

КОНФЕРЕНЦИЯ В

**РАСПРОСТРАНЕНИЕ ИЗЛУЧЕНИЯ
В АТМОСФЕРЕ И ОКЕАНЕ**

ХАРАКТЕРИСТИКИ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИ ПОПОЛНЯЮЩЕЙ ДИФРАКЦИОННО-ЛУЧЕВОЙ ТРУБКИ НА ПОСТФИЛАМЕНТАЦИОННОМ ЭТАПЕ РАСПРОСТРАНЕНИЯ ФЕМТОСЕКУНДНЫХ ЛАЗЕРНЫХ ИМПУЛЬСОВ В ВОЗДУХЕ

Гейнц Ю.Э.¹, Землянов А.А.¹, Минина О.В.^{1,2}

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

² Национальный исследовательский Томский государственный университет, Томск, Россия

e-mail: ygeints@iao.ru, zaa@iao.ru, mov@iao.ru

Ключевые слова: фемтосекундные лазерные импульсы, самофокусировка, филаментация, энергетически пополняющая дифракционно-лучевая трубка.

Представлены результаты исследования распространения в воздухе фемтосекундных лазерных импульсов в режиме самофокусировки и филаментации. Анализ результатов численного моделирования проводился на основе метода дифракционно-лучевых трубок. В результате было установлено, что средняя мощность в постфиламентационных световых каналах, образованных пучками суб- и миллиметрового радиуса, составляет около 0,6-0,9 критических мощностей самофокусировки, и она слабо зависит от начальных параметров лазерного импульса. В целом энергозатраты излучения на филаментацию снижаются при увеличении радиуса пучка.

Введение

Распространение фемтосекундных лазерных импульсов в нелинейной среде сопровождается пространственно-временными модуляциями фазы и амплитуды светового поля, которые приводят к самофокусировке и филаментации излучения [1]. Вследствие самофокусировки лазерного пучка происходит уменьшение его поперечного размера и формирование нелинейного фокуса. Существование нескольких последовательных фокусов, вызванное образованием волноводной структуры и/или фокусировок в разных временных слоях импульса, обеспечивает филаментацию лазерного излучения.

Для описания явлений самофокусировки и филаментации фемтосекундных лазерных импульсов в работе [2] был развит дифракционно-лучевой подход. В его основе лежит понятие дифракционно-лучевой трубки (ДЛТ). Каждая такая трубка, образованная множеством дифракционных лучей (ДЛ), называется дифференциальной для мгновенных ДЛ и интегральной для усредненных ДЛ. В рамках данного подхода была введена в рассмотрение энергетически пополняющая дифракционно-лучевая трубка. Она формирует нелинейный фокус, содержит энергию достаточную для компенсации энергопотерь пучка на протяжении всего жизненного цикла филамента, а после его окончания определяет границы постфиламентационного канала (ПФК). Определенная таким образом интегральная энергетически пополняющая ДЛТ соответствует «энергетическому резервуару» филамента, описанному в работе [3]. Исследования характеристик данной трубки из работы [4] показали,

что количество энергии, содержащейся в ней, изменяется при варьировании начального радиуса пучка и пиковой мощности в импульсе. Кроме того энергия излучения расходуется неравномерно при распространении лазерных импульсов вдоль трассы.

Для использования явления филаментации в решении задач атмосферной оптики представляет интерес оценить характеристики интегральной энергетически пополняющей ДЛТ на постфиламентационном этапе распространения излучения. Это связано с формированием ПФК и их отличительными особенностями: низкой (на несколько порядков меньше по сравнению со всем пучком) угловой расходимостью, высокой интенсивностью (в соответствии с оценками из работы [5] порядка 10^{11} - 10^{12} Вт/см²) и распространением на большие расстояния, в частности, в работе [6] протяженность ПФК превышала 2 км.

Результаты

Изменение энергии в интегральной энергетически пополняющей трубке $W_{\text{ит}}$ вдоль трассы z/L_R и в зависимости от начальной энергии в лазерных импульсах W_0 демонстрируется на рис. 1а и 1б, соответственно. Здесь продольная координата z нормирована на длину Рэлея исходного пучка $L_R = k_0 R_0^2 / 2$, где k_0 – волновое число, R_0 – начальный радиус гауссова пучка по уровню спада интенсивности e^{-1} ; $\eta = P_0 / P_{\text{cr}}$ – отношение пиковой мощности P_0 к критической мощности самофокусировки P_{cr} (для рассматриваемых параметров $P_{\text{cr}} = 3,2$ ГВт).

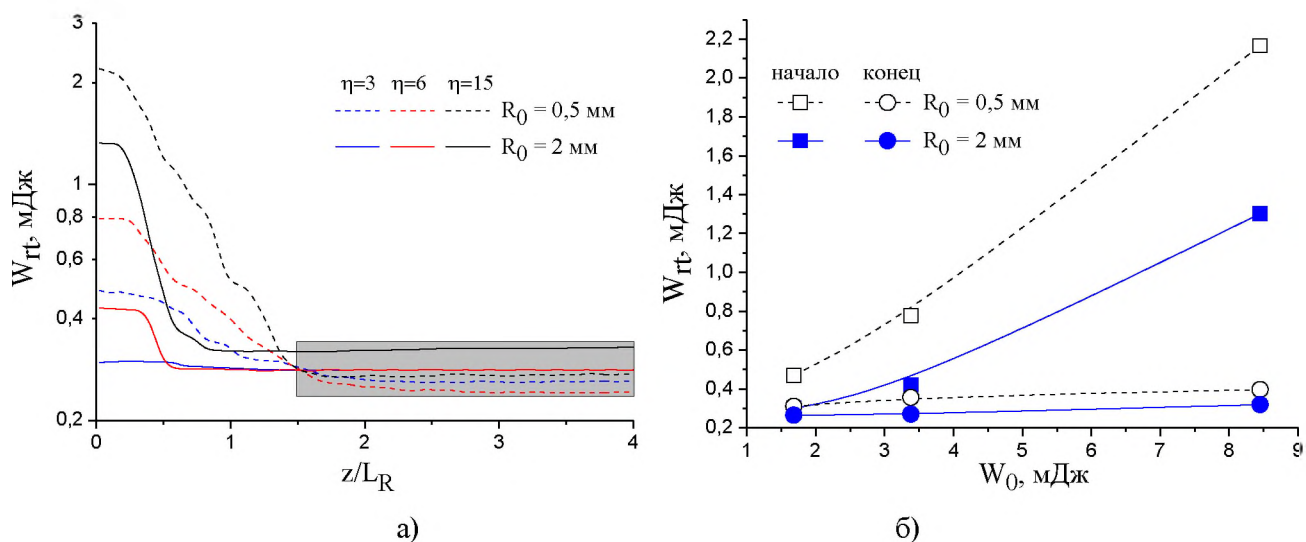


Рис. 1. Зависимость энергии в интегральной энергетически пополняющей ДЛТ $W_{\text{ит}}$ от дистанции распространения z/L_R (а) и от начальной энергии W_0 в лазерных импульсах (б).

Начальный этап самофокусировки характеризуется практически постоянным значением энергии в энергетически пополняющей ДЛТ. Это продолжается до начала активного плазмообразования, когда энергия, содержащейся в данной трубке, уменьшается в 2-10 раз. После этого следует этап постфиламентационного распространения, для которого характерно

отсутствие плазмы и практически неизменный уровень энергии в энергетически пополняющей ДЛТ.

Также оказывается, что с увеличением начального радиуса пучка необходима меньшая энергия для обеспечения филаментации. Более наглядно это продемонстрировано на рис. 1б, где построены начальная и конечная энергия в энергетически пополняющей трубке для лазерных пучков радиусом $R_0 = 0,5$ мм (чёрные кривые) и $R_0 = 2$ мм (синие кривые) при различных начальных значениях энергии в импульсе.

Обсуждение

Если рассматривать филаментацию лазерных импульсов в соответствии с общепринятыми представлениями [1], как следствие динамического баланса фокусирующей керровской и дефокусирующей плазменной нелинейностей среды, то зависимость, представленная на рис. 1б, кажется невозможной. Это связано с тем, что указанный баланс нелинейностей приводит к инвариантности характеристик области филаментации (диаметр филамента, пиковая интенсивность излучения и плотность плазмы) относительно энергии (а, следовательно, и мощности) лазерного излучения и радиуса пучка. Из этого следует, что и коэффициент потерь энергии излучения при ионизации среды в таком филаменте не должен зависеть ни от энергии импульса, ни от радиуса пучка. Однако в реальных условиях самофокусировка всегда сопровождается aberrациями, которые вносят искажения в профиль пучка в области нелинейного фокуса. Поскольку величина этих искажений пропорциональна радиусу пучка, то поперечное распределение интенсивности поля в зоне филамента будет значительно отличаться для пучков с разным значением начального радиуса.

В общем случае при распространении гауссова пучка вдоль трассы формируется специфический профиль плотности энергии, аналогичный Бессель-Гауссовому пучку, состоящему из осевого максимума и системы колец. Кольцевая структура оптического поля такого пучка приводит к продольной нестабильности филаментации, из-за чего формирующийся участок филаментации становится разрывным вдоль трассы. Это приводит к снижению энергопотерь пучка в целом. Таким образом, при увеличении радиуса пучка увеличиваются aberrации его профиля, и возрастает число колец при повышении их амплитудного контраста. При этом повышается нестабильность области филаментации, а суммарные потери на филаментацию уменьшаются. Это приводит к снижению количества энергии в пополняющей трубке, требуемого для обеспечения филаментации (рис. 1б).

В то же время, доля энергии излучения в ПФК, относительно слабо зависит от начальных параметров импульса и в среднем варьирует в диапазоне от 0,22 до 0,32 мДж (серая область на рис. 1а), что в среднем при пересчете на мощность соответствует значениям $(0,6-0,9)P_{cr}$. Это

является недостаточным для возобновления процесса филаментации в воздухе, но поскольку мощность излучения в ПФК остается на гигаваттном уровне (около 1,9-2,9 ГВт), то сам канал можно использовать для создания области филаментации в другой среде с большей кубической нелинейностью и с меньшим значением критической мощности P_{cr} , например, в воде ($P_{cr} = 6,5$ МВт) или стекле ($P_{cr} = 2$ МВт). Данная возможность была успешно реализована в экспериментах с оптическим стеклом К8 в работе [5].

Также следует отметить, что хотя начальный энергозапас в пополняющей трубке для субмиллиметровых пучков оказывается большим, чем для пучков миллиметрового радиуса, на этапе постфиламентационного распространения (серая область на рис. 1а) эта пропорция становится обратной: в энергетически пополняющей трубке, охватывающей ПФК, содержится больше энергии уже для миллиметровых пучков, чем для субмиллиметровых. Это связано с большими потерями энергии на филаментацию для субмиллиметровых пучков вследствие больших относительных размеров областей с высокими значениями нелинейного поглощения.

Заключение

Анализ энергетических характеристик световых структур, формируемых при самофокусировке и одиночной филаментации фемтосекундных лазерных импульсов в воздухе, показал, что расход энергии излучения из энергетически пополняющей ДЛТ вдоль трассы происходит неравномерно. В целом энергозатраты излучения на филаментацию снижаются при увеличении радиуса пучка. Средняя мощность в постфиламентационных световых каналах, образованных пучками суб- и миллиметрового радиуса, не превышает значение критической мощности P_{cr} , составляя $(0,6-0,9)P_{cr}$, и слабо зависит от начальных параметров лазерного импульса.

Литература

1. Self-focusing: Past and Present. Fundamentals and Prospects // Topics in Applied Physics / Eds. Boyd R.W. et al. Berlin: Springer, 2008. V.114. 605 p.
2. Гейнц Ю.Э., Землянов А.А., Минина О.В. Дифракционно-лучевая оптика филаментации: I. Формализм дифракционных лучей и световых трубок // Оптика атмосферы и океана. 2018. Т. 31. № 5. С. 364-371.
3. Liu W., Gravel J.-F., Theberge F., Becker A., Chin S.L. Background reservoir: its crucial role for long-distance propagation of femtosecond laser pulses in air // Appl. Phys. B. 2005. V. 80. № 7. P. 857-860.
4. Гейнц Ю.Э., Землянов А.А., Минина О.В. Моделирование самофокусировки фемтосекундных лазерных импульсов в воздухе методом дифракционных лучей и световых трубок // Оптика атмосферы и океана. 2019. Т. 32. № 2. С. 120-130.
5. Анексимов Д.В., Землянов А.А., Иглакова А.Н., Кабанов А.М., Кучинская О.И., Матвиенко Г.Г., Ошлаков В.К., Петров А.В. Глобальная самофокусировка и особенности множественной филаментации излучения субтераваттного титан-сапфирового лазера с сантиметровым диаметром выходной апертуры на 150-метровой трассе // Оптика атмосферы и океана. 2017. Т. 30. № 9. С. 727-732.
6. Mechain G., D'Amico C., Andre Y.-B., Tzortzakis S., Franco M., Prade B., Mysyrowicz A., Couairon A., Salmon E., Sauerbrey R. Range of plasma filaments created in air by a multi-terawatt femtosecond laser // Opt. Commun. 2005. V. 247. P. 171-180.