

ИЗМЕРЕНИЕ ПРОСТРАНСТВЕННОГО ПРОФИЛЯ ЭЛЕКТРОННОЙ ПЛОТНОСТИ В МАГНИЕВОЙ ЛАЗЕРНОЙ ПЛАЗМЕ ПО ШТАРКОВСКОМУ УШИРЕНИЮ В РЕНТГЕНОВСКОЙ ОБЛАСТИ СПЕКТРА

*В.П.Баянов, С.С.Гулидов, А.А.Мах, Г.В.Перегудов,
И.И.Собельман, А.Д.Стариков, В.А.Чирков*

Исследовано штарковское уширение линии $1s - 5p$ ($\lambda = 6,576\text{\AA}$) водородоподобного иона MgXII в рентгеновском спектре излучения лазерной плазмы. Энергия нагревающего лазерного импульса $E = 25$ дж, длительность $\tau = 10^{-10}$ сек, $\lambda = 1,06$ мкм. По величине штарковского уширения построена зависимость электронной плотности N_e лазерной плазмы от расстояния до мишени. Максимальное значение N_e , измеренное вблизи мишени, составляло $3,1 \cdot 10^{21}$ см $^{-3}$. Пространственное разрешение лазерного факела 25 мкм.

Исследование штарковского уширения линий многозарядных ионов в рентгеновской области спектра представляет значительный интерес как спектроскопический метод диагностики плотной и сверхплотной лазерной плазмы [1].

В видимой области спектра измерение штарковского уширения является одним из наиболее прямых методов измерения электронной плотности плазмы. Наблюдение штарковского уширения линий многозарядных ионов, как правило, затруднено, так как оно обычно маскируется большим доплеровским уширением. В литературе имеется лишь несколько работ, в которых измеряется штарковское уширение в далекой ультрафиолетовой области спектра, см., например, работу [2], в которой исследовалась линия перехода $3 - 4$ водородоподобного иона углерода ($\lambda = 520,6\text{\AA}$) и [3], где исследовалось уширение линий лаймановской серии водородоподобного бериллия ($\lambda = 60 + 76\text{\AA}$).

В настоящей работе сообщается о результатах эксперимента, в котором удалось измерить штарковское уширение линии водородоподобного иона $1s - 5p$ MgXII ($\lambda = 6,576\text{\AA}$). Это позволило провести исследование распределения электронной плотности в лазерной плазме в зависимости от расстояния до мишени.

Для нагрева плазмы использовался лазер на неодимовом стекле ($\lambda = 1,06$ мкм) с энергией в импульсе 25 дж и длительностью импульса 10^{-10} сек. Задающий генератор, работавший в режиме самосинхронизации мод, излучал цуг импульсов. Из этого цуга с помощью электрооптического затвора вырезался единичный импульс, который далее усиливался. Для усиления излучения задающего генератора использовался один из каналов лазерной установки, описанной в работе [4]. Излучение лазера фокусировалось на мишень трехкомпонентным объективом $f = 60$ мм. Плотность потока на мишень составляла $\sim 5 \cdot 10^{15}$ вт·см $^{-2}$; контраст излучения $\sim 10^4$.

Мишень в виде диска диаметром 30 мм помещалась в вакуумную камеру, в которой поддерживался вакуум не хуже 10^{-3} тор.

Для спектрального разложения рентгеновского излучения плазмы был использован фокусирующий спектрограф по схеме Иоганна с вогнутым кристаллом слюды. Спектрограф описан в работе [5]. Линия исследовалась в третьем порядке спектра. Дисперсия спектрографа для $\lambda = 6,576 \text{ \AA}$ составляла $5,46 \cdot 10^{-3} \text{ \AA/мм}$ ($1,565 \text{ эв/мм}$) при ширине аппаратной функции $\delta\lambda \approx 3 \cdot 10^{-4} \text{ \AA}$ ($\delta E \approx 0,1 \text{ эв}$).

Источник рентгеновского излучения, лазерный факел, находился внутри спектрографа. Линия наблюдения мишень – спектрограф составляла с поверхностью мишени угол 15° . Для получения пространственного распределения свечения факела между лазерным факелом и кристаллом слюды помещалась щель [5], параллельная направлению дисперсии, обеспечивающая пространственное разрешение деталей факела. Спектры регистрировались на специальную рентгеновскую фотопленку УФ-ВР с чувствительностью, близкой к 10^7 квантов на см^2 [6]. Для перевода почернений на фотопленке в относительные интенсивности излучения использовались характеристические кривые, полученные в работе [6]. Высокая светосила спектрографа и большая чувствительность фотопленки УФ-ВР позволили регистрировать рентгеновский спектр за одну лазерную вспышку, а высокая разрешающая способность исключала влияние регистрирующей аппаратуры на контур исследуемой линии.

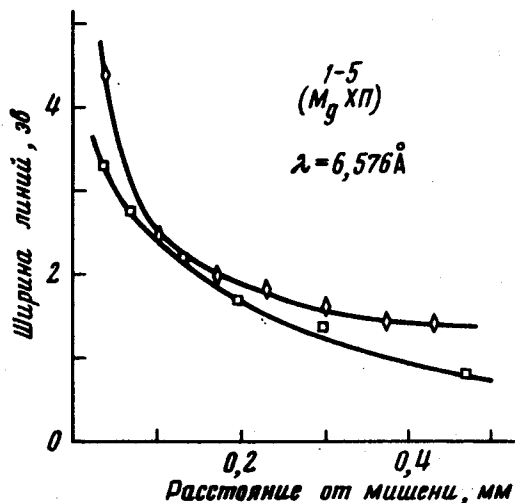


Рис. 1. Экспериментальные значения в электронвольтах ширины линии $1s - 5p$ ($\lambda = 6,576 \text{ \AA}$, Mg XII) в зависимости от расстояния до мишени r , мм; \diamond – плоская мишень, \square – лазерное излучение сфокусировано в углубление (диаметр и глубина $\approx 0,1$ мм)

Было исследовано шарковское уширение линии $1s - 5p$ Mg XII для двух конфигураций мишени. В одном случае лазерное излучение фокусировалось на плоскую поверхность (пространственное разрешение 25 мкм), в другом – в углубление диаметром и глубиной 0,1 мм (пространственное разрешение 50 мкм). На рис. 1 представлена зависимость экспериментальной ширины от расстояния до мишени для этих двух случаев. Нами оценивались различные факторы, влияющие на величину уширения линии $1s - 5p$ Mg XII; квазистатическое уширение ионами, вклад за счет электронных ударов, дебаевское экранирование и доплер-эффект [7]. Оценки показали, что уширение электронами не да-

ет значительного вклада и основными факторами являются уширение ионами (причем существенно проявляется дебаевское экранирование) и доплер-эффект. Величина доплеровского уширения нами была измерена по ширинам резонансной и интеркомбинационной линий гелие-подобного иона Mg XI и исключалась из экспериментальной ширины при определении штарковского уширения.

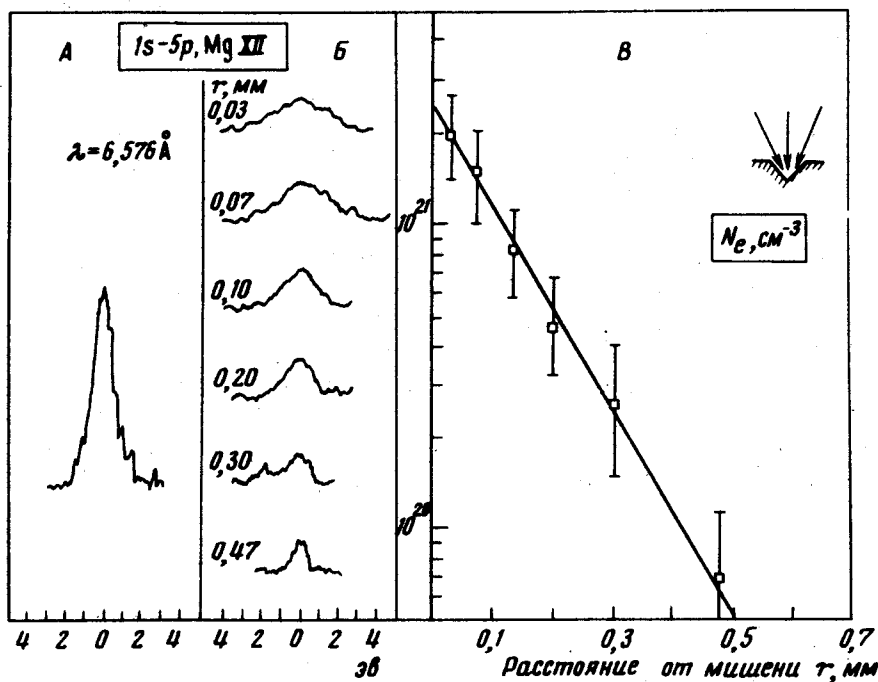


Рис. 2. Лазерное излучение сфокусировано в углубление мишени. (А) – контур линии 1s – 5p (MgXII) без пространственного разрешения. (Б) – контур линии 1s – 5p на различных расстояниях r , мм от мишени. (В) – пространственный профиль электронной плотности $N_e(r)$ см^{-3} , определенный по штарковскому уширению линии 1s – 5p

При учете дебаевского экранирования (см. [7, 8]) обычная хольцмарковская формула для ширины заменяется для рассматриваемого конкретного случая приближенной формулой:

$$\Delta E \approx 0,76 (N_e / 10^{20})^{0,6} T_e^{0,21}, \quad (1)$$

где ΔE , эв – штарковское уширение линии 1s – 5p, T_e , кэв – электронная температура плазмы. Аппроксимации, применявшиеся при выводе формулы (1), допустимы при величинах параметра Эккера δ [7; 8] $0,2 \leq \delta \leq 12$ (δ – число ионов внутри дебаевской сферы). Для наших условий значения δ не выходили за эти пределы.

Формула (1) служила основой для определения электронной плотности по штарковскому уширению линии 1s – 5p. Данные по локальной электронной температуре T_e были получены по относительным интенсивностям резонансной линии 1s – 2s [H] – иона MgXII и ее диэлект-

ронного сателлита $1s 2p^1 P_1 - 2p^2 1D_2$ [6, 9, 10]. Вблизи мишени $T_e = 0,2$ кэв, на расстоянии $0,3$ мм $T_e = 0,6$ кэв.

В случае плоской мишени максимальное значение электронной плотности, измеренное вблизи мишени составляло величину $N_e = 3 \cdot 10^{21}$ см⁻³, а для мишени с углублением $N_e = 2,0 \cdot 10^{21}$ см⁻³. При удалении от мишени существенного отличия N_e для этих двух случаев не наблюдается. График $N_e(r)$ для мишени с углублением представлен на рис. 2(В). На этом же рисунке 2(Б) показано, как меняется контур линии $1s - 5p$ MgXII при удалении от мишени, а также контур этой линии, полученный без пространственного разрешения (2(А)).

В заключение авторы считают своим долгом поблагодарить В.А.Бойко, А.В.Виноградова, Е.А.Юкова за полезные обсуждения, М.Р.Шпольского и его сотрудников за предоставление высокочувствительной пленки УФ-ВР.

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

Поступила в редакцию
15 января 1976 г.

Литература

- [1] А.В.Виноградов, И.И.Собельман, Е.А.Юков. Квантовая электроника, 1, 268, 1974.
- [2] Е.В.Аглицкий, В.А.Бойко, С.М.Захаров, Г.В.Склизков. Препринт ФИАН №143, 1970; В.А.Бойко, О.Н.Крохин, Г.В.Склизков. Труды ФИАН, 76, 186, 1974.
- [3] А.М.Malvezzi, E.Jannitti, G.Tondello. Opt. Commun., 13, 307, 1975.
- [4] М.П.Ванюков; В.И.Крыжановский, В.А.Серебряков, В.Н.Сизов, А.Д.Стариков. Опт.-мех. пром., №12, 32, 1973.
- [5] Г.В.Перегудов, Е.Н.Рагозин, В.А.Чирков. Квантовая электроника, 2, 1844, 1975.
- [6] Е.В.Аглицкий, В.А.Бойко, Т.А.Калинкина, А.Н.Ошуркова, С.А.Пикуз, В.М.Уварова, А.Я.Фаенов, М.Р.Шпольский. ПТЭ №4, 207, 1975.
- [7] И.И.Собельман. Введение в теорию атомных спектров. Физматгиз, М., 1963.
- [8] G.Ecker. Z.f. Phys., 148, 593, 1957; G.Ecker, K.G.Müller. Z.f.Phys., 153, 317, 1958.
- [9] A.H.Gabriel, C.Jordan. Interaction of spectral intensities from Laboratory and Astrophysical plasmas. Chapt 4. In: "Case studies in atomic collision physics." 1972. v2, p. 209.
- [10] В.А.Бойко, О.Н.Крохин, С.А.Пикуз, А.Я.Фаенов. Квантовая электроника, 1, 2178, 1974.