

Управление филаментами

План

12.1 Мобильные системы для экспериментального исследование явления филаментации в атмосфере

12.2 Управление стартом филамента

12.3 Позиционирование филаментов на протяженных атмосферных трассах

12.4 Пространственная регуляризация с помощью апертурных и фазовых масок

12.5 Управление параметрами филамента. Пучки с астигматизмом волнового фронта.

12.6 Динамические аберрации волнового фронта

Франко-Немецкий проект TeraMobile

Первые публикации 2000 г.



Container (6 m x 2.5 m)

Технические характеристики мобильной лаборатории





Стандарт ISO 20 ft контейнер, вес 10 т Внутренние размеры 5.70 х 2.15 х 2.20 м Потребляемая мощность 30 КВт (380 В, 63 А) Температурная стабильность ±1 °C Наружная температура от −20 °C до +35 °C Класс чистоты 10⁵

Terawatt&THz (T&T) мобильная лаборатория



Частота повторения	10 Гц
Длина волны	805 нм
Ширина спектра	25 нм
Длительность импульса	47 фс
Энергия импульса	270 мДж
M ²	1.05

Канада: Defence Research & Development Canada (DRDC)

В стандартном контейнере.

Основные цели: •изучение филаментации на атмосферных трассах •генерация ТГц-излучения

Первые публикации 2006 г.

M.Châteauneuf, J.Dubois, SPIE, v. 6400, (2006)

12.2 Способы управление стартом филамента

Управление стартом филамента. Масштабирование пучков



Формула Марбургера $Z_{fil} = \frac{0,367ka_0^2}{\left\{ \left[\left(\frac{P}{P_{cr}} \right)^{1/2} - 0,852 \right]^2 - 0,0219 \right\}^{1/2}} \qquad a_0 \dagger Z_j \dagger$

Фокусировка пучков



Управление стартом филамента. Чирпированные импульсы

 $P(\tau_p) = \pi a_0^2 I_0 \frac{\tau_0}{\tau_p}$

 $P(\tau_p) \mid Z_{fil}$

Использование фазовомодулированных (чирпированных импульсов)

A

$$I(x, y, z = 0, t) = A_0 \sqrt{\frac{\tau_0}{\tau_p}} \exp\left(-\frac{x^2 + y^2}{2a_0^2} - \frac{t^2}{2\tau_p^2} + i\frac{\delta t^2}{2}\right)$$

Параметр фазовой модуляции $\delta = \pm \frac{\sqrt{(\tau_p / \tau_0)}}{2}$



$$z_{fil} = \frac{0,367ka_0^2}{\left\{ \left[\left(\frac{P}{P_{cr}}\right)^{1/2} - 0,852 \right]^2 - 0,0219 \right\}^{1/2}}$$

Прекомпенсация нормальной дисперсии групповой скорости в воздухе



Для филаментации на километровых расстояниях в атмосфере используют импульсы с отрицательным чирпом ($\delta < 0, \Delta \omega = \delta t$). Такой импульс сжимается в среде с нормальной дисперсией.

Филаментация на больших расстояниях. Чирпированные импульсы

Горизонтальное (3 м над дорогой) распространение



G. Mechain, C.D. Amico, Y.-B. Andre, et al. Opt. Comm., 247, 181 (2005).

Ограничение самофокусировки за счет дисперсии



http://www.acms.arizona.edu/movies/ SelfFocus/dirindex.html

Центральный слой импульс с пиковой самофокусируется мощностью на меньшем расстоянии, чем другие слои импульса. Это приводит к обострению фронтов импульса и сильному влиянию дисперсии групповой скорости. Дисперсия разбивает импульс на два субимпульса с меньшей интенсивностью и мощностью порога самофокусировки. Субниже импульсы дифрагируют в квазилинейном режиме.

12.3 Позиционирование филаментов на протяженных атмосферных трассах

Управление началом филаментации в турбулентной атмосфере: чирп



Среднее расстояние до начала первого филамента в фокусированном пучке (*F* = 5000 м) в зависимости от длительности фазово-модулированного импульса.

Среднее расстояние z_{fil} до начала образования филамента в чирпированном импульсе



С.А.Шленов, А.И. Марков, Квантовая электроника, т. 39, №7, 658 (2009)

Управление началом филаментации в турбулентной атмосфере: масштабирование пучка



Зависимость среднего расстояния до начала филаментации от радиуса пучка a_0 для различных значений структурной постоянной атмосферной турбулентности: $6 \cdot 10^{-15}$ см^{-2/3} (квадраты), $1 \cdot 10^{-15}$ см^{-2/3} (треугольник вершиной вниз) и $0,125 \cdot 10^{-15}$ см^{-2/3} (треугольники вершиной вверх).

Минимизация разброса расстояния до начала филаментации на вертикальной трассе 2,5 км



Параметры импульса: $t_0 = 250 \text{ fs},$ $P_0 = 200 P_{cr}.$

W = 200 мДж

Чирп выбирается так, чтобы <Z_{fil}>=2,5 км

12.4 Пространственная регуляризация с помощью апертурных и фазовых масок

Пространственная регуляризация с помощью апертурной сетки

1)
$$A(x, y, z = 0, t) = A_0 \exp\left(-\frac{x^2 + y^2}{2a_0^2} - \frac{t^2}{2\tau_0^2}\right) T_{mesh}(x, y)$$

2) $A(x, y, z = 0, t) = A_0(1 + \xi_i(x, y)) \exp\left(-\frac{x^2 + y^2}{2a_0^2} - \frac{t^2}{2\tau_0^2}\right) C_i$
3) $A(x, y, z = 0, t) = A_0(1 + \xi_i(x, y)) \exp\left(-\frac{x^2 + y^2}{2a_0^2} - \frac{t^2}{2\tau_0^2}\right) C_i T_{mesh}(x, y)$

Импульс: $\tau_0 = 25$ fs, $\lambda = 800$ нм, E = 130 мкДж, $a_0 = 2.4$ мм, $P_{\text{peak}}/P_{\text{cr}} = 370$ (этанол). $P_{Rcor}/P_{cr} = 1.5$ Сетка: период $d = 0.2a_0$, толщина $h \approx 0.016a_0$, $P_{\text{unit}}/P_{\text{cr}} = 3.7$.

Kandidov V.P., Dormidonov A.E. et al. Appl. Phys., B 87, 29 (2007)

Пространственная регуляризация с помощью апертурной сетки



2)

Пространственная регуляризация с помощью линзового массива



Линзовый массив



Слабая турбулентность

Сильная турбулентность

12.5 Управление длиной филамента. Пучки с астигматизмом волнового фронта

Пучок с астигматизмом волнового фронта

$$\varphi(x, y) = \frac{k_0 x^2}{2f_x} + \frac{k_0 y^2}{2f_y}$$

Параметр астигматизма

$$\Delta f/f_{0}$$
, где $\Delta f = |f_x - f_y|, f_0 = (f_x + f_y)/2$



Пиковая интенсивность и линейная плотность плазмы в зависимости от параметра астигматизма



Увеличение астигматизма приводит к уменьшению пиковой интенсивности в филаменте и линейной плотности плазмы.

При сильном астигматизме фокусировка вначале происходит в одной из двух поперечных плоскостей. Это препятствует быстрому формированию нелинейного фокуса. Фокусировка в одной плоскости требует меньшую оптическую силу отрицательной линзы, формируемой самонаведенной плазмой, для предотвращения коллапса пучка.

Полное число электронов в плазменном канале после прохождения ИК и УФ импульсов



Уменьшение интенсивности вызывает сильное падение скорости ионизации и, следовательно, электронной плотности в плазме. В то же время, поперечный размер плазменного канала **ИК** импульса почти не меняется. Это ведет к резкому уменьшению полного числа электронов $Q_{\rm e}^{\rm total}$ в плазменном канале.

Поперечный размер плазменного канала УФ импульса увеличивается с ростом астигматизма. В итоге, линейная концентрация плазмы и полное число электронов уменьшаются медленнее, чем в ИК импульсе.

Линейная плотность плазмы вдоль плазменного канала



Астигматизм приводит к формированию немного более длинных каналов. При этом пиковые значения линейной концентрации электронов сильно падают с ростом параметра астигматизма в случае ИК импульса.

Сильный астигматизм расщепляет плазменный канал на две области в окрестности переднего и заднего фокусов.

Формирование пучков с астигматизмом волнового фронта: наклонное падение на сферическое зеркало



Расстояние между зеркалом и точкой пересечения лучей в плоскости рисунка f_x соответствует тангенциальному (переднему) фокусу.



Передний фокус (красная кривая), задний фокус (зеленая) и параметр астигматизма (синяя) в зависимости от угла падения α.

Плазменные канала филамента в пучке с астигматизмом волнового фронта: эксперимент



При слабом астигматизме плазменные каналы непрерывны.

С ростом астигматизма канал расщепляется на две области в окрестности переднего и заднего фокусов.

A. A. Dergachev, A. A. Ionin, V. P. Kandidov, et al. *Quantum Electronics*, 44(12):1085–1090, 2014.

12.6 Динамические аберрации волнового фронта

Динамические аберрации волнового фронта при прохождении твердотельных элементов проходной оптики



$$B = \frac{2\pi}{\lambda} \int_{0}^{\Delta z} n_2^{solid} I(z) dz < 1$$

Фазовая самомодуляция



Изменение фокального расстояния в течение импульса

$$\Delta \varphi(r,\tau) = -n_2^{\text{solid}} I_{\max}(\tau) e^{-\frac{r^2}{a_0^2}} \frac{2\pi n_0}{\lambda} \Delta z; \quad \Delta \varphi = \frac{k_0 r^2}{2f_{nl}}$$
$$f_{nl}(\tau) = \frac{a_0^2}{2n_2^{\text{solid}} I_0(\tau) n_0 \Delta z} = \frac{4\pi^2 a_0^4}{3,77\lambda^2 \Delta z} \frac{P_{cr}^{\text{solid}}}{P(\tau)}$$

$$f^{-1}(\tau) = f^{-1} + f_{nl}^{-1}(\tau)$$

Длительность импульса 100 фс, $\lambda = 744$ нм, радиус пучка $a_0 = 1$ мм, $P_0 = 10$ ГВт, фокусное расстояние геометрической фокусировки f = 1 м.

Критическая мощность в плавленом кварце $P_{cr}^{solid} = 2$ MBт, толщина $\Delta z = 1$ мм.



Зеленая горизонтальная линия - фокусное расстояние f = 1 м.

Красная и синяя кривые — изменение фокусного расстояния в течение импульса в фокусирующей и дефокусирующей средах.

Распределение флюенса в воздухе после прохождения кварцевой пластинки



Без пластинки

Влияние пластинки сказывается на длине плазменного канала. Вследствие большей кривизны волнового фронта центральных слоев импульса, они фокусируются на меньшем расстоянии, приводя к более раннему образованию филамента.

Временные слои на фронте импульса с меньшей кривизной волнового фронта фокусируются приблизительно на том же расстоянии, что и без пластинки.

Плазменные каналы импульса с динамическими аберрациями волнового фронта



После прохождения тонкой пластинки длина плазменного канала в воздухе увеличивается за счет смещения его начала.

Дефокусирующая нелинейность, напротив, уменьшает длину плазменного канала.

Линейная концентрация электронов: эксперимент



Экспериментально измеренная линейная концентрация электронов вдоль оптической оси после прохождения пластинок из плавленого кварца различной толщины.

Вертикальными отрезками отмечены точки старта филаментации, определенные по генерации суперконтинуума в тонкой пробной пластинке.

A. A. Dergachev, A. A. Ionin, V. P. Kandidov, et al. Laser Physics Letters, V. 12, no. 1, 015403 (2015)