

УДК 621.378.33, 535.621.33

*Д.В. АПЕКСИМОВ, О.А. БУКИН**, Е.Е. БЫКОВА*, Ю.Э. ГЕЙНЦ*, С.С. ГОЛИК***, А.А. ЗЕМЛЯНОВ*,
А.М. КАБАНОВ*, О.И. КУЧИНСКАЯ****, Г.Г. МАТВИЕНКО*, В.К. ОШЛАКОВ*, А.В. ПЕТРОВ*, Е.Б. СОКОЛОВА***

ФИЛАМЕНТАЦИЯ СФОКУСИРОВАННЫХ ФЕМТОСЕКУНДНЫХ ИМПУЛЬСОВ Ti:Sa-ЛАЗЕРА НА ПЕРВОЙ И ВТОРОЙ ГАРМОНИКАХ В ВОЗДУХЕ

Представлены результаты экспериментов по филаментации сфокусированных в воздухе световых импульсов Ti:Sa-лазера гигаваттной мощности на основной и второй гармониках (800 и 400 нм). Изучалась динамика изменения пространственных и спектральных характеристик плазменной колонки.

Ключевые слова: фемтосекундное лазерное излучение, самофокусировка, филаментация, фазовая самомодуляция, фотоионизация.

Особенностью филаментации остро сфокусированного ультракороткого излучения в отличие от параллельного (коллимированного) пучка является то, что филаментация реализуется в малом объеме фокальной перетяжки. При этом в нелинейном фокусе могут быть достигнуты экстремальные плотности мощности световой волны, близкие по порядку к внутриатомным величинам, радиус плазменной колонки может доходить всего до нескольких микрометров, при характерной длине несколько миллиметров. Создание таких микромасштабных плазменных каналов является важным для ряда практических задач. В условиях управления параметрами лазерного излучения возможно обеспечить доставку энергии излучения в заданное место атмосферы на ограниченных дистанциях. Возможно осуществлять многокомпонентное и многоканальное зондирование атмосферы и проводить анализ загрязняющих ее веществ. Помимо этого, используя электрические свойства канала, созданного фемтосекундным лазером, возможно обеспечить стимулированный разряд грозового облака. Начало области филаментации излучения определяется исходя из баланса «сил» самофокусировки и дифракции. В теории нестационарной самофокусировки световых импульсов для оценки координаты начала участка филаментации лазерного пучка общепризнанным является использование формулы Марбюргера (Marburger J. H.) [1], которая была выведена путем аппроксимации большого объема расчетных данных и в явном виде содержит начальные параметры лазерного излучения. Для сфокусированного излучения за счет действия эффекта Керра стартовая точка филаментации смещается от геометрического фокуса навстречу лазерному пучку. Величина этого смещения зависит от нелинейных свойств среды и мощности лазерного импульса. Поэтому важно иметь достоверную информацию о величине связанной с оптическим эффектом Керра нелинейной кубической поляризуемости воздуха при распространении в нем ультракороткого лазерного излучения в различных частотных диапазонах.

Основная цель проведенных исследований состояла в получении такой информации для случая филаментации остро сфокусированного лазерного излучения на двух гармониках Ti:Sa-лазера. Институт оптики атмосферы СО РАН совместно с Институтом прикладной физики РАН осуществил первые в России натурные эксперименты по управлению параметрами тераваттного ультракороткого лазерного излучения для обеспечения эффекта самофокусировки на удаленной дистанции [2]. Воздействующий лазерный пучок диаметром 5 мм по уровню e^{-1} , максимальной энергией в импульсе $E_{01} = 0,9$ мДж, длительностью импульса $t_{и} = 39$ фс (по e^{-1}), частотой следования импульсов 1 кГц фокусировался линзой с фокусным расстоянием $f = 200$ мм в атмосферном воздухе. Примеры регистрируемых изображений плазменной колонки (ПК), образующейся в фокальной области линзы, показаны на рис. 1. Видно, что при одной и той же мощности лазерного импульса плазменный канал, создаваемый излучением второй гармоники, был существенно длиннее и примерно в несколько раз тоньше в поперечнике, чем на основной частоте.

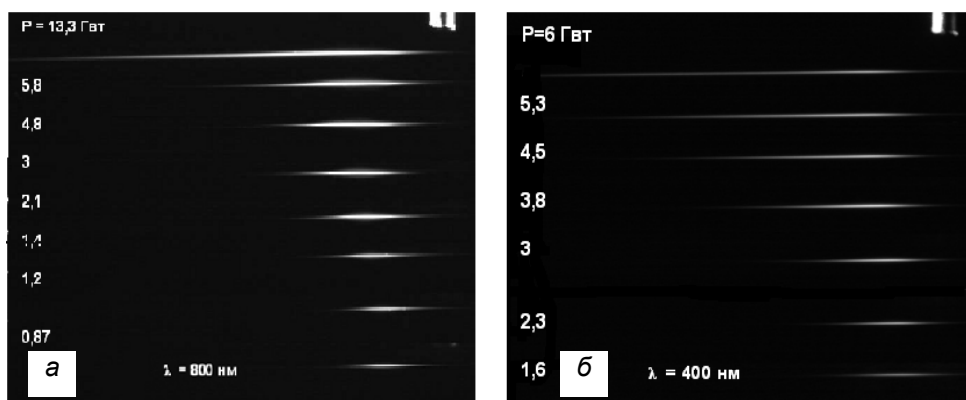


Рис. 1 Филаментация в воздухе импульсов Ti:Sa лазера с $\lambda_{01} = 800$ нм (а) и $\lambda_{02} = 400$ нм (б), энергией в импульсе $E < 0,9$ мДж, длительностью импульса $t_{\text{и}} = 39\text{--}700$ фс, сфокусированных линзой с $f = 200$ мм, поляризатор перед объективом CCD-камеры. С левой стороны кадров – значения мощности импульса. Направление излучения – слева направо. Диаметр реперной иглы в правом верхнем углу – 0,8 мм, левый край иглы соответствует положению геометрического фокуса линзы.

На рис. 2 показаны координаты положения ПК при изменении начальной мощности P_0 в импульсе излучения. Начало z_1 и конец z_2 ПК вычислялись посредством цифровой обработки фотографий светящегося образования (подобных представленным на рис. 1) по уровню 1:100 падения контраста изображения от максимума в продольном (вдоль распространения пучка) направлении. За положение центра ПК z_0 принималась координата центра тяжести продольного распределения яркости изображения на оси лазерного пучка.

Видно, что как начало ПК, так и ее центр смещаются от геометрического фокуса пучка в сторону лазерного источника при увеличении мощности в импульсе, что является результатом действия эффекта Керра. Причем при одном и том же значении P_0 величина смещения z_1 для второй гармоники (400 нм) существенно больше, чем для основного излучения (800 нм).

Как видно из рисунков, координата начала ПК неизменна в пределах всего диапазона изменения начальной мощности пучка. Поскольку при относительно низкой мощности в фемтосекундном импульсе ($P_0 \approx 0,5$ ГВт) и острой фокусировке пучка (числовая апертура $NA \approx 0,01$) его распространение происходит квазилинейно [3], то можно считать, что фиксируемый на фотоприемник светящийся плазменный канал ограничен линейной фокальной перетяжкой пучка с эффективной длиной.

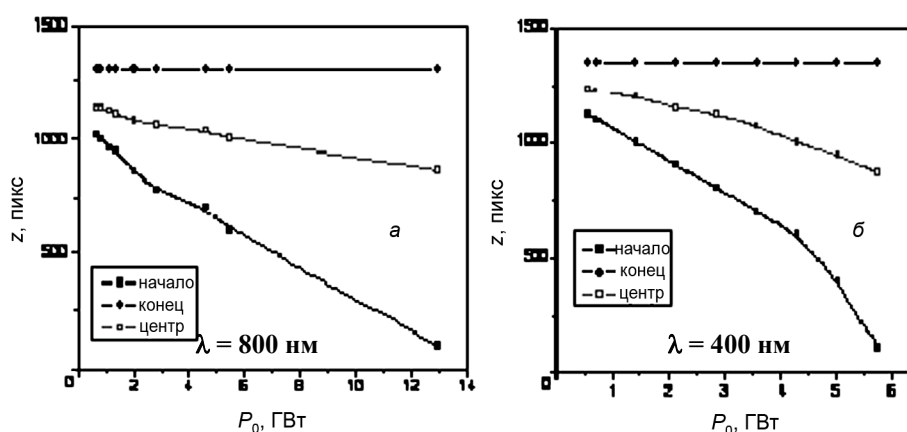


Рис. 2. Координаты (в пикселях, 1 пикс = 13,3 мкм) начала, центра и конца плазменной колонки, образующейся при самофокусировке излучения с $\lambda = 800$ нм (а) и 400 нм (б), в зависимости от начальной пиковой мощности лазерного импульса

Таким образом, эксперименты показали, что если фемтосекундный лазерный пучок изначально достаточно сильно сфокусирован, то даже в условиях проявления керровской самофокусировки дальний край образующейся ПК не покидает предела дальней зоны линейной фокальной перетяж-

ки пучка, а изменение длины ПК происходит только за счет смещения ее начала. Этот результат является несколько неожиданным с точки зрения устоявшейся в литературе модели филаментации фокусированных ультракоротких импульсов и требует своего дальнейшего исследования. Увеличение мощности импульса сопровождается удлинением светящегося образования в канале пучка для излучения обеих гармоник лазерного источника. Однако темп роста параметра длины филамента для второй гармоники лазера выше, чем для основного излучения, так что при одной и той же мощности лазерного импульса плазменный «филамент», образованный излучением с $\lambda_0 = 400$ нм, в целом оказывается длиннее.

Достаточно неожиданным результатом исследований оказалось то, что, несмотря на предпринятые усилия, полного соответствия экспериментальной зависимости формуле Марбюржера получить не удается. Аналогичная ситуация наблюдается и при существенно сверхкритической мощности лазерного импульса. Причем в первом случае экспериментально измеренное начало филамента «отстает» от расчетной координаты, а во втором – наоборот, опережает ее. Это говорит о возможном изменении самого коэффициента нелинейности n_2 с ростом мощности импульса.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Marburger J. H. // Prog. Quant. Electr. – 1975. – V. 4. – Part 1. – P. 35–110.
2. Апексимов Д.В., Букин О.А., Быкова Е.Е. и др. // Оптика атмосферы и океана. – 2010. – Т. 23. – № 7. – С. 536–542.
3. Гейнц Ю.Э., Землянов А.А., Ионин А.А. и др. // ЖЭТФ. – 2010. – Т. 138. – Вып. 5. – С. 822–829.

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

Поступила в редакцию 20.07.12.

**Институт автоматизации и процессов управления ДВО РАН,

г. Владивосток, Россия

***Дальневосточный федеральный университет, г. Владивосток, Россия

****Национальный исследовательский Томский государственный университет,

г. Томск, Россия

E-mail: OlesyaTSU14@mail.ru

Апексимов Дмитрий Владимирович, к.ф.-м.н., ст. науч. сотр.;

Букин Олег Алексеевич, д.ф.-м.н., профессор, зав. лабораторией;

Быкова Елена Евгеньевна, науч. сотр.;

Гейнц Юрий Эльмарович, д.ф.-м.н., гл. науч. сотр.;

Голик Сергей Сергеевич, к.ф.-м.н., зав. лабораторией;

Землянов Александр Анатольевич, д.ф.-м.н., профессор, зав. лабораторией;

Кабанов Андрей Михайлович, д.ф.-м.н., ведущ. науч. сотр.;

Кучинская Олеся Ивановна, студентка;

Матвиенко Геннадий Григорьевич, д.ф.-м.н., директор;

Ошлаков Виктор Константинович, к.ф.-м.н., ст. науч. сотр.;

Петров Алексей Вадимович, аспирант;

Соколова Екатерина Борисовна, инженер-программист.