


## НЕЛИНЕЙНЫЕ ОПТИЧЕСКИЕ ЯВЛЕНИЯ В АТМОСФЕРЕ И ОКЕАНЕ

УДК 530.182 + 535-15

# Структурированная филаментация мощного фемтосекундного лазерного излучения при модуляции амплитудными сетчатыми масками

Ю.Э. Гейнц, О.В. Минина \*

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

Поступила в редакцию 01.09.2023;

после доработки 29.09.2023;

принята к печати 09.10.2023

Теоретически рассмотрена проблема управления параметрами области филаментации мощных фемтосекундных лазерных импульсов при амплитудной модуляции излучения металлической сетчатой маской. В этом случае исходный лазерный пучок разбивается на отдельные субпучки меньшей энергии, что приводит к выраженной регуляризации пространственной структуры филаментов, формирующейся на этапе самофокусировки излучения за счет дифракционного взаимодействия между субпучками в нелинейной среде. С помощью численного моделирования установлено, что при использовании модуляционных сеток сокращается общая длина области филаментации фемтосекундного лазерного излучения в воздухе. Продольная связность лазерной плазмы в таких филаментах может существенно повышаться. Показано, что пространственными характеристиками филаментов (начало, протяженность, связность) можно управлять в широких пределах путем изменения параметров сеток (толщина перекрестий, размер ячеек), а также положения сеточной маски относительно центра лазерного пучка. Результаты работы важны для прогнозирования распространения мощного фемтосекундного лазерного излучения в нелинейной среде, в частности на атмосферных трассах.

*Ключевые слова:* фемтосекундное лазерное излучение, амплитудная модуляция, сеточная маска, самофокусировка, лазерная филаментация, постфиламентационный световой канал; femtosecond laser radiation, amplitude modulation, mesh mask, self-focusing, laser filamentation, postfilament.

## Введение

Нелинейно-оптические явления самофокусировки и филаментации мощного лазерного излучения в прозрачных средах [1–3] уже много лет детально изучаются как с фундаментальной, так и с прикладной точек зрения [3–6]. Интерес к этим исследованиям во многом связан с комплексным характером взаимодействия излучения и среды распространения, приводящим к целой линейке нелинейно-оптических эффектов, среди которых генерация терагерцового излучения, формирование конической суперконтинуальной эмиссии, образование локализованных высокоинтенсивных областей в форме плазменных и бесплазменных постфиламентационных каналов (постфиламентов). В этой связи особую важность приобретают работы, направленные на повышение эффективности управления характеристиками области филаментации мощного фемтосекундного лазерного излучения и постфиламентационных световых каналов [7–9].

Спектральные, пространственные и энергетические трансформации, происходящие при распро-

странении мощных фемтосекундных лазерных импульсов в оптических средах, определяют основные способы управления параметрами области филаментации [10]. К ним относятся изменения начальных параметров лазерного излучения (радиус пучка, энергия, длительность импульса), использование профилированного излучения, а также амплитудная и/или фазовая модуляция излучения.

Преимуществом амплитудной модуляции фемтосекундного лазерного излучения является формирование заданного числа высокоинтенсивных световых каналов и их контролируемое распространение. Это подтверждают результаты работы [11, 12] по филаментации фемтосекундных импульсов в воздухе, а также публикации [13–15], в которых исследовалась филаментация излучения в жидкостях и твердых телах.

Для ряда задач атмосферной оптики, в частности для фемтосекундной искровой спектроскопии [16], *большее* значение имеет возможность управления смещением области филаментации мощного излучения от начала оптической трассы, нежели изменение ее протяженности. Так, в нашей предыдущей статье [17] для излучения на основной гармонике титан-сапфирового фемтосекундного лазера продемонстрировано управление структурными параметрами области филаментации при амплитудной

\* Юрий Эльмарович Гейнц (ygeints@iao.ru); Ольга Владимировна Минина (mov@iao.ru).

модуляции сетками с ячейками различного размера. В натуральных экспериментах и с помощью численного моделирования было получено смещение (примерно на 25%) участка филаментации излучения в воздухе вдоль трассы при сохранении длины области филаментации с использованием амплитудной модуляции пучка.

В настоящей работе мы продолжаем исследования, представленные в [17], и теоретически рассматриваем проблему управления характеристиками филаментов и постфиламентов при распространении мощных фемтосекундных лазерных импульсов на протяженных воздушных трассах. Для решения этой проблемы также применяется амплитудная модуляция исходного излучения с помощью металлических сеток с ячейками различного размера при варьировании толщины перекрестий и общего размера сетки. Это преследовало две цели: разбиение исходного сверхмощного импульса на менее мощные фрагменты-субпучки и инициирование масштабного дифракционного взаимодействия между субпучками, приводящего к регуляризации формирующейся на этапе самофокусировки дифракционной картины [18]. Отдельно обсуждается эффект от расположения перекрестия амплитудной сетчатой маски относительно центра лазерного пучка.

## 1. Постановка задачи

Численное моделирование распространения мощных фемтосекундных лазерных импульсов в прозрачной среде проводилось на основе эффективного (интегрированного по времени) нелинейного уравнения Шредингера (НУШ) для огибающей оптического поля, известного в литературе как 3D-НУШ [19]. Формализм и основные детали численного моделирования на основе решения 3D-НУШ представлены в [20–22]. Это уравнение получается после интегрирования по временной координате полного четырехмерного (3D+1) НУШ [3], что позволяет значительно экономить вычислительные ресурсы и почти на порядок сокращает время проведения расчетов. Актуальность такого сокращения связана с обеспечением минимального разрешения по всем координатам при проведении численного моделирования распространения мощных фемтосекундных лазерных импульсов в условиях их самофокусировки и филаментации для пучков миллиметрового радиуса. В этом случае используется порядка  $10^4$  точек по поперечным координатам  $x$  и  $y$ ,  $10^3 - 10^4$  точек – по продольной координате  $z$ . Результаты, полученные при решении 3D-версии НУШ, сравнивались как с результатами моделирования в рамках (3D+1) НУШ [20, 21], так и с лабораторными экспериментами [22] и показали хорошее согласие друг с другом.

Сеточные маски генерировались программной процедурой в виде двумерного амплитудного экрана с расположенными через равные промежутки прямоугольными областями полного пропускания поля, разделенными сеткой, состоящей из перекре-

стий с нулевым пропусканием. Для улучшения сходимости численного алгоритма решения НУШ границы перекрестий не были резкими (ступенчатыми), а обеспечивали постепенный переход от полного пропускания к полному блокированию оптической волны. Для этого использовалась супергауссовская функция с резким падением амплитуды в узком, но конечном интервале значений. Сгенерированные сетки характеризуются числом ячеек  $n$ , их размером  $d$  и толщиной используемой «провода»  $D$  для создания перекрестий амплитудной маски.

Были рассмотрены сетки с мелкими ( $d/R_0 \leq 1$ ) и крупными ячейками ( $d/R_0 > 1$ ) ( $R_0$  – начальный радиус пучка). В случае мелкоячейстых сеток моделирование проводилось для пучка с  $R_0 = 1$  мм,  $d$  принимало значения от 0,2 до 1 мм. При распространении излучения через крупноячейстые сетки рассматривались пучки с  $R_0 = 4$  мм, поэтому величина  $d$  доходила до 5 мм (см. раздел 2.2). Диаметр проволоки  $D$  варьировался от 50 до 500 мкм.

При распространении гауссова лазерного пучка через сетчатую амплитудную маску его начально унимодальный поперечный профиль интенсивности становится мультимодальным с новыми максимумами поля. Их количество определяется размером ячейки сетчатой маски. Этот параметр непосредственно влияет на характер пространственной модуляции излучения. Также большое значение имеет конкретное расположение перекрестия сетки относительно центра исходного лазерного пучка. В ходе численного моделирования расположение перекрестия определялось числом ячеек сетки  $n$  по одной из координатных осей. Как будет показано ниже, непосредственное влияние этого параметра на картину распространения мощного лазерного излучения определяется тем, является ли значение  $n$  четным или нечетным. Если  $n$  было четным (рис. 1, *а, в, г*), то на центральную и наиболее интенсивную часть пучка приходилось перекрестие сетки, которое делило пучок на четыре одинаковых субпучка меньшей энергии. Для обозначения этого случая в дальнейшем будет использоваться символ «+». При нечетном  $n$ , наоборот, сетка обрамляла наиболее интенсивную часть пучка (рис. 1, *б*), создавая квазипрямоугольный супергауссов профиль интенсивности с малоинтенсивными боковыми лепестками. Этот случай будет обозначаться символом «□». Расположение сетки относительно центра лазерного пучка удобно отслеживать по окружности, обозначающей границы пучка по уровню  $e^{-2}$ , как показано на рис. 1.

В дальнейшем численное моделирование филаментации выполнялось для коллимированного фемтосекундного лазерного импульса с несущей длиной волны  $\lambda = 744$  нм. В качестве модели воздушной среды распространения излучения использовалась смесь кислорода и азота (20% + 80%). Концентрация нейтральных молекул газа составляла  $2,5 \cdot 10^{19}$  см<sup>-3</sup>. Поперечный профиль интенсивности определялся гауссовой функцией. Начальный радиус пучка  $R_0$  составлял 1 и 4 мм (по уровню  $e^{-1}$ ).

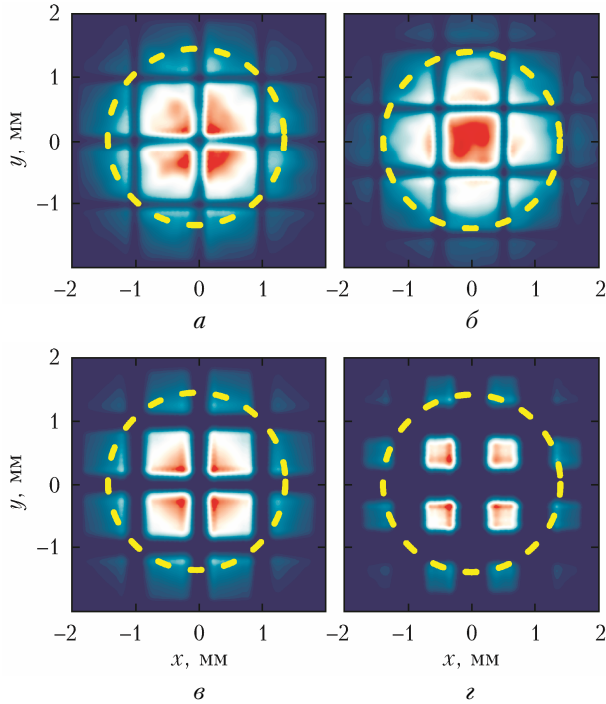


Рис. 1. Примеры различных амплитудных масок: сетка с четным (*a*, *в*, *г*) и нечетным (*б*) числом ячеек с  $D = 50$  (*a*, *б*),  $250$  (*в*) и  $500$  (*г*) мкм (см. цветной рисунок на сайте <http://iao.ru/ru/content/vol.37-2024/iss.01>)

Значения пиковой мощности в импульсе  $P_0$  выбирались в диапазоне от 5 до 15 критических мощностей самофокусировки  $P_{cr}$ , которая в соответствии с [3] равнялась 3,2 ГВт. С точки зрения сценария протекания лазерной филаментации рассматриваемые значения относительной пиковой мощности  $\eta = P_0/P_{cr}$  соответствуют распространению излучения для так называемых импульсов малой, умеренной и большой мощности. В этих ситуациях исследуются особенности нелинейного распространения мощного фемтосекундного лазерного излучения в режимах одиночной и множественной филаментации, а также в некоторых пограничных случаях. Конкретный сценарий, реализуемый в численном эксперименте, будет определяться не только мощностью импульса и начальным радиусом пучка, но и параметрами амплитудной сетчатой маски.

## 2. Управление координатой начала и длиной области филаментации

### 2.1. Мелкоячеистые сетки

Согласно формуле Марбургера [23] дистанция самофокусировки гауссова пучка в керровской среде определяется оптическими свойствами среды распространения, а также параметрами излучения, а именно радиусом пучка и его мощностью. Следуя формуле Марбургера, при использовании сетки в пространственной конфигурации «□», т.е. с нечетным числом ячеек  $n$ , филаментация пучка должна происходить раньше, чем для сетки «+»-типа, т.е.

с четным числом ячеек. Очевидно, это справедливо при одинаковом размере ячеек сеток обоих типов. Причина уменьшения координаты начала филаментации связана с более ранней самофокусировкой субпучка, выделяемого центральной ячейкой сетки из наиболее интенсивной части пучка (рис. 1, *б*). Так, в случае четырех субпучков, показанных на рис. 1, *а*, самофокусировка излучения может начаться позже, поскольку интенсивность каждого субпучка будет меньше. При увеличении диаметра проволоки, формирующей перекрестия сетки (рис. 1, *в*, *г*), субпучки будут сдвигаться от центральной части пучка и даже могут оказаться близко к его периферии.

Конкуренция этих факторов приводит к тому, что при использовании сеток «+»-типа с ячейками размером  $d > 0,5$  мм, что примерно соответствует половине радиуса пучка для начального радиуса пучка 1 мм, в целом координата начала филаментации удаляется. Область филаментации, расположенная вдоль оптической трассы, показана на рис. 2 вертикальными отрезками, отмечающими начало и конец активного плазмообразования в канале пучка. Координаты этих точек определялись по условию превышения плотности свободных электронов уровня  $10^{14}$  см $^{-3}$ . Более сильное дробление пучка за счет уменьшения параметра  $d$  нивелирует различия в картинах филаментации. Это особенно заметно при малой начальной мощности в импульсе (рис. 2, *а*), так как в этом случае формируется очень большое число субпучков малого радиуса. Из-за этого доля энергии, приходящаяся на каждый конкретный субпучок (даже для центральной области исходного лазерного пучка), оказывается недостаточной для проявления эффектов, связанных с положением перекрестия сетчатой маски. В этом случае лазерный пучок скорее соответствует сильно зашумленному пучку супергауссова профиля, для которого положение выбросов интенсивности от отдельных ячеек не является существенным.

Другие закономерности, проявляющиеся при распространении мощного фемтосекундного лазерного излучения через амплитудные сетчатые маски, связаны с протяженностью участка филаментации  $L_{fil}$ , на котором происходят активная ионизация воздуха и образование плазмы. Например, сокращение  $L_{fil}$  наблюдается при малой мощности излучения (рис. 2, *а*), если сравнивать со случаем распространения немодулированного излучения (голубая область на рис. 2), когда пучок излучения не проходил через сетчатую маску.

Для объяснения физической причины этого сокращения обратимся к рис. 3. Видно, что для пучка с  $\eta = 5$  число последовательных рефокусировок сокращается на всем участке филаментации (приблизительно с трех до одной), что можно проследить по уменьшению числа максимумов при изменении пиковой интенсивности  $I_{max}$  вдоль трассы  $z$ .

Возвращаясь к рис. 2, заметим, что при  $\eta = 15$  (см. рис. 2, *в*) наблюдается повышение связности (продольной непрерывности) области филаментации,

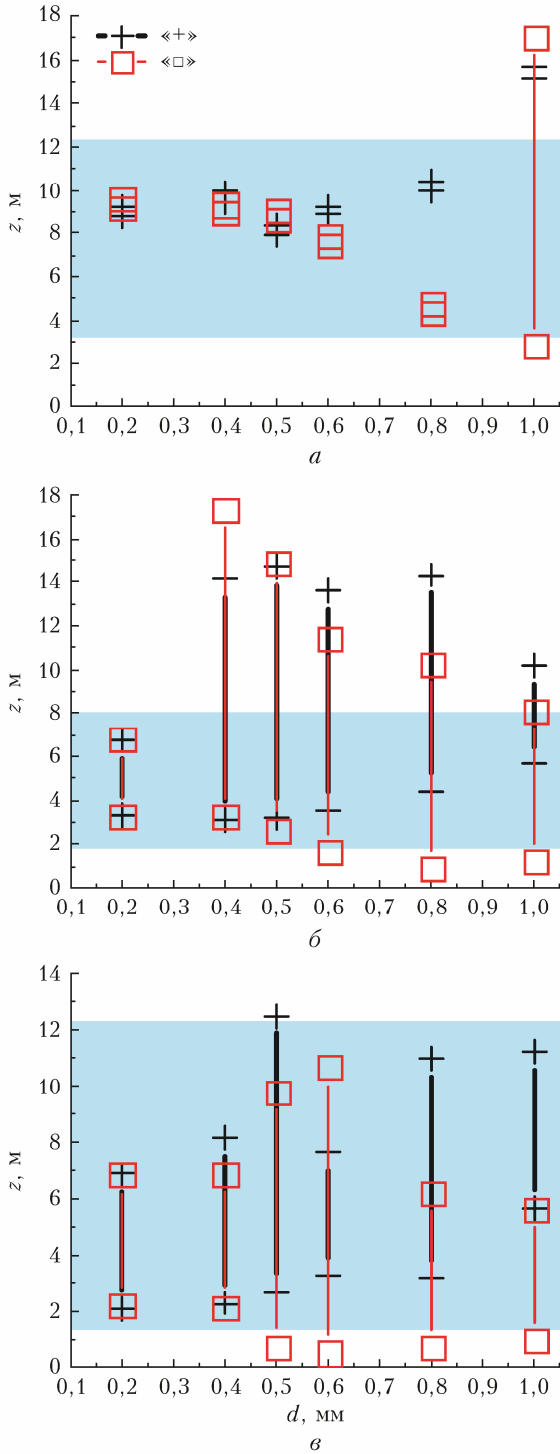


Рис. 2. Зависимость положения области филаментации (вертикальные отрезки) от размера ячейки модуляционных сеток «+»- и «□»-типов при распространении пучков фемтосекундных лазерных импульсов с  $\eta = 5$  (а), 10 (б) и 15 (в). Голубым цветом отмечена протяженность области филаментации при распространении излучения без модуляционной сетки (см. цветной рисунок на сайте <http://iao.ru/ru/content/vol.37-2024/iss.01>)

когда расстояние между отдельными максимумами сокращается. На рис. 3 для пиковой интенсивности  $I_{\max}$  эти ситуации показаны синими линиями.

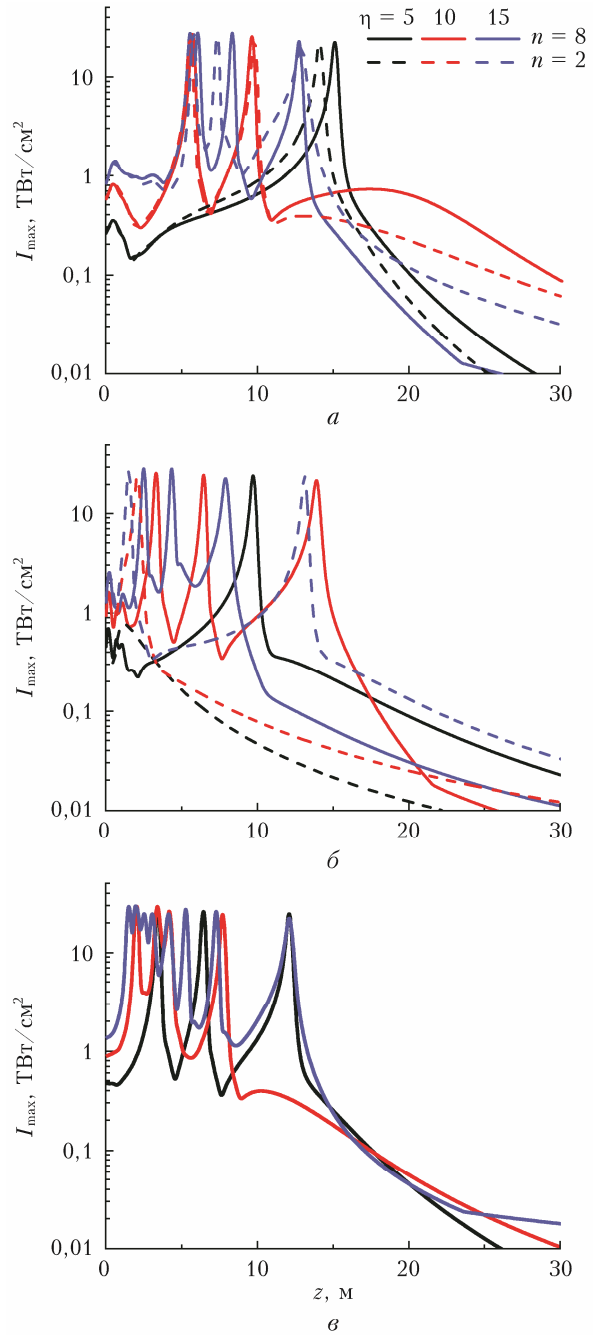


Рис. 3. Зависимость пиковой интенсивности от дистанции распространения для импульсов с  $\eta = 5, 10, 15$  для сеток «+»-типа с  $d = 1$  (а) и  $0,4$  (б) мм, а также без использования сетки (в) (см. цветной рисунок на сайте <http://iao.ru/ru/content/vol.37-2024/iss.01>)

Анализ зависимостей, полученных при использовании модуляционных сеток (рис. 3, а, б), удобно проводить, сравнивая их с зависимостями, построенными для немодулированного излучения (рис. 3, в). Увеличение координаты начала области филаментации и уменьшение ее длины, наблюдаемые на рис. 2, согласуются с результатами численных и экспериментальных исследований, представленных нами ранее в [16] для слабоэллиптического лазерного пучка диаметром 8 мм.

Еще одним параметром, с помощью которого можно управлять областью филаментации мощного лазерного излучения, является площадь перекрытия лазерного пучка сеткой. Действительно, как видно на рис. 3, при небольших значениях  $d$  и  $n$ , когда общий размер всей сеточной маски оказывается меньше размера пучка (например, штриховые кривые на рис. 3, б, построенные при  $d = 0,4$  мм,  $n = 2$  и  $R_0 = 1$  мм), амплитудной маской перекрывается только центральная часть пучка, а его периферия остается немодулированной. При такой частичной модуляции для маломощного излучения ( $\eta = 5$ ) филаментация может не реализоваться (черная штриховая кривая на рис. 3, б). В целом за счет изменения площади перекрытия лазерного пучка амплитудной маской удается отдалить область филаментации от начала трассы, а наибольшего смещения удается добиться для масок с большим размером ячеек (сплошные кривые на рис. 3, а).

## 2.2. Крупноячеистые сетки

Использование сеток с размером ячеек, превышающим начальный радиус пучка, более предпочтительно в исследованиях филаментации на достаточно протяженных трассах, поскольку они формируют субпучки большего начального радиуса, что важно для атмосферных приложений филаментации. Для более наглядной демонстрации эффекта от применения крупноячеистых сеток на трассах длиной более 100 м в этом разделе рассматриваются пучки с  $R_0 = 4$  мм.

На рис. 4 приведена зависимость  $I_{\max}$  лазерного импульса, модулированного различными сеточными масками от дистанции распространения. Если сравнить положение участка филаментации со случаем немодулированного гауссова излучения (серая область), то видно, что мелкоячеистая сетка « $\square$ »-типа ( $d = 1$  мм, черная штриховая кривая,  $d/R_0 < 1$ ) значительно удаляет старт филаментации,

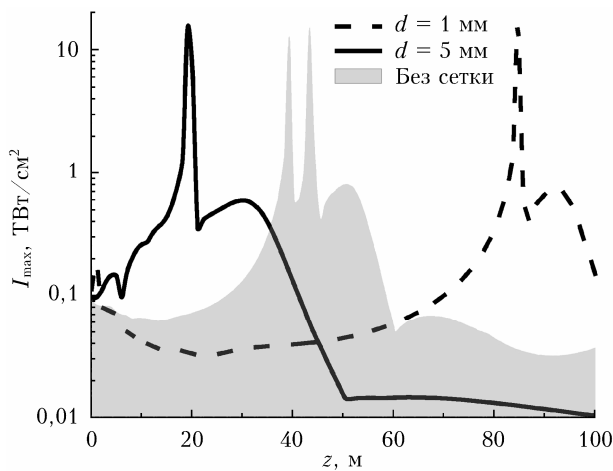


Рис. 4. Зависимость пиковой интенсивности импульса от дистанции распространения мощного фемтосекундного лазерного излучения в воздухе при варьировании размера ячеек сетки

а более крупноячеистая сетка ( $d = 5$  мм, черная сплошная кривая,  $d/R_0 > 1$ ), наоборот, может приблизить ее к началу трассы распространения.

Из рис. 4 также следует, что в численных расчетах пространственный диапазон существования филаментации пучка во всех случаях модуляции излучения сетками составляет не больше одного метра. Это расстояние оказывается значительно меньшим, чем в экспериментах [17], где удавалось зафиксировать ненулевую электропроводимость канала пучка, свидетельствующую о его филаментации, на существенно большей протяженности (порядка 10 м). Причина такого расхождения теоретической модели и эксперимента может заключаться в зависимости координаты филаментации излучения от характера размещения перекрестия амплитудной маски относительно центра пучка, что подробно рассматривалось в разд. 2.1.

Изменение координаты начала филаментации  $z_{fil}$  для сеток с ячейками различного размера представлено на рис. 5.

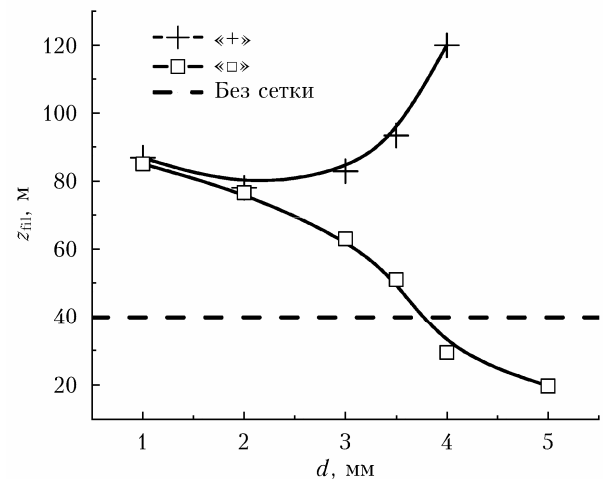


Рис. 5. Зависимость координаты начала филаментации от размера ячейки сетки для различных вариантов расположения перекрестия относительно центра лазерного пучка

Как видно (рис. 5), динамика филаментации мощного лазерного излучения будет существенно зависеть от положения перекрестия относительно центра пучка. При распространении излучения через сетки «+»-типа, выделяющие четыре субпучка небольшой мощности, характерна последовательная конструктивная интерференция этих субпучков. В то же время для сеток « $\square$ »-типа главным драйвером самофокусировки является дифракция излучения на резких границах апертуры для одного мощного субпучка. Это изменяет характер филаментации мощного лазерного излучения тем сильнее, чем больше размер ячеек сетки. Для мелкоячеистых сеток ( $d/R_0 \leq 0,5$ ) отдельных субапертур становится слишком много для того, чтобы распределение энергии было чувствительным к конкретному положению перекрестия амплитудной маски.

### 3. Повышение стабильности пространственного положения высокоинтенсивных световых каналов

Множественная филаментация — стохастический процесс, из-за чего прогнозирование расположения отдельных высокоинтенсивных каналов в области филаментации и постфиламентационного каналирования является проблематичным. Один из возможных способов решения проблемы — использование амплитудных сетчатых масок, поскольку они снижают стохастический характер процесса. Это иллюстрирует рис. 6, на котором построены поперечные сечения лазерного пучка на различных расстояниях от начала трассы для излучения с  $\eta = 15$ , полученные без использования сетки (рис. 6, *a, z*) и для сеток с ячейками разного размера. Выбор расстояния определялся наличием области филаментации (рис. 6, *a–в*) и постфиламентов (рис. 6, *z–e*) в каждом из рассматриваемых случаев.

Из рис. 6, *a* следует, что при распространении немодулированного излучения картина филаментации является несимметричной. Это связано с появлением случайных максимумов при модуляционной неустойчивости зашумленного гауссова пучка. Уменьшение влияния стохастического характера множественной филаментации видно на рис. 6, *б*, построенного для сетки с минимальным из рассматриваемых размером ячейки ( $d = 0,2$  мм). Этот эффект проявляется в формировании центрального высокоинтенсивного канала, окруженного системой дифракционных колец. Здесь первое из этих колец является наиболее мощным и содержит в себе два дополнительных максимума. При увеличении раз-

мера сетки ( $d = 1$  мм на рис. 6, *в*) эффект от использования сетчатой амплитудной маски становится менее выраженным, что проявляется в практически полном отсутствии кольцевой структуры пучка.

В зоне постфиламентационного распространения излучения (рис. 6, *z*) гауссов пучок демонстрирует наличие двух центральных максимумов в распределении плотности энергии, окруженных системой несимметричных колец, сформировавшихся на стадии филаментации в результате множественных рефокусировок. В кольцах также присутствуют случайно расположенные локальные максимумы, что уменьшает стабильность осевой части пучка, которая ассоциирована с постфиламентом. Это в целом демонстрирует неупорядоченную картину распространения немодулированного излучения. В отличие от этого, на рис. 6, *д, e* отчетливо прослеживается формирование одного постфиламента, положение которого стабильно сохраняется на больших расстояниях. Кольцевая структура, формируемая вокруг центрального максимума, наблюдается как для малых, так и для крупных ячеек. Более отчетливо ее видно на рис. 6, *д*, который построен для сетки с ячейками размером 0,2 мм.

Можно сделать вывод, что при одинаковых параметрах лазерного излучения и малых размерах ячеек (до  $d = 0,4$  мм) влияние числа ячеек сетки на параметры области филаментации ( $z_{\text{fil}}$ ,  $L_{\text{fil}}$ ) и постфиламентационного каналирования пучка незначительно и не превышает порядка 10%. Однако при большем размере ячеек ( $d \geq R_0$ ) координата начала филаментации смещается к началу трассы (рис. 4, 5). Этот эффект важно учитывать при проведении дальнейших исследований, направленных на формирование удаленной области филаментации.

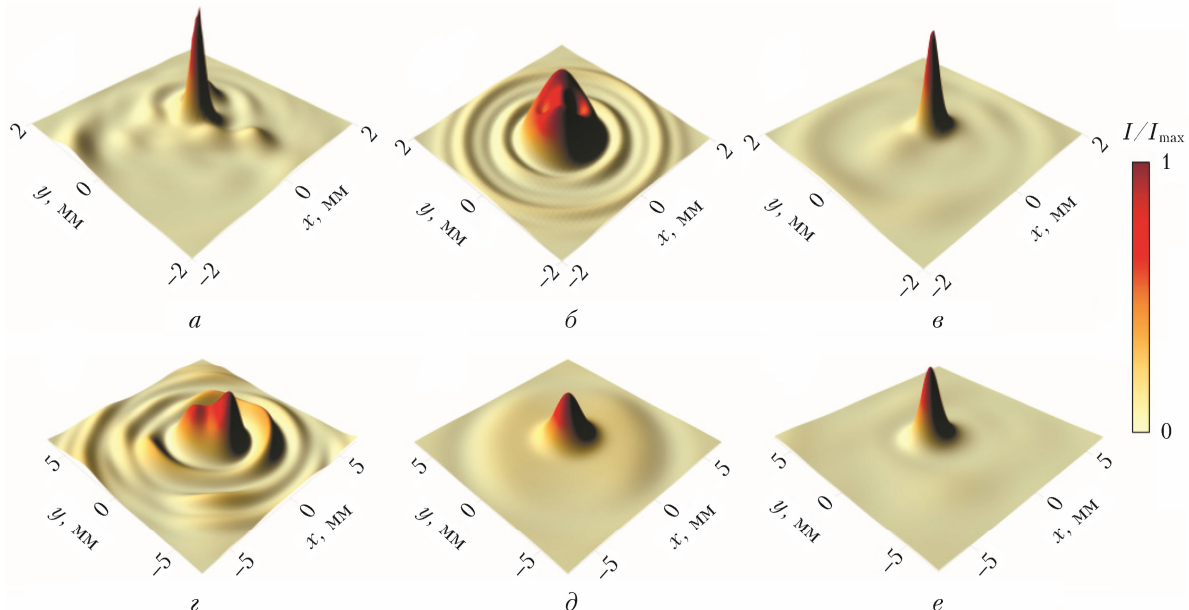


Рис. 6. Поперечные сечения лазерного пучка на расстояниях  $z = 5$  (*a–в*) и  $20$  м (*z–e*) от начала трассы для импульсов с  $\eta = 15$ , полученные без использования сетки (*a, z*) и для сеток «□»-типа с ячейками размером 0,2 (*б, д*) и 1 мм (*в, e*) (см. цветной рисунок на сайте <http://iao.ru/ru/content/vol.37-2024/iss.01>)

#### 4. Повышение продольной непрерывности области филаментации и реализация бесфиламентационного распространения мощного фемтосекундного лазерного излучения

В реальных условиях при изготовлении амплитудных масок в виде сеток еще одним свободным параметром является диаметр используемой металлической проволоки  $D$ , формирующей перекрестия сетки. За счет его изменения меняются площадь пучка, перекрываемая сеткой, и глубина его пространственной модуляции.

Из анализа рис. 7, а, на котором построен продольный профиль пиковой концентрации свободных электронов  $\rho_e$ , генерируемых в канале излучения (плотность плазмы), следует, что при малых  $D$  ( $D \ll d$ ) общий размер сетки и положение перекрестия относительно центра лазерного пучка становятся несущественными, поскольку в этом случае

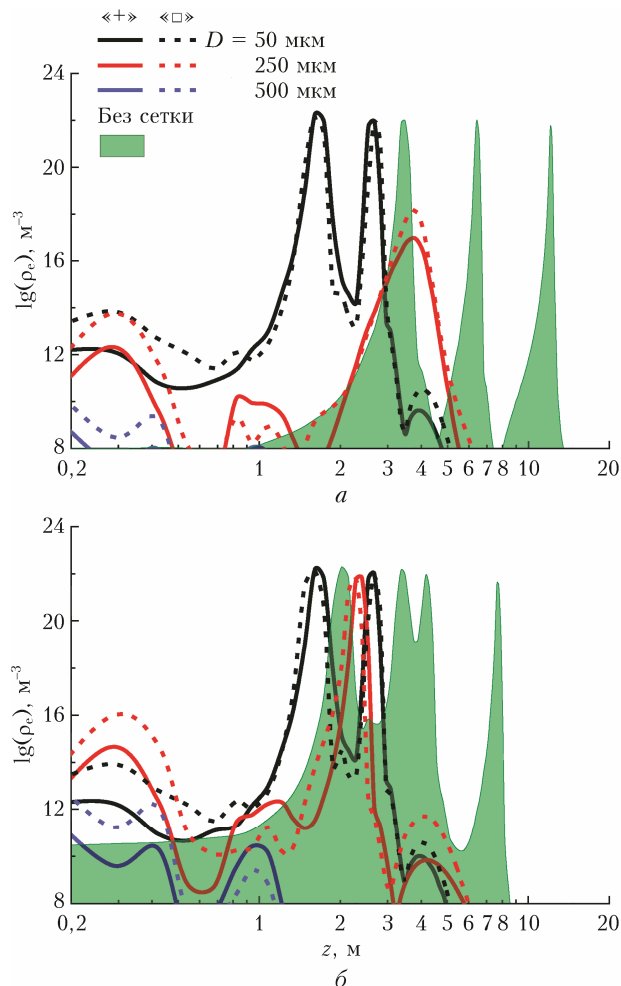


Рис. 7. Зависимость плотности плазмы от дистанции распространения лазерных пучков с  $\eta = 5$  (а) и 10 (б) при различном диаметре проволоки для ячеек с  $d = 1 \text{ мм}$  и без сетки (затененная область) (см. цветной рисунок на сайте <http://iao.ru/ru/content/vol.37-2024/iss.01>)

(черные кривые на рис. 7, а) отличия в координатах начала филаментации и длине области филаментации практически не наблюдаются. Аналогичные закономерности существуют и для более широких перекрестий (красные кривые на рис. 7, а). При еще большем диаметре проволоки ( $D \sim d$ ) филаментация не реализуется (синие кривые на рис. 7, а). Срыв филаментации в этом случае обусловлен, во-первых, тем, что с увеличением диаметра проволоки уменьшается энергия, приходящаяся на отдельные максимумы поля. Во-вторых, пространственное расположение формируемых субпучков относительно друг друга становится более обособленным, что снижает их дифракционное взаимодействие при распространении. Важная роль дифракционных эффектов при самофокусировке мощного фемтосекундного лазерного излучения и формировании области филаментации подробно описана, например, в [18, 24].

При большей пиковой мощности в импульсе ( $\eta = 10$  на рис. 7, б) описанные выше закономерности сохраняются, но возрастает расхождение в координатах начала филаментации при различном положении перекрестия относительно центра лазерного пучка («+» и «□»). Однако данные различия не превышают  $\sim 6\%$ . Поэтому можно сказать, что в рассматриваемом случае положение перекрестия оказывается второстепенным фактором по сравнению с наличием амплитудной модуляции сеточной маской.

#### Заключение

Рассмотрены возможности управления характеристиками области филаментации мощных фемтосекундных лазерных импульсов в воздухе с помощью амплитудных масок сетчатого типа. Такой тип наложенной модуляции амплитуды волны обеспечивает контроль как филаментов, так и постфиламентов за счет разделения исходного лазерного пучка на отдельные субпучки с меньшей энергией. Численное моделирование позволило установить, что положение перекрестия сеточной маски относительно центра лазерного пучка влияет на координату начала области филаментации, ее длину и продольную связность лазерной плазмы в филаментах. Дополнительными варьируемыми параметрами амплитудных масок были число ячеек, их размер и толщина перекрестий. Они определяют степень модуляции излучения и то, насколько сильным будет дифракционное взаимодействие между отдельными субпучками.

Сравнивая результаты численных расчетов, полученных с модуляционными сетками и без них, следует отметить уменьшение длины области филаментации в условиях наложенной амплитудной модуляции. Когда осевая часть лазерного пучка приходится на центр ячейки сетки, также наблюдается приближение координаты начала филаментации пучка к началу оптической трассы. Наибольшая длина области филаментации обеспечивается при модуляции всего пучка (а не только его центральной части), что реализуется за счет увеличения числа

ячеек сетки. Для минимизации стохастического характера множественной филаментации и регуляризации плотности энергии в поперечном сечении лазерного пучка более предпочтительны мелкоячеистые сетки. Они позволяют получить устойчивую кольцевую структуру на участке формирования постфиламентов благодаря дифракционному взаимодействию полей от отдельных субпучков. Варьирование толщины проволоки, формирующей перекрестия сетки, показало, что в этом случае менее существенными становятся общий размер сетки и положение перекрестия относительно центра лазерного пучка.

### Список литературы

1. Аскаръян Г.А. Воздействие градиента поля интенсивного электромагнитного луча на электроны и атомы // ЖЭТФ. 1962. Т. 42, № 6. С. 1567–1570.
2. Braun A., Korn G., Liu X., Du D., Squier J., Mourou G. Self-channeling of high-peak-power femtosecond laser pulses in air // Opt. Lett. 1995. V. 20, N 1. P. 73–75.
3. *Self-focusing: Past and Present. Fundamentals and Prospects* / R.W. Boyd, S.G. Lukishova, Y.R. Shen (eds.). Berlin: Springer, 2009. 605 p.
4. Chin S.L. Femtosecond laser filamentation. New York, Springer Science + Business Media, LLC, 2010. 130 p.
5. Couairon A., Mysyrowicz A. Femtosecond filamentation in transparent media // Phys. Rep. 2007. V. 441. P. 47–189.
6. Чекалин С.В., Кандидов В.П. От самофокусировки световых пучков – к филаментации лазерных импульсов // Успехи физ. наук. 2013. Т. 183, № 2. С. 133–152.
7. Méchain G., Couairon A., André Y.-B., D'Amico C., Franco M., Prade B., Tzortzakakis 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.
8. 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 // Opt. Commun. 2011. V. 284, N 14. P. 3601–3606.
9. Алексимов Д.В., Гейнц Ю.Э., Землянов А.А., Кабанов А.М., Матвиенко Г.Г., Ошлаков В.К. Филаментация фемтосекундных лазерных импульсов в воздухе / под общ. ред. А.А. Землянова. Томск: Изд-во ИОА СО РАН, 2017. 162 с.
10. Panov N.A., Kosareva O.G., Murtazin I.N. Ordered filaments of a femtosecond pulse in the volume of a transparent medium // J. Opt. Technol. 2006. V. 73, N 11. P. 778–785.
11. Алексимов Д.В., Бабушкин П.А., Гейнц Ю.Э., Землянов А.А., Матвиенко Г.Г., Ошлаков В.К., Петров А.В., Хорошаева Е.Е. Закономерности распространения амплитудно-модулированного мощного фемтосекундного лазерного излучения в воздухе // Оптика атмосф. и океана. 2021. Т. 34, № 11. С. 837–841; *Aleksimov D.V., Babushkin P.A., Geints Yu.E., Zemlyanov A.A., Matvienko G.G., Oshlakov V.K., Petrov A.V., Khoroshaeva E.E.* Features of propagation of amplitude-modulated high-power femtosecond laser radiation in air // Atmos. Ocean. Opt. 2022. V. 35, N 2. P. 97–102.
12. Shipilo D.E., Panov N.A., Sunchugasheva E.S., Mokrousova D.V., Shutov A.V., Zvorykin V.D., Ustinovskii N.N., Seleznev L.V., Savel'ev A.B., Kosareva O.G., Chin S.L., Ionin A.A. Fifteen meter long uninterrupted filaments from sub-terawatt ultraviolet pulse in air // Opt. Express. 2017. V. 25, N 21. P. 25386–25391.
13. Shroeder H., Chin S.L. Visualization of the evolution of multiple filaments in methanol // Opt. Commun. 2004. V. 234. P. 399–406.
14. Kandidov V.P., Aközbeq N., Scalora M., Kosareva O.G., Nyakk A.V., Luo Q., Hosseini S.A., Chin S.L. Towards a control of multiple filamentation by spatial regularization of a high-power femtosecond laser pulse // Appl. Phys. B. 2005. V. 80. P. 267–275.
15. Kosareva O.G., Nguyen T., Panov N.A., Liu W., Salimnia A., Kandidov V.P., Aközbeq N., Scalora M., Vallée R., Chin S.L. Array of femtosecond plasma channels in fused silica // Opt. Commun. 2006. V. 267, N 2. P. 511–523.
16. Кульчин Ю.Н., Вознесенский С.С., Гамаюнов Е.Л., Голк С.С., Ильин А.А., Каменев О.Т., Никитин А.И., Павлов А.Н., Попик А.Ю., Ромашко П.В., Субботин Е.П. Фотонные методы и технологии мониторинга океана и атмосферы // Квант. электрон. 2020. Т. 50, № 5. С. 475–488.
17. Geints Yu.E., Minina O.V., Geints I.Yu., Seleznev L.V., Pushkarev D.V., Mokrousova D.V., Rizaev G.E., Shipilo D.E., Nikolaeva I.A., Kurilova M.V., Panov N.A., Kosareva O.G., Houard A., Couairon A., Ionin A.A., Liu W. 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.
18. Mitina E., Uryupina D., Shipilo D., Nikolaeva I., Panov N., Volkov R., Kosareva O., Savel'ev A. Diffraction impact onto regularized plasma channel formation by femtosecond laser filamentation // Photonics. 2023. V. 10, N 8. P. 928–1–14.
19. 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.
20. 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.
21. Geints Yu.E., Minina O.V., Zemlyanov A.A. Self-channeling of spatially modulated femtosecond laser beams in the post-filamentation region // J. Opt. Soc. Am. B. 2022. V. 39, N 6. P. 1549–1556.
22. Geints Yu.E., Minina O.V., Mokrousova D.V., Pushkarev D.V., Rizaev G.E., Seleznev L.V. Manipulation of femtosecond laser filamentation by wire mesh amplitude mask // Opt. Commun. 2023. V. 543. P. 129595–1–10.
23. Marburger J.H. Self-focusing: Theory // Prog. Quantum Electron. 1975. V. 4, part 1. P. 35–110.
24. Землянов А.А., Бульгин А.Д., Гейнц Ю.Э., Минина О.В. Динамика световых структур при филаментации



фемтосекундных лазерных импульсов в воздухе // Оптика атмосф. и океана. 2016. Т. 29, № 5. С. 359–368; *Zemlyanov A.A., Bulygin A.D., Geints Yu.E., Mini-*

*na O.V.* Dynamics of light structures during filamentation of femtosecond laser pulses in air // *Atmos. Ocean. Opt.* 2016. V. 29, N 5. P. 395–403.

*Yu.E. Geints, O.V. Minina.* **Structured filamentation of high-power femtosecond laser radiation modulated by amplitude mesh masks.**

The problem of controlling the parameters of the filamentation region of high-power femtosecond laser pulses for amplitude modulation of radiation by a metal mesh mask is theoretically considered. To this end, the initial laser beam is split into individual lower energy subbeams. This leads to a pronounced regularization of the spatial structure of the filaments, which is formed at the stage of radiation self-focusing due to diffraction interaction between subbeams in a nonlinear medium. Generally, the total length of the filamentation domain of femtosecond laser radiation in air is reduced when using modulation meshes. At the same time, the longitudinal continuity of laser plasma in such filaments can significantly increase. We show that the spatial parameters of filaments (coordinate of the start, length, and continuity) can be controlled over a wide range by changing mesh parameters (crosshair thickness and cell size), as well as the position of the mesh mask relative to the laser beam center. The results are important for predicting the propagation of high-power femtosecond laser radiation in a nonlinear medium, in particular, along atmospheric paths.