

УДК 533.9

Исследования параметров облака плазмы, образующегося при лазерном облучении сферических мишеней

Ю. Д. Богуненко, Г. А. Бондаренко, Г. В. Долголева,
В. А. Жмайло, А. Г. Кравченко, Е. А. Новикова,
В. А. Стародубцев, В. П. Стаценко

Российский Федеральный ядерный центр — Всероссийский научно-исследовательский институт экспериментальной физики (РФЯЦ-ВНИИЭФ), Саров, Нижегородская обл., Россия

Даны описания измерений и расчеты параметров облака плазмы (ОП), возникающего при лазерном облучении сферических мишеней в вакуумной камере. Характеристики лазерного импульса: $E \sim 10^2$ Дж, $\tau \approx 0,5$ нс, $\lambda = 1,315$ мкм. Давление фонового воздуха $\sim 10^{-2}$ торр.

В работах [1, 2] дано описание постановки и результатов экспериментальных и расчетно-теоретических исследований эффектов, возникающих при испарении и разлете лазерной мишени в окружающей атмосфере.

Эксперименты проводили на стенде МКВ-4, расположенном в одном из каналов йодного лазера "Искра-5". Стенд представляет собой цилиндрическую вакуумную камеру длиной 1,5 м, диаметром 1 м, снабженную системами откачки и газонапуска с четырьмя окнами для ввода лазерного излучения. Стенд оснащен рядом оптических диагностик. Облучение мишени производилось с четырех сторон. Энерговыведение в мишени составляло $\sim 10^2$ Дж, длительность импульса $\approx 0,5$ нс. Схема проведения эксперимента на стенде МКВ-4 показана на рис. 1.

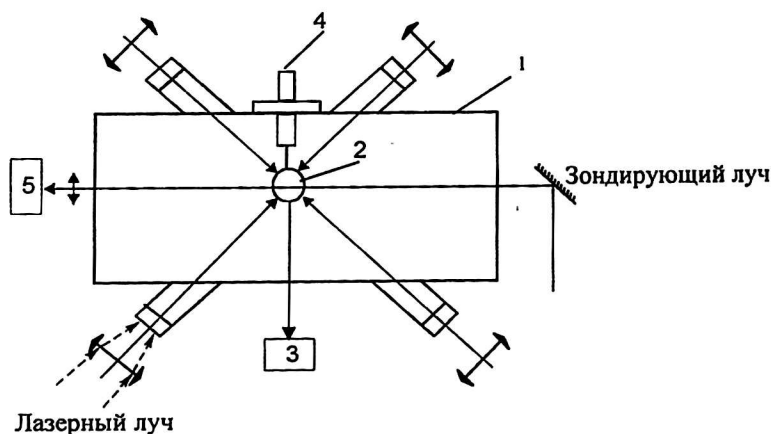


Рис. 1. Схема проведения экспериментов:

1 — вакуумная камера; 2 — мишень; 3 — блок коаксиальных детекторов излучения ОП;
4 — фотохронограф; 5 — интерферометр

Во время проведения опытов производилась регистрация:

- спектрально-временных характеристик потоков излучения ОП методом фильтр — детектор с помощью блока коаксиальных фотоэлементов 3 в спектральных диапазонах 0,4 (СДФ7) и 0,7 мкм (ФЭК14). Элементы системы ре-

гистрации были предварительно откалиброваны, что позволило производить абсолютные измерения потоков излучения ОП;

- процессов образования и развития ОП с помощью интерференционно-теневой методики при зондировании излучением второй гармоники йодного лазера с длиной волны $\lambda_{II}=0,658$ мкм. Регистрация интерферограмм производилась интерферометрами сдвига и Майкельсона. По интерферограммам определялся фазовый сдвиг зондирующего излучения $\Delta N = \Delta\phi/2\pi$ для сравнения с расчетным значением;

- динамики образования ОП с помощью фотохронографа, при этом регистрировалось самосвечение ОП в диапазоне 0,7 мкм в режиме щелевой развертки. Результатом измерения является регистрация $r-t$ -диаграммы самосвечения ОП.

В экспериментах, описанных в [2], камера МКВ наполнялась воздухом при давлениях 6 и 60 торр, а мишень представляла собой тонкостенную оболочку с внутренним вводом излучения.

Такие параметры опыта приводили к тому, что возникающее течение по существу представляло собой сильный точечный взрыв с почти равновесным составом плазмы.

В данной работе опыт рассматривается при давлении $\sim 10^{-2}$ торр. При таком давлении на расстояниях $r \leq 10$ см атмосфера слабо влияет на разлет мишени, а процессы кинетики в ней оказываются неравновесными.

Расчетно-теоретическая интерпретация результатов экспериментов проводилась по численной методике СНДП [3, 4], ориентированной на численное исследование физических процессов, протекающих в лазерной плазме. При этом учитывались: поглощение лазерного излучения в плазме; движение среды в двухтемпературном приближении с учетом физической вязкости; неравновесность среды, рассчитываемая с помощью уравнений ионизационной кинетики; перенос тепла электронами и ионами с ограничением диффузионного потока; перенос излучения в спектральном квазидиффузионном приближении.

Ниже рассмотрены постановка и результаты расчетов и сравнение с экспериментом для двух опытов с мишенью прямого облучения при давлении воздуха $0,9 \cdot 10^{-2}$ и $0,5 \cdot 10^{-2}$ торр.

Геометрия задачи — сферическая, в центре помещается мишень из пенополиуретана ($C_3H_7O_2N$) со средней плотностью $\rho_1 = 0,03$ г·см⁻³, диаметром $d_0 = 3,4$ мм, снаружи — воздух.

Расчеты проводились в двух редакциях:

в первом случае мишень считается гомогенной, т. е. рассчитываются две области;

во втором случае приближенно учитывалась пористость мишени — она моделировалась заданием на ее внешней границе слоя с толщиной порядка толщины стенок пор (1–2 мкм) — именно на этом слое происходит поглощение лазерного излучения. В этом случае рассчитывались три области: $0 \leq r \leq r_1 \equiv d_0/2$; $r_1 \leq r \leq r_2$; $r_2 \leq r \leq r_3$.

Здесь $r_2 = r_1 + \Delta r$, $\Delta r = 2-6$ мкм, $r_3 = 170$ мм. Начальная плотность мишени: в первой области — ρ_1 , во второй — $\rho_2 = 1$ г·см⁻³, в третьей — ρ_3 .

Поток излучения лазерного импульса падает на мишень снаружи. Длительность $\sim 0,5$ нс, длина волны $\lambda = 1,315$ мкм, энергия импульса (в соответствии с приведенными данными наблюдений) 120 Дж.

Граничные условия на внешней границе ($r = r_3$): для скорости — типа “жесткая стенка”, для излучения — свободный выход.

Уравнение состояния вещества мишени и воздуха рассчитывается по модели среднего иона [5] так же, как и все коэффициенты переноса.

Во всех расчетах использовалась лагранжева счетная сетка.

Результаты расчетов и сравнение с экспериментом

Результаты расчетов приведены на рис. 2—8. На рис. 2 показана зависимость от времени кинетической и внутренней энергии, а также энергии, излученной из ОП. К моменту $t \geq 250$ нс кинетическая энергия падает до значений, меньших внутренней энергии, при этом излучается около 6 % полной энергии.

Расчет проводился с давлением воздуха $0,5 \cdot 10^{-2}$ торр как с тремя областями ($\Delta r = 6$ мкм), так и с двумя. Результаты расчетов обоих вариантов, как видно из рис. 2, отличаются несущественно.

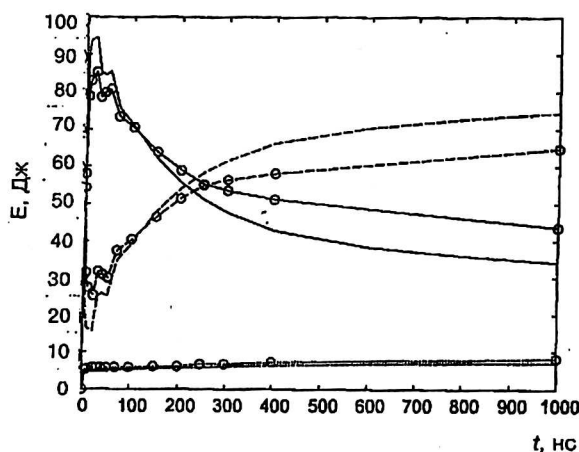


Рис. 2. Расчетный баланс энергии ОП:

расчет с 3-мя областями: — кинетическая; - - - внутренняя; ... излученная;
расчет с 2-мя областями: о — кинетическая; о- - - внутренняя; о... излученная

Расчетные профили электронных концентраций и степени ионизации на различные моменты времени приведены на рис. 3 и 4.

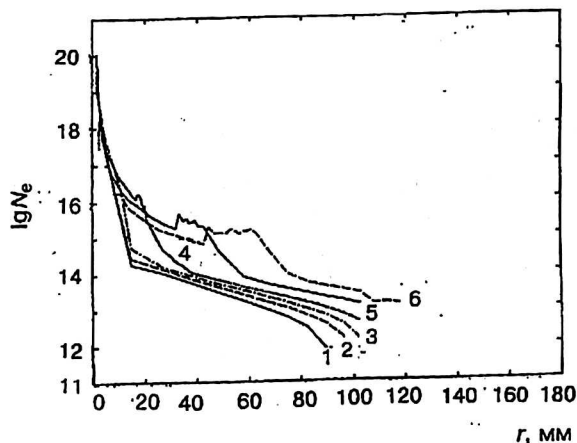


Рис. 3. Степень ионизации:

1 — $t = 5$ нс; 2 — $t = 10$ нс; 3 — $t = 20$ нс; 4 — $t = 50$ нс;
5 — $t = 100$ нс; 6 — $t = 300$ нс

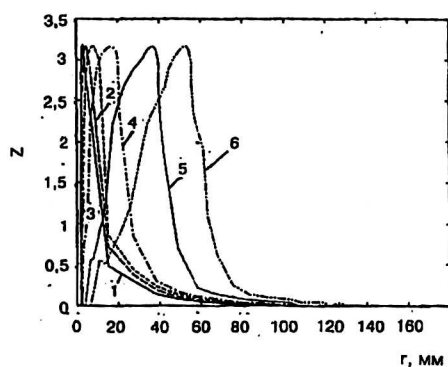


Рис. 4. Электронные концентрации N_e , $см^{-3}$:
 1 — $t = 5$ нс; 2 — $t = 10$ нс;
 3 — $t = 20$ нс; 4 — $t = 50$ нс;
 5 — $t = 100$ нс; 6 — $t = 300$ нс

На рис. 5 приведена зависимость интенсивности излучения ОП от времени для диапазона 0,4 мкм, полученная в расчете и экспериментах. Как видно, в целом она неплохо согласуется с измерениями, учитывая их разброс. Аналогичная зависимость для диапазона 0,7 мкм приведена на рис. 6.

Рис. 5. Зависимость интенсивности (I , Вт/стер/мкм) излучения ОП от времени для диапазона 0,4 мкм:
 в расчете (—) и экспериментах:
 * — с давлением воздуха $0,5 \cdot 10^{-2}$ торр;
 о — с давлением $0,9 \cdot 10^{-2}$ торр

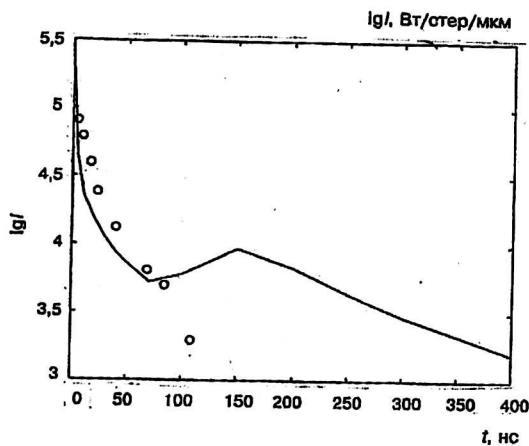
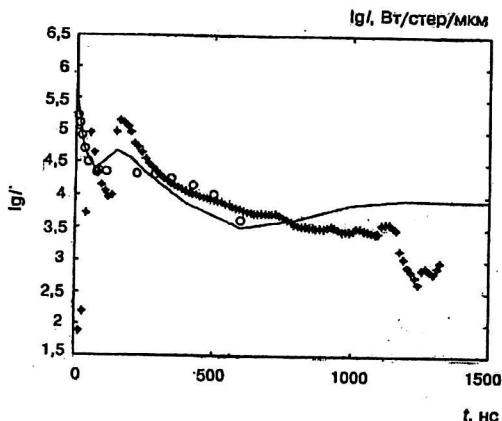


Рис. 6. Зависимость интенсивности излучения ОП от времени для диапазона 0,7 мкм:
 о — в опыте с давлением воздуха $0,9 \cdot 10^{-2}$ торр;
 — в расчете

Исходя из полученных в расчете концентраций n_e , см^{-3} свободных электронов (при пренебрежении поглощением), определялась величина показателя преломления n_r [5]. Длина волны, использовавшаяся для получения интерференционной картины, $\lambda=0,658$ мкм. Отметим, что мы пренебрегали поляризуемостью атомов и ионов.

Полученные таким образом профили n_r применялись для сравнения с наблюдаемой величиной сдвига полос $\Delta N(r)$ на интерференционной картине. Для этого рассчитывалась величина дополнительного набега фазы $\Delta\varphi(r)$ ($\Delta N=\Delta\varphi/(2\pi)$ — число линий, на которое сдвигалась интерференционная картина по сравнению с невозмущенной) в падающем (проходящем через возмущенную область на минимальном расстоянии r) луче как функции r

$$\Delta\varphi = \frac{2\pi}{\lambda} 2 \int_r^{\infty} \frac{dn_r dr'}{\sqrt{r'^2 - r^2}},$$

где $dn=1-n_r$.

Рассчитанные таким образом профили $\Delta N(r)$ показаны на рис. 7, а, б; там же приведены измеренные значения этой величины для моментов $t = 40$ и 70 нс. Экспериментальные данные получены из интерферограмм, которые приведены на рис. 8.

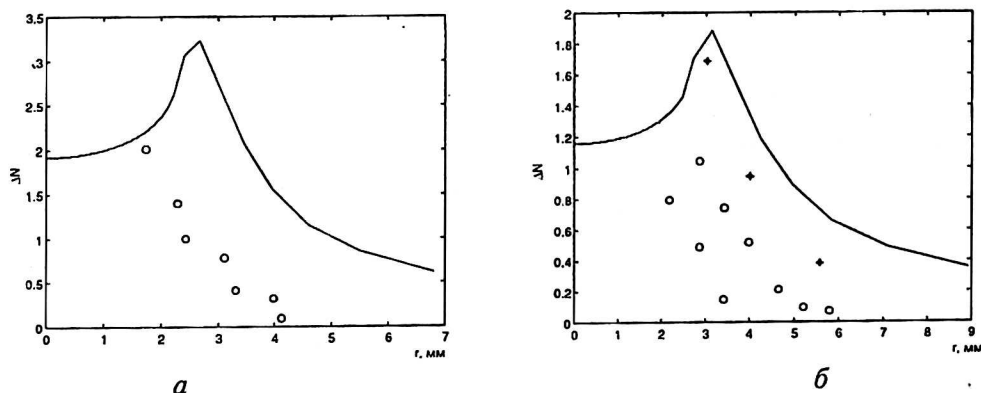


Рис. 7. Зависимость изменения набега фазы $\Delta N = \Delta\varphi / 2\pi$ от расстояния до центра мишени: а — $t = 40$ нс: о — в опыте с давлением $0,9 \cdot 10^{-2}$ торр; — — в расчете; б — $t = 70$ нс: о — в опыте с давлением $0,9 \cdot 10^{-2}$ торр; * — в опыте с давлением $0,5 \cdot 10^{-2}$ торр; — — в расчете

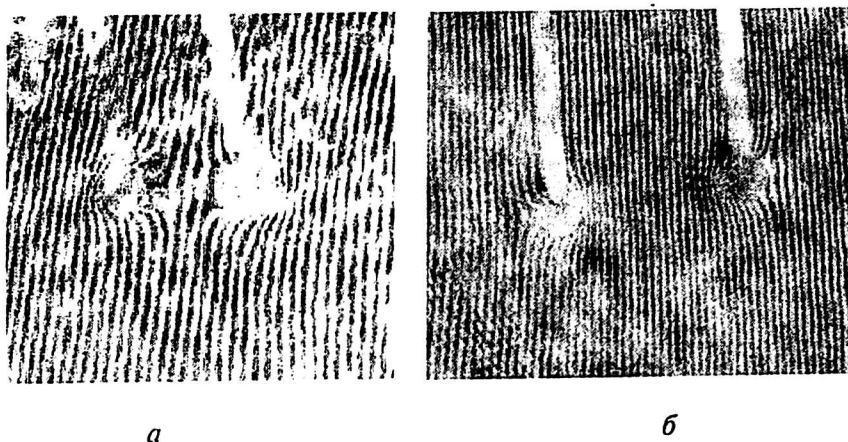


Рис. 8. Интерферограммы, полученные в опыте для задержек: а — 40 нс; б — 70 нс

Каждая из интерферограмм обрабатывалась только для одной выбранной оси плоскости регистрации, т. е. рассматривалось только одно сечение облака плазмы. Ось проходила через центр мишени в направлении максимального сдвига полос. На рис. 7, а, б приведены точки, соответствующие "правому" и "левому" направлениям разлета. Приведенная погрешность измерений составляет $\pm 0,5$ полосы, в этом случае рассчитанные значения удовлетворительно согласуются с измеренными.

Приведенные здесь результаты являются предварительными. В дальнейшем предполагается их уточнение, расширение интервала исследуемых давлений и вариация типов мишеней.

Л и т е р а т у р а

1. Бондаренко Г. А., Долголёва Г. В., Жмайло В. А. и др.: Тез. докл. на Вторых Забабахинских научных чтениях, 1992.

2. Бондаренко Г. А., Богуненко Ю. Д., Грошев Е. В. и др. Исследование процессов излучения и кинетики в "огненном шаре", возникающем при разлете лазерной мишени в атмосфере вакуумной камеры: Докл. на XXV Звенигородской конф. по физике плазмы и УТС: Звенигород Московской обл., 2—6 марта, 1998.

3. Долголева Г. В. Методика расчета движения двухтемпературного излучающего газа СНДП//ВАНТ. Сер. Методики и программы численного решения задач математической физики. 1983. Вып. 2(13), С. 29—33.

4. Бельков С. А., Долголева Г. В. Модель среднего иона для расчета кинетики ионизации, населенностей возбужденных уровней и спектральных коэффициентов переноса излучения в программе СНДП//ВАНТ. Сер. Математическое моделирование физических процессов. 1992. Вып. 1. С. 59—61.

5. Гинзбург В. Л. Распространение электромагнитных волн в плазме. — М.: Наука, 1967.

Study of plasma parameters appearing under laser irradiation of spherical target

*Ju. D. Bogunenko, G. A. Bondarenko, G. V. Dolgoljova,
W. A. Zhmajlo, A. G. Kravchenko, E. A. Novikova,
V. A. Starodubtsev, V. P. Statsenko*

Russian Federal Nuclear Center — All-Russian Research Institute of Experimental Physics (RFNC-VNIIEF), Sarov, Niz. Novgorod reg., Russia

A plasma cloud was obtained by a laser irradiation of spherical targets in the vacuum chamber. The measurements and calculations of plasma cloud parameters are described. Properties of laser impulse: $E \sim 10^2$ J; $\tau \approx 0.5$ nsec; $\lambda = 1.315 \mu\text{m}$. Background air pressure: $\sim 10^{-2}$ torr.