

УДК 535.33.539.26 : [546.821+546.72]=128

## НАБЛЮДЕНИЕ СПЕКТРОВ Ti XXI—Fe XXV В РЕНТГЕНОВСКОМ ИЗЛУЧЕНИИ ЛАЗЕРНОЙ ПЛАЗМЫ

Ю. А. Михайлов, С. А. Пикуз, Г. В. Склизков,  
А. Я. Фаенов и С. И. Федотов

С помощью светосильных рентгеновских спектрографов получены спектры He-подобных ионов Ti XXI . . . Fe XXV, образующихся в лазерной плазме при плотности потока нагревающего излучения  $\sim 10^{14}$  Вт/см<sup>2</sup>. Характерной особенностью полученных спектров является наличие интенсивных спутных линий, соответствующих переходам с дважды возбужденных уровней Li-, Be- и т. д. ионов. Измеренная электронная температура составила  $\sim 800$  эВ, ионизационная температура —  $\sim 500$  эВ, что свидетельствует о том, что лазерная плазма в условиях эксперимента была ионизирующейся. Проводится сравнение спектра Fe XXV, полученного в настоящей работе, с ранее полученными спектрами в солнечной короне и вакуумной искре.

### В в е д е н и е

В проблеме лазерного управляемого термоядерного синтеза наряду с созданием мощных лазерных установок [1] важное место занимают разработка и совершенствование диагностических методик и приборов для исследования параметров плазмы [1, 2]. Высокотемпературная сверхплотная лазерная плазма является интенсивным источником рентгеновского излучения [2, 3], которое несет информацию о таких важных параметрах плазмы, как температура и плотность. Для проведения измерений этих параметров методами рентгеновской спектроскопии в лазерные термоядерные мишени могут быть введены тяжелые элементы в виде примесей или оболочек.

При выборе примесей следует учитывать, что для каждого элемента существует оптимальный, с точки зрения чувствительности метода и точности измерений, диапазон температур [4]: чем выше температура, тем больше должен быть заряд ядра  $Z$ . Измерение температур  $T_e \geq 1$  кэВ потребует использования элементов с  $Z > 20$ .

Соответствующие спектральные линии H- и He-подобных ионов, по которым можно производить измерения параметров плазмы, лежат в области длин волн  $\lambda \leq 3$  Å. Особый интерес к таким ионам объясняется тем, что их рентгеновские спектры характеризуются относительно простой структурой, позволяющей проводить достаточно надежные сравнения экспериментальных данных с теоретическими работами [5, 8].

В лазерной плазме, образующейся при потоке нагревающего излучения на мишени  $\sim 10^{14}$  Вт/см<sup>2</sup> как в плоском случае [2, 9], так и в случае сферического облучения [1, 10], электронная температура в корональной модели составляет  $\sim 1$  кэВ. При таких температурах для элементов с  $Z > 20$  доля H- и He-подобных ионов в лазерной плазме невелика и для регистрации спектров в диапазоне длин волн 0.5 . . . 3 Å за одну вспышку лазера необходима светосильная спектральная аппаратура. Использование в этой области фокусирующих схем спектрографов, работающих на отражение от кристаллов, ограничено существенным ухудшением спектрального разрешения, что связано с малыми углами падения

на кристалл [11]. Поэтому для этой цели был использован светосильный спектрограф, выполненный по схеме Кошуа, обеспечивающий регистрацию спектров в области длин волн  $\lambda \leq 3 \text{ \AA}$  [21].

В настоящей работе для нагрева плазмы использовался неодимовый лазер с выходной энергией  $\sim 20 \text{ Дж}$  при длительности импульса  $\sim 2 \text{ нс}$ .

Лазерное излучение фокусировалось на поверхность плоской массивной мишени, при этом плотность потока составляла  $\sim 10^{14} \text{ Вт/см}^2$ .

На рис. 1 приведены денситограммы Ti XXI и Cr XXIII, полученные с помощью спектрографа по схеме Иоганна с кристаллом LiF, изогнутым по радиусу 500 мм, а также V XXII и Fe XXV, полученные со спектрографом по Кошуа с кристаллом LiF, изогнутым по радиусу 150 мм.

Характерной особенностью полученных спектров He-подобных ионов является наличие интенсивных спутных линий, соответствующих переходам с дважды возбужденных уровней ионов более низкой кратности (Li-, Be- и т. д. подобные спутники). Если в спектрах гелиеподобных ионов с  $Z < 17$  наблюдались в основном спутники, соответствующие переходам в Li-подобных ионах [4, 12], то в настоящей работе для элементов с  $Z > 20$  наблюдаются также спутники, соответствующие переходам в других L-ионах: Be-подобные спутники в спектрах Ti и V, Be-, B-подобные спутники в спектре Cr, Be-, B- и C-подобные спутники в спектре Fe. Заселение дважды возбужденных уровней в ионе с зарядом  $Z_i$  в принципе возможно двумя путями: 1) путем диэлектрон-

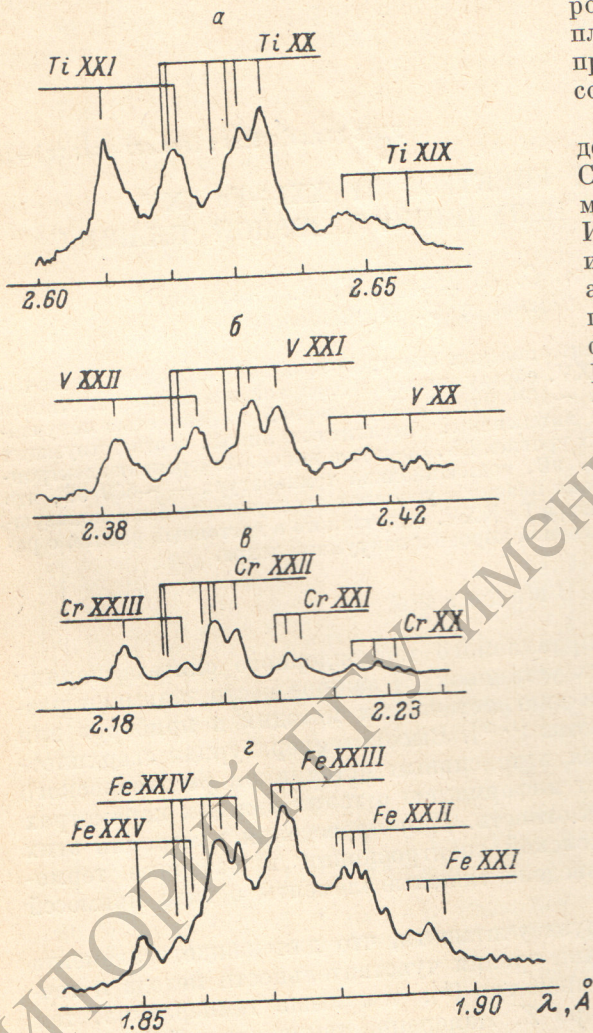


Рис. 1. Денситограммы He-подобных ионов Ti XXI, V XXII, Cr XXIII, Fe XXV, образующихся в лазерной плазме при потоке нагревающего излучения  $\sim 10^{14} \text{ Вт/см}^2$ .

а —  $T_e = 770$ ,  $T_z = 440 \text{ эВ}$ ; б —  $T_e = 800$ ,  $T_z = 440 \text{ эВ}$ ;  
в —  $T_e = 830$ ,  $T_z = 500 \text{ эВ}$ ; г —  $T_e = 830$ ,  $T_z = 500 \text{ эВ}$ .

ной рекомбинации иона ( $Z_i + 1$ ), 2) путем прямого возбуждения электрона из K-оболочки иона  $Z_i$ .

Отношение интенсивности спутника и интенсивности резонансной линии определяется [7, 8] в первом случае соотношением

$$\alpha(T_e) = \frac{I_{Z_i}^{д.з.}}{I_R} = \alpha(T_e) \frac{N_{Z_i+1}}{N_{He}} \frac{\Gamma_{\gamma} A_{\gamma\gamma_0}}{\Gamma_{\gamma} + \sum A_{\gamma\gamma_0}}, \quad (1)$$

а во втором случае соотношением

$$\xi(T_z) = \frac{I_{Z_i}^{н.в.}}{I_R} = \frac{N_{Z_i}}{N_{He}} c' \frac{A_{\gamma\gamma_0}}{\Gamma_{\gamma} + \sum A_{\gamma\gamma_0}}, \quad (2)$$

где  $I_R$  — интенсивность резонансной линии гелиеподобного иона,  $I_{Z_i}^{a.}$ ,  $I_{Z_i}^{n.}$  — интенсивности соответствующих сателлитов,  $N_{Z_{i+1}}$  и  $N_{Z_i}$  — концентрации соответствующих ионов,  $\alpha(T_e)$  — множитель, зависящий от электронной температуры плазмы  $T_e$ ,  $T_z$  — ионизационная температура,  $\Gamma_\gamma$  — вероятность автоионизации уровня  $\gamma$ ,  $A_{\gamma\gamma_0}$  — вероятность радиационного перехода с уровня  $\gamma$ ,  $\sum A_{\gamma\gamma_0}$  — сумма вероятностей по нижним состояниям,  $c'$  — скорость столкновительного возбуждения.

Например, по данным [7], в случае иона Fe XXV величины  $\alpha(T_e)$  и  $\xi(T_z)$  для сателлита  $j^1$  составляют соответственно 4.2 и 0.026 при  $T_e = T_z = 930$  эВ.

Существует ряд Li-подобных сателлитов, которые обусловлены в основном диэлектронной рекомбинацией, т. е. их интенсивности не зависят от электронной плотности и ионизационного состояния плазмы и определяются только электронной температурой [см. формулу (1)]. Электронная температура, определенная по самым интенсивным из них  $k$  и  $j$ , приведена на рис. 1.

С другой стороны, имеются Li-подобные сателлиты, обусловленные в основном прямым возбуждением снизу, интенсивности которых существенным образом зависят от ионизационного состояния плазмы, т. е. отношения  $N_{Li}/N_{He}$  [см. формулу (2)]. Для характеристики ионизационного состояния плазмы в работе [7] была введена так называемая ионизационная температура  $T_z$ , причем  $T_z = T_e$  соответствует равновесной плазме,  $T_z < T_e$  — ионизирующейся плазме,  $T_z > T_e$  — рекомбинирующей плазме. Используя данные работы [7], в настоящей работе определена величина  $T_z$  по отношению интенсивностей сателлитов  $q$  и  $a$  к интенсивности резонансной линии (более подробно методика определения  $T_z$  и  $T_e$  описана в [4]). Величина  $T_z$  в данных экспериментах составляет 400–500 эВ (рис. 1), т. е. отношение  $(T_z/T_e) \sim 0.6$ , что соответствует случаю ионизирующейся плазмы. Полученные в настоящей работе значения  $T_e \sim 800$  эВ для элементов с большим зарядом ядра указывают на то, что подобная методика характеризует в случае измерения по ионам максимальной кратности наиболее горячую область плазмы в отличие от измерений по спектрам He-подобных ионов с зарядом ядра  $Z=12 \div 20$  [9, 13, 14]. В последнем случае измеренная  $T_e$  изменялась от  $\sim 250$  до  $\sim 600$  эВ при переходе от Mg к Ca.

Для исследуемых ионов с зарядами ядер  $Z=22 \div 25$  при температуре  $\sim 800$  эВ интенсивности Li-подобных сателлитов становятся сравнимыми с интенсивностями резонансной и интеркомбинационной линии, а в спектре He-подобного железа значительно превосходят их, что хорошо согласуется с теорией (рис. 2, з). В наблюдаемом спектре железа максимальную интенсивность имеют линии, соответствующие Be-подобным сателлитам, что качественно соответствует расчетам [8]. По этим сателлитам также в принципе можно проводить измерения параметров плазмы.

Таким образом, рентгеновские спектры He-подобных ионов элементов с зарядом ядра  $Z \sim 25$  могут быть использованы для определения электронной температуры и ионизационного состояния наиболее горячей области плазмы. При измерении характерной температуры методом фильтров возникают сложности, связанные с возможными отклонениями спектра электронов от максвелловского, т. е. в определении электронной температуры термализованной части плазмы. В методе [12], основанном на измерении электронной температуры по отношению интенсивностей резонансных линий H- и He-подобных ионов, точность определения  $T_e$  существенно зависит от выбранной модели ионизационного равновесия и тщательности калибровки спектральной аппаратуры. Рассматриваемая в настоящей работе методика измерения электронной температуры нечувствительна к выбору модели равновесия в плазме и наличию в спектре электронов высокоэнергетичного «хвоста». Анализ ионизационного со-

<sup>1</sup> Обозначения  $k, j, q, a$  — см. в работе [15].

стояния в лазерной плазме по интенсивностям сателлитов, обусловленных внутриоболочечным возбуждением, может быть полезен при изучении механизмов поглощения и преобразования энергии нагревающего излучения в корональной области плазмы.

В заключение следует отметить, что полученные в настоящей работе спектры представляют интерес для астрофизики. Особенно это относится к спектру железа, которое является наиболее обильным тяжелым элементом на солнце [16].

На рис. 2, а приведен спектр железа, зарегистрированный при солнечной вспышке [20], который соответствует электронной температуре в плазме короны  $T_e \sim 2150$  эВ и случаю равновесия ( $T_z = T_e$ ). При этом вклад в интенсивность сателлитов за счет возбуждения электронным ударом снизу невелик. В спектре вакуумной искры [19], с помощью которой делались попытки воспроизведения солнечного спектра [17-19], велико влияние возбуждения электронным ударом. При этом интенсивность сателлитов  $q$  и  $a$  более чем в два раза превышает интенсивность сателлитов  $k$  и  $j$ , обусловленных только диэлектронной рекомбинацией. Ионизационная температура составляет  $T_z \sim 1/3 T_e$ , т. е. плазма является сильно ионизующейся.

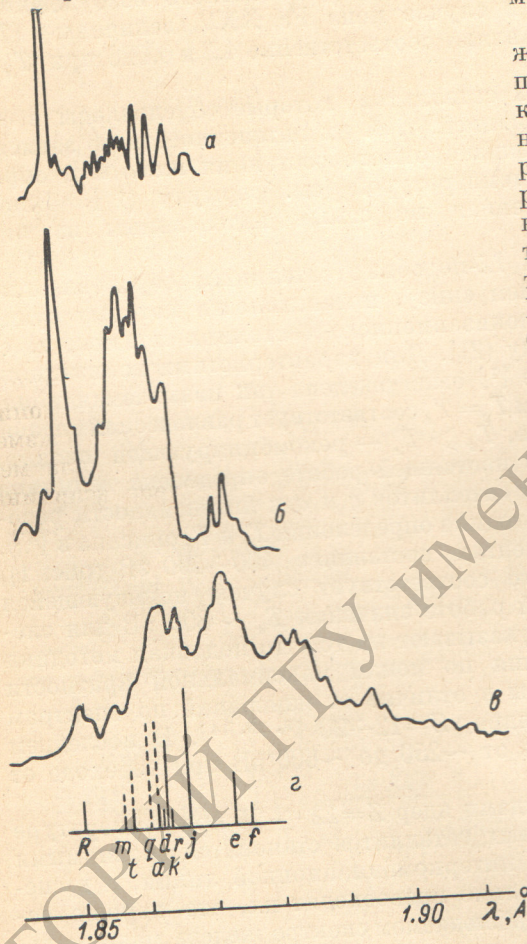


Рис. 2. Характерные денситограммы Не-подобных ионов Fe XXV.

а — в спектре солнечной короны [25],  $T_e = 2150$ ,  $T_z = 2150$  эВ; б — в спектре вакуумной искры [24],  $T_e = 2330$ ,  $T_z = 710$  эВ,  $N_e = 3 \cdot 10^{20}$  см<sup>-3</sup>; в — спектр настоящей работы,  $T_e = 830$ ,  $T_z = 500$  эВ,  $N_e > 10^{21}$  см<sup>-3</sup>; z — теоретический спектр, рассчитанный по данным работы [12] для случая в.

Лазерная плазма в настоящем эксперименте характеризуется меньшей температурой (рис. 2, в), а также промежуточным по отношению к условиям в солнечной короне и вакуумной искре ионизационным состоянием ( $T_z \sim 0.6 T_e$ ). Интенсивности сателлитов  $q$  и  $a$  в этом случае сравнимы с интенсивностями сателлитов  $k$  и  $j$ . Отсутствие в спектрах лабораторных источников линий, соответствующих магнитоквадрупольному переходу  $1s^2 1S_0 \rightarrow 1s2p 3P_2$  и магнитодипольному переходу  $1s^2 1S_0 \rightarrow 1s2s 3S_0$ , связано с высокой электронной плотностью ( $N_e \geq 10^{20}$  см<sup>-3</sup>).

Из сопоставления лабораторных и астрофизических спектров ясно, что лазерная плазма по физическим условиям ближе к солнечной короне, чем вакуумная искра. Принципиальным здесь является то, что процессы ионизации и возбуждения и в короне, и в лазерной плазме имеют тепловой характер в отличие от вакуумной искры, где они определяются ускорительными механизмами.

Авторы благодарны Н. Г. Басову, О. Н. Крохину за интерес к работе, В. А. Бойко, У. И. Сафроновой, А. М. Урнову, В. А. Чиркову, Е. А. Юкову за обсуждение результатов.

## Литература

- [1] Н. Г. Басов, О. Н. Крохин, Г. В. Склизков, С. И. Федотов. Тр. ФИАН СССР, *76*, 146, 1974.
- [2] В. А. Бойко, О. Н. Крохин, Г. В. Склизков. Тр. ФИАН СССР, *76*, 186, 1974.
- [3] А. А. Кологривов, Ю. А. Михайлов, Г. В. Склизков, С. И. Федотов, А. С. Шиканов, Н. Р. Шпольский. Квантовая электроника, *2*, 2223, 1975.
- [4] В. А. Бойко, С. А. Пикуз, А. Я. Фаенов. Препринт ФИАН СССР, № 17, 1976.
- [5] Л. А. Вайнштейн, У. И. Сафронова. Препринт ИСАН № 6, М., 1975.
- [6] А. В. Виноградов, И. И. Собельман, Е. А. Юков. Квантовая электроника, *1*, 268, 1974.
- [7] С. Р. Bhalla, A. H. Gabriel, L. O. Presnyakov. Mon. Not. R. astr. Soc., *172*, 359, 1975.
- [8] Yu. I. Grineva, U. I. Safronova, A. M. Urnov. Preprint № 58, Lebedev Physical Institute, Academy of Sciences of the USSR, Moscow, 1975.
- [9] В. А. Бойко, О. Н. Крохин, С. А. Пикуз, А. Я. Фаенов, А. Ю. Чугунов. Физика плазмы, *1*, 309, 1975.
- [10] B. R. Guscott, G. Charatis, J. S. Hildum, R. R. Johnson, F. J. Mayer, N. K. Moncur, D. E. Solomon, C. E. Thomas. Report at the VII European Conf. on Controlled Fusion and Plasma Physics, Switzerland, 1975.
- [11] И. Б. Боровский. Физические основы рентгеноспектральных исследований. гл. 12. Изд. МГУ, 1956.
- [12] D. J. Nagel, P. G. Burkhalter, C. M. Dozier, J. F. Holzrichter, B. M. Klein, J. M. McMahon, J. A. Stampfer, R. R. Whitlock. Phys. Rev. Lett., *33*, 743, 1974.
- [13] В. А. Бойко, О. Н. Крохин, С. А. Пикуз, А. Я. Фаенов. Квантовая электроника, *1*, 2178, 1974.
- [14] В. А. Бойко, С. А. Пикуз, А. Я. Фаенов. Квантовая электроника, *2*, 1216, 1975.
- [15] Е. В. Аглицкий, В. А. Бойко, С. М. Захаров, С. А. Пикуз, А. Я. Фаенов. Квантовая электроника, *1*, 908, 1974.
- [16] И. Л. Бейгман. Интерпретация рентгеновских спектров Солнца. Астрономия (итоги науки и техники), ВИНТИ, М., 1974.
- [17] T. N. Lie, R. C. Elton. Phys. Rev., *43*, 865, 1971.
- [18] B. S. Fraenkel, J. L. Schwob. Phys. Lett., *40*, 83, 1972.
- [19] Э. Я. Гольц, М. А. Житник, Э. Я. Кононов, С. Л. Мандельштам, Ю. В. Сидельников. Препринт ИСАН № 4, М., 1974.
- [20] Yu. I. Grineva, V. I. Karev, W. Korneev, V. V. Krutov, S. L. Mandel'stam, L. A. Vainstein, B. N. Vasiliev, I. A. Zhitnik. Solar Physics, *29*, 441, 1973.
- [21] Ю. А. Михайлов, С. А. Пикуз, Г. В. Склизков, А. Я. Фаенов, С. И. Федотов. Препринт ФИАН СССР, *21*, М., 1976.

Поступило в Редакцию 6 мая 1976 г.