

## ИССЛЕДОВАНИЕ ДИНАМИКИ ЛАЗЕРНОЙ ПЛАЗМЫ ПО РЕНТГЕНОВСКИМ СПЕКТРАМ МНОГОЗАРЯДНЫХ ИОНОВ

*Н.Г.Басов, К.Гетц<sup>1)</sup>, М.П.Калашников, Ю.А.Михайлов,  
А.В.Роде, Г.В.Склизков, С.И.Федотов, Э.Ферстер<sup>1)</sup>*

Представлены результаты исследований структуры изображений лазерной плазмы в свете оптически толстых рентгеновских спектральных линий. Показано, что анализ таких изображений дает информацию о средней скорости разлета плазмы, о гидродинамическом КПД сжатия и скорости испарения массы мишени.

Методы рентгеновской спектроскопии в экспериментах по лазерному термоядерному синтезу<sup>1</sup> позволяют определить электронную плотность  $N_e$ , температуру и ионизационное состояние плазмы, а при использовании примесных газов в мишени — величину параметра удержания  $\rho r$  ( $\rho$  — плотность,  $r$  — размер плазмы)<sup>2,3</sup>. В данной работе приведены результаты экспериментов, выполненных на установке "Дельфин-1"<sup>4</sup>, в которых по сдвигу максимума интенсивности на изображениях плазмы в оптически толстых рентгеновских спектральных линиях определена скорость испарения массы  $m$  и гидродинамический КПД сжатия мишени  $\eta$ .

Эксперименты по сферическому сжатию и нагреву оболочек проведены на уровне энергии лазера  $1 \div 1,5$  кДж, эффективность поглощения  $35 \div 40\%$ , использовались оболочки из стекла диаметром  $400 \div 500$  мкм с толщиной стенки  $d = 0,5 \div 4$  мкм. Формирование изображений плазмы в свете собственного излучения рентгеновских спектральных линий осуществлялось спектрографом с плоским кристаллом кварца  $Q [10\bar{1}0]$  с помощью щели, расположен-

<sup>1)</sup> Фридрих — Шиллер — Университет, г. Йена, ГДР.

ной вдоль направления дисперсии. Спектральное разрешение, определяемое кристаллом, составляло  $\sim 8,8 \cdot 10^3$ , пространственное разрешение по объекту в направлении, перпендикулярном дисперсии, составляло  $\sim 30$  мкм, что дает возможность исследования структуры спектральной линии в различных сечениях изображения плазмы.

Типичный K-спектр рентгеновского излучения кремния в интервале  $5 \div 7 \text{ \AA}$  интегральный за время жизни плазмы и характерное двумерное изображение в линии [He]-иона кремния представлены на рис. 1. В центре изображения плазмы наблюдается сдвиг максимума излучения по направлению дисперсии, величина смещения  $\Delta\lambda$  определена как разность длин волн геометрического центра изображения плазмы сферической мишени и максимума интенсивности.

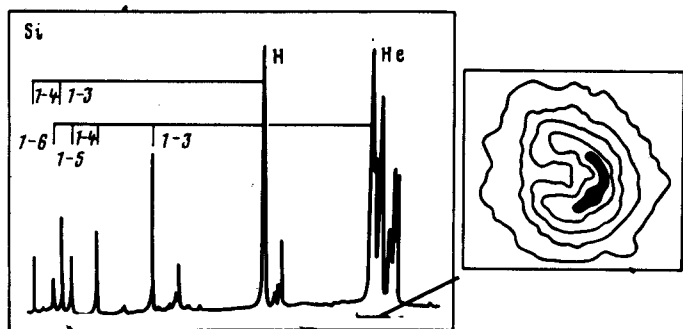


Рис. 1. Спектр рентгеновского излучения кремния и денситограмма изображения плазмы в свете резонансной линии [He]<sup>+</sup>-иона кремния  $1s^2 - 1s2p$

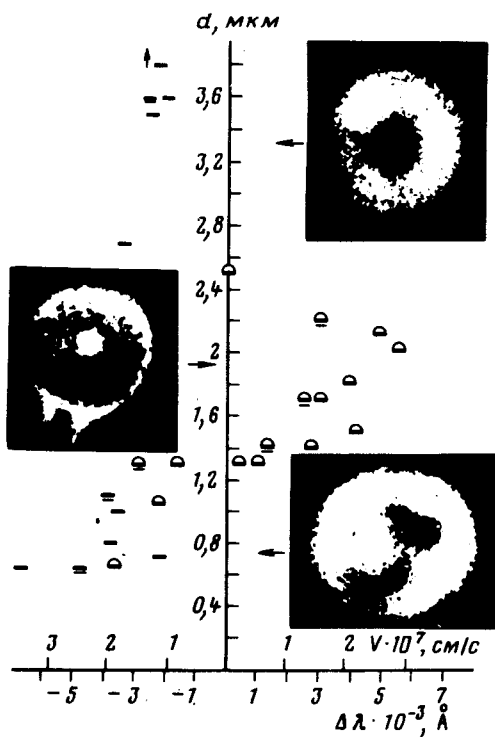


Рис. 2. Зависимость сдвига  $\Delta\lambda$  от толщины оболочки и рентгеновские обскурограммы, иллюстрирующие оптимальные условия сжатия оболочки ( $1,2 < d < 2,5$  мкм), неустойчивый характер сжатия ( $d < 1,2$  мкм) и отсутствие излучения сжатой оболочки ( $d > 2,5$  мкм). Дугой отмечены эксперименты, в которых зарегистрировано сжатие

Основной физической причиной наблюдаемого явления служит, по-видимому, эффект Доплера в плазме, разлетающейся радиально-симметричным образом. В самом деле, если предположить, что плазма для излучения резонансных линий является оптически толстой, т.е. при формировании изображения экранируется противоположная от наблюдателя сторона мишени, то сдвиг длины волны излучения зависит от проекции вектора скорости разлета на ось наблюдения. В центре изображения, где направление разлета совпадает с осью наблюдения, реализуется максимум сдвига, а на периферийных областях изображения плазмы, где направле-

ние разлета перпендикулярно оси, сдвиг отсутствует. Таким образом, величина сдвига и его знак должны быть связаны со скоростью разлета и с оптической толщиной плазмы для регистрируемого излучения. Именно такая связь и наблюдается в экспериментах.

На рис. 2 представлены результаты измерений величины и направления сдвигов максимума интенсивности на изображениях плазмы в экспериментах с оболочками различной толщины. В интервале  $d = 0,6 \div 1,2$  мкм наблюдается "синее" ( $-\Delta\lambda$ ) смещение максимума, при увеличении  $d = 1,2 \div 2,5$  мкм сдвиг становится "красным" ( $+\Delta\lambda$ ), и при  $d > 2,5$  мкм на изображениях вновь наблюдается "синее" смещение максимума интенсивности. Стрелкой обозначена величина сдвига в эксперименте со сплошной сферой диаметром 470 мкм.

Для объяснения зависимости сдвига от толщины оболочек проведены расчеты профилей температуры и плотности плазмы по программе <sup>5</sup> и построены контуры линий по методике, приведенной в <sup>6,7</sup>.

В результате расчетов установлено, что в экспериментах с тонкими оболочками максимальный вклад в интенсивность рентгеновских спектральных линий дают области плазмы с плотностью  $\sim 10^{22}$  см<sup>-3</sup>. Внешняя горячая корона ( $N_e < 10^{21}$  см<sup>-3</sup>) при этом практически полностью прозрачна для излучения резонансного перехода и поэтому "синий" доплеровский сдвиг на изображениях соответствует средней скорости движения слоя плотной плазмы  $\langle v_n \rangle$ .

При увеличении толщины оболочки возрастает масса корональной области, и излучение резонансных спектральных линий, выходящее из плотных слоев, испытывает в неоднородной расширяющейся плазме уже значительное самопоглощение. В результате, в условиях рассматриваемых экспериментов, максимум интенсивности смещен на изображениях в "красную" сторону.

При дальнейшем увеличении толщины оболочки преимущественно начинают излучать области с меньшей плотностью ( $\sim 10^{20}$  см<sup>-3</sup>) и резонансные спектральные линии выходят из плазмы без существенного самопоглощения. На изображениях формируется "синий" доплеровский сдвиг излучения разлетающихся слоев плазмы с докритической плотностью.

Отметим, что диапазон  $d = 1,2 \div 2,2$  мкм, для которого наблюдается "красное" смещение, является оптимальным для реализации высокого сжатия и нагрева термоядерного DD-топлива в экспериментах на установке "Дельфин-1". Процесс сжатия в экспериментах с такими оболочками имеет хорошую симметрию (рис. 2), величина объемного сжатия достигает  $3,5 \cdot 10^3$ , нейтронный выход составляет до  $10^7$  за импульс. В экспериментах с более тонкими оболочками процесс сжатия не вполне симметричен, в ряде экспериментов наблюдается развитие филаментации и в целом только в  $\sim 40\%$  случаев регистрируется сжатие. При увеличении толщины оболочек выше 2,5 мкм сжатое ядро в экспериментах не зарегистрировано, что, по-видимому, связано с его низкой температурой.

Сопоставляя значение  $\langle v_n \rangle$ , измеренное по доплеровскому "синему" смещению в экспериментах с тонкими оболочками, с величиной скорости схлопывания оболочки  $\langle v_{об} \rangle$ , определенной с помощью рентгеновского ЭОП<sup>а</sup> <sup>4</sup>, и привлекая данные по величине лазерной энергии, поглощенной за время схлопывания оболочки, определена гидродинамическая эффективность  $\eta$  и скорость испарения мишени  $\dot{m}$ . Характерные значения этих величин, полученные в экспериментах на установке "Дельфин-1":  $\langle v_n \rangle = (1,2 \div 3,3 \pm 0,1) \cdot 10^7$  см/с;  $\langle v_{об} \rangle = (0,8 \div 1,6 \pm 0,2) \cdot 10^7$  см/с;  $\eta = 5 \div 10\%$ ;  $\dot{m} \sim 1 \cdot 10^5$  г/см<sup>2</sup> · с. Значения  $\eta$  и  $\dot{m}$  хорошо согласуются с данными, основанными на масспектрометрических и коллекторных измерениях <sup>8</sup>.

Авторы благодарят Б.Н.Чичкова за полезные обсуждения.

#### Литература

1. Басов Н.Г., Захаренков Ю.А., Зорев Н.Н. и др. Нагрев и сжатие термоядерных мишеней, облучаемых лазером. М.: ВИНТИ, 1984, 26, ч. 1, 2.
2. Key M.H. et al. J. Phys. B, 1979, 12, 1, L213.
3. Yaakobi B. et al. Phys. Rev. Lett., 1980, 44, 16, 1072.

4. Басов Н.Г. и др. Письма в ЖЭТФ, 1983, 37, 109.
5. Змитренко Н.В. и др. Вопросы атомной науки и техники, 1983, 2, 34.
6. Вайнштейн Л.А. и др. Препринт ФИ АН СССР, 1984, М., № 66, с. 19.
7. Бойко В.А. и др. Квантовая электроника, 1981, 8, 28.
8. Басов Н.Г. и др. Сб. докладов III Всесоюзного совещания по диагностике высокотемпературной плазмы, Дубна, 1983, с. 26; *Shikanov A.S. et. al.* In: Fusion Energy – 1981, IAEA, Vienna, 1982, 175.

Физический институт им. П.Н.Лебедева  
Академии наук СССР

Поступила в редакцию  
18 июня 1985 г.

---