

НАБЛЮДЕНИЕ РЕНТГЕНОВСКИХ СПЕКТРОВ ХРОМА И ЖЕЛЕЗА В ПЛАЗМЕ УСТАНОВКИ "ТОКАМАК-10"

*Е.В. Аглицкий, В.А. Ранцев-Картинов,
М.М. Степаненко, Д.А. Щеглов*

На установке Т-10 получены рентгеновские спектры высокоионизованных атомов Fe и Cr с энергетическим разрешением 20 эв. Параметры плазмы $n_e(0) \sim 7 \cdot 10^{13} \text{ см}^{-3}$ и $T_e(0) \sim 1,2 \text{ кэВ}$. Из анализа спектров получена оценка примеси хрома $n_{Cr} = 10^{10} \text{ см}^{-3}$.

Изучение спектров многозарядных ионов представляет не только общефизический интерес, но и может быть использовано в качестве эффективного метода измерения параметров высокотемпературной плазмы. Это объясняет появление большого числа как экспериментальных, так и теоретических работ, посвященных регистрации и анализу таких спектров в космической и лабораторной плазме [1 – 7].

На установке Т-10 авторами была проведена регистрация рентгеновского спектра в диапазоне энергий квантов $E = 5, 3 \dots 7 \text{ кэВ}$ с энергетическим разрешением 20 эв. В спектрографе, собранном по схеме Иоганна, был применен кристалл LiF, вырезанный по плоскости (200) и изогнутый по радиусу 30 см. Расположение спектрографа на установке показано на рис. 1.

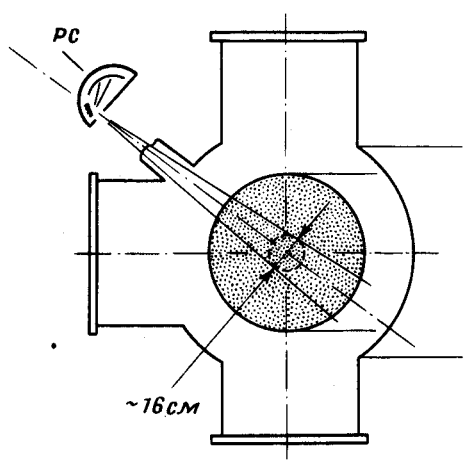


Рис. 1. Схема расположения спектрографа на установке Токамак-10

Экспозиция производилась сериями из ~ 80 разрядов, большинство из которых имело параметры, близкие к описанным в работе [8]: ток в плазме составлял 400 кА , продольное магнитное поле 35 кЭ , электронная температура и плотность в центре шнура $1,2 \text{ кэВ}$ и $7 \cdot 10^{13} \text{ см}^{-3}$. Участки спектра, полученного в одной из серий, воспроизведены на рис. 2. Там же приведены положения основных линий перехода $1s-2p$ для различных ионизационных состояний (символы спектроскопические).

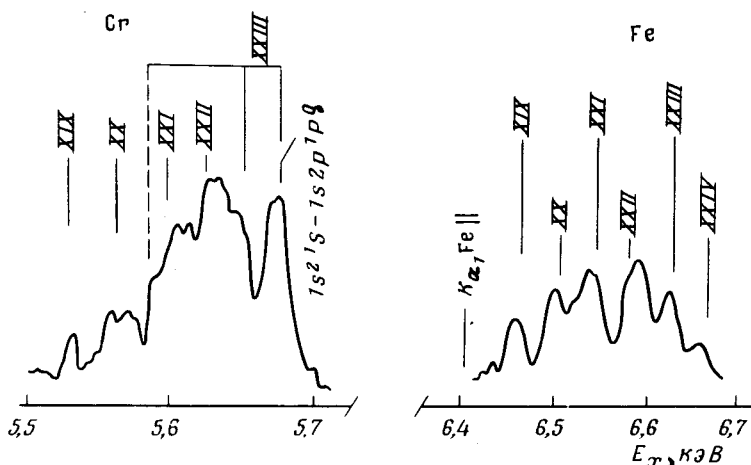


Рис. 2. Усредненные микрофотограммы рентгеновских спектров одной серии разрядов Т-10

Следует отметить сходство этого спектра с результатами, приведенными в работах [3 – 5], и, в особенности со спектром железа, полученным с помощью кристаллического монохроматора на токамаке ST при такой же электронной температуре в центре плазменного шнура [5]. Однако, и рентгеновский спектр железа, полученный на ST, и спектр железа на Т-10 отличаются от результатов вычислений, проведенных в работе [7] в рамках стационарной модели. Это в равной степени относится и к спектру хрома, – рассчитанному авторами и измеренному на Т-10. Оценки показывают, что не удастся полностью объяснить различие между расчетным спектром и экспериментальным спектром на Т-10, даже если принять во внимание радиальное распределение электронной температуры и плотности и вклад излучения на начальной и конечной стадиях разряда. Возможно, что для объяснения требуется учесть такие факторы, как конечное время пребывания ионов в горячей центральной зоне плазменного шнура, а также неточность использованных в расчетах скоростных коэффициентов ионизации и рекомбинации. Так, например, экспериментальные спектры железа на ST и Т-10 более похожи на тот вариант теоретического спектра, который получен в [7] при уменьшенных вдвое (по сравнению с основным вариантом расчета) скоростях ионизации (см. также [9]).

Полученные спектры тяжелых примесей совместно с абсолютными измерениями потока квантов этих групп линий могут быть использованы для оценок концентраций хрома и железа в центральной зоне плазменного шнура. Один из подходов к таким оценкам основан на использовании мощности излучения всей группы "К-линий" при заданной тем-

пературе T_e и сопоставлении этой мощности с результатами измерений. Второй подход заключается в использовании измерений и расчетов мощности отдельной спектральной линии и может быть применен, например к He-подобному иону хрома Cr XXIII (см. переход $1s-2p\ ^1P_1$ на рис. 2). При этом для оценок полного количества хрома необходимо провести расчет доли He-подобных ионов. Вычисление мощности излучения всех ионов не требуется и, следовательно, в отличие от первого случая отпадает необходимость в знании ряда скоростных коэффициентов. В результате применения второго подхода, для хрома была получена следующая оценка концентрации: $n_{Cr} = 10^{10}\text{ см}^{-3}$ в центральной области плазменного шнура. При этом были использованы независимые экспериментальные результаты измерений в этой области спектра с помощью пропорционального счетчика, приведенные в работе [8].

Отметим, что для Т-10 измерения концентрации хрома представляют особый интерес. Дело в том, что конструкционные материалы вакуумной камеры содержат примерно постоянный процент хрома по отношению к суммарному количеству железа и никеля, что можно использовать для оценки вклада всех трех примесей в эффективный заряд ионов плазмы (в предположении, что соотношение концентраций этих элементов в плазме отражает их процентное содержание в стенках камеры). В данном случае оценки для центральной зоны шнура $\Delta Z_{eff} = 0,3$, что хорошо согласуется с результатами, полученными другими методами [8].

В заключение следует отметить, что анализ линейчатых рентгеновских спектров оказывается весьма полезным и эффективным методом исследования примесей в замкнутых системах типа токамак.

Авторы выражают искреннюю благодарность Н.М.Гегечкори и С.Ю.Лукьянову за постоянный интерес к работе и плодотворные дискуссии.

Институт атомной энергии
им И.В.Курчатова

Поступила в редакцию
15 августа 1977 г.

Литература

- [1] Y.U.Grineva et al. Solar Phys., 29, 441, 1973.
- [2] W.M.Neupert, M.Swartz. Astrophys. J. 160, L189, 1970.
- [3] T.N.Lie, R.C.Elton. Phys. Rev., A3, 865, 1971.
- [4] B.S.Frankel, J.L.Schwob. Phys. Lett., 40A, 83, 1972.
- [5] N.Bretz et al. In Plasma Phys. and Controlled Nucl. Fusion Research 1974. Proc. 5-th Conf. (Tokyo) IAEA, Vienna, 1975, v.1, p.55.
- [6] Е.В.Аглицкий и др. Квантовая электроника, 1, 908, 1974.
- [7] A.L.Merts. R.D.Cowan, N.H.Magee Jr. Report LA-6226-ms, 1976.
- [8] A.B.Berlisov et al. In Nucl. Fusion Supplement, 1977. IAEA, Vienna. 1977, v.1, p. 3.
- [9] R.U.Datla, L.J.Nugent, H.R.Griem. Phys. Rev., A, 14, 979, 1976.