

## СЖАТИЕ ДВУСЛОЙНЫХ МИШЕНЕЙ С ДТ-ГАЗОМ И НЕОНОМ НА УСТАНОВКЕ "ПРОГРЕСС"

М.Г.Анучин, В.Г.Бородин, А.А.Горохов, Г.П.Дьяконов,  
А.Л.Запысов, И.М.Израилев, В.М.Комаров, В.Б.Крюченков,  
В.А.Подгорнов, В.Г.Покровский, А.В.Чарухчев

В опытах на мощной 6-канальной лазерной установке "Прогресс" исследуется устойчивость сжатия стеклянных оболочечных мишеней со слоем Al на наружной поверхности, заполненных ДТ-газом с добавлением Ne. Сопоставляются изображения лазерной плазмы в рентгеновских линиях многозарядных ионов Al, Si, Ne и в непрерывном спектре рентгеновского излучения. Данные рентгеновских измерений в совокупности с измерениями поглощенной энергии, нейтронного выхода сравниваются с результатами газодинамических расчетов по программе "Заря".

Проблема устойчивости сжатия оболочечных лазерных мишеней является одной из центральных во всей проблеме лазерного термоядерного синтеза <sup>1, 2</sup>. Однако, в настоящее время существуют лишь ограниченные экспериментальные данные по этой теме. Так, в работах <sup>3, 4</sup> исследовалась устойчивость границы раздела алюминиевого и стеклянного слоев оболочки мишени при плотности потока греющего излучения  $q \sim (1 \dots 4) \cdot 10^{16}$  Вт/см<sup>2</sup>, когда происходит существенное выравнивание неоднородностей лазерной плазмы за счет электронной теплопроводности. Работа <sup>5</sup> касается вопроса устойчивости движения оболочки при  $q \sim 10^{13}$  Вт/см<sup>2</sup>. В диапазоне же  $q \sim 10^{14} \div 10^{15}$  Вт/см<sup>2</sup> нет достаточно полных экспериментальных исследований устойчивости сжатия оболочечных мишеней, кроме косвенных свидетельств либо неустойчивого <sup>6, 7</sup>, либо устойчивого <sup>8, 9</sup> характера сжатия.

В настоящей работе представлены результаты опытов по исследованию устойчивости сжатия SiO<sub>2</sub>-оболочек, покрытых снаружи слоем Al и заполненных смесью ДТ-газа с неоном. Эксперименты проведены на 6-канальной лазерной Nd-установке "Прогресс" <sup>10</sup> при длительности лазерного импульса 0,2 нс (ширина на полувысоте) и  $q \approx 10^{15}$  Вт/см<sup>2</sup>. В табл. 1 представлены условия проведения опытов.

№ опыта	$R_0$ мкм	$\Delta_1$ мкм	$\Delta_2$ мкм	$\eta_0$	$p_1$ ата	$p_2$ ата	$E_M$ Дж	$\frac{\Delta \bar{E}_K}{\bar{E}_K}$	$L/R_0$	$K$
1	53,9	0,63	0,6	$\pm 4,1 \%$	14	3,2	84	$\pm 18 \%$	3,0	0,8
2	73,5	0,62	0,55	$\pm 4,8 \%$	15	3,5	208	$\pm 18 \%$	2,2	1,7
3	74,5	0,66	0,61	$\pm 4,2 \%$	14,2	3,8	155	$\pm 9 \%$	2,2	1,3
4	58,9	0,61	0,45	$\pm 4,9 \%$	14	2,9	188	$\pm 18 \%$	2,7	1,6
5	63,1	0,97	0,12	$\pm 4,9 \%$	27,4	3,8	106	$\pm 15 \%$	2,5	0,6

Здесь  $R_0$  – начальный радиус оболочки,  $\Delta_1$  и  $\Delta_2$  – толщина слоев стекла и Al соответственно,  $p_1$  и  $p_2$  – начальное давление ДТ-газа и неона,  $\eta_0$  – разнотолщинность оболочки,  $E_M$  – энергия падающего на мишень лазерного излучения,  $\frac{\Delta \bar{E}_K}{\bar{E}_K}$  – средний разброс энергии по лазерным каналам. Фокусировка лазерного излучения осуществлялась за мишень в пятно диаметром  $\lesssim 20$  мкм на расстояние  $L$ . Параметр  $K$  характеризует превышение входной энергии, поступающей в каналы лазерной установки, над уровнем, при котором в каналах развивается заметная самофокусировка лазерного излучения. Разновременность сведения пучков на мишень была не хуже 30 пс, контраст лазерного излучения по мощности в данной серии составлял  $\approx 10^8$  <sup>11</sup>.

В табл. 2 приведены измеренные параметры лазерной плазмы.

№ опыта	$E_{\text{п}}$ , Дж	$N_{DT}$	$\rho$ , г/см <sup>3</sup>	$\rho'$ , г/см <sup>3</sup>	$T_e$ , кэВ
1	20 ± 5	6 · 10 <sup>4</sup>	—	≈ 0,2	—
2	55 ± 10	2,6 · 10 <sup>5</sup>	—	—	—
3	34 ± 7	7 · 10 <sup>4</sup>	—	—	—
4 эксп.	22 ± 5	1,3 · 10 <sup>5</sup>	0,1 ... 0,2	≈ 0,2	0,31 ± 0,03
расч.	23,2	3,3 · 10 <sup>7</sup>	0,76		0,72
5 эксп.	20 ± 5	1,5 · 10 <sup>5</sup>	0,4 ... 1	≈ 0,3	0,30 ± 0,03
расч.	24,9	7 · 10 <sup>5</sup>	0,43		0,38

Величина  $E_{\text{п}}$  поглощенной мишенью энергии измерялась семью плазменными калориметрами и тремя ионными коллекторами, равномерно распределенными по направлениям на мишень. Нейтронный выход  $N_{DT}$  регистрировался по методу задержанной регистрации сцинтилляционным детектором. Плотность  $\rho$  сжатого газа определялась<sup>1)</sup> по одномерному изображению сжатого газа в излучении  $Ly_{\beta}$  линии Н-подобного иона Ne с учетом разрешающей способности регистрирующей аппаратуры, а температура электронов  $T_e$  в сжатом газе оценивалась по отношению интенсивностей резонансных линий Н- и Не-подобных ионов Ne с учетом их поглощения в сжатом газе и оболочке мишени. В табл. 2 приведены значения  $\rho'$  плотности сжатого газа, найденные из измерения спектральной полуширины линии  $Ly_{\beta}Ne^{+9}$  и ее сравнения с результатами численных расчетов штарковского и доплеровского уширения линий<sup>13</sup> с учетом реального состава газовой смеси и измеренной электронной температуры. При определении  $\rho'$  были сделаны соответствующие поправки на размер источника рентгеновского излучения, аппаратурное уширение, самопоглощение рентгеновского излучения аналогично<sup>14</sup>.

Устойчивость сжатия мишеней определялась из сравнения изображений лазерной плазмы в рентгеновских линиях ионов Al, Si и Ne, содержащихся в разных частях мишени, и рентгеновских обскурограмм. На рис. 1, 2 представлены денситограммы изображений, зарегистрированных в опытах № 4 и 5, соответственно. В опыте № 4 линейчатое рентгеновское излучение многозарядных ионов Al присутствует на расстояниях ≈ 35 мкм от центра мишени, хотя согласно численным оценкам и расчетам по программе "Заря"<sup>16</sup> граница раздела алюминия со стеклом не подходит ближе, чем на 53 мкм до центра мишени. В то же время размер области сжатого газа  $2R_{DT} \approx 40$  мкм, определенный из изображения в линии  $Ly_{\beta}Ne^{+9}$  существенно больше диаметра внутреннего кольца в рентгеновской обскурограмме (отмечено горизонтальной скобкой на рис. 1), соответствующего рентгеновскому излучению сжатой оболочки. Все это свидетельствует о неустойчивом характере как границы раздела Al — стекло, так и стекло — газ в данном опыте. Эта неустойчивость может проявляться как в нарушении сферической симметрии сжатия, так и в перемешивании слоев плазмы между собой. Тот факт, что диаметр внутреннего кольца в изображении плазмы в линии ионов Si несколько больше величины  $2R_{DT}$  (см. рис. 1), позволяет оценить сверху амплитуду возмущения границы раздела газ — стекло. Опыты № 2 и 3 также характеризуются неустойчивостью границы Al — стекло.

В опытах № 1 и 5 не наблюдается (см. рис. 2) излучение в рентгеновских линиях Al из центральных областей плазмы, что свидетельствует об устойчивом характере движения гра-

1) Изображения плазмы в рентгеновских линиях ионов Si, Al, Ne регистрировались при помощи спектрографа на плоских кристаллах гипса и CsAP с щелевой разверткой<sup>12</sup>. Изображения в линиях Si, Al двумерные, так как спектральное уширение этих линий существенно меньше, чем линий Ne.

ницы раздела Al – стекло в этих опытах. Об устойчивости же границы раздела газ – стекло можно судить только в опыте №5 (в опыте №1 не были зарегистрированы изображения в линиях Ne). В этом опыте диаметр внутреннего кольца в изображении плазмы в линии Si существенно больше величины  $2R_{DT}$ , а отсутствие ярко выраженной кольцевой структуры центрального пика на рентгеновских обскурограммах объясняется<sup>2)</sup> вкладом в центр изображения плазмы рентгеновского излучения ионов Ne. Это позволяет с большой долей уверенности считать сжатие границы раздела газ – стекло устойчивым.

Как видно из табл. 1, проведенные опыты характеризуются близкими значениями величин  $\eta_0$ ,  $R_0/\Delta$ ,  $\Delta E_K/E_K$ ,  $L/R_0$ , характеризующими начальные возмущения самой оболочки и условий ее облучения, и одинаковым таутохронизмом. Существенно различаются лишь значения величины  $K$ . Причем наблюдается прямая корреляция устойчивости сжатия оболочки с величиной  $K$ , когда она больше единицы, начинает наблюдаться неустойчивое сжатие. Это позволяет сделать предположение о возможной причине неустойчивого сжатия в опытах №2, 3, 4 – ухудшение симметрии облучения мишени вследствие деформации временного и пространственного профилей лазерного импульса, возникающей в результате развития мелкомасштабной самофокусировки пучков в усилительных каскадах лазерной установки. В опытах №1, 5 этот эффект не проявляется, поскольку лазерная энергия в этих опытах ниже порога по самофокусировке.

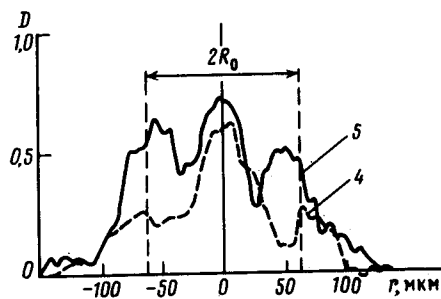
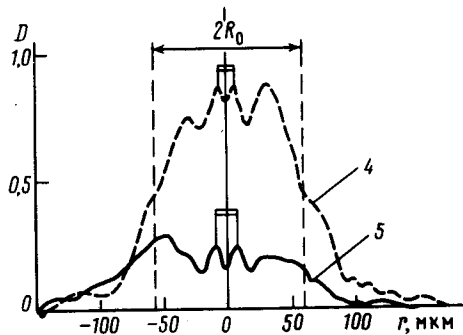
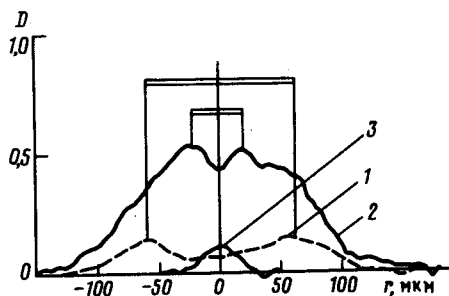
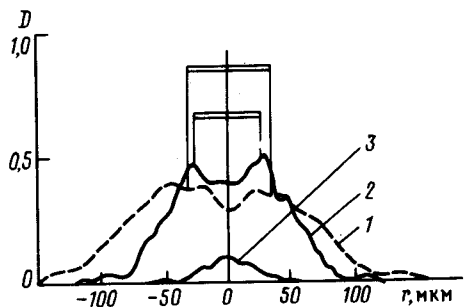


Рис. 1

Рис. 2

Рис. 1. Денситограммы изображений лазерной плазмы в линиях  $Ly_\alpha$  ионов  $Al^{+12}$  (кривая 1),  $w, Si^{+12}$  (2),  $Ly_\beta Ne^{+9}$  (3) и рентгеновских обскурограмм (кривым 4, 5 соответствуют средние энергии квантов  $\bar{\epsilon} = 2,6$  и  $3,5$  кэВ), зарегистрированных в опыте №4

Рис. 2. Денситограммы изображений лазерной плазмы в линиях  $Ly_\alpha$  ионов  $Al^{+12}$  (кривая 1),  $w, Si^{+12}$  (2),  $Ly_\beta Ne^{+9}$  (3) и рентгеновских обскурограмм (кривым 4, 5 соответствуют средние энергии квантов  $\bar{\epsilon} = 1,3$  и  $2,6$  кэВ), зарегистрированных в опыте №5

<sup>2)</sup> Согласно оценкам, проведенным на основе экспериментальных значений параметров сжатого газа, вклад в центральный пик от рентгеновского излучения ионов сравним с вкладом от вещества сжатой оболочки.

Заметим, что возмущения обусловленные самофокусировкой лазерного излучения, являются наиболее опасными, так как имеют характерную длину волны порядка толщины сжимающейся оболочки (согласно численным расчетам по программе "Заря" оболочка распухает под действием разогрева быстрыми электронами до толщины  $\sim 10$  мкм). Эти возмущения имеют максимальный инкремент роста и наиболее быстро приводят к разрушению оболочки на нелинейной стадии их развития <sup>15</sup>.

В табл. 2 представлены параметры лазерной плазмы, рассчитанные по программе "Заря" для условий опытов №4 и 5, в которых получен наибольший объем экспериментальной информации и наблюдается как устойчивое (№5), так и неустойчивое (№4) сжатие. Существенное отличие расчетных и экспериментальных значений параметров плазмы в опыте №4 и их близость в опыте №5 подтверждают сделанный ранее вывод о характере процесса сжатия мишеней в указанных опытах.

#### Литература

1. Гамалий Е.Г., Розанов В.Б., Самарский А.А. и др. ЖЭТФ, 1980, 79, 459.
2. Боков Н.Н., Бунатян А.А., Лыков В.А. и др. Письма в ЖЭТФ, 1977, 26, 630.
3. Tanaka K., Thorsos E.I. Appl. Phys. Lett., 1979, 35, 853.
4. Key M.H., Lunney J.G. et al. Appl. Phys. Lett., 1980, 36, 269.
5. Key M.H., Rumsby P.T. et al. Phys. Rev., Lett., 1980, 45, 1801.
6. Yaakobi B., Delettrez J. et al. Phys. Fluids, 1984, 27, 516.
7. Goldsack T.J., Kilkenny J.D. et al. Phys. Fluids, 1982, 25, 1634.
8. Key M.H., Lewis C.L.S. et al. Phys. Rev. Lett., 1980, 44, 1669.
9. Auerbach J.M., Mead W.C. et al. Phys. Rev. Lett., 1980, 44, 1672.
10. Алексеев В.Н., Бордачев Е.Г., Бородин В.Г. и др. Известия АН СССР, сер. физич., 1984, 48, 1447.
11. Крыжановский В.И., Чертков А.А., Малинов В.А. и др. Квантовая электроника, 1985, 11, 372.
12. Ганеев А.С., Запысов А.Л., Зуев А.И. и др. Квантовая электроника, 1982, 9, 711.
13. Held B., Deutch et al. Phys. Rev. A, 1984, 29, 896.
14. Kilkenny J.D., Lee R.W. et al. Phys. Rev. A, 1980, 22, 2746.
15. Verdon C.P., McCrory R.L. et al. Phys. Fluids, 1982, 25, 1653.
16. Барышева Н.М., Зуев А.И. и др. ЖВМ и МФ, 1982, 22, 401.

Поступила в редакцию

3 июня 1986 г.