

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ РФ



Национальный исследовательский
ТОМСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ

Т Р У Д Ы
ПЯТНАДЦАТОЙ
ВСЕРОССИЙСКОЙ КОНФЕРЕНЦИИ
СТУДЕНЧЕСКИХ
НАУЧНО-ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИХ
ИНКУБАТОРОВ

Томск, 17–19 мая 2018 г.



ТОМСК
«Издательство НТЛ»
2018

Положение глобального фокуса пучка при множественной филаментации фемтосекундных лазерных импульсов в воздухе

А.И. Мельникова¹, О.В. Минина^{1,2}

¹*Томский государственный университет, г. Томск, Россия*

²*Институт оптики атмосферы им. В.Е. Зуева СО РАН, г. Томск, Россия*

Распространение мощных фемтосекундных лазерных импульсов в прозрачных средах сопровождается рядом линейных и нелинейных преобразований, что приводит к самофокусировке излучения и формированию световых каналов – филаментов, в которых содержатся экстремально высокие значения интенсивности. Визуально филаментация лазерных импульсов проявляется в формировании вдоль трассы протяженных светящихся плазменных каналов, а также генерации широкополосного излучения – суперконтинуума. Благодаря данным особенностям, явление филаментации нашло широкое применение в атмосферной оптике, например при многокомпонентном детектировании загрязняющих веществ в атмосфере, создании протяженных ионизированных каналов и направленной передаче лазерной энергии.

Для практического использования особый интерес представляют пучки сантиметрового радиуса, поскольку их распространение сопровождается множественной филаментацией. Данный режим характеризуется образованием десятков и сотен плазменных каналов, произвольно расположенных по сечению пучка и вдоль трассы. Также при филаментации лазерных импульсов формируется глобальный фокус пучка, то есть на определенном расстоянии происходит сосредоточение основной энергии в области, поперечный размер которой меньше начального диаметра пучка. В работе [1] показано, что вблизи глобального фокуса пучка наблюдается максимальное количество филаментов, поэтому для атмосферной оптики актуальна задача о создании в заданной точке трассы области филаментации с определенными характеристиками. В связи с этим важно установить зависимость координаты глобального фокуса пучка от начальных параметров лазерного излучения.

В данной работе представлены результаты численного моделирования распространения фемтосекундных импульсов титан-сапфирового лазера в воздухе в режиме множественной филаментации для сантиметровых пучков. Моделирование проводилось на основе численного ре-

шения нелинейного уравнения Шредингера [2, 3] с использованием ресурсов «Сибирского суперкомпьютерного центра» ИВМиМГ СО РАН.

Результаты

На рис. 1 показана эволюция радиуса пучка вдоль трассы. Данные зависимости построены на основе результатов численного моделирования (кривая 1) и экспериментальных данных по множественной филаментации фемтосекундных лазерных импульсов на 150-метровой воздушной трассе из работы [4] (кривая 2) для пучков радиусами 0,625 и 1,25 см с энергией 30 мДж.

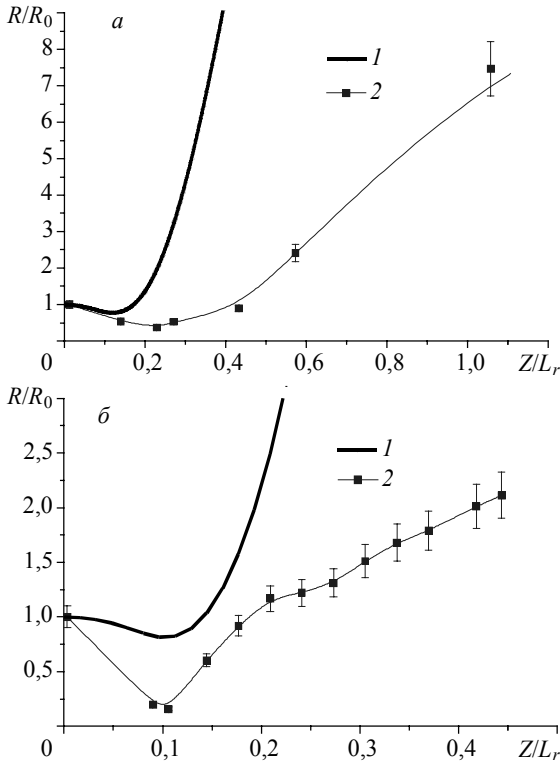


Рис. 1. Изменение радиусов пучков вдоль трассы для пучков с начальным радиусом: 0,625 (а) и 1,25 см (б). Кр. 1 соответствует результатам численного моделирования, кр. 2 – экспериментальным данным из [4]

На рис. 1 продольная координата Z нормирована на длину Релея L_r , а поперечная R – на начальный радиус пучка R_0 . Из рис. 1 видно, что в нормированных координатах положение глобального фокуса слабо зависит от начального радиуса пучка. Однако при переходе к размерным величинам ситуация существенно изменяется. Анализ результатов проведенных численных моделирований и их сравнение с экспериментальными данными из работ [4, 5] показал зависимость положения глобального фокуса пучка не только от энергии, мощности и радиуса пучка, но и от плотности энергии. Так, при увеличении плотности энергии глобальный фокус сдвигается к началу трассы. Для импульсов с одинаковой энергией уменьшение начального радиуса пучка приводит к уменьшению координаты глобального фокуса.

Также из рис. 1 можно заметить, что радиус пучка значительно увеличивается после прохождения глобального фокуса. При этом угловая расходимость пучка, наблюдаемая в эксперименте (кривая 2), меньше расходимости пучка, полученной в ходе численного моделирования (кривая 1). Основная причина данных отличий связана с расслоением пучка на кольцевые структуры, которые уменьшают его угловую расходимость, что не учитывалось в теоретической модели.

Далее исследовалась зависимость положения глобального фокуса пучка от мощности в импульсе $\eta = P_0/P_c$, где P_0 – начальная мощность, P_c – критическая мощность самофокусировки равная 3,2 ГВт. При численном моделировании рассматривались лазерные импульсы длительностью $t_p = 100$ фс с длиной волны $\lambda_0 = 800$ нм, начальная мощность варьировалась от $20P_c$ до $60P_c$, начальный радиус пучка R_0 составлял 0,625, 1,25 и 2,5 см. Так как нормированная координата глобального фокуса почти не зависит от начального радиуса пучка, то на рис. 2, где показана зависимость положения глобального фокуса от мощности в импульсе, кривая 1 соответствует среднему значению координаты глобального фокуса для пучков с радиусами 0,625; 1,25 и 2,5 см.

Рис. 2 наглядно демонстрирует, что при увеличении мощности η координата глобального фокуса уменьшается (кривая 1), что качественно согласуется с известной формулой Марбургера [6] (кривая 2). Количественно более точно (кривая 3) координату глобального фокуса можно определить, если в формуле Марбургера в соответствии с работой [1] умножить нормированную мощность η на коэффициент $b < 1$, что соответствует увеличению значения критической мощности P_c . Тогда в рассматриваемом случае формула Марбургера запишется в виде

$$Z = \frac{0,367 \cdot 2L_r}{\sqrt{(\sqrt{b\eta} - 0,852)^2 - 0,0219}}, \quad (1)$$

где $b = 0,483$.

На основе полученных результатов для множественной филаментации фемтосекундных лазерных импульсов можно ввести критерий подобия в виде обобщенной пространственной координаты Z/L_r и обобщенной энергетической координаты $\eta = P_0/P_c$, которые аппроксимируются формулой (1).

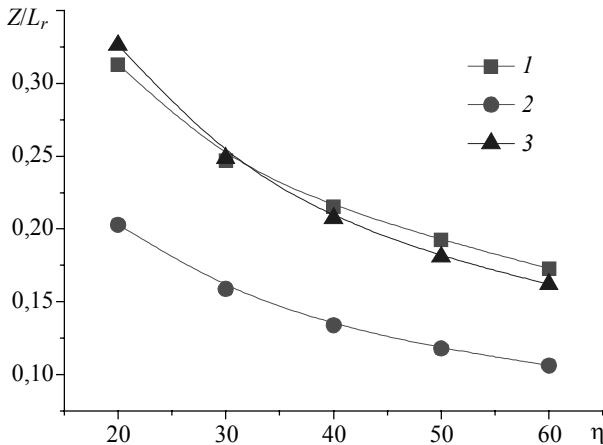


Рис. 2. Зависимость положения глобального фокуса пучка от мощности: кр. 1 – усредненная кривая, построенная для пучков с радиусами 0,625; 1,25 и 2,5 см; кр. 2 и 3 построены по формуле Марбургера [6] и масштабированной формуле Марбургера (1), соответственно

Заключение

Таким образом, варьированием пространственных и энергетических характеристик лазерного пучка возможно осуществлять управление положением области филаментации при распространении мощных фемтосекундных лазерных импульсов в воздухе. Зависимость положения глобального фокуса пучка от начальной мощности лазерных импульсов аппроксимируется масштабированной формулой Марбургера.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Гейнц Ю.Э., Голик С.С., Землянов А.А. и др. Микроструктура области множественной филаментации фемтосекундного лазерного излучения в твердом диэлектрике // Квантовая электроника. 2016. Т. 46. № 2. С. 133–141.
2. Гейнц Ю.Э., Землянов А.А., Кабанов А.М. и др. Нелинейная фемтосекундная оптика атмосферы. Томск: Изд-во Института оптики атмосферы СО РАН, 2010. 212 с.
3. Пергамент А.Х., Балаиов А.Д. Математическое моделирование распространения фемтосекундного импульса // Математическое моделирование. 2006. Т. 18. № 4. С. 3–18.
4. Апексимов Д.В., Землянов А.А., Иглакова А.Н. и др. 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.
5. Апексимов Д.В., Землянов А.А., Иглакова А.Н. и др. Множественная филаментация лазерных пучков различного диаметра в воздухе на трассе длиной 150 м // Оптика атмосферы и океана. 2016. Т. 29. № 1. С. 51–55.
6. Marburger J.H. Self-focusing // Prog. Quant. Electron. 1975. No. 4. P. 35–110.

Мельникова Алина Игоревна, студентка; alishka.melnikova@mail.ru;

Минина Ольга Владимировна, аспирантка; olga_minina@mail.ru