

В.В. Осипов, Н.Б. Волков, В.В. Платонов, М.Г. Иванов

Особенности развития лазерного факела с графитовой мишени

Институт электрофизики УрО РАН, г. Екатеринбург

Поступила в редакцию 15.12.2003 г.

Обсуждаются результаты экспериментов по исследованию нелинейной динамики плазменного факела, генерируемого воздействием импульса излучения CO_2 -лазера большой длительности на графитовую мишень. Показано, что наблюдаемые в эксперименте грибообразная форма светящейся области и длительность излучения определяются развитием неустойчивости Рихтмайера–Мешкова контактной границы «углеродная плазма–воздух» и образованием наночастиц в расширяющейся в буферный газ плазме.

В последние годы в связи с развитием работ по нанотехнологии вырос интерес к физическим процессам, происходящим при получении наноразмерных порошков и нанесении тонких пленок излучением непрерывных и импульсно-периодических лазеров [1–3]. Этим процессам предшествует образование плазменного факела в результате испарения мишени сфокусированным лазерным излучением. В ряде экспериментов [1, 4] были найдены условия, при которых до 97–100% массы вещества из мишени поступает в плазменный факел в виде пара. На это указывают малые размеры и сферическая форма частиц получаемого нанопорошка [3]. Однако несмотря на это, при нанесении тонких пленок на поверхности материалов в атмосфере не удается получить их хорошей однородности [4]. Неясными также остаются причины получения нанопорошка в четыре раза меньшего среднего размера частиц при использовании импульсно-периодического излучения по сравнению с непрерывным [1, 3]. Это указывает на необходимость проведения дальнейших исследований характеристик и динамики плазменного факела, генерируемого в этих условиях.

В данной статье излагаются результаты экспериментального и теоретического исследования динамики плазменного факела, образуемого в результате фокусировки импульса излучения импульсно-периодического CO_2 -лазера «ЛАЭРТ» [3, 5], возбуждаемого комбинированным разрядом, на плоскую мишень из графита или YSZ. Исследования проводились в условиях, близких к реализуемым, при получении нанопорошков [3] и нанесении тонких пленок в атмосфере [4]. Многомодовое излучение CO_2 -лазера с поперечным сечением 3×4 см фокусировалось на плоскую мишень с помощью линзы из KCl с фокусным расстоянием 10 см. Фокальное пятно имело форму эллипса с размерами 0,6 и 0,7 мм. Излучение (рис. 1) направлялось на мишень под углом 45° к ее поверхности. Покадровая съемка собственного свечения плазменного факела производилась скоростным фоторегистрато-

ром ВФУ-1. Временной интервал между кадрами составлял 11 мкс, время экспозиции кадра ~1 мкс.

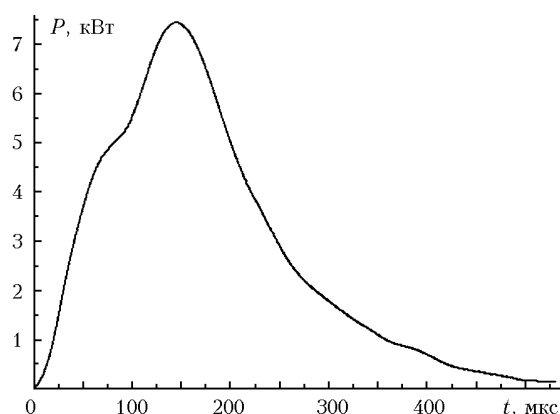


Рис. 1. Форма импульса излучения импульсно-периодического CO_2 -лазера «ЛАЭРТ»

На рис. 2 приведена покадровая регистрация собственного свечения плазменного факела, генерируемого при воздействии импульса лазерного излучения на графитовую мишень. Анализ позволяет выделить два существенных факта, которые требуют более подробного рассмотрения.

1. В процессе развития светящаяся область плазменного факела приобретает грибообразную форму с изменяющейся во времени сложной внутренней структурой.

2. Длительность свечения плазменного факела существенно превышает длительность импульса лазерного излучения на его полувысоте. (Например, в работе [6] сообщается о формировании углеродных нанотрубок при лазерной абляции графитовой мишени. В этой работе также было зарегистрировано свечение плазменного факела с длительностью, существенно превышающей длительность лазерного излучения). Более того, как показывает рис. 2, после 328 мкс светящийся столб, связывающий облако с мишенью, прерывается.

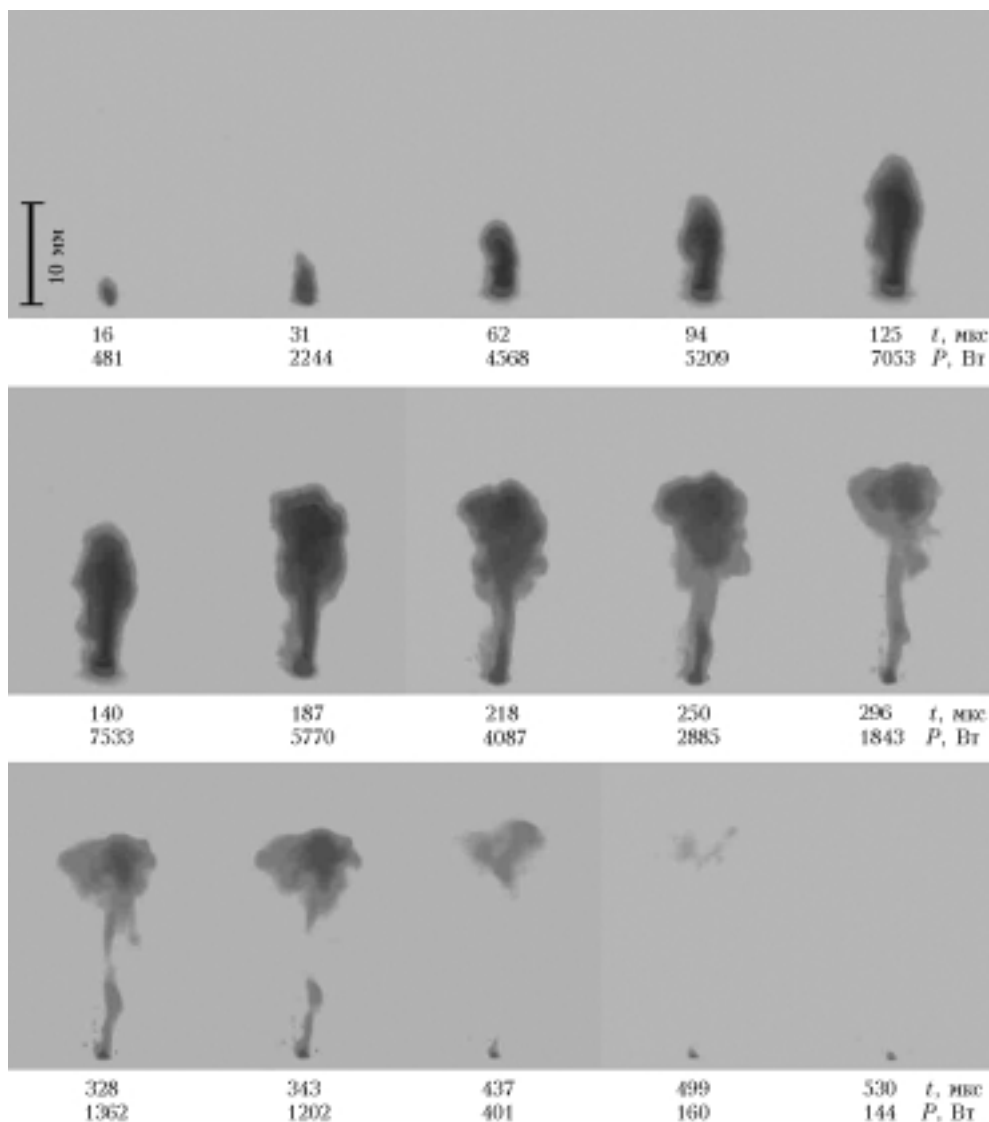


Рис. 2. Кинограмма собственного свечения плазменного факела, генерируемого лазерным излучением большой длительности

В результате этого поступление энергии в облако прекращается (см. рис. 2, кадр, соответствующий 343 мкс).

Таким образом, в течение дальнейшего времени регистрации (более 100 мкс, а реально значительно больше) светящееся облако не зависит от физических процессов, происходящих на поверхности мишени.

Грибообразная форма плазменной струи, по нашему мнению, определяется развитием неустойчивости Рихтмайера–Мешкова контактной границы «плазма–газ», [5, 6]. В [7] с помощью численного моделирования показано, что за конечное время, сколь угодно малое, начальное возмущение контактной границы «жидкостей» с различной плотностью приводит к формированию и отрыву крупномасштабного вихря тяжелой жидкости (в нашем случае тяжелой жидкостью является более плотная углеродная плазма, а легкой – воздух). Для возникновения неустойчивости Рихтмайера–Мешкова необходимо наличие ускорения, направленного со стороны легкой жидкости в тяжелую жидкость.

На рис. 3 приведены зависимости скорости (*a*) и ускорения границы светящейся области плазменного факела (*b*) во времени. Видно, что максимальные значения ускорения, направленного в сторону плазменного факела, в наших экспериментах составляли $(1-2) \cdot 10^6 \text{ м/с}^2$.

Немонотонный характер поведения кривых, по-видимому, связан с порционным характером абляции мишени: из-за высокой плотности испаренного вещества у поверхности уменьшается его оптическая прозрачность, для увеличения которой требуется время на расширение. Наличие в эксперименте высоких значений ускорений, направленных в сторону мишени, позволяет нам утверждать о развитии неустойчивости Рихтмайера–Мешкова контактной границы «плазменный факел – буферный газ». На существенно нелинейных стадиях этой неустойчивости ввиду большого количества вихрей тяжелой жидкости и «пузырей» легкой жидкости происходит их интенсивное турбулентное перемешивание [8].

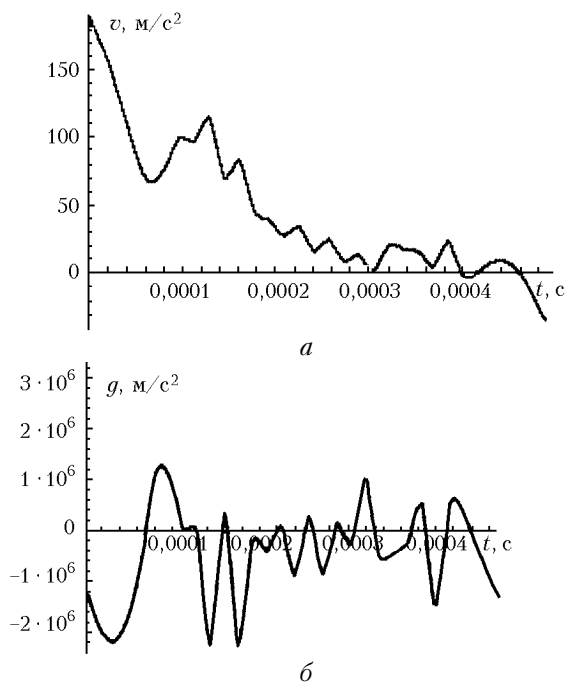


Рис. 3. Динамика ускорения границы светящейся области на оси симметрии плазменного факела

Турбулентное перемешивание, по нашему мнению, способствует формированию нанопорошка и мешает получению однородных пленок в атмосфере. Наблюдаемое нами поведение собственного свечения плазменного факела свидетельствует в пользу этого (см. рис. 2).

Длительное свечение плазменного облака, поступление энергии в которое прекратилось начиная с 328 мкс (см. рис. 2), мы связываем с планковским свечением раскаленных наночастиц. Для подтверждения этого соображения нами проведены эксперименты по воздействию на ту же мишень излучением ТЕА-СО₂-лазера длительностью 1,5 мкс, пиковой мощностью $9 \cdot 10^4$ Вт, длительностью импульса на полувысоте 50 нс и энергией 20 мДж. Излучение падало на мишень под прямым углом и фокусировалось в пятно диаметром 0,2 мм.

Для получения щелевой развертки свечения плазменного факела использовался фоторегистратор ФЭР-7 с погрешностью измерения интервала времени $\Delta t = \pm 0,1$ мкс и пространственной координаты $\Delta l = \pm 0,05$ мм. Для уменьшения энергии, поступающей в мишень при высоком уровне мощности, использовался оптический пробой в парах материала мишени. Минимальное время достижения оптического пробоя составляло 40 нс. Момент его возникновения регистрировался по появлению линий N₂⁺ ($\lambda = 470,9$ нм) с помощью монохроматора МСД-1, ФЭУ-79 и осциллографа. По этим данным определялась энергия, поступившая в мишень. Она составляла 4 мДж.

На рис. 4 приведена щелевая развертка свечения плазменного факела. Видно, что первоначально свечение возникает на расстоянии 0,5 мм у поверхности мишени. Плазменная граница неустойчива,

длительность свечения практически совпадает с длительностью импульса излучения. Максимального размера 1,28 мм плазменный факел достигает в момент времени $t \sim 1$ мкс.



Рис. 4. Щелевая развертка собственного свечения плазменного факела, генерируемого лазерным излучением малой длительности

Зная характерные энергию лазерного излучения, поступающую в мишень, размеры фокального пятна и глубину кратера, можно оценить среднюю концентрацию атомов углерода в устье факела. Она составляет при $T = 3000$ К $n_C = 4,594 \cdot 10^{16}$ см⁻³, т.е. в 245 раз меньше средней концентрации молекул воздуха $n_{O_2} = 1,128 \cdot 10^{19}$ см⁻³. Это препятствует образованию наночастиц, и, следовательно, время свечения плазмы не может превышать длительность импульса излучения на время более времени жизни возбужденных состояний $\sim 10^{-7}$ с, что и наблюдалось нами в эксперименте.

Совсем другая ситуация наблюдается при воздействии на мишень длительного импульса излучения с энергией 1,5 Дж, когда уровень мощности подбирался таким, чтобы оптический пробой не достигался. В этом случае в плазменный факел поступало $2,51 \cdot 10^{-8}$ кг углерода, что обеспечивало среднюю концентрацию его атомов в устье факела, равную $(1,49-1,72) \cdot 10^{19}$ см⁻³. Поскольку $n_C > n_{O_2}$, расширение плазменного факела в буферный газ (воздух) вело к эффективному образованию наночастиц, определяющих наблюдаемое в наших экспериментах длительное свечение плазменного факела.

Таким образом, форма и структура свечения плазменного факела определяются, по нашему мнению, развитием неустойчивости Рихтмайера-Мешкова, а длительность свечения — наличием в нем раскаленных ультрадисперсных частиц.

Данная работа выполнена при частичной финансовой поддержке Призидиума УрО РАН (проект «Генерация мощных потоков когерентного излучения и его использование для создания новых технологий» по программе интеграции Уральского и Сибирского отделений РАН).

1. Muller E., Oestreich Ch., Popp U., Michel G., Staupendahl G., Hennenberg K.-H. Characterization of nanocrystalline oxide powders prepared by CO₂ laser evaporation // J. KONA-Powder and Particle. 1995. N 13. P. 79–90.
2. Popp U., Herbig R., Michel G., Muller E., and Oestreich Ch. Properties of nanocrystalline ceramic powders prepared by laser evaporation and recondensa-

- tion // J. Eur. Ceram. Soc. 1998. V. 18. P. 1153–1160.
3. Котов Ю.А., Осипов В.В., Иванов М.Г., Саматов О.М., Платонов В.В., Азаркевич Е.И., Мурзакаев А.М., Медведев А.И. Исследование характеристик оксидных нанопорошков, получаемых при испарении мишени импульсно-периодическим CO₂-лазером // Ж. техн. физ. 2002. Т. 72. Вып. 11. С. 76–82.
 4. Осипов В.В., Иванов М.Г., Молочков К.В., Платонов В.В., Сабуров А.А. Нанесение тонких пленок тугоплавких материалов методом имплантации в пучке мощного импульсно-периодического лазерного излучения // Матер. V конф. «Физикохимия ультрадисперсных систем». Екатеринбург, ИФМ УрО РАН, 2001. Ч. 2. С. 231–239.
 5. Осипов В.В., Иванов М.Г., Лисенков В.В., Платонов В.В. Высокоэффективный импульсно-периодический CO₂-лазер ЛАЭРТ для технологических применений // Квант. электрон. 2002. Т. 32. N 3. С. 253–259.
 6. Kokai F., Takahashi K., Yudasaka M., and Iijima S. Laser ablation of graphite-Co/Ni and growth of single-wall carbon nanotubes in vortex formed in an Ar atmosphere // J. Phys. Chem. B. 2000. V. 104. P. 6777–6784.
 7. Nichikawa T., Nakano H., Uesugi N., Nakao M., and Masuda H. Greatly enhanced soft x-ray generation from femtosecond-laser-produced plasma by using nanohole-alumina target // Appl. Phys. Lett. 1999. V. 75. P. 4079–4081.
 8. Убеллоде А.Р., Льюис Ф.А. Графит и его кристаллические соединения. М.: Мир, 1965. 256 с.
 9. Свойства конструкционных материалов на основе углерода: Справочник / Под ред. В.П. Соседова. М.: Metallurgia, 1975. 335 с.
 10. Киттель Ч. Введение в физику твердого тела. М.: Наука, 1978. 792 с.
 11. Афанасьев Ю.В., Крохин О.Н. Высокотемпературные и плазменные явления, возникающие при взаимодействии мощного лазерного излучения с веществом // Физика высоких плотностей энергии / Под ред. П. Кальдиролы и Г. Кнопфеля. М.: Мир, 1974. С. 311–353.
 12. Richtmyer R.D. Taylor instability in shock acceleration of compressible fluids // Commun. Pure and Appl. Math. 1960. V. 12. P. 297–319.
 13. Мешков Е.Е. Неустойчивость границы раздела двух газов, ускоряемой ударной волной // Изв. АН СССР. Мех. жидкости и газа. 1969. Т. 5. С. 151–158.
 14. Волков Н.Б., Майер А.Е., Яловец А.П. Нелинейная динамика контактной границы сплошных сред с различной плотностью // Ж. техн. физ. 2003. Т. 73. Вып. 3. С. 1–10.

V.V. Osipov, N.B. Volkov, V.V. Platonov, M.G. Ivanov. **Evolution peculiarity of laser plasma jet upon graphite target.**

The results of investigation of unstable behavior of a plasma jet produced by CO₂-laser long-pulse irradiation of graphite, are reported. The mushroom-like form of glowing area of the plasma jet is believed to be stimulated by the Richtmaer–Meshkov instability of the plasma-air interface and formation of nanoparticles within the plasma.