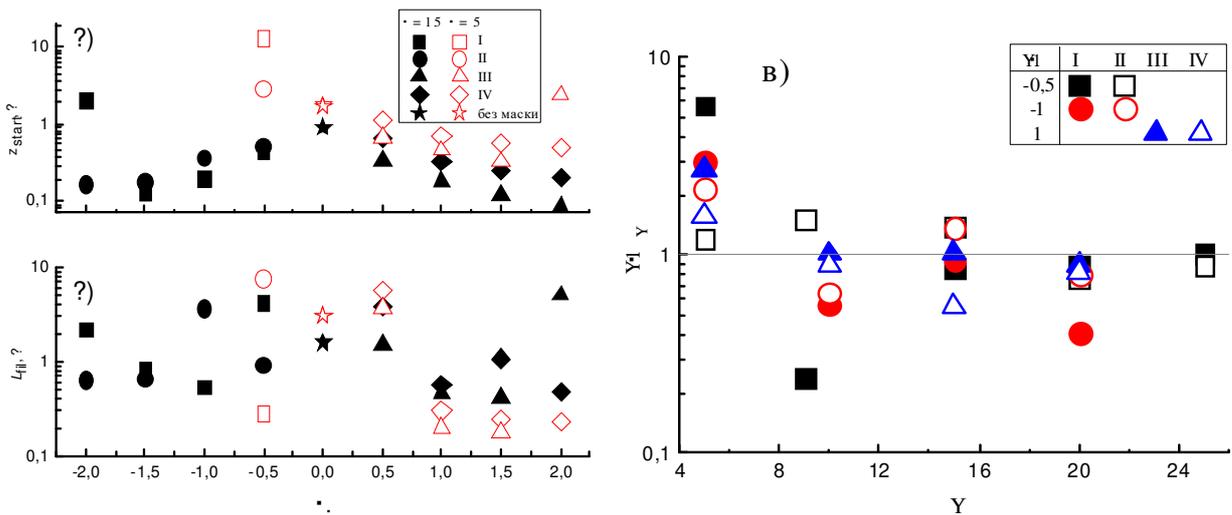


Рисунок 2 – Координата начала  $z_{start}$  (а) и длина  $L_{fil}$  (б) области филаментации для различных фазомодулирующих масок для пучка с относительной пиковой мощностью  $\eta = 5$  и 15. (в) Зависимость относительной угловой расходимости  $\theta/\theta_0$  высокоинтенсивного канала от относительной мощности лазерного импульса  $\eta$ .

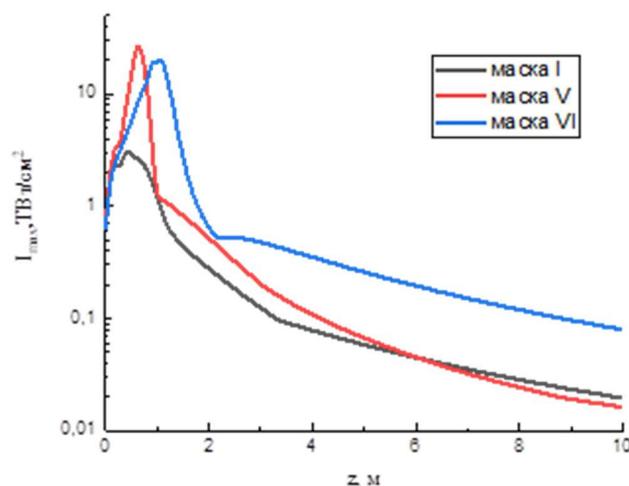


Рисунок 3 – Зависимости максимальной интенсивности вдоль трассы при распространении лазерного импульса с  $\eta = 5$  для фазовых масок I, V, VI с  $\varphi_0 = -1$

### 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. 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.
2. 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.
3. 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.
4. Yury E. Geints. Angular Patterns of Nonlinear Emission in Dye Water Droplets Stimulated by a Femtosecond Laser Pulse for LiDAR Applications // *Remote Sens.* 2023. V. 15. P. 4004.  
<https://doi.org/10.3390/rs15164004>.  
Импакт-фактор журнала SJR 2024 = 1.09.
5. A.D. Bulygin, Y.E. Geints, and I.E. Geints. Vortex Beam in a Turbulent Kerr Medium for Atmospheric Communication // *Photonics*. 2023. V. 10, Is. 7. P. 856.  
DOI:10.3390/photonics10070856  
Импакт-фактор журнала SJR 2024 = 0.46.