

Investigation of Interaction of the Plasma Clouds Forming as a Result of Two Laser Target Irradiation

V.I. Annenkov, A.V. Bessarab, G.A. Bondarenko, G.V. Dolgoleva, V.A. Zhmailo, V.A. Krotov, V.P. Kovalenko, A.V. Kunin, I.N. Nikitin, E.A. Novikova, A.I. Panov, I.V. Sobolev, S.S. Sokolov, V.A. Starodubtsev, R.R. Sungatullin, A.E. Shirokov

Russian Federal Nuclear Center – All-Russian Research Institute of Experimental Physics,
Mira av. 37, 607190 Sarov, Nizhnii Novgorod Reg., Russia

V.B. Lebedev , G.G. Feldman

BIFO Company, Ozernaya st. 46, 119361 Moscow, Russia

Описаны результаты исследования взаимодействия двух плазменных облаков, возникающих при лазерном облучении двух различных мишеней в атмосфере фонового газа на стенде МКВ-4 установки «Искра-5». Результаты эксперимента сравниваются с расчётами.

ВВЕДЕНИЕ

Исследование динамики взаимодействия плазменных облаков (ПО) представляет интерес для решения ряда задач астрофизики и геофизики. В работе [1] нами исследовались параметры ПО, образующихся при лазерном облучении плоских и сферических мишеней в атмосфере воздуха в диапазоне давлений $10^{-5} - 10^2$ Торг на стенде «МКВ-4» установки «Искра-5» [2]. Эксперименты проводились при облучении мишеней моноимпульсом энергией 500 J и длительностью 0,5 ns. В результате модернизации установки «Искра-5» появилась возможность двухимпульсного облучения мишеней разными каналами установки с регулируемой задержкой между импульсами в пределах нескольких микросекунд, что дало возможность создания двух ПО, взаимодействующих друг с другом. Наличие этого инструмента позволяет изучать элементарные процессы, определяющие взаимодействие плазменных потоков, и моделировать взаимодействие остатков взрыва сверхновых с ионизованными облаками межзвездного газа [3].

В данной работе исследуются явления, сопровождающие взаимодействие двух плазменных облаков, возникающих при лазерном облучении двух различных мишеней в атмосфере фонового газа. Результаты эксперимента сравниваются с расчётами.

1. ПОСТАНОВКА ЭКСПЕРИМЕНТОВ

Стенд «МКВ-4» представляет собой цилиндрическую вакуумную камеру (длина 1.5 m, диаметр 1 m), снабженную системами откачки и газонапуска, окнами для ввода лазерного излучения и оснащен рядом оптических диагностик.

Эксперименты проводились в следующей редакции. В центре вакуумной камеры размещалась полая тонкостенная сферическая мишень из органики (CH , $\rho \approx 1.1 \text{ g/cm}^3$, диаметр 4 mm, толщина стенки 2 μm) с отверстием диаметром 0.8 mm для ввода лазерного излучения (ЛИ) внутрь мишени. ЛИ первого импульса установки “Искра-5” (энергия $\approx 350 \text{ J}$, длительность $\approx 0.5 \text{ ns}$) вводилось в мишень. На расстоянии 5 cm от этой мишени располагалась плоская мишень из алюминия. Ее нормаль была ориентирована в направлении сферической мишени. ЛИ второго импульса установки “Искра-5” фокусировалось на мишень в пятно диаметром $\approx 200 \mu\text{m}$. Плотность потока ЛИ составила на плоской мишени $4\text{-}5 \times 10^{15} \text{ W/cm}^2$. Время между приходом первого и второго импульсов на мишени $\approx 6.2 \mu\text{s}$. Давление остаточного воздуха в камере $\approx 10^{-2} \text{ torr}$.

В результате после прихода первого лазерного импульса образуется сферическое облако плазмы. Плазма расширяется в атмосферу фонового воздуха. Второй лазерный импульс формирует струю плазмы от плоской мишени, которая распространяется через сферическое облако плазмы.

Схема проведения экспериментов приведена на рис. 1.

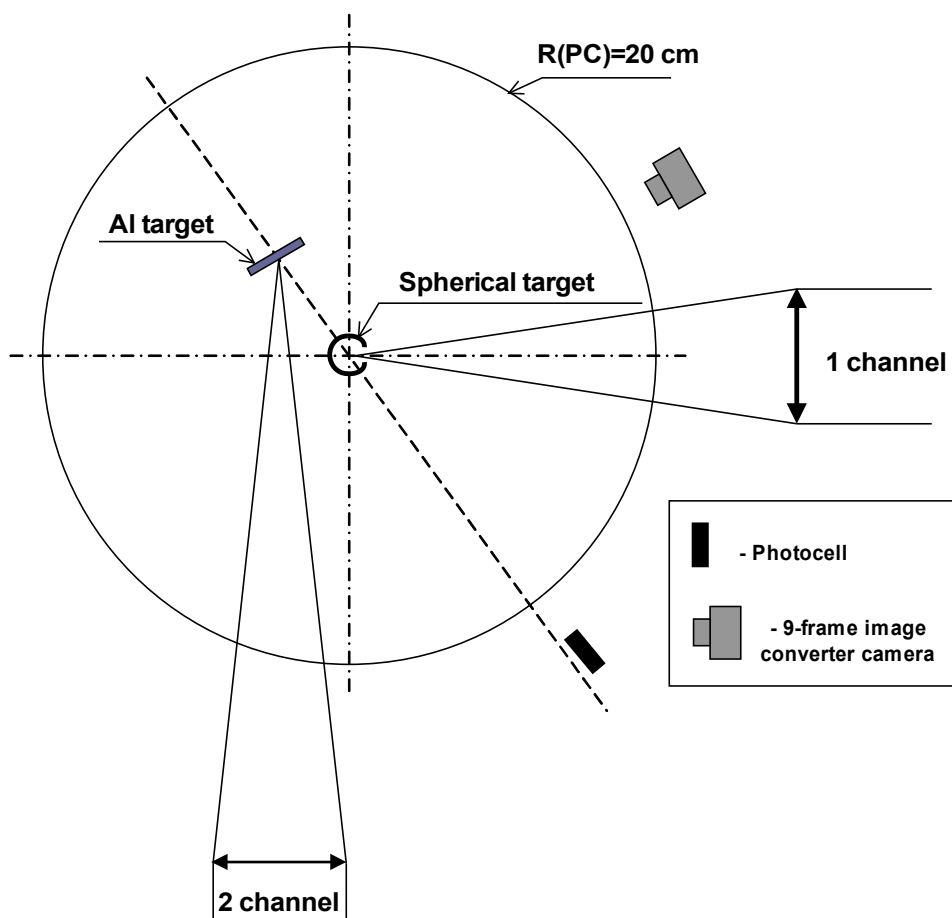


Рис. 1. Схема проведения эксперимента.

В процессе проведения экспериментов производилась регистрация зависимости интенсивности светимости плазмы в видимом диапазоне от времени, а также многокадровая съемка свечения ПО.

1. Зависимость интенсивности светимости плазмы в видимом диапазоне от времени измерялась коаксиальным фотоэлементом SDF7 [1].

2. Многокадровая съемка свечения ПО в спектральном диапазоне 400-800 нм производилась с помощью миниатюрной программируемой девятикадровой электронно-оптической камеры K011 [4]. Эта камера обеспечивала независимую установку длительности любого кадра и любой межкадровой паузы в диапазоне от 0,1 до 102,4 мкс с шагом установки 0,1 мкс.

Съемка велась в направлении ввода ЛИ в сферическую мишень (вдоль оси камеры).

2. ПОСТАНОВКА ЧИСЛЕННЫХ РАСЧЕТОВ

Расчеты, представленные в данной работе, имели следующие цели:

- Воспроизвести наблюдаемые в опыте динамику и свечение потоков плазмы для каждой из мишени в отдельности;
- Дать трактовку оптическим эффектам, возникающим при воздействии на каждую из мишеней излучения из другой мишени, а также при столкновении потоков плазмы от разных мишеней;

С этой целью был проведен ряд одно- и двумерных расчетов.

Одномерные расчеты были проведены по методике СНДП [5]. При этом учитывались следующие физические процессы: двухтемпературная газодинамика, электронно-ионная релаксация, перенос спектрального рентгеновского излучения и его взаимодействие с веществом, электронная и ионная теплопроводности. Неравновесность среды и поглощение лазерного импульса рассчитывались в соответствии с моделью среднего иона [5].

Двумерные расчеты разлета плазмы плоской мишени и ее взаимодействие с плазмой сферической мишени были проведены по численной методике «ДМК» [6]. В той методике решаются уравнения газодинамики в лагранжевых переменных на нерегулярных сетках. Начальные данные для этих расчетов брались из одномерных расчетов, проведенных по методике СНДП для плоской задачи о разлете плоской мишени. Были проведены расчеты для разлета Al в вакуум, а также в облако плазмы от сферической мишени. По полученным данным о движении плазмы и ее параметрам была рассчитана яркость ее светящейся области. Эти расчеты проводились в приближении оптически тонкого тела, излучательная способность которого оценивалась в приближении Крамерса, степень ионизации по модели «эффективного иона» Ю.П.Райзера [7].

3. РЕЗУЛЬТАТЫ ЭКСПЕРИМЕНТОВ И РАСЧЁТОВ

На рис. 2 приведена кадровая съемка свечения ПО, образующегося при двухимпульсном облучении сферической и плоской мишеней. Время задержки второго импульса относительно первого составило $6.2 \mu\text{s}$.

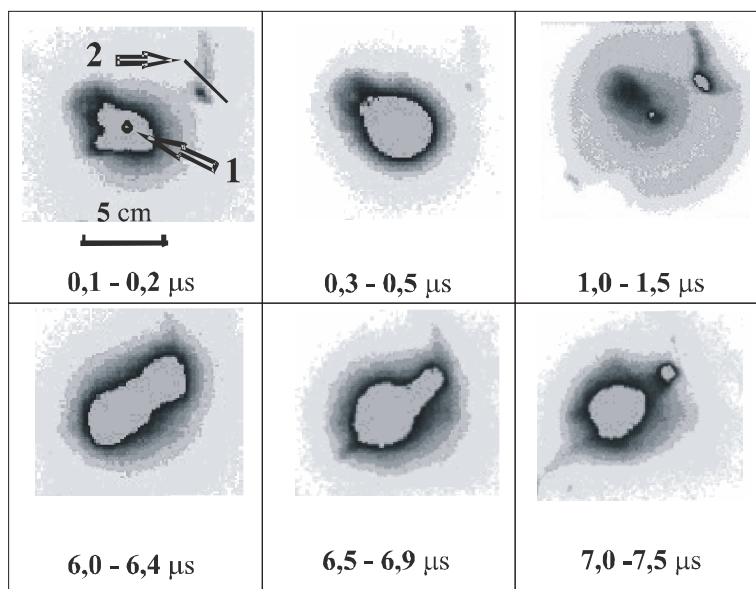


Рис. 2. Plasma clouds glow of spherical and flat targets. 1 – the centre of spherical target, 2 – position of flat target.

На первом кадре кроме процесса образования ПО сферической мишени наблюдается свечение плоской мишени, вызванное воздействием излучения сферической мишени. На втором кадре свечение плоской мишени прекратилось. К моменту 3 кадра плазма от сферической мишени долетает до плоской и опять наблюдается ее свечение. К моменту 6 μs свечение ПО сферической мишени полностью прекращается (на рисунке не указано). Экспонирование 4 кадра на рис. 2 начинается за $0,2 \mu\text{s}$ до прихода второго импульса на плоскую мишень. При этом наблюдается свечение как плоской мишени, так и области плазмы сферической мишени. На последующих двух кадрах наблюдается процесс дальнейшего развития ПО плоской мишени в виде струи и взаимодействия плазмы плоской и сферической мишеней.

На рис. 3 приведена $r-t$ диаграмма движения границы области свечения сферической мишени, полученная из данных рис.2 и одномерного расчета по методике СНДП.

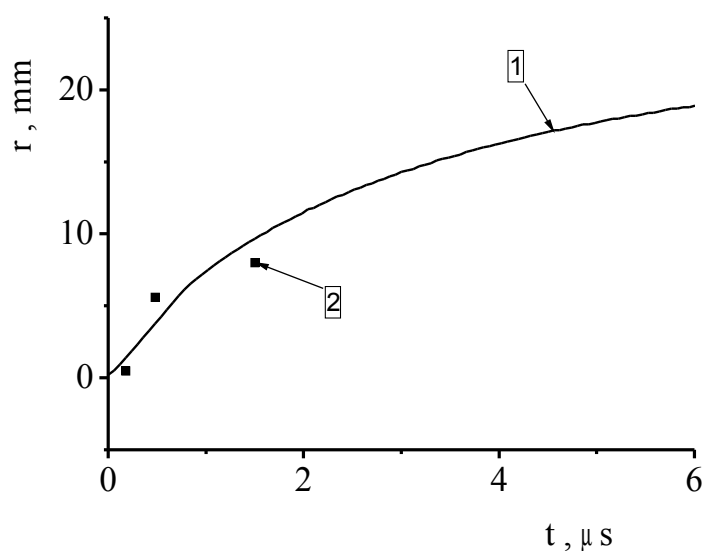


Рис. 3. r - t диаграммы границы области свечения сферической мишени 1- расчет, 2 - эксперимент.

На рис. 4-6 приведены зависимости интенсивности свечения ПО от времени в спектральном диапазоне $0.4 \mu\text{m}$ для различных режимов облучения мишеней.

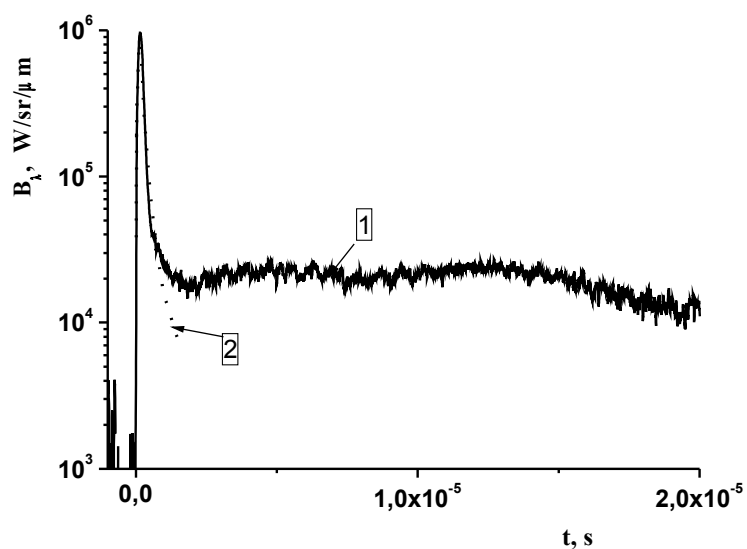


Рис. 4. Зависимость интенсивности излучения сферической мишени от времени для спектрального диапазона $0.4 \mu\text{m}$. 1 – эксперимент, 2 – одномерный расчет.

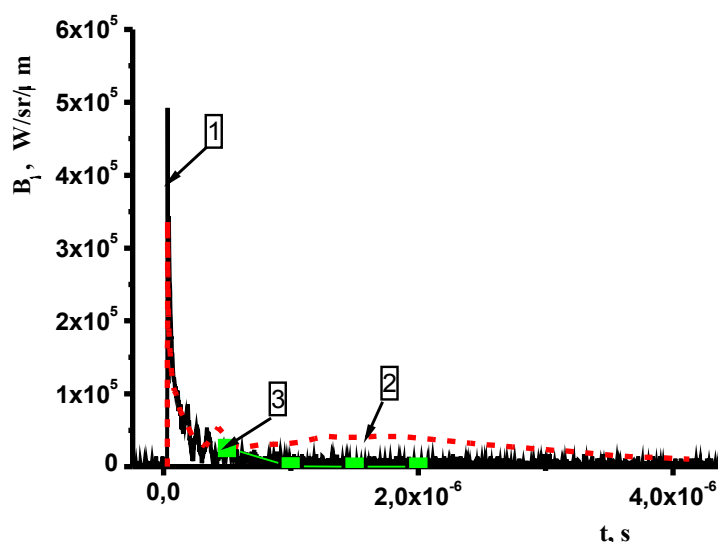


Рис. 5. Зависимость интенсивности излучения плоской мишени от времени для спектрального диапазона $0.4 \mu\text{m}$. 1 – эксперимент, 2 – одномерный расчет, 3 – двумерный расчет.

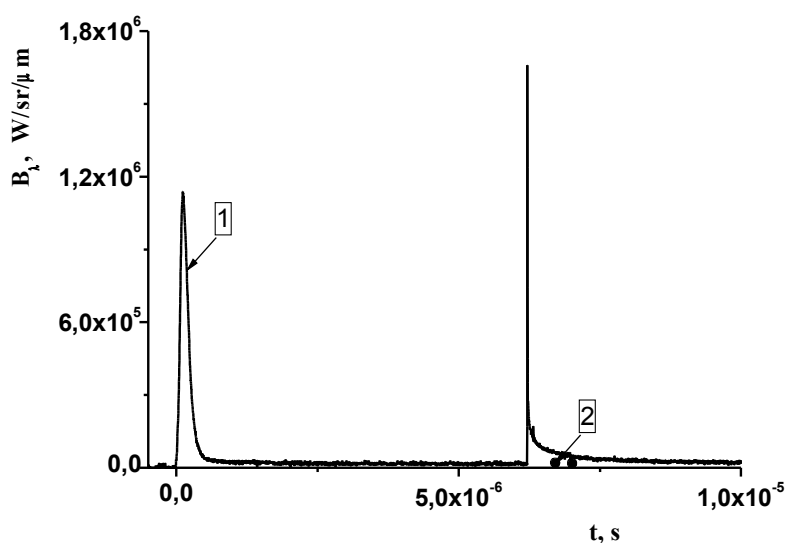


Рис. 6. Зависимость интенсивности излучения сферической и плоской мишеней от времени для спектрального диапазона $0.4 \mu\text{m}$ при двухимпульсном режиме облучения. 1 – эксперимент, 2 – двумерный расчет.

На рис. 7 приведен результат двумерного расчета светимости плоской мишени при ее разлете в плазму, образовавшуюся при облучении сферической мишени, на момент времени $0,5 \mu\text{s}$. Поток излучения рассчитан для спектрального диапазона $0,3-0,7 \mu\text{m}$. На растровой картине выведена шкала интенсивности цвета. В приближении оптически тонкого тела

интеграл по площади растровой картины дает полную мощность излучения струи плазмы в рассматриваемом спектральном диапазоне.

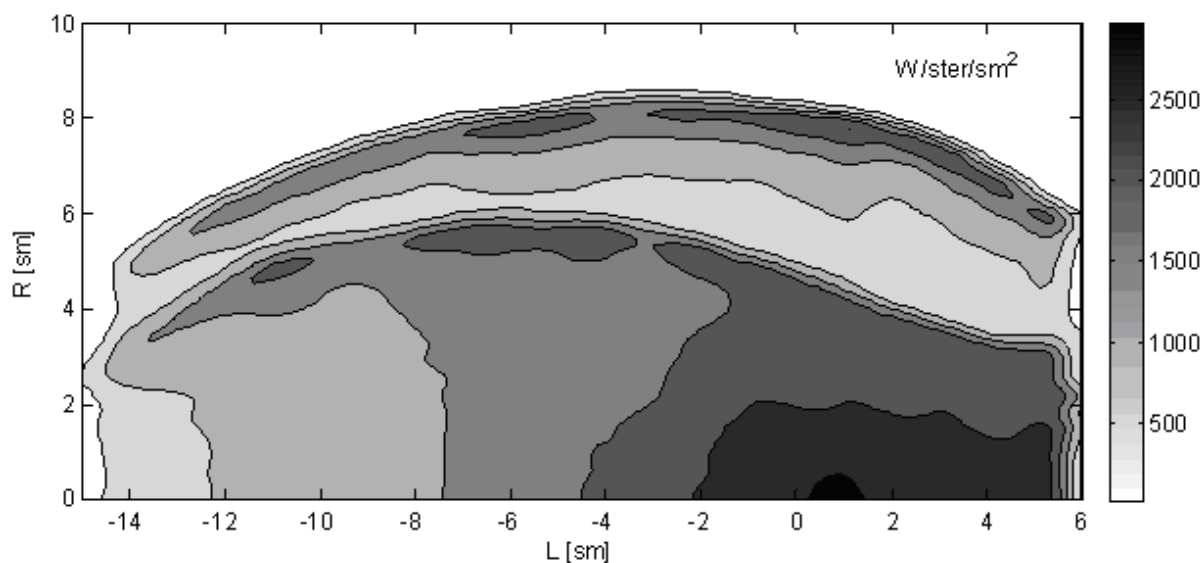


Рис. 7. Двумерный расчет светимости плоской мишени при разлете в фоновую плазму сферической мишени (момент времени $0,5 \mu\text{s}$).

Количественные характеристики размеров и их сравнение с данными эксперимента (рис.2) приведены в таблице.

Параметр	Теория	Эксперимент
R cm	8	7,5
L cm	12	10

Здесь: R – максимальный поперечный размер светящейся области, L – ее длина.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В результате исследования взаимодействия двух плазменных облаков, возникающих при лазерном облучении двух различных мишеней в атмосфере фонового газа, выяснено:

Взаимодействие облаков плазмы плоской и сферической мишеней проявляются в том, что при разлете плазмы плоской мишени в присутствии фоновой плазмы сферической мишени, несмотря на малую плотность последней, наблюдается заметное увеличение размеров светящейся области и более медленное угасание по сравнению с разлетом в вакуум.

Данные оптических наблюдений для сферической мишени находятся в количественном согласии с соответствующими одномерными расчетами. Данные наблюдений разлета плоской

мишени, как в одно- так и в двухимпульсном режиме облучения качественно согласуются с результатами двумерных расчетов.

Авторы признательны коллективу установки «Искра-5» за техническое обеспечение экспериментов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Yu.D. Bogunenko, A.V.Bessarab, G.A.Bondarenko, *et al.*, Studies of Optical Properties of a Nonequilibrium Plasma in the MKV-4 Facility, // Plasma Physics Report (Russian), 2005, Vol. 31, No. 8, pp. 765-768.
2. V.I.Annenkov, V.A.Bagretsov, V.G.Bezuglov, *et al.*, Power Pulse Laser 120 TW „Iskra-5”, // Quantum electronics (Russian), 1991, Vol. 18, No. 5, p. 536.
3. Byung-II Jun and T.W.Jones. Radio emission from a young supernova remnant interacting with an interstellar cloud: magnetohydrodynamic simulation with relativistic electron. // The Astrophysical Journal. 1999. V511. P. 774-791.
4. K011 9-frame camera, [http: www.bifocompany.com](http://www.bifocompany.com)
5. Bel'kov S.S., Gayduk S.N., Garanin S.G., Dolgoleva G.V., Kochemasov G.G.: Vopr. At. Nauki Tekh., ser. Metodiki i programmy chislennoogo reshenia zadach matematicheskoy fiziki, vyp. 1 (1990), p. 76 (in Russia).
6. Sofronov I.D., Rasskazova V.V., Nesterenko L.V. The use of nonregular nets for solving two-dimensional nonstationary problems in gas dynamics // Numerical Methods in Fluid Dynamics, Math. and Mech. series. Moscow: Mir, 1984. P. 82 – 121.
7. Ya.B. Zeldovich & Yu.P. Raizer. Physics of shock waves & high temperature hydrodynamics phenomena, 1&2 (1976) (AP, NY).