

04

Особенности динамики быстрого Z-пинча в среде тяжелых элементов, обнаруженные при исследовании поляризации рентгеновского излучения

© А.Н. Долгов, Н.А. Клячин, Д.Е. Прохорович

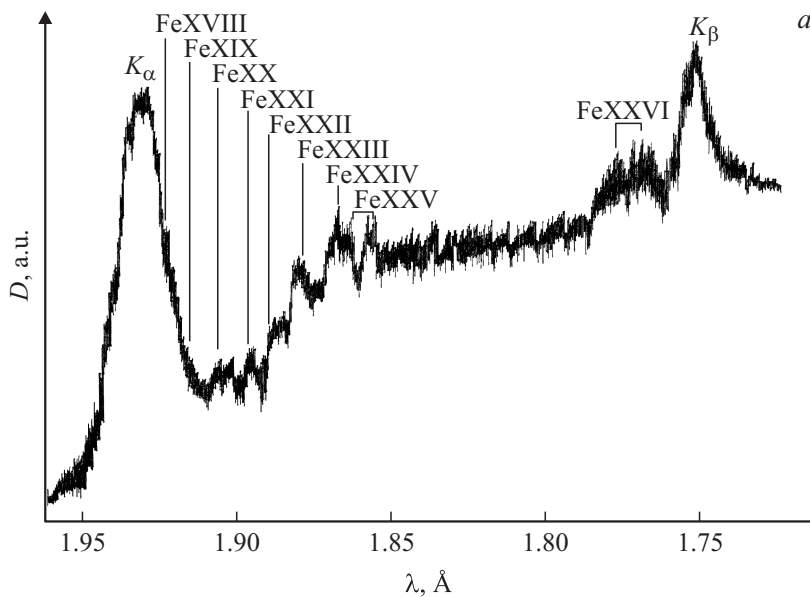
Национальный исследовательский ядерный университет (МИФИ), Москва
E-mail: prokhorovich73@mail.ru

Поступило в Редакцию 20 сентября 2013 г.

Приведены результаты спектрополяриметрии рентгеновского излучения микропинчевого разряда. Обнаружено, что поляризация в отдельных частях спектра носит различный характер, отражающий особенности протекающих процессов при развитии пинч-эффекта.

Диагностика высокотемпературной плазмы методами дифракционной спектроскопии высокого разрешения является источником уникальной информации о температуре, плотности и ионизационном состоянии вещества в экстремальных условиях. Дифракционной спектроскопии доступно исследование поляризации испускаемого плазмой излучения, что несет информацию о присутствии сильных электромагнитных полей и наличии анизотропии функции распределения электронов по скоростям. Таким образом, исследования поляризации рентгеновского излучения, испускаемого высокотемпературной плазмой на различных стадиях изучаемого процесса, способны сообщить дополнительные сведения о специфике протекания этого процесса. Отметим, что поляризация рентгеновского излучения была обнаружена в лазерной плазме, быстрых пинчевых разрядах, ионных ловушках [1–3].

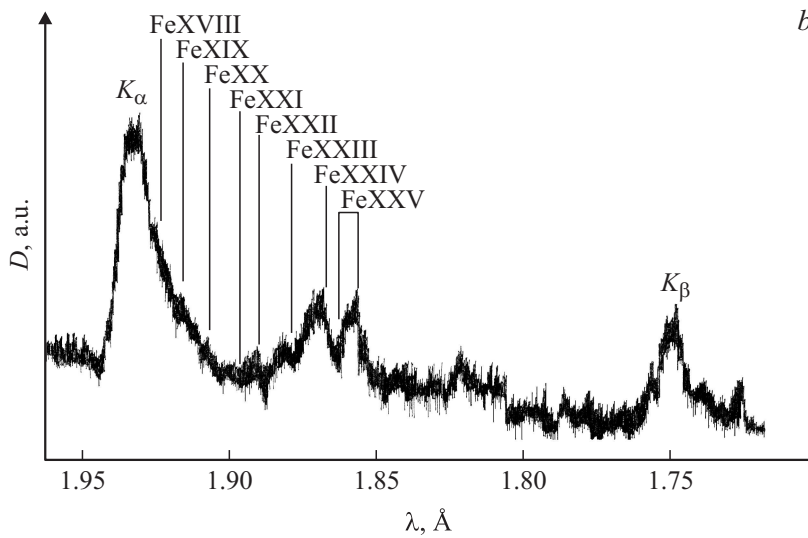
В представляемой работе авторы провели спектрополяриметрическое исследование рентгеновского излучения быстрого Z-пинча в среде тяжелых элементов в области характеристического спектра плазмообразующего элемента — железа. Быстрый Z-пинч в среде тяжелых элементов представляет интерес для изучения экстремальных состояний вещества и привлекает внимание исследователей в



Денситограмма зарегистрированного спектра излучения при ортогональной (*a*) и параллельной (*b*) относительно оси разряда ориентации плоскости дисперсии.

качестве высокоэффективного источника коротковолнового излучения для ряда приложений, таких как рентгенолитография, рентгеновская микроскопия биологических объектов, управляемый термоядерный синтез.

Разряд осуществлялся в устройстве типа низкоиндуктивной вакуумной искры [4]. Был реализован режим микропинчевания, т.е. сжатие токового канала собственным магнитным полем до образования области микронных размеров, называемой горячей точкой или микропинчем. Температура плазмы микропинча составляет 2–3 keV при плотности порядка плотности твердого тела 10^{28} m^{-3} . Длительность радиационного сжатия, в котором доминируют лучистые потери энергии и которое приводит к формированию микропинча, составляет порядка 10^{-10} s , что делает проведение измерений с соответствующим временным разрешением технически сложной задачей [5,6]. Для исследования поляризации рентгеновского излучения использовалась методика брэгговского отра-



Продолжение рисунка.

жения излучения от анализирующего кристалла под углами, близкими к углу Брюстера [7].

На рисунке представлены денситограммы спектров, зарегистрированных с помощью фокусирующего по схеме Иоганна кристаллического спектрографа на фотоэмульсионном детекторе при многоимпульсной экспозиции (50 разрядов) для двух случаев пространственной ориентации плоскости дисперсии кристалла: *a* — плоскость дисперсии ортогональна оси разряда; *b* — плоскость дисперсии параллельна оси разряда, в первом случае выделяется компонента вектора напряженности электрического поля падающей волны, направленная параллельно оси разряда, во втором — поперек оси разряда. На спектрограммах ярко выражено преобладание продольной ориентации электрического поля волны для тормозного континуума и излучения водородоподобного иона FeXXVI. Преимущественно продольная ориентация наблюдается и для излучения K_{α} -линии и сливающихся с ней линий ионов низкой кратности. В излучении ионов FeXVIII–FeXIX преоблада-

ет поперечная ориентация электрического поля волны, в излучении ионов FeXXIII–FeXXV вклад обеих компонент сопоставим.

Характер поляризации тормозного континуума и линейчатого излучения ионов низкой кратности при его анализе на основе имеющихся данных о динамике и параметрах микропинчового разряда [2,3,8] свидетельствует о том, что в плазме перетяжки, образующейся в результате 1-го (МГД) сжатия, развивается процесс ускорения электронов в осевом направлении под действием электростатического поля резистивной природы. Протекание 2-го (радиационного) сжатия сопровождается раскачкой поперечных колебаний плазмы и возникновением сильных поперечных электрических микрополей, оказывающих влияние на поляризацию излучения ионов FeXVIII–FeXXV. Завершение сжатия и разлет плазмы перетяжки в дальнейшем на фоне продолжающегося разогрева под действием аномального сопротивления ведет к затуханию колебаний, при том что условия для существования продольного электрического поля сохраняются. Как следствие — выраженная продольная ориентация электрического поля волны в излучении иона FeXXVI.

Таким образом, впервые методами дифракционной спектроскопии выявлены особенности поляризации рентгеновского излучения в области характеристического спектра плазмообразующего элемента. Показано, что особенности поляризации в отдельных частях спектра отражают особенности протекающих при пинч-эффекте процессов — развитие ускорительных процессов в квазистатическом продольном электрическом поле на стадиях МГД-сжатия и развала микропинча, генерация сильных поперечных электрических микрополей на стадии радиационного сжатия.

Список литературы

- [1] *Fujimoto T., Iwamae A.* Plasma Polarization Spectroscopy. N.Y.: Springer, 2007. 384 p.
- [2] *Пикуз С.А.* X-пинч. Экспериментальные исследования / Дис. докт. физ.-мат. наук. М.: Физический ин-т им. П.Н. Лебедева РАН, 2007. 238 с.
- [3] *Баронова Е.О.* Развитие методов рентгеновской спектроскопии и их применение в исследованиях плазмы сильноточных разрядов / РИЦ „Курчатовский институт“, Институт ядерного синтеза. 2009. 211 с.
- [4] *Долгов А.Н., Земченкова Н.В., Клячин Н.А., Прохорович Д.Е.* // Физика плазмы. 2010. Т. 36. № 9. С. 826.

- [5] *Erbert Ch.K., Koshelev K.N., Kunze H.-J.* // J. Quantitative Spectroscopy and Radiative Transfer. 2000. V. 65. P. 195.
- [6] *Sinars D.B., Pikuz S.A., Shelkovenko T.A., Chandler K.M., Hammer D.A.* // Rev. Sci. Instrum. 2001. V. 72. N 7. P. 2948.
- [7] *Баронова Е.О., Долгов А.Н., Якубовский Л.К.* // ПТЭ. 2004. № 6. С. 1.
- [8] *Кошелев К.Н., Сидельников Ю.В., Вихрев В.В., Иванов В.В.* Спектроскопия в горячей плазме многозарядных ионов. М.: Наука, 1991. 205 с.