

Метод пространственной регуляризации пучка филаментов в фемтосекундном лазерном импульсе

В.П.Кандидов, Н.Акозбек, М.Скалора, О.Г.Косарева,
А.В.Някк, Ч.Луо, С.А.Хоссейни, С.Л.Чин

Предложен, численно обоснован и экспериментально апробирован метод упорядочения в пространстве хаотически расположенных филаментов, возникающих в мощном фемтосекундном лазерном импульсе. Метод основывается на наложении регулярных возмущений светового поля в поперечном сечении импульса.

Ключевые слова: филаментация, фемтосекундные импульсы, пространственные структуры.

1. В газах и конденсированных средах вследствие пространственной неустойчивости интенсивного светового поля в условиях самофокусировки импульсы высокой мощности распадаются на большое число хаотически расположенных филаментов [1]. Стохастический характер филаментации, обусловленный возмущениями светового поля на выходе лазерной системы и флуктуациями оптических параметров среды, приводит к неустойчивости сигнала обратного рассеяния, например в фемтосекундных лидарах [2, 3]. В работе [4] рассмотрена возможность получения пучка филаментов, расположенных упорядоченно в поперечном сечении в виде кольца, с помощью введения сильных пространственных градиентов светового поля.

В настоящей работе предложен метод пространственной регуляризации пучка филаментов в лазерном импульсе посредством модуляции интенсивности в его поперечном сечении.

2. Формирование протяженных филаментов (длиной сотни метров) является результатом динамического перераспределения плотности мощности в поперечном сечении импульса, которое происходит вследствие керровской самофокусировки среды и нелинейной рефракции в лазерной плазме [5]. При этом их возникновение определяется мелкомасштабной самофокусировкой интенсивного светового поля. Идея предлагаемого метода регуляризации хаотически расположенных филаментов состоит в том, чтобы создать в плоскости поперечного сечения импульса систему заданных возмущений интенсивности, на которых зарождаются филаменты, несмот-

ря на флуктуации импульса, связанные как с качеством выходного лазерного излучения, так и со случайными неоднородностями среды.

3. Для обоснования метода численно исследована стационарная мелкомасштабная самофокусировка плоской волны со случайными и с регулярными возмущениями интенсивности. «Стохастическая» филаментация рассмотрена для светового поля $\vec{E}(x, y, z = 0)$ при случайных аддитивных возмущениях амплитуды $\zeta(x, y)$, распределенных по нормальному закону с нулевым средним и дисперсией σ^2 . Радиус корреляции $\xi(x, y)$ выбирался равным пространственному масштабу, при котором возмущения плоской волны с интенсивностью $I_0 = [cn_0/(8\pi)] \times |\langle \vec{E} \rangle|^2$ имеют наибольший инкремент нарастания в керровской среде [1]. При «периодической» филаментации регулярные возмущения светового поля задавались введением в поперечное сечение импульса квадратной сетки с периодом d и непрозрачными штрихами шириной $h \ll d$. Пространственная регуляризация достигалась мультипликативным наложением на стохастическое световое поле $\vec{E}(x, y, z = 0)$ регулярных возмущений, создаваемых сеткой. В численных исследованиях полагалось, что на одну ячейку сетки размером $d \times d$ приходится мощность, превышающая критическую мощность самофокусировки в 8 раз.

Статистические испытания, выполненные по выборке из 50 независимых реализаций случайного поля $\zeta(x, y)$, показали, что при $\sigma^2 = 0.01$ регуляризация поля излучения сеткой в среднем упорядочивает расположение филаментов в плоскости поперечного сечения импульса. Одновременно среднее расстояние до начала филаментации сокращается, а средняя плотность филаментов возрастает более чем на 30%. С увеличением σ^2 до 0.09 рассмотренная сетка практически не приводит к пространственной регуляризации филаментов. Подробно численное исследование метода будет опубликовано в журнале «Applied Physics B».

4. Метод пространственной регуляризации филаментации экспериментально продемонстрирован на установке университета Лаваль (Канада). Излучение титансапфирового лазера (длина волны 810 нм, частота следования импульсов 10 Гц, длительность импульсов 42 фс, энергия до 15 мДж) с радиусом пучка 4 мм распространялось в кювете с метанолом длиной 1 см. Для регистра-

В.П.Кандидов, О.Г.Косарева, А.В.Някк. Московский государственный университет им. М.В.Ломоносова, физический факультет, Россия, 119992 Москва, Воробьевы горы;

e-mail: kandidov@msuic.phys.msu.ru; kosareva@msuic.phys.msu.ru; nyakk@mail.ru; тел.: (095) 939 3091, факс: (095) 939 31 13

N.Akozbeq. Time Domain Corporation, 7057 Old Madison Pike, Huntsville, AL 35 806, USA

M.Scalora. US Army Aviation and Missile Command, AMSAM-WSRD-ST, Huntsville, AL 35 898-5000, USA

Q.Luo, S.A.Hosseini, S.L.Chin. Departement de Physique, de Genie Physique et d'Optique and Centre d'Optique, Photonique et Laser, Universite Laval, Quebec G1K 7P4, Canada; e-mail: slchin@phy.ulaval.ca

Поступила в редакцию 13 сентября 2004 г.

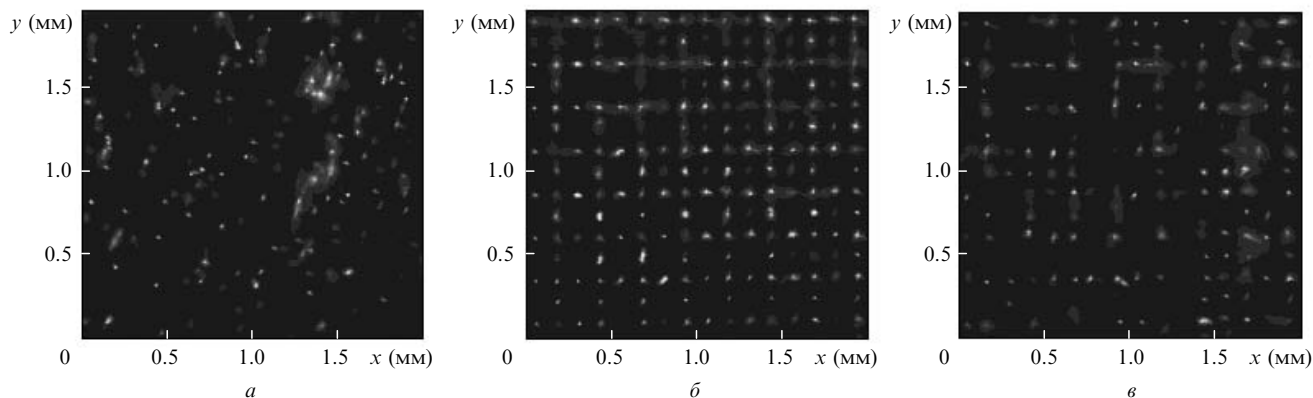


Рис.1. Картины расположения филаментов в поперечном сечении импульса с энергией 2 мДж и длительностью 42 фс, регистрируемые в зеленом свете на выходном окне кюветы с метанолом: «стохастическая» филаментация с маской, расположенной на расстоянии 102 мм от входа в кювету (а), «периодическая» филаментация с сеточным транспарантом, находящимся на расстоянии 13.5 мм от кюветы (б), и «регуляризованная» филаментация с маской и сеткой на указанных выше расстояниях (в).

ции филаментов на выходном окне кюветы использовалась CCD-камера, перед которой помещались селективное узкополосное диэлектрическое зеркало, отсекающее излучение на длине волны лазера, и зеленый фильтр ВГ18 для выделения коротковолновой ветви направленного излучения суперконтинуума, сопровождающего филаментацию [6]. Для получения случайных возмущений интенсивности перед входным окном кюветы на расстоянии 102–120 мм располагалась маска из полиэтиленовой пленки со случайным распределением коэффициента пропускания. Относительные флуктуации интенсивности за маской достигали в среднем 60%, их пространственный масштаб составлял 25–140 мкм. Пространственная регуляризация филаментации осуществлялась сеточным транспарантом с периодом 240 мкм и штрихами шириной 20 мкм. Расстояние между сеткой и входным окном кюветы изменялось от 5.5 до 43 мм с шагом 2 мм.

При измерениях мощность импульсов составляла 2 мДж, пиковая интенсивность I_0 на оси была равна 9×10^{10} Вт/см²; в этом случае на одну ячейку сетки приходилась мощность, в 10 раз превышающая критическую мощность самофокусировки в метаноле. Типичная картина, регистрируемая на выходном окне кюветы, приведена на рис.1 для приосевой области размером 7×7 ячеек сетки. При «стохастической» филаментации, получаемой при нахождении перед входным окном кюветы только маски, филаменты располагались в поперечном сечении импульса хаотически. При «периодической» филаментации (перед кюветой только сетка) формировалась регулярная система филаментов. Когда же перед входным окном кюветы помещались и маска и сеточный транспарант, наблюдалось упорядочение пространственного расположения филаментов по сравнению со

«стохастической» филаментацией. Пространственная регуляризация имела место при изменении энергии импульса и расстояний от маски и сетки до входного окна кюветы. Статистическая обработка серии данных, полученных при смещении маски в своей плоскости, показала, что при регуляризации плотность филаментов в среднем возрастает в 1.5–2 раза.

5. В предлагаемом методе управления филаментацией может использоваться наложение регулярных возмущений как амплитуды, так и фазы светового поля фемтосекундного импульса. Оптимизация геометрии регуляризирующих возмущений позволит повысить его эффективность. Метод ориентирован на применение в фемтосекундных лидарных системах, работающих в условиях атмосферной турбулентности.

В.П.Кандидов, О.Г.Косарева, А.В.Някк благодарят за поддержку РФФИ (грант № 03-02-16939) и Европейский офис по научным исследованиям армии США (контракт № 62558-04-P-6051), Ч.Луо, С.А.Хоссейни, С.Л.Чин – научные фонды Канады CFI, NSERC, CIPI, DRDC-Valcartier, а также Spectra Physics и FQRNT.

1. Беспалов В.И., Литвак А.Г., Таланов В.И. В сб. *Нелинейная оптика* (Новосибирск: Наука, 1968, с. 428).
2. Kasparian J., Rodriguez M., Méjean G., Yu J., Salmon E., Wille H., Bourayou R., Frey S., André Y.-B., Mysyrowicz A., Sauerbrey R., Wolf J.-P., Wöste L. *Science*, **301**, 61 (2003).
3. Hosseini S.A., Luo Q., Ferland B., Liu W., Akozbek N., Roy G., Chin S.L. *Appl. Phys. B*, **77**, 697 (2003).
4. Mechain G., Couairon A., Franco M., Prade B., Mysyrowicz A. *Phys. Rev. Lett.*, **93**, 035003 (2004).
5. Кандидов В.П., Косарева О.Г., Колтун А.А. *Квантовая электроника*, **33**, 69 (2003).
6. Kandidov V.P., Kosareva O.G., Golubtsov I.S., Liu W., Becker A., Akozbek N., Bowden C.M., Chin S.L. *Appl. Phys. B*, **77**, 149 (2003).