

## НАБЛЮДЕНИЕ СЖАТИЯ ДВУХКАСКАДНЫХ ОБОЛОЧЕЧНЫХ МИШЕНЕЙ, ОБЛУЧАЕМЫХ ЛАЗЕРОМ

*Н.Г.Басов, А.А.Ерохин, Ю.А.Захаренков, Н.Н.Зорев,  
А.И.Исаков, А.А.Кологривов, А.И.Никитенко,  
Ю.А.Меркульев, А.А.Рупасов, Г.В.Склизков, А.С.Шиканов*

Впервые проведены эксперименты по сжатию двухкаскадных оболочечных мишеней при абляционном ускорении внешнего каскада. Зарегистрированы передача энергии от внешнего каскада внутреннему и объемное сжатие последнего  $\delta \approx 150$ .

В проблеме лазерного УТС<sup>1</sup> одной из основных задач, стоящих перед экспериментом, является моделирование на существующих установках (с энергией  $E_{\text{лаз}} \approx 10^2 - 10^4$  Дж) условий, характерных для "реакторной плазмы", т. е. таких, которые будут реализовываться для мишеней и лазеров мегаджоульного уровня. Одна из возможностей такого моделирования заключается в использовании двухкаскадных (т. е. состоящих из двух концентрически расположенных оболочек) мишеней<sup>2</sup>. Это позволяет увеличить скорость сжатия внутреннего каскада при столкновении с более тяжелой внешней оболочкой до значений  $u_2 > 200$  км/с (необходимых для достижения термоядерных температур сжимаемого топлива) при сохранении высокой плотности плазмы<sup>3</sup>. В экспериментальном плане, однако, процесс нагрева и сжатия каскадных мишеней совершенно не изучен и здесь наиболее важен вопрос об устойчивости их сжатия в реальном эксперименте при отсутствии сферической симметрии (что связано с необходимостью механического подвеса внутреннего каскада). Другим принципиальным вопросом является эффективность трансформации энергии внешнего каскада в кинетическую энергию внутреннего, величина возможных "потерь" энергии при "неупругом" столкновении оболочек.

Эксперименты проводились на 9-типучковой лазерной установке "Кальмар"<sup>4</sup> (длина волны  $\lambda_0 \approx 1,06$  мкм, энергия  $E_{\text{лаз}} \approx 200$  Дж, длительность импульса  $\tau_{\text{имп}} \approx 1$  нс, плотность потока  $q_0 \lesssim 2 \cdot 10^{14}$  Вт/см<sup>2</sup>). Мишень (рис. 1 а, б) изготавлилась следующим образом. Внутренняя оболочка из стекла ( $\text{SiO}_2$ ) диаметром  $2R_2 \approx 100$  мкм с толщиной стенки  $\Delta_2 \approx 0,8 - 2,0$  мкм помещалась между двумя тонкими ( $\sim 5 \cdot 10^{-6}$  см) пленками из нитрата целлюлозы. Внешняя оболочка из полистирола ( $\text{C}_8\text{H}_8$ )<sub>n</sub> диаметром  $2R_1 \approx 150 - 300$  мкм резалась лучом азотного лазера на две полусферы, которые приклеивались к пленке кон-

центрично внутренней оболочке. Качество готовой мишени контролировалось как оптическими методами, так и с помощью рентгеновской микрорадиографии<sup>5</sup>. Толщина внешнего каскада выбиралась таким образом, чтобы к моменту соударения каскадов оставалась неиспаренной не менее половины его массы.

Для исследования процесса сжатия мишени и параметров образующейся плазмы использовался диагностический комплекс<sup>6</sup>, включающий рентгеновские, оптические, корпускулярные и другие методы.

Баланс энергии исследовался с помощью системы калориметров<sup>6</sup> различных типов, расположенных в вакуумной камере. Было обнаружено некоторое (примерно в 1,5 раза) увеличение поглощенной энергии по сравнению с простой оболочкой из полистирола<sup>7</sup> — уменьшились потери, связанные с рефракцией греющего излучения в плазменной короне и стала равной нулю доля световой энергии, прошедшей мимо мишени. Это, очевидно, связано с наличием держателя мишени.

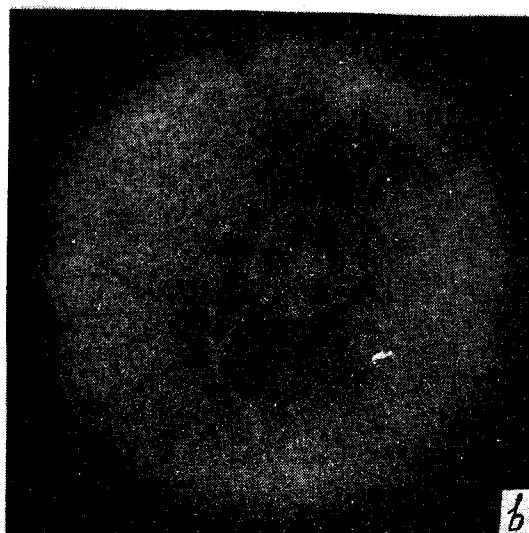
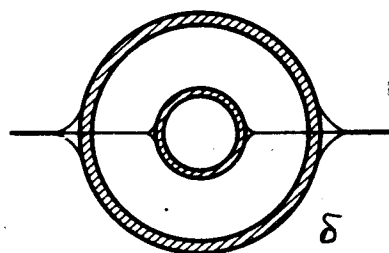
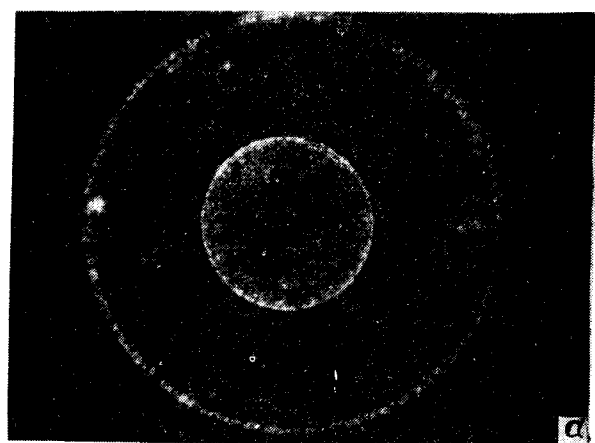


Рис. 1. Фотография двухкаскадной мишени (а), схема ее подвеса (б) и обскурограмма (в). Внешний каскад —  $(C_8H_8)_n$ ,  $2R_1 \approx 276$  мкм; внутренний каскад —  $(SiO_2)$ ,  $2R_2 \approx 97$  мкм

На рис. 1, в приведена характерная рентгеновская обскурограмма плазмы двухкаскадной мишени. На этой обскурограмме отчетливо видны две светящиеся концентрические области, соответствующие эмиссии внешней и внутренней оболочек. Весьма заметно увеличение светимости внешнего каскада в экваториальной области мишени, соответствующей рас-

положению пленочного подвеса, указывающее на заметное увеличение поглощения в этой области, что согласуется с калориметрическими измерениями баланса энергии. Тем не менее, характерной особенностью экспериментов с мишенями такой конструкции, является достаточно однородная светимость внутреннего каскада, свидетельствующая об увеличении равномерности распределения энергии по поверхности внутреннего каскада в сравнении с внешним. В нескольких опытах на обскурограммах зарегистрировано появление третьего внутреннего кольца, свидетельствующего о сжатии второго каскада. Достигнутое объемное сжатие второго каскада было относительно невелико,  $\delta \lesssim 150$ , что, по-видимому, объясняется как несимметричной конструкцией мишеней, так и недостаточно еще высоким качеством мишеней при их ручном монтаже.

Измерение электронной температуры плазмы с пространственным разрешением осуществлялось с помощью многоканальных камер-обскур с различными фильтрами, пропускающими кванты с энергией  $h\nu \gtrsim 1$  кэВ, и давало значения  $T_e \simeq 500$  эВ для внешнего каскада (как и в случае простых полистирольных оболочек) и  $T_e \simeq 300$  эВ для внутреннего. Спектр непрерывного рентгеновского излучения в области  $h\nu \gtrsim 10$  кэВ как по числу квантов, так и по форме хорошо соответствовал экспериментам с простыми полистирольными мишенями.

Применение масс-спектрометра Томсона<sup>8,9</sup> показало, что в составе разлетающейся плазмы присутствуют ионы водорода ( $H^+$ ) и углерода ( $C^+ - C^{+6}$ ), составляющих внешний каскад, максимальная скорость которых достигает  $v_{max} \simeq 10^8$  см/с. Энергетические распределения таких ионов, полученные из обработки масс-спектров, позволили измерить расход массы внешнего каскада и определить величину его кинетической энергии в момент столкновения с внутренним.

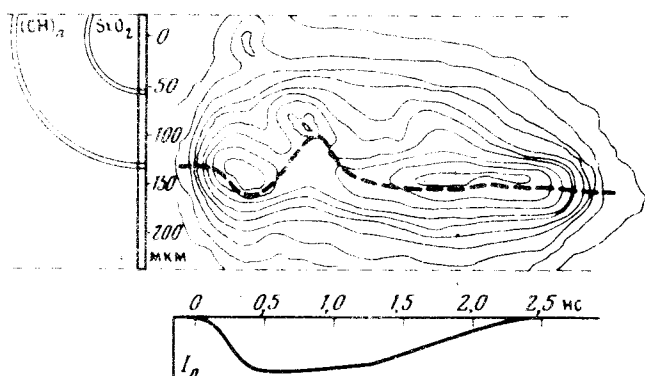


Рис. 2. Изоденситограмма временной развертки свечения плазмы мишени на частоте гармоники  $2\omega_0$ . Пунктиром показана восстановленная траектория движения области  $n_c$ . Внизу — форма лазерного импульса

В отдельных выстрелах, когда толщина внешнего каскада не превосходила 2 мкм, наблюдались ионы кремния и кислорода с зарядами до  $z = 6$ , максимальная скорость которых достигала  $v_{max} \simeq 8 \cdot 10^7$  см/с. В распределении ионов кремния и кислорода выделяются два пика в области энергий  $\sim 10$  кэВ и  $\sim 50 - 70$  кэВ. Калибровка масс-спектров проводилась с использованием данных ионных коллекторов и электростатического анализатора. Оказалось, что по сравнению с экспериментами с однокаскадными оболочками из стекла средний заряд ионов внутреннего каскада уменьшается примерно в 2 раза во всем диапазоне скоростей  $v \sim (3 - 8) \cdot 10^7$  см/с. Оценки электронной температуры плазмы по положению максимумов массового распределения дают значение  $T_e \simeq 0,5 - 0,6$  кэВ для ионов углерода и  $T_e \simeq 0,3$  кэВ для ионов кремния и кислорода, что находится в хорошем согласии с данными рентгеновских измерений.

Динамика сжатия двухкаскадных мишеней определялась при исследовании движения в пространстве и во времени области светимости плазмы на частоте второй гармоники частоты греющего излучения, генерация которой происходит в области с критической плотностью  $n_c \simeq 10^{21} \text{ см}^{-3}$ <sup>10</sup>. На рис. 2 приведен результат обработки характерной фэрограммы для

мишени с  $R_1 \approx 129$  мкм,  $\Delta_1 \approx 1,7$  мкм,  $R_2 \approx 53,5$  мкм,  $\Delta_2 \approx 1,2$  мкм. По траектории движения критической поверхности можно полагать, что внешняя оболочка достигала внутренней в момент  $t_1^* \approx 0,8$  нсек, при этом значение ее средней скорости составляет  $\bar{u}_1 = (R_1 - R_2) / t_1^* \approx 9 \cdot 10^6$  см/с. На основании данных о скорости испарения вещества, полученных из масс-спектрометрических измерений углеводородных ионов, оказывается, что к моменту  $t_1^*$  столкновения оболочек масса внешнего каскада уменьшается вдвое ( $m_1^* \approx 200$  нг), но еще примерно в два раза превышает массу второго каскада ( $m_2 \approx 108$  нг). Оценка кинетической энергии движущегося к центру внешнего каскада дает  $E_{1 \text{ кин}}^* \approx 1$  Дж, или около 5% от поглощенной к моменту  $t_1^*$  лазерной энергии. Таким образом, в результате проведенных экспериментов показана возможность сжатия внутреннего каскада при ударном взаимодействии с внешним каскадом, облучаемым лазером.

Авторы благодарны В.Б.Розанову и С.Ю.Гуськову за полезные обсуждения.

#### Литература

1. Басов Н.Г., Захаренков Ю.А., Зорев Н.Н., Рупасов А.А., Склизов Г.В., Шиканов А.С. Нагрев и сжатие термоядерных мишеней, облучаемых лазером. Итоги науки и техники, сер. Радиотехника. т. 26, М., ВИНТИ, 1982.
2. Розанов В.Б., Самарский А.А. Препринт ФИАН, 1980, №9.
3. Басов Н.Г., Гамалий Е.Г., Гуськов С.Ю., Розанов В.Б. Квантовая электроника, 1982, 9, 1945.
4. Басов Н.Г., Захаренков Ю.А., Зорев Н.Н. и др. ЖЭТФ, 1976, 71, 1788.
5. Бушуев В.С., Дороготовцев В.М., Исаков А.И. и др. Труды ФИАН, 1980, 127, 73; Громов А.И., Исаков А.И., Котов С.В. и др. Препринт ФИАН, 1981, №233.
6. Афанасьев Ю.В., Басов Н.Г., Васин Б.Л. и др. ЖЭТФ, 1979, 77, 2539.
7. Басов Н.Г., Вергунова Г.А., Гамалий Е.Г. и др. ЖЭТФ, 1983, 84, 564.
8. Воловски Е., Ворына Э., Ерохин А.А. и др. ЖТФ, 1982, 52, 366.
9. Basov N.G., Erokhin A.A., Shikanov A.S. et al. IPPLM Report №37/80(57), Warsaw, 1980.
10. Басов Н.Г., Волосевич П.П., Гамалий Е.Г. и др. Письма в ЖЭТФ, 1978, 28, 135.