

Рентгеновская и вакуумно-ультрафиолетовая спектроскопии плазмы с использованием новых фокусирующих многослойных структур

Ю. Э. Бороздин, Е. Д. Казаков, В. И. Лучин⁺¹), Н. Н. Салашенко⁺, И. Ю. Толстихина, В. В. Чернов⁺,
Н. И. Чхало⁺, А. П. Шевелько¹), О. Ф. Якушев

Физический институт им. П.Н. Лебедева РАН, 119991 Москва, Россия

⁺ Институт физики микроструктур РАН, 603950 Нижний Новгород, Россия

Поступила в редакцию 6 ноября 2007 г.

После переработки 22 ноября 2007 г.

Зарегистрированы спектры лазерной плазмы в мягкой рентгеновской (0.8–0.95 нм) и в вакуумно-ультрафиолетовой областях спектра (3–4 нм) с использованием новых фокусирующих многослойных структур. Продемонстрирована возможность измерения за один лазерный импульс с энергией ~ 1 мДж электронной температуры лазерной плазмы легких элементов по относительным интенсивностям сателлитов и линий ионов различной кратности.

PACS: 07.85.Fv, 52.38.Ph, 52.70.La

Одним из наиболее эффективных методов исследования излучения лабораторной и астрофизической плазмы является рентгеновская и вакуумно-ультрафиолетовая (ВУФ) спектроскопии многозарядных ионов (см., например, [1]). В частности, к настоящему времени очень подробно изучены спектральные характеристики излучения в окрестности резонансных линий [H]- (водородо)- и [He]- (гелие)-подобных многозарядных ионов [1, 2]: в узком участке спектра по относительным интенсивностям сателлитов ионов различной кратности можно определять температуру и плотность электронов, исследовать ионизационное равновесие и устанавливать наличие стационарности или изучать динамику развития плазмы. Определенные трудности в этом методе возникают при измерении малых электронных температур $T_e < 100$ эВ. При этом надо использовать спектры ионов легких элементов, а для них существенно уменьшаются относительные интенсивности диэлектронных сателлитов. В то же время, диапазон температур $T_e < 100$ эВ представляет наибольший интерес в связи с разрабатываемыми в настоящее время практическими приложениями – проекционной ВУФ литографией ($\lambda \sim 13.5$ нм) и микроскопией живых биологических объектов в так называемом “водяном окне” (область длин волн 2.4–4.0 нм – между K краями поглощения кислорода и углерода).

Целью работы является исследование ВУФ спектров лазерной плазмы углерода с помощью светосиль-

ного кристаллического спектрометра на основе новых фокусирующих многослойных структур (МС) и разработка метода измерения электронной температуры плазмы в области $T_e \geq 60$ эВ.

Для измерения электронной температуры T_e использовалось отношение интенсивностей близко расположенных спектральных линий [H]-подобного (переход 1–2) и [He]-подобного (переход 1–3) ионов углерода. В корональном пределе это отношение равно

$$I_{\text{H}}(1-2)/I_{\text{He}}(1-3) = N_{\text{H}}/N_{\text{He}} \langle v\sigma \rangle_{1-2} / \langle v\sigma \rangle_{1-3},$$

где N_{H} и N_{He} – плотность ионов в основном состоянии и $\langle v\sigma \rangle$ – скорости возбуждения соответствующих уровней из основного состояния. Условие применимости коронального равновесия [3] $N_e < N_e^* = 10^{16} \cdot z^7 \sim 10^{21} \text{ см}^{-3}$ (где z – спектроскопический символ) выполняется для горячей плазменной короны ($N_e \sim 10^{20} \text{ см}^{-3}$). Скорости возбуждения $\langle v\sigma \rangle$ определялись с использованием данных [3], отношение плотностей ионов $N_{\text{H}}/N_{\text{He}}$ в основном состоянии – данных [4]. Зависимость отношения интенсивностей $I_{\text{H}}(1-2)/I_{\text{He}}(1-3)$ приведено на рис.1. Как следует из рис.1, это отношение интенсивностей для ионов углерода чувствительно к температуре электронов для $T_e \geq 60$ эВ.

Лазерная плазма создавалась при фокусировке излучения второй гармоники лазера на Nd стекле (длительность импульса 2 нс, диаметр пятна фокусировки ~ 20 мкм) на массивную Mg или полиэтиленовую мишень. Многослойные интерференционные структуры были нанесены на кристаллы слюды и исполь-

¹) e-mail: luchin@ipm.sci.nnov.ru; shevelko@rambler.ru

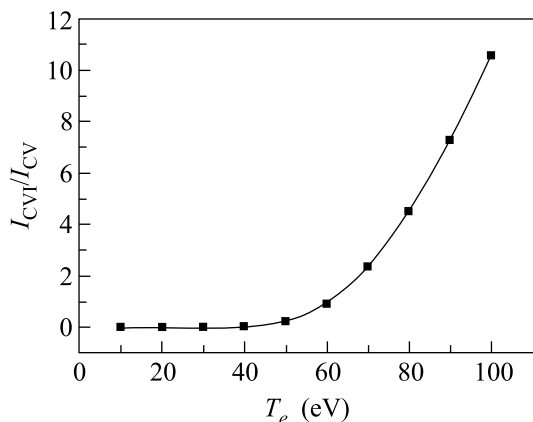


Рис.1. Зависимость от электронной температуры T_e отношения интенсивностей линий [H]-подобного (переход 1–2) и [He]-подобного (переход 1–3) ионов углерода

зависимости в спектрометре Гамоша [5] для исследования рентгеновских и ВУФ спектров лазерной плазмы.

Схема спектрометра Гамоша приведена на рис.2.

В этой схеме используется кристалл, изогнутый по

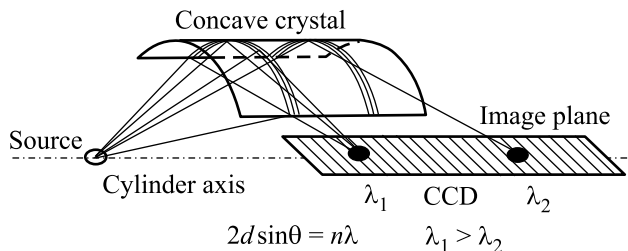


Рис.2. Схема рентгеновского фокусирующего спектрометра, выполненного по схеме Гамоша [5]

цилиндру, а источник излучения и плоскость регистрации лежат на оси цилиндра. Излучение от источника на различных длинах волн после отражения от дуги кристалла фокусируется в точку на оси спектрометра. Это приводит к очень высокой светосиле этой схемы в широком диапазоне спектра. Другим преимуществом этой схемы является формирование спектра на оси спектрометра, что позволило использовать ПЗС линейку в качестве детектора излучения. Большая длина детектора (в нашем случае 30 мм) давала возможность регистрировать спектр в широком диапазоне длин волн.

Радиус изгиба кристалла R составлял 20 мм. В качестве детектора излучения использовалась ПЗС линейка Toshiba TCD 1304AP, имеющая 3724 элемента шириной 8 мкм и высотой 200 мкм каждый. Для исследования спектров углерода (диапазон длин волн $\lambda = 3\text{--}4$ нм) активная область ПЗС детектора соединялась с волоконной шайбой, на которую наносился тонкий слой (~ 10 мкм) люминофора. Фокусирующая геометрия спектрометра наряду с вы-

сокой эффективностью ПЗС детектора приводит к высокой чувствительности прибора: эффективность спектрометра может превышать эффективность схемы с плоским кристаллом и с фотографической регистрацией спектра в $10^4\text{--}10^6$ раз [5]. Это позволяло регистрировать рентгеновские спектры в этих экспериментах при малых энергиях лазерного импульса (вплоть до 1 мДж).

Для исследования спектров Mg (диапазон длин волн $\lambda = 0.8\text{--}0.95$ нм) были изготовлены МС на основе пары W/ W_4C с периодом $d = 1.2$ нм [6], для исследования спектров углерода (диапазон длин волн $\lambda = 3\text{--}4$ нм) – МС на основе пары Cr/Sc с периодом $d = 3.75$ нм [7]. В первом случае для защиты от видимого света использовался рентгеновский фильтр (полиимид 1.1 мкм + 0.2 мкм Al), во втором случае – свободно висящий Cr-Sc фильтр, методика изготовления которого описана в работе [8].

На рис.3 приведен спектр Mg, зарегистрированный с помощью W/ W_4C многослойного зеркала в ка-

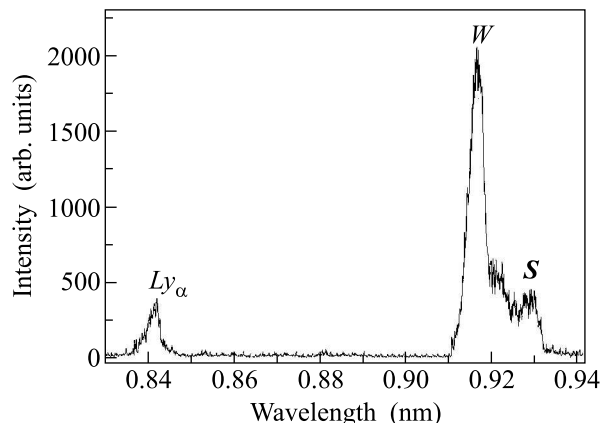


Рис.3. Рентгеновский спектр Mg лазерной плазмы ($E_L = 50$ мДж), зарегистрированный с помощью многослойной структуры. Отмечены резонансные линии Ly_α и w водородоподобного ([H]-) и гелиеподобного ([He]-) ионов Mg и спутничные линии (S)

честве дисперсионного элемента. Наблюдается полная структура спектра – резонансные линии Ly_α и w [H]-подобного и [He]-подобного ионов Mg, а также спутничные линии S . Спектральное разрешение составляло величину $\lambda/\delta\lambda \sim 200$. Температура электронов, измеренная по отношению интенсивностей диэлектронных спутников и резонансной линии [He]-подобного иона Mg [2], составила величину $T_e = 250$ эВ.

На рис.4 приведены спектры излучения плазмы углерода, зарегистрированные с помощью Cr/Sc многослойного зеркала в качестве дисперсионного элемента. Благодаря высокой чувствительности спектрометра, спектры регистрировались за одну вспыш-

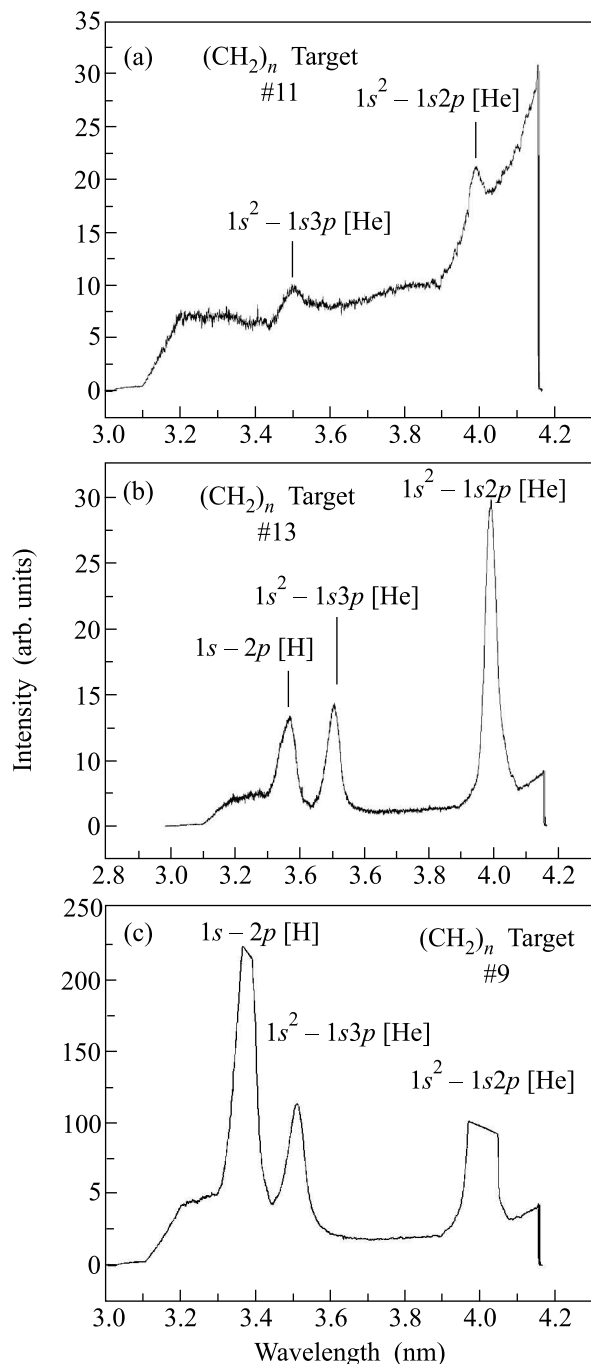


Рис.4. ВУФ спектры C VI-CV ионов углерода. Отмечены резонансные линии водородоподобного ([H]-) и гелиеподобного ([He]-) ионов углерода и переход 1-3 в [He]-ионе. Электронная температура $T_e < 50$ эВ (а), $T_e = 60$ эВ (б), $T_e = 70$ эВ (с)

ку лазера при очень низкой энергии лазерного импульса: 1–10 мДж. Спектральное разрешение $\lambda/\delta\lambda \sim 100$ позволило наблюдать резонансные линии [H]- и [He]-подобных ионов и переход (1–3) в [He]-подобном ионе. Электронная температура, измеренная по отношению интенсивностей переходов (1–2) в [H]-

подобном и (1–3) в [He]-подобном ионах (см. рис.1), составила величину $T_e = 60–70$ эВ (см. рис.4б, с).

Диапазон возможного применения МС в качестве дисперсионных элементов не ограничен приведенными примерами. Использование в фокусирующих спектрометрах МС с различными межплоскостными расстояниями $d = 1–13$ нм [7] позволит проводить исследования как в мягкой рентгеновской, так и в вакуумно-ультрафиолетовых областях спектра. Возможность в больших пределах плавно варьировать величину периода напыляемых МС существенно дополняет спектральные возможности фокусирующих схем. Дисперсионные элементы на основе кристаллов слюды и КАР и молекулярных многослойных структур не всегда удобны в применении из-за дискретного набора значений периода и не перекрывают весь доступный для МС диапазон. По мере развития технологий изготовления МС, они вытеснили многослойные молекулярные дисперсионные элементы. Рентгеновские зеркала на основе напыленных МС превосходят отражающие многослойные молекулярные структуры по радиационной стойкости и другим эксплуатационным свойствам. При умеренном спектральном разрешении ($\lambda/\delta\lambda \sim 100$) такие спектрометры благодаря своим фокусирующим свойствам и применению нового ПЗС детектора спектрометры будут обладать большой эффективностью. Применение новых спектрометров позволит измерять температуру электронов в диапазоне $T_e \sim 50–100$ эВ, реализуемом в плазменных установках для проекционной ВУФ литографии и микроскопии.

Работа выполнена при финансовой поддержке гранта Российского фонда фундаментальных исследований # 07-02-00992 и программы Президиума РАН “Фемтосекундная оптика и физика сверхсильных лазерных полей”.

1. Л. П. Пресняков, УФН **119**, 49 (1976).
2. Л. А. Вайнштейн, У. И. Сафронова, А. М. Урнов, Труды ФИАН **119**, 13 (1980).
3. Л. А. Вайнштейн, И. И. Собельман, Е. А. Юков, *Возбуждение и уширение спектральных линий*, М.: Наука, 1979.
4. M. Arnaud and R. Rothenflug, *Astron. Astrophys. Suppl. Ser.* **60**, 425 (1985).
5. A. P. Shevelko, Yu. S. Kasyanov, O. F. Yakushev, and L. V. Knight, *Rev. Sci. Instrum.* **73**, 3458 (2002).
6. Ю. А. Вайнер, А. Е. Пестов, К. А. Прохоров и др. *ЖЭТФ* **130**, 401 (2006).
7. M. S. Bibishkin, N. I. Chkhalo, A. A. Fraerman et al., *Nucl. Instrum. and Methods A* **543**, 333 (2005).
8. С. С. Андреев, М. С. Бибишкин, Н. Kimura и др. *Известия РАН, серия физ.* **69**, 207 (2005).