

Особенности динамики электронной плотности при филаментации фемтосекундного лазерного излучения в воздухе при повышенном давлении

П.А. Чижов, В.В. Букин, А.А. Ушаков, С.В. Гарнов

Измерена электронная плотность в плазменном канале фемтосекундного филамента в воздухе при давлениях от 1 до 7 атм на временах от момента ионизации до сотен пикосекунд после него. Обнаружены резкий рост начальной электронной концентрации в диапазоне давлений 3–4 атм и уменьшение диаметра плазменного канала по мере роста давления от 3 до 7 атм.

Ключевые слова: фемтосекундные лазеры, филаментация, интерферометрия.

1. Введение

Фемтосекундная лазерная плазма исследуется на протяжении последних десятилетий. Одним из направлений исследований является изучение процесса филаментации ультракороткого лазерного излучения [1]. Впервые фемтосекундная филаментация на расстоянии в десятки метров наблюдалась в [2]. Явление филаментации представляет собой результат нелинейно-оптического взаимодействия с прозрачной средой фемтосекундных лазерных импульсов высокой мощности. В процессе самофокусировки при увеличении интенсивности лазерного излучения до порога фотоионизации образуется лазерная плазма, дефокусировка в которой ограничивает дальнейший рост интенсивности в нелинейном фокусе. Динамический баланс керровской самофокусировки и плазменной дефокусировки приводит к формированию протяженного плазменного канала.

Для процесса филаментации в воздухе при атмосферном давлении данные численного моделирования [3–5] и экспериментальные измерения различными методами, включая оптическое зондирование [6, 7] и измерение флуоресценции плазмы [8], дают пиковые значения электронной плотности 10^{14} – 10^{17} см⁻³ в зависимости от параметров фокусировки и характеристик лазерного импульса.

Метод просвечивающей интерферометрии, используемый в нашей работе, может быть применен для оценки динамики электронной плотности на протяжении сотен пикосекунд после ионизации, где плотность плазмы еще достаточно высока для надежной регистрации сдвига фаз

П.А. Чижов. Институт общей физики им. А.М. Прохорова РАН, Россия, 119991 Москва, ул. Вавилова, 38; e-mail: pvch@inbox.ru
В.В. Букин, С.В. Гарнов. Институт общей физики им. А.М. Прохорова РАН, Россия, 119991 Москва, ул. Вавилова, 38, Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ», Россия, 115409 Москва, Каширское ш., 31;
e-mail: vladimir.bukin@gmail.com, svgnarnov@mail.ru

А.А. Ушаков. Институт общей физики им. А.М. Прохорова РАН, Россия, 119991 Москва, ул. Вавилова, 38, Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова, физический факультет, Россия, 119991 Москва, Воробьевы горы;
e-mail: ushakov.alexandr@physics.msu.ru

Поступила в редакцию 16 марта 2016 г.

[9, 10]. В представленных экспериментах надежно наблюдаемый сдвиг фаз составлял ~ 2 мрад, что для диаметра канала ~ 100 мкм соответствует плотности плазмы $\sim 10^{16}$ см⁻³. Поскольку существует множество процессов, ведущих к рекомбинации электронов, исследование распада плазменного канала в различных условиях может быть использовано для выявления вклада этих процессов. Одним из параметров, который легко поддается изменению и при этом может существенно влиять на характер филаментации, является давление газа [11]. Цель настоящей работы – исследование влияния давления газа на электронную плотность плазменного канала, возникающего в процессе филаментации лазерного излучения в воздухе.

2. Эксперимент

Схема экспериментальной установки приведена на рис. 1. Высокоинтенсивный фемтосекундный лазерный импульс ($E = 2.5$ мДж, $t = 150$ фс (FWHM), $D = 12$ мм ($1/e^2$)) создавал плазму при фокусировке линзой ($f = 50$ см). Частота следования импульсов составляла 10 Гц. При этом визуально наблюдалось свечение плазмы протяженностью около 2 см (при атмосферном давлении). Плазменный канал создавался в камере высокого давления, длина распространения лазерного излучения внутри камеры до точки фокуса составляла около 40 см. Канал просвечивался слабым пробным импульсом того же лазера в момент ионизации среды либо спустя некоторое время, регулируемое линией оптической задержки. Серии интерферограмм при просвечивании плазменного канала (сигнальные) и без него (фоновые) снимались КМОП-камерой (Basler acA2040-25gm-NIR, 1", 2048×2048); при этом плазменный канал отображался на матрицу камеры телескопом.

В экспериментах исследовалась область плазменного канала, удаленная от геометрического фокуса линзы на расстояние ~ 1 см (в сторону фокусирующей линзы), что соответствовало наиболее яркой части филамента при атмосферном давлении. Наличие на пути пробного пучка фазового объекта, которым является плазменный канал, приводило к изменению интерференционной картины. При обработке интерферограмм с помощью метода фурье-фильтрации выделялась средняя разность между фоновы-

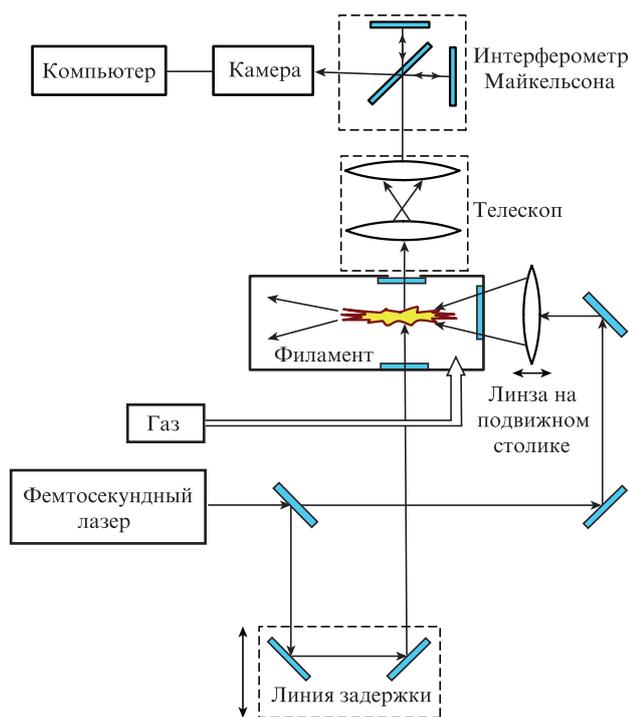


Рис.1. Схема экспериментальной установки.

ми и сигнальными распределениями фаз, соответствующая плазменной фазовой добавке [12]. Затем, в предположении цилиндрической симметрии плазмы, по этой фазовой добавке вычислялось изменение показателя преломления и по модели Друде определялась электронная плотность. Существующая методика обработки данных позволяла регистрировать изменение фазы $\sim 2-3$ мрад.

3. Результаты

На рис.2 представлен пример полученного при обработке интерферограмм распределения фазовой добавки в зондирующем пучке. На рисунке хорошо виден плазменный канал диаметром ~ 100 мкм. Лазерное излучение распространяется справа налево. Фазовый сдвиг, вносимый плазмой, составляет ~ 100 мрад. Представленное распределение соответствует начальной стадии образования плазменного канала.

На рис.3 приведена зависимость начальной пиковой электронной концентрации в плазменном канале от давления, из которой следует, что с увеличением давления электронная плотность в плазменном канале растет; при этом рост носит сильно неравномерный характер. В частности, при повышении давления от 3 до 4 атм электронная плотность увеличивается практически вдвое.

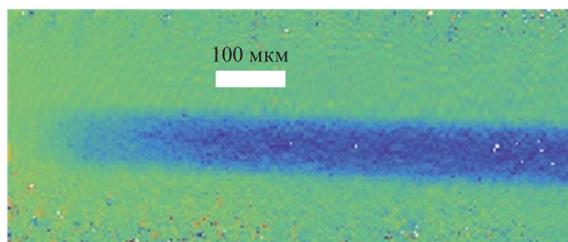


Рис.2. Пример двумерного распределения фазового сдвига в плазменном канале сразу после ионизации.

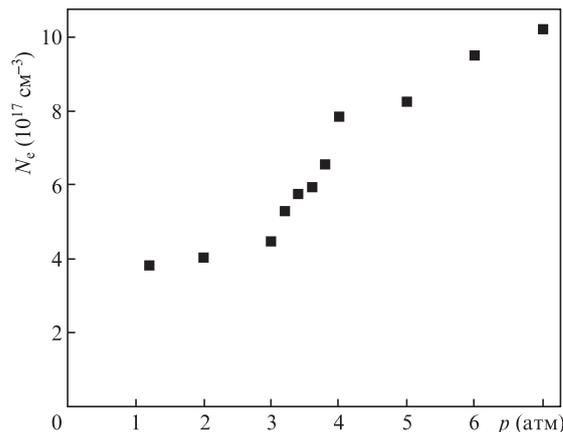


Рис.3. Зависимость начальной пиковой электронной концентрации в плазменном канале в воздухе от давления.

На рис.4 приведены профили электронной концентрации в поперечном сечении филамента для давлений воздуха от 2, 3, 4 и 6 атм для момента времени 1 пс после ионизации. Полная ширина на полувысоте профилей составляет для 2 и 3 атм примерно 90 мкм, для 4 и 6 атм – около 75 и 65 мкм соответственно. Стоит отметить, что в диапазоне 1–3 атм диаметр канала (как и пиковая электронная концентрация) изменяется слабо, однако при давлении 4 атм заметно существенное изменение. Дальнейший рост пиковой электронной концентрации сопровождается уменьшением диаметра плазменного канала.

В диапазоне давлений 1 – 10 атм показатель преломления среды $n_0 \approx 1$, а рост нелинейного показателя преломления n_2 прямо пропорционален давлению. Так, в работе [4] приводятся следующие зависимости n_0 и n_2 для воздуха при длине волны $\lambda = 1$ мкм: $n_0 \approx 1 + 10^{-23} N_a$, $n_2 [\text{см}^2 \cdot \text{Вт}^{-1}] \approx 2 \times 10^{-38} N_a$, где N_a – концентрация атомов газа [см^{-3}]. Таким образом, критическая мощность $P_{cr} = \lambda^2 / (2\pi n_0 n_2)$ в первом приближении пропорциональна $1/N_a$ и уменьшается с ростом давления. С другой стороны, при той же интенсивности I лазерного излучения вероятность ионизации атомов газа $w(I)$ остается прежней, а электронная концентрация $N_e \sim w(I)N_a$ линейно возрастает с увеличением давления. При плазменной частоте $\omega_p^2 = 4\pi e^2 N_e / m_e$ изменение показателя преломления из-за образовавшейся плазмы $\Delta n_p \approx \frac{1}{2} (\omega_p / \omega)^2$ пропорционально N_e и N_a . Таким образом, в первом приближении и фокусировка и дефокусировка пропорциональны давлению газа, интен-

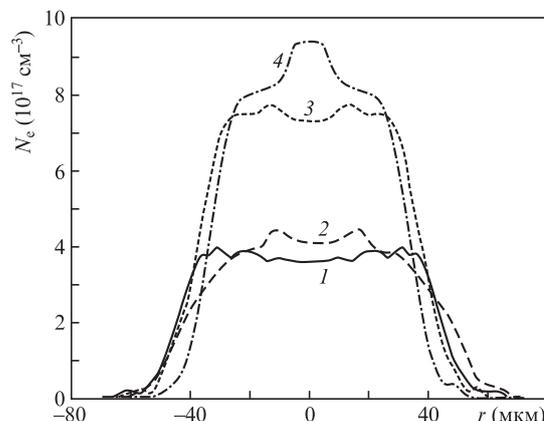


Рис.4. Профили электронной концентрации в плазменном канале при давлениях 2 (1), 3 (2), 4 (3) и 6 атм (4) спустя 1 пс после ионизации.

сивность, при которой $n_2 = \Delta n_p$, остается прежней и ожидается линейный рост электронной концентрации. С другой стороны, $I \propto P_{cr}/S$ (S – площадь поперечного сечения филамента), поэтому при повышении давления и уменьшении критической мощности фокусировки необходимо уменьшение S , т.е. уменьшение диаметра филамента [13].

Результаты, полученные в работе, качественно соответствуют приведенным выше соображениям о росте электронной концентрации и уменьшении диаметра плазменного канала. Однако, как видно из рис.3, линейной зависимости электронной концентрации от давления не наблюдается, а имеет место резкое изменение параметров канала при давлениях 3–4 атм. Приведенное выше объяснение изменения параметров канала является довольно грубым и не учитывает, например, эволюцию фемтосекундного лазерного импульса в процессе распространения и инерционность отклика среды. Кроме того, на канал влияет и фокусировка линзой. При этом в силу резко нелинейной зависимости вероятности ионизации газа от интенсивности даже небольшие изменения равновесной интенсивности приводят к значительному изменению электронной плотности плазмы в канале. В целом, по результатам эксперимента можно отметить уменьшение равновесной интенсивности при повышении давления. Необходимо также отметить, что параметры канала наблюдались в одной точке. При различных давлениях длина плазменного канала различна, что может приводить к смещению наблюдаемой области канала относительно участка с максимальной плотностью, а это влияет на измеряемые параметры.

На рис.5 приведены временные зависимости измеренной в эксперименте пиковой электронной плотности в линейном и логарифмическом масштабе при распаде плазменного канала в воздухе для давлений 1–7 атм. Видно, что при увеличении давления скорость распада возрастает. Так, при давлении 3 атм при начальных параметрах плазменного канала (диаметр, электронная концентрация), схожих с параметрами канала при давлении 1 атм, скорость рекомбинации электронов существенно выше. Нами не проводились измерения температуры электронов, которая является основным параметром для расчета вероятности путей рекомбинации [10]. Но даже при фиксированных начальных параметрах плазмы ожидается увеличение скорости распада за счет увеличения частоты столкновений по мере роста давления.

Таким образом, проведенные в настоящей работе исследования динамики распада плазменного канала фемтосекундного филамента свидетельствуют о монотонном росте скорости рекомбинации электронов по мере повышения давления газа. Обнаружен резкий рост начальной электронной концентрации в диапазоне давлений 3–4 атм. Этот рост сопровождается существенным уменьшением диаметра плазменного канала.

Работа выполнена при поддержке Программы Президиума РАН «Экстремальное лазерное излучение: физика и фундаментальные приложения», РФФИ (гранты

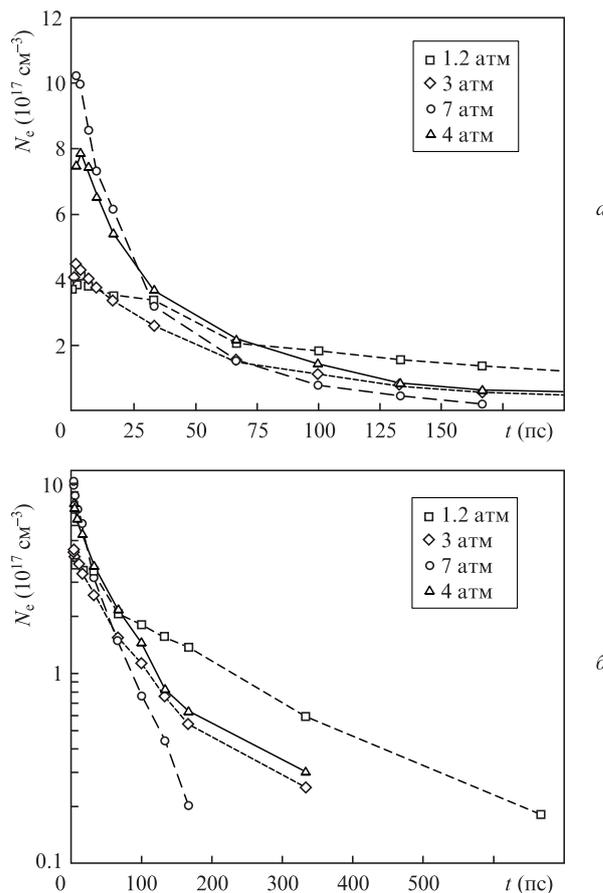


Рис.5. Зависимости пиковой электронной плотности от времени с момента ионизации в плазменном канале фемтосекундного филамента в воздухе при различных давлениях в линейном (а) и логарифмическом масштабе (б).

№ 15-02-99630, 15-32-20966), гранта Президента РФ государственной поддержки ведущих научных школ РФ № НШ-9695.2016.2.

- Couairon A., Mysyrowicz A. *Phys. Reports*, **441**, 47(2007).
- Braun A., Korn G., Liu X., Du D., Squier J., Mourou G. *Opt. Lett.*, **20**, 73 (1995).
- Mlejnek M., Wright E.M., Moloney J.V. *Opt. Lett.*, **23**, 382 (1998).
- Couairon A., Bergé L. *Phys. Plasmas*, **7**, 193 (2000).
- Wu J., Antonsen T.M. *Phys. Plasmas*, **10**, 2254 (2003).
- Rodriguez G., Valenzuela A.R., Yellampalle B., Schmitt M.J., Kim Ki-Yong. *J. Opt. Soc. Am. B*, **25**, 1988 (2008).
- Théberge F., Liu W., Simard P.Tr., Becker A., Chin S.L. *Phys. Rev. E*, **74**, 036406 (2006).
- Eisenmann S., Pukhov A., Zigler A. *Phys. Rev. Lett.*, **98**, 155002 (2007).
- Букин В.В., Гарнов С.В., Малютин А.А., Стрелков В.В. *Квантовая электроника*, **37** (10), 961 (2007).
- Bodrov S., Bukin V., Tsarev M., Murzanev A., Garnov S., Aleksandrov N., Stepanov A. *Opt. Express*, **19**, 6829 (2011).
- Chizhov P., Bukin V., Garnov S. *Phys. Procedia*, **71**, 222 (2015).
- Takeda M., Ina H., Kobayashi S. *J. Opt. Soc. Am.*, **72** (1), 156 (1982).
- Chin S.L., Wang T.J., Marceau C., Wu J., Liu J.S., Kosareva O., Panov N., Chen Y.P., Daigle J.F., Yuan S., Azarm A., Liu W.W., Seideman T., Zeng H.P., et al. *Laser Phys.*, **22** (1), 1 (2012).