



Московский государственный университет имени М. В. Ломоносова
Физический факультет
Кафедра Общей Физики и Волновых Процессов



Дипломная работа

Самофокусировка лазерных импульсов с регулярной поперечной структурой и сравнительный анализ филаментации на длинах волн 0.8 и 10 мкм в воздухе

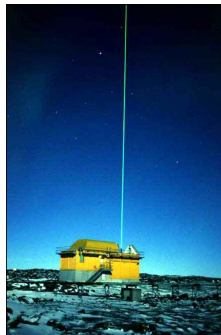
Олег Ефимов

Научный руководитель к. ф.-м. н. доцент С. А. Шлёнов

22 декабря 2010

Проблема управления началом филаментации

Одними из приложений явления филаментации является FIBS-спектроскопия (filament induced breakdown spectroscopy). Для FIBS важно уметь управлять расстоянием филаментации. Это возможно сделать с помощью временной или пространственной модуляции импульса.



Изменение характеристик филамента на разных длинах волн лазерного излучения

В ряде последних работ по филаментации лазерного излучения в воздухе исследуется изменение характеристик филамента (I^{fil} , N_e^{fil} , r_{fil} , r_{pl}) в зависимости от длины волны излучения. На данный момент экспериментально и численно исследована филаментация на длинах волн в диапазоне 248–1240 нм.

[1] В.Ю. Фёдоров. Влияние параметров фемтосекундного лазерного импульса на филаментацию в атмосфере / Кандидатская диссертация. Физический факультет МГУ им. М. В. Ломоносова.— 2010.

Цели работы

1. Анализ самофокусировки лазерных импульсов с регулярной поперечной структурой. Исследование различных режимов филаментации в зависимости от мощности пучка и разности фаз в соседних элементах структуры.
2. Численное моделирование процесса филаментации излучения CO_2 -лазера в воздухе. Сравнительный анализ филаментации на длинах волн 800 нм и 10 мкм.

Математическая модель филаментации

Уравнение медленно меняющейся амплитуды:

$$2ik \frac{\partial E}{\partial z} = \Delta_{\perp} E - k \frac{\partial^2 k}{\partial \omega^2} \frac{\partial E^2}{\partial t^2} + \frac{2k^2}{n_0} [\Delta n_k + \Delta n_p] E - ik\alpha E$$

Керровская нелинейность:

$$\Delta n_k(\vec{r}, z, t) = n_2 I(\vec{r}, z, t)$$

Плазменная нелинейность:

$$\Delta n_p(\vec{r}, z, t) = -\frac{\omega_p^2}{2n_0\omega_0^2}$$

Уравнение динамики плотности электронов:

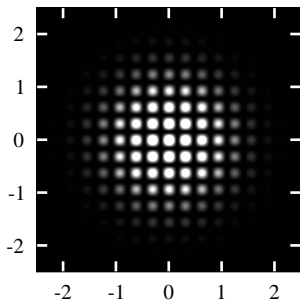
$$\frac{\partial N_e^{(N_2, O_2)}}{\partial t} = R_{\lambda}(I) \left(N_0^{(N_2, O_2)} - N_e^{(N_2, O_2)} \right)$$

Самофокусировка пучков с регулярной поперечной структурой

Периодический пучки с гауссовой огибающей:

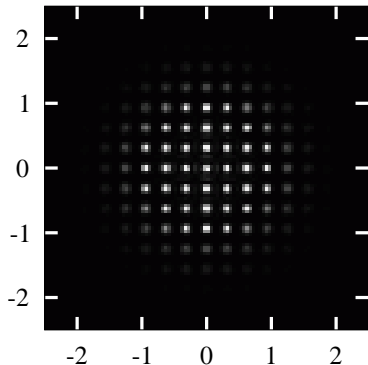
$$E^{outphase}(x, y, z = 0) = E_0 \exp\left(-\frac{x^2 + y^2}{2r_0^2}\right) \cos(\alpha_m x) \cos(\alpha_m y)$$

$$E^{inphase}(x, y, z = 0) = E_0 \exp\left(-\frac{x^2 + y^2}{2r_0^2}\right) |\cos(\alpha_m x) \cos(\alpha_m y)|$$

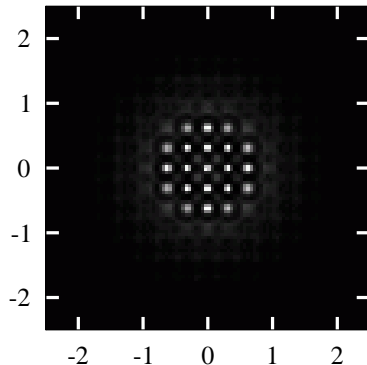


Режим с образованием множества филаментов:

$$P_1/P_{cr}^{Gauss} \approx 2$$



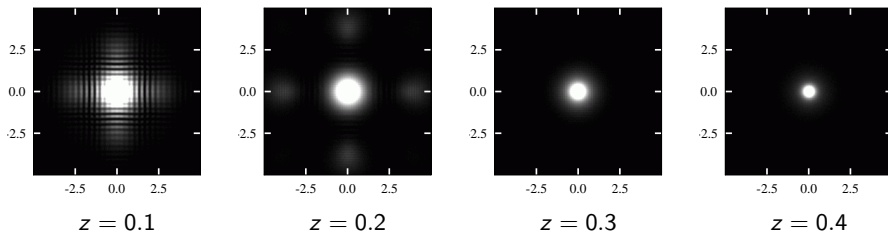
Противофазная
модуляция



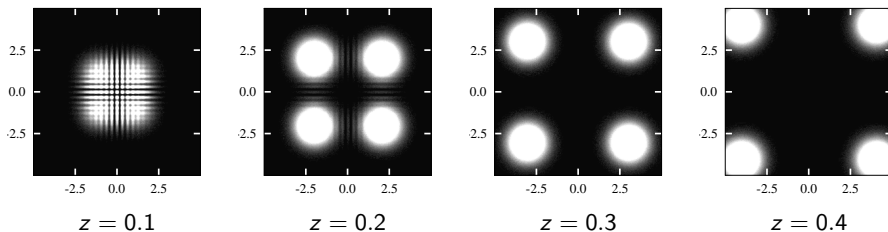
Синфазная
модуляция

Процесс филаментации пучка с регулярной поперечной структурой при $P/P_{cr}^{Gauss} = 13.3$

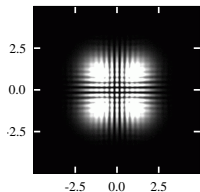
Синфазный пучок:



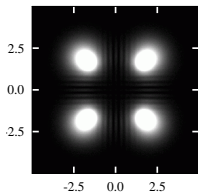
Противофазный пучок:



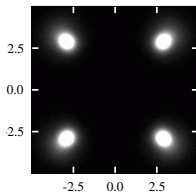
Процесс филаментации противофазного пучка при $P/P_{cr}^{Gauss} = 26.5$



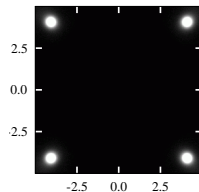
$z = 0.1$



$z = 0.2$

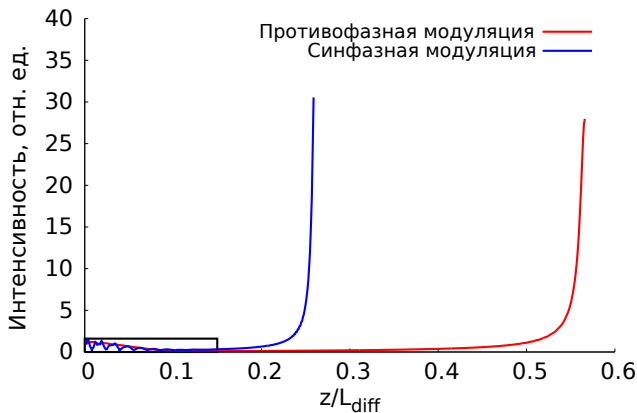


$z = 0.3$



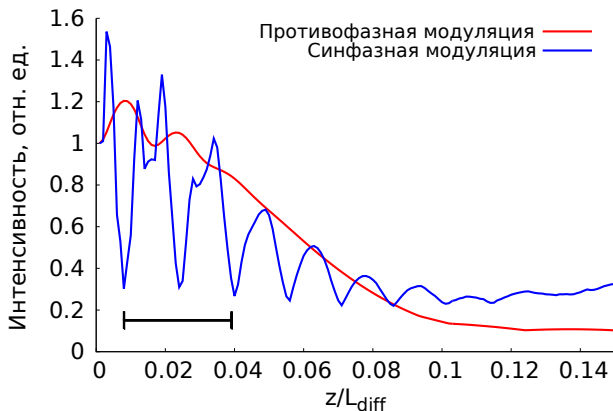
$z = 0.4$

Характер самофокусировки синфазного и противофазного пучков одинаковой мощности



Зависимость пиковой интенсивности от расстояния.

Особенности начального этапа распространения синфазного и противофазного пучков одинаковой мощности



Зависимость пиковой интенсивности от расстояния.

Режим однофиламентации синфазного пучка при

$$P/P_{cr}^{Gauss} = 26.5$$

Постановка нестационарной задачи в осесимметричном приближении

Уравнение распространения в безразмерных цилиндрических координатах:

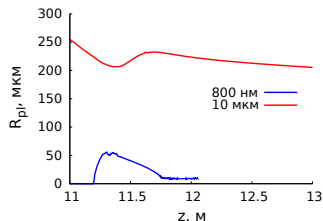
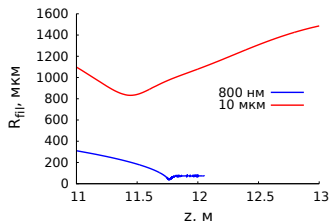
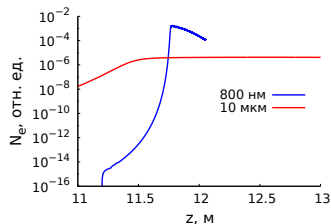
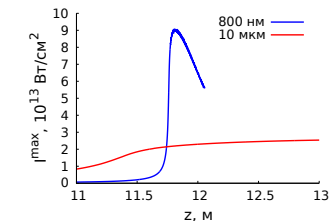
$$2i \frac{\partial E}{\partial z} = \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(r \frac{\partial E}{\partial r} \right) - \frac{L_{diff}}{L_{disp}} \frac{\partial^2 E}{\partial t^2} + R|E|^2 E - R_I N_e E - i\alpha E$$

Начальные условия:

$$E(\vec{r}, z = 0, t) = E_0 \cdot \exp\left(-\frac{r^2}{2r_0^2}\right) \cdot \exp\left(-\frac{t^2}{2\tau_0^2}\right)$$

При этом скорость ионизации $R_{\lambda=800}(I)$ рассчитана по модели ППТ, а $R_{\lambda=10000}(I)$ — по модели АДК.

Сравнение полученных характеристик филамента и плазменного канала при филаментации излучения на длинах волн 800 нм и 10 мкм



Параметры импульсов: $2r_0(\lambda_{800}) = 0.25 \text{ см}$, $2r_0(\lambda_{10000}) = 0.88 \text{ см}$, $L_{\text{diff}} = 12.2 \text{ м}$, $2T_0 = 750 \text{ фс}$, $P/P_{\text{cr}} = 1.5$.

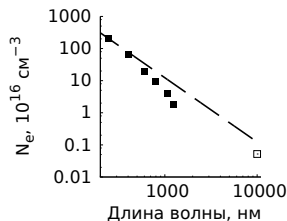
Сравнение полученных характеристик филамента и плазменного канала
при филаментации излучения на длинах волн 800 нм и 10 мкм

λ	z_{fil} , м	I_{fil} , Вт/см ²	N_e^{fil} , см ⁻³	r_{fil} , мкм	r_{pl} , мкм
10 мкм	11.52	$2.12 \cdot 10^{13}$	$0.01 \cdot 10^{16}$	839	198
800 нм	11.77	$8.91 \cdot 10^{13}$	$4.4 \cdot 10^{16}$	38.2	8.8

$$\begin{aligned}
 N_e^{fil}(\lambda) &\sim \frac{1}{\lambda^2} \\
 r_{fil} &\sim \lambda \\
 r_{pl} &\sim \lambda
 \end{aligned}$$

Сравнение полученных характеристик филамента и плазменного канала при филаментации излучения на длинах волн 800 нм и 10 мкм

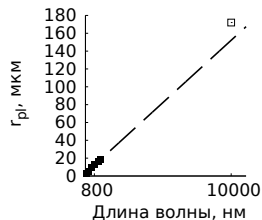
λ	z_{fil} , м	I_{fil} , Вт/см ²	N_e^{fil} , см ⁻³	r_{fil} , мкм	r_{pl} , мкм
10 мкм	11.52	$2.12 \cdot 10^{13}$	$0.01 \cdot 10^{16}$	839	198
800 нм	11.77	$8.91 \cdot 10^{13}$	$4.4 \cdot 10^{16}$	38.2	8.8



$$N_e^{fil}(\lambda) \sim \frac{1}{\lambda^2}$$

$$r_{fil} \sim \lambda$$

$$r_{pl} \sim \lambda$$



Пиковая концентрация плазмы

Радиус плазменного канала

Выводы I

1. Исследована филаментация гауссового пучка с регулярной поперечной структурой и различными фазовыми соотношениями между соседними элементами этой структуры.
2. Показано, что при одинаковых остальных параметрах в случае синфазной модуляции образуется один филамент, а в случае противофазной модуляции возникает четыре филамента, разбегающиеся от оси распространения исходного импульса, и вследствие этого в случае противофазного пучка критическая мощность самофокусировки примерно в 4 раза больше, чем в синфазном случае. Таким образом, существует область значений мощности пучка, при которой в синфазном случае филамент образуется, а в противофазном — нет.

Выводы II

1. Рассмотрена одиночная филаментация осесимметричного импульса и разработана расчётная программа, учитывающая дифракцию, керровскую нелинейность, дисперсию второго порядка и ионизацию с учётом отдельной концентрации ионов кислорода и азота в воздухе.
2. Проведено сравнение характеристик возникающего филамента и плазменного канала при филаментации излучения на длинах волн 800 нм и 10 мкм для двух импульсов с одинаковыми длительностями, дифракционной длиной и превышением пиковой мощности над критической мощностью самофокусировки.
3. Показано, что при увеличении длины волны излучения диаметр филамента и плазменного канала увеличиваются, тогда как концентрация плазмы уменьшается. Характеристики филаментов, получаемых при самофокусировке излучения на длине волны 10 мкм, успешно описываются зависимостями, полученными из обобщения экспериментов по филаментации излучения видимого и ближнего ИК диапазонов.