

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ЭЛЕКТРОННОЙ ПЛОТНОСТИ ЛАЗЕРНОЙ ПЛАЗМЫ  
ПО ИНТЕНСИВНОСТЯМ САТЕЛЛИТОВ РЕЗОНАНСНЫХ ЛИНИЙ  
ВОДОРОДОПОДОБНЫХ ИОНОВ

В. А. Бойко, С. А. Пикуз, А. Я. Фаенов

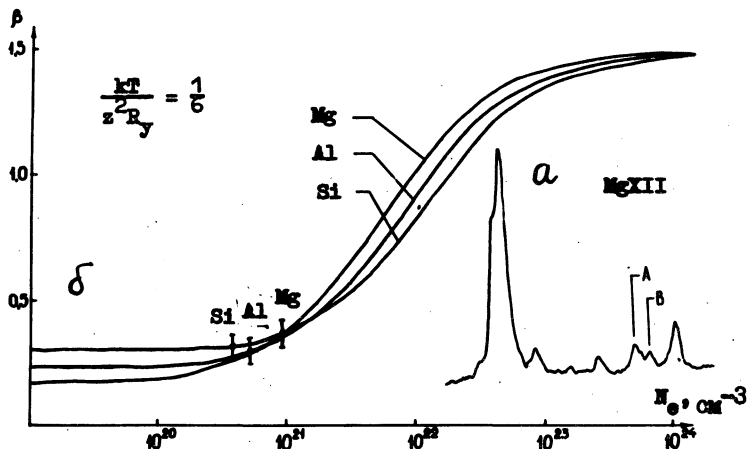
УДК 621.375.82 + 533.916

Проводится сопоставление профилей электронных плотностей  $N_e(r)$  в диапазоне  $N_e \sim 10^{20} \div 10^{21} \text{ см}^{-3}$ , полученных в одном эксперименте с помощью трех независимых методик определения  $N_e$  по рентгеновском спектре многозарядных К-ионов.

Анализ интенсивностей спутников резонансного дублета  $1s_{\alpha}$  H-подобных ионов, соответствующих переходам  $1s_{nl} - 2l'nl''$  ( $n = 2, 3$ ) с дважды возбужденных уровней He-подобных ионов /1,2/, показал, что экспериментальные интенсивности в большинстве случаев совпадают с теоретическими, вычисленными в корональном приближении с использованием значений вероятностей радиационного и автоионизационного распада, рассчитанных в работах /3,4/. Вместе с тем было отмечено, что наблюдаемая интенсивность спутников в спектре магния, соответствующих переходам  $1s2p \ ^3P_{0,1,2} - 2p^2 \ ^3P_{1,2}$  и  $1s2s \ ^3S_1 - 2s2p \ ^3P_{0,1,2}$  (обозначены на рис. 1 соответственно А и В), в несколько раз превышает расчетную. Аномальные интенсивности спутников удалось объяснить, приняв в рассмотрение переходы между верхними уровнями за счет электрон-ионных соударений, что позволило предложить новую методику измерения электронной плотности плазмы в диапазоне  $N_e \sim 10^{20} \div 10^{23} \text{ см}^{-3}$  /5,6/.

В настоящей работе для лазерной плазмы, нагреваемой излучением неодимового лазера при плотностях потока  $q \sim 5 \cdot 10^{14} \text{ Вт/см}^2$  (подробнее об условиях эксперимента см. в /7-9/), проводятся исследования относительных интенсивностей I спутничных структур А и В для ионов с зарядом ядра  $z = 12 \div 14$  и по отношению  $\beta = I_B/I_A$  определяется электронная плотность плазмы. Из спектрограмм, полученных

с пространственным разрешением в условиях одного эксперимента, определяются профили электронной плотности  $N_e(x)$  с помощью трех независимых методов: 1) по относительным интенсивностям диэлектронных спутников резонансных линий  $I_{V_{cl}}$  H-подобных ионов,

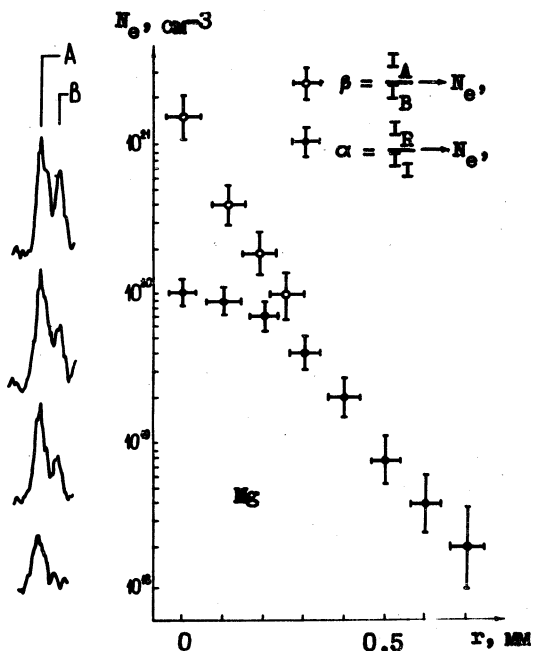


Р и с. 1: а) Характерная денситограмма участка спектра иона  $Mg_{XII}$ . Буквами А и В отмечены линии, соответствующие диэлектронным спутникам, по которым проводится определение электронной плотности (соответствующие переходы см. в тексте). б) Зависимость отношения интенсивностей диэлектронных спутников В и А от электронной плотности плазмы. Отмечены экспериментальные значения  $\beta$ , определенные из спектрограмм, полученных в экспериментах без пространственного разрешения

2) по относительным интенсивностям резонансной и интеркомбинационной линий He-подобных ионов; 3) по Штарковскому уширению переходов с высоких уровней H-подобных ионов.

На рис. 1 приведены теоретические зависимости  $\beta(N_e)$  для  $z = 12+14$ , соответствующие безразмерной температуре  $\theta = kT_e / z^2 R_y = 1/6$ , и значения  $\beta$ , полученные в экспериментах без пространственного разрешения. Значение  $\theta = 1/6$  хорошо соответствует экспериментальным значениям  $T_e$ , измеренным по относительным интенсивно-

тям диэлектронных спутников и резонансных линий H-подобных ионов с различными  $n$  /2/. На рис. 1 приведена также денситограмма участка спектра магневой плазмы, на которой указаны используемые для опре-



Р и с. 2. Профили плотности  $N_e(r)$  в случае мишени из магния, измеренные по отношению интенсивностей диэлектронных спутников резонансной линии  $\text{Lu}_\alpha$  иона  $\text{MgXII}$  ( $\Phi$ ) и по отношению интенсивностей резонансной и интеркомбинационной линий иона  $\text{MgXI}$  ( $\Phi$ ). Слева приведены характерные денситограммы группы спутников А и В на различных расстояниях от поверхности мишени

деления  $N_e$  группы спутников. Экспериментальные значения  $\beta$  для магневой мишени соответствуют  $N_e \sim 10^{21} \text{ см}^{-3}$ . Для  $n = 13, 14$  (мишени из алюминия и кремния) точность определения  $N_e$  значительно ниже, поскольку экспериментальные точки попадают на практически горизонтальный участок кривой  $\beta(N_e)$ , соответствующий корональным

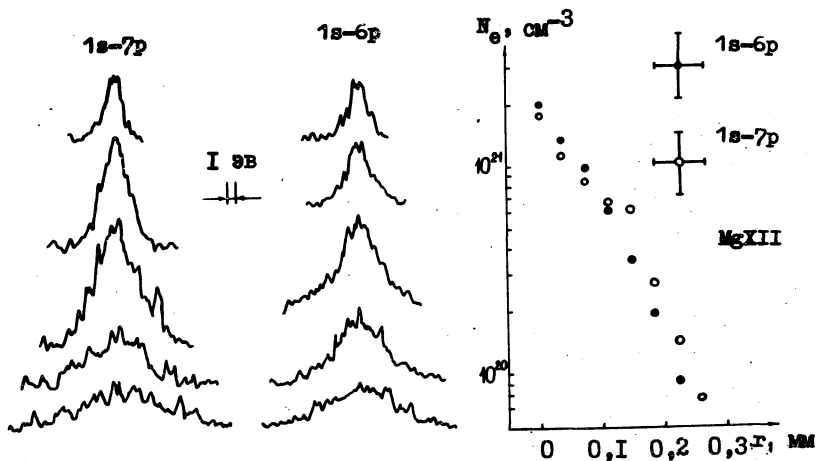
условиям. С учетом экспериментальной ошибки можно утверждать, что плотность в этих случаях не выше  $10^{21}$  см<sup>-3</sup>.

На рис. 2 приведены денситограммы спутниковых структур А и В, соответствующие излучению плазмы на различных расстояниях от поверхности мишени. Относительные интенсивности спутников изменяются от  $\beta = 0,5$  вблизи мишени до  $\beta = 0,17$  на расстоянии  $\sim 0,25$  мм от мишени. Такие значения  $\beta$ , согласно кривым рис. 1, соответствуют изменению электронной плотности  $N_e$  от  $\sim 1,5 \cdot 10^{21}$  см<sup>-3</sup> до  $\sim 10^{20}$  см<sup>-3</sup>. На рис. 2 вместе с профилем  $N_e(r)$ , полученным из относительных интенсивностей спутников, приведен также профиль, полученный из относительных интенсивностей резонансной R и интеркомбинационной I линий He-подобного иона MgXII. Видно, что во втором случае максимальное значение  $N_e$  вблизи мишени на порядок меньше ( $\sim 10^{20}$  см<sup>-3</sup>). На расстоянии  $\sim 0,25$  мм значения  $N_e$  для обоих методов совпадают. Подробный результат связан с тем, что регистрируемый спектр усреднен по времени и двум пространственным координатам. Размеры же областей светимости используемых в этих методиках линий различны: для спутников — не более  $\sim 0,35$  мм, для резонансной и интеркомбинационной линий — не менее 5 мм. Поэтому в первом случае профиль лучше описывает центральную часть плазмы, во втором — ее периферию. Подтверждением такой интерпретации служат также результаты, полученные в идентичных условиях при использовании мишеней (как однородных, так и смесей), в состав которых входили элементы с большими  $Z$ .

При этом с ростом  $Z$  область светимости резонансных и интеркомбинационных линий существенно уменьшалась (подробнее см. /9,10/) и профили плотности, например, для He-подобных ионов фосфора РХIV и серы SХV хорошо согласуются с профилем плотности, измеренным по относительным интенсивностям диэлектронных спутников He-подобных ионов MgXII.

На рис. 3 приведены денситограммы линий, соответствующих переходам  $1s-6p$ ,  $1s-7p$  He-подобных ионов MgXII. Видно, что линии вблизи мишени уширяются. Для определения электронной плотности использовалась экстраполяционная формула из работ /II/. Максимальная электронная плотность, зарегистрированная с помощью этой методики, составила  $N_e \sim 2 \cdot 10^{21}$  см<sup>-3</sup>, а профиль  $N_e(r)$  близок к профилю, определенному по относительным интенсивностям диэлектронных спутников.

Отметим безусловную перспективность методики определения электронной плотности плазмы по относительным интенсивностям спутников резонансных линий H-подобных ионов. Во-первых, рассматриваемая методика использует отношение интенсивностей спектральных ли-



Р и с. 3. Профиль плотности  $N_e(z)$  в случае магниевой мишени, измеренный по штарковскому уширению линий 1s-6p, 1s-7p иона MgXII. Слева приведены денситограммы этих линий на различных расстояниях от поверхности мишени. Максимальное уширение вблизи поверхности мишени

ний, излучающихся при переходах, конечным состоянием которых является не основное, а возбужденное состояние иона. Концентрация ионов в возбужденном состоянии мала, поэтому плазма в этих линиях практически всегда оптически тонкая. При измерениях  $N_e$  по относительным интенсивностям резонансных и интеркомбинационных линий оптическая толщина может быть велика и необходимо принимать во внимание эффекты пленения излучения, которые могут приводить к изменению формы и интенсивности линий. Во-вторых, для регистрации спутников не требуется использование аппаратуры с высоким спектральным разрешением, принципиально необходимой для надежного и точного измерения штарковского уширения спектральных линий. Кроме того, штарковское уширение превалирует над доплеровским

только для переходов с высоких уровней, которые для  $n$ -подобных ионов с  $z > 13$  пока не наблюдались.

Авторы благодарны А. В. Виноградову, И. Ю. Скобелеву, В. А. Чиркову, Е. А. Юкову за полезные обсуждения.

Поступила в редакцию  
27 января 1977 г.

### Л и т е р а т у р а

- I. В. А. Бойко, С. А. Пикуз, А. Я. Фаенов, Препринт ФИАН, № 17, М., 1976 г.
2. В. А. Бойко, С. А. Пикуз, У. И. Сафронова, А. Я. Фаенов, Квантовая электроника, 4, 600 (1977).
3. Л. А. Вайнштейн, У. И. Сафронова, Препринт ИСАН № 6, М., 1975 г.
4. Л. А. Вайнштейн, У. И. Сафронова, Препринт ФИАН № 146, М., 1976 г.
5. В. И. Баянов, В. А. Бойко, А. В. Виноградов, С. С. Гулидов, А. А. Илькин, В. А. Катулин, А. А. Мак, В. Ю. Носач, А. Л. Петров, Г. В. Перегудов, С. А. Пикуз, И. Ю. Скобелев, А. Д. Стариков, А. Я. Фаенов, В. А. Чирков, Е. А. Юков, Письма в ЖЭТФ, 24, 352 (1976).
6. А. В. Виноградов, И. Ю. Скобелев, Е. А. Юков, ЖЭТФ, (1977) (в печати).
7. В. А. Бойко, О. Н. Крокин, С. А. Пикуз, А. Я. Фаенов, Квантовая электроника, 1, 2178 (1974).
8. В. А. Бойко, С. А. Пикуз, А. Я. Фаенов. ПТЭ, № 5, 222 (1975).
9. В. А. Бойко, С. А. Пикуз, А. Я. Фаенов. Квантовая электроника, 2, 1216 (1975).
10. В. А. Бойко, С. А. Пикуз, А. Я. Фаенов, Препринт ФИАН № 26, М., 1977 г.
11. В. И. Баянов, С. С. Гулидов, А. А. Мак, Г. В. Перегудов, И. И. Соболевман, А. Д. Стариков, В. А. Чирков, Письма в ЖЭТФ, 23, 206 (1976).