

04

© 1991

НАГРЕВ ПЛАЗМЫ ТЯЖЕЛОИОННЫМ ПУЧКОМ  
УСКОРИТЕЛЯ RFQ „MAXILAC“

Г.Е. Б е л я е в, Б.А. Б р ю н е т к и н,  
А.А. Г о л у б е в, К. М а р т - О л ь т,  
И.Ю. С к о б е л е в, А.Я. Ф а е н о в,  
Д.Х.Х. Х о ф ф м а н н, Б.Ю. Ш а р к о в,  
А.В. Ш у м ш у р о в

1. В настоящее время весьма перспективным представляется способ создания термоядерной плазмы интенсивными пучками тяжелых ионов [1]. Проведение работ в этом направлении ставит задачу дальнейшего развития неконтактных (и, в первую очередь, спектроскопических) методов диагностики плазмы. При этом, разрабатываемые методики должны обеспечивать измерение параметров плазмы, лежащих в очень широком диапазоне: от  $T_e \approx (1-10)$  эВ и  $N_e \approx (10^{16}-10^{20}) \text{ см}^{-3}$  (для экспериментов с умеренными значениями энерговывода) до  $T_e \approx 100$  эВ и  $N_e \approx (10^{21}-10^{23}) \text{ см}^{-3}$  (для планируемых экспериментов с пучками высокой интенсивности) [2]. Поскольку в первом случае плазма будет содержать, главным образом, малозарядные ионы, а во втором – многозарядные, то, очевидно, создаваемый диагностический комплекс должен строиться на использовании излучения плазмы как в видимом и ближнем УФ, так и в мягком рентгеновском диапазонах, причем его рентгено-спектральная часть может включать (с некоторыми модификациями) методы и средства, разработанные ранее для диагностики высокотемпературной лазерной плазмы (см., например, [3]).

2. В настоящей работе приведены результаты первых экспериментов по определению параметров плазмы, нагреваемой пучком тяжелых ионов умеренной интенсивности. Эксперименты проводились на тяжелоионном ускорителе RFQ „Maxilac“ [4].

Схема эксперимента приведена на рис. 1. Пучок тяжелых ионов  $Kr^+$  с энергией 45 кэВ/нуклон фокусировался в вакуумной камере на поверхность твердой магниевой мишени в пятно размером  $1 \times 3 \text{ мм}^2$ . Ионный ток амплитудой до 5 мА представлял собой последовательность импульсов длительностью 10 нс с интервалом 74 нс, полная длительность импульса тока составляла 500 мкс. Диагностический комплекс включал в себя многоканальную рентгеновскую камеру-обскуру, мониторы временного хода излучения видимого и рентгеновского диапазонов, а также спектроскопический канал, обеспечивающий регистрацию спектров в диапазоне 250–600 нм с временным и пространственным разрешением. Изображение плазмы с помощью двух кварцевых линз передавалось на входную щель

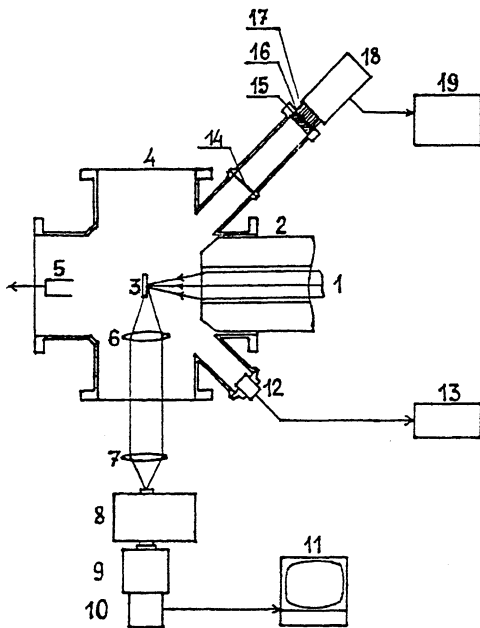


Рис. 1. Схема эксперимента: 1 - ионный пучок; 2 - фокусирующие квадрупольные линзы; 3 - мишень; 4 - вакуумная камера; 5 - цилиндр Фарадея; 6, 7 - линзы; 8 - спектрограф; 9 - стрик-камера; 10 - ПЗС-камера; 11 - ЭВМ; 12 - монитор видимого и /или/ рентгеновского излучения; 13 - осциллограф; 14 - пятиканальная обскура; 15 - микроканальная пластина; 16 - люминофор; 17 - волоконная шайба; 18 - FCO-камера; 19 - система анализа изображения.

спектрографа *JARRELL-ASH MONOSPEC 27*, плоскость его выходной щели была совмещена с плоскостью входной щели стрик-камеры *HAMATSU-C979-01*. Изображение на экране стрик-камеры регистрировалось с помощью ПЗС-камеры *2DR HADLAND PHOTONICS*, работавшей в линию с компьютером *IBM-3090*.

В проведенных экспериментах наблюдались достаточно интенсивные спектральные линии, обусловленные переходами  $3p-3s$ ,  $3d-3p$ ,  $4s-3p$ , и  $4f-3d$  иона  $Mg II$  и  $3s3p-3s^2$ ,  $3s3d-3s3p$ ,  $3s4s-3s3p$  иона  $Mg I$ . Типичное изображение участка спектра, содержащего наиболее интенсивные линии ионов  $Mg I, II$ , приведено на рис. 2.

3. Электронная плотность плазмы определялась по ширине линии  $4f^2F_{5/2, 7/2} - 3d^2D_{3/2, 5/2}$  иона  $Mg II$ . Наблюдаемая ширина данной линии складывалась из аппаратной ширины  $\Delta\lambda_{app}$  и электронной ударной ширины  $\Delta\lambda_{уд} = a(T_e)N_e$ , где  $a(T_e)$  весьма слабо

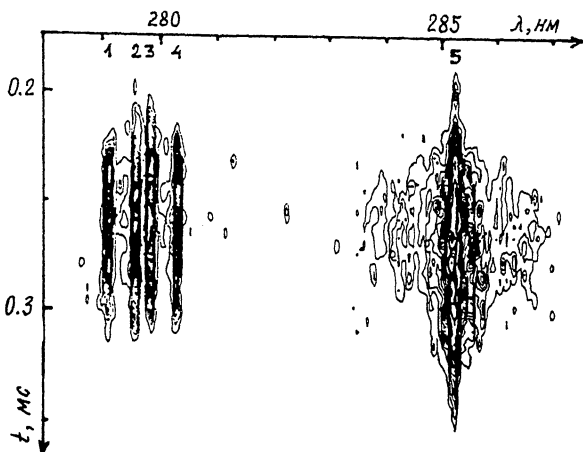


Рис. 2. Изображение участка спектра излучения плазмы магниевой мишени: 1 -  $3d^2D_{3/2} - 3p^2P_{1/2}$  (2790.78 Å); 2 -  $3p^2P_{3/2} - 3s^2S_{1/2}$  (2795.53 Å); 3 -  $3d^2D_{5/2} - 3p^2P_{3/2}$  (2797.99 Å); 4 -  $3p^2P_{1/2} - 3s^2S_{1/2}$  (2802.71 Å); 5 -  $3s3p^1P_1 - 3s^2^1S_0$  (2852.13 Å); 1-4 - Mg II, 5 - Mg I.

зависит от температуры [5]. Роль всех остальных механизмов уширения (тепловое и разлетное доплеровское уширение, ионное ударное уширение, уширение за счет эффекта самопоглощения) была пренебрежимо мала. Экспериментальное значение ширины линии  $4f-3d$ , взятое в момент времени, соответствующий максимуму светимости линий иона Mg II из примешенной области размером  $\approx 25$  мкм, составило  $\Delta\lambda_{\text{эксп}} = 2.1$  Å, что дает значение электронной плотности плазмы  $N_e = 1.4 \cdot 10^{17}$  см $^{-3}$ .

4. Для определения электронной температуры плазмы использовалось отношение  $\alpha$  интенсивности линии  $4f-3d$  иона Mg II к суммарной интенсивности дублета  $4s-3p$  этого же иона. Проведенные кинетические расчеты, учитывающие эффекты пленения излучения в рамках приближения Бибермана-Холстейна, показали, что в области  $N_e \approx (10^{16}-10^{17})$  см $^{-3}$   $\alpha$  практически не зависит от плотности электронов и весьма чувствительно к температуре плазмы в диапазоне  $T_e \approx (0.5-1.5)$  эВ (см. рис. 3). Экспериментальное значение отношения интенсивностей  $\alpha$ , измеренное для того же момента времени, что и ширина линии  $4f-3d$ , составило  $\alpha_{\text{эксп}} = 0.56$ . Для поперечного размера плазмы  $l = 1$  мм такое значение отношения интенсивностей соответствует значению  $T_e = 0.9$  эВ. Отметим, что возможная неточность знания величины  $l$  весьма слабо сказывается на измеренном значении температуры (например, даже 2-х-кратная ошибка в определении  $l$  приведет лишь к 10%-ной погрешности в определении  $T_e$ ).

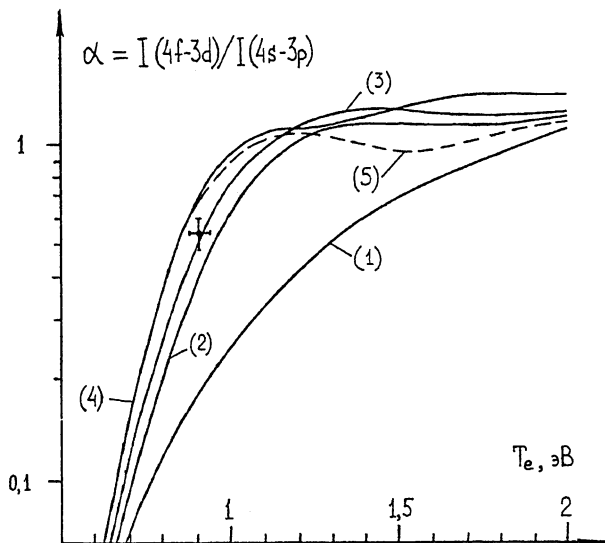


Рис. 3. Зависимости  $\alpha(T_e)$  для плазмы с разной плотностью и геометрическими размерами. Кривая 1 соответствует случаю оптически тонкой плазмы; 2 -  $l = 0.5$  мм,  $N_e = 10^{17}$  см $^{-3}$ ; 3 -  $l = 1$  мм,  $N_e = 10^{17}$  см $^{-3}$ ; 4 -  $l = 2$  мм,  $N_e = 10^{17}$  см $^{-3}$ ; 5 -  $l = 2$  мм,  $N_e = 10^{16}$  см $^{-3}$ ,  $\times$  -  $\alpha_{\text{эксп}}$ .

5. Измеренные значения  $N_e$  и  $T_e$  позволяют определить ионизационный состав исследуемой плазмы. Результаты расчета обилия ионов в стационарной плазме дают для  $N_e \approx 10^{17}$  см $^{-3}$  и  $T_e \approx 0.9$  эВ следующие значения относительных концентраций нейтральных, одно- и двухзарядных ионов магния:  $N(\text{Mg I}) : N(\text{Mg II}) : N(\text{Mg III}) = 4.8 \cdot 10^{-2} : 1 : 2.9 \cdot 10^{-3}$ . Это означает, что в момент максимального нагрева примесная плазма состояла практически полностью из однократноионизированных ионов Mg II.

6. Таким образом, в настоящей работе впервые определены параметры плазмы твердотельных мишеней, нагреваемых тяжелоионным пучком. Описанные в работе диагностические методики могут быть использованы в дальнейших экспериментах для исследования динамики нагрева плазмы тяжелоионным пучком и восстановления пространственно-временных зависимостей ее параметров.

#### С п и с о к л и т е р а т у р ы

- [1] В о с к R., Н о f m a n n I., A r n o l d R. // Nuclear Science Applications, 1984. V. 2. P. 97.

- [2] D i e t r i c h K.-G., M a h r t - O l t K.,  
J a c o b y J. e. a. // Laser and Particle Beams.  
1990. V. 8. N 4. P. 583.
- [3] Б о й к о В.А., В и н о г р а д о в А.В., П и к у з С.А.  
и др. Рентгеновская спектроскопия лазерной плазмы, М.:  
ВИНИТИ, 1980.
- [4] M u l l e r R.W. GSI Report N GSI-90-25, 1990.  
P. 25.
- [5] G r i e m H.R. Spectral line broadening by plasmas,  
Academic Press, N.-Y. and London, 1974.

Поступило в Редакцию  
5 июня 1991 г.