Письма в ЖЭТФ, том 108, вып. 7, с. 483 – 486

Мониторинг $K_\alpha \div K_\beta$ спектра микропинча в плазме железа

А. Н. Долгов[+1)], Н. А. Клячин[*], Д. Е. Прохорович[+]*

[+] *Всероссийский научно-исследовательский институт автоматики им. Н.Л. Духова (ФГУП ВНИИА), 127055 Москва, Россия*

[*] *Национальный исследовательский ядерный университет "МИФИ" (НИЯУ МИФИ), 115409 Москва, Россия*

Поступила в редакцию 26 июля 2018 г.

После переработки 28 августа 2018 г.

Исследована изменчивость $K_\alpha \div K_\beta$ спектра излучения микропинча в плазме железа сильноточной вакуумной искры при регистрации в единичном разряде с помощью компактной диффузионной камеры в качестве детектора. Пространственная сепарация излучения осуществлялась методами дифракционной спектроскопии. Обнаружены свидетельства опережающего развития ускорительных процессов для электронной компоненты по отношению к процессу развала плазмы микропинча в результате ее аномального нагрева.

DOI: 10.1134/S0370274X18190050

Одним из самых продуктивных методов диагностики плотной горячей плазмы, несомненно, является дифракционная спектроскопия рентгеновского излучения. При исследовании плазмы с малым временем жизни и значительным разбросом параметров плазмы от импульса к импульсу важна возможность регистрации спектра излучения в единичном импульсе, что определяется чувствительностью и пространственным разрешением используемого детектора излучения. Трековые детекторы такие, как диффузионная камера, отличает помимо высокой чувствительности к ионизирующему излучению и высокого пространственного разрешения, нечувствительность к электромагнитным помехам, возможность получать, по крайней мере, первичную информацию в режиме реального времени и относительная простота [1, 2]. Цель описанных ниже экспериментов состояла в регистрации характеристического спектра излучения уникального объекта – микропинча, часто называемого "горячей точкой" или "плазменной точкой" в разряде сильноточной вакуумной искры [3] с использованием в качестве детектора малогабаритной диффузионной камеры [4]. Микропинч – локализованная область размером менее 0.1 мм горячей ($T_e \approx 1$ кэВ) плотной ($n_e \approx 10^{22}$ см$^{-3}$) плазмы, являющаяся в настоящее время одним из самых ярких лабораторных источников излучения в мягком рентгеновском диапазоне $1 \div 10$ кэВ [5].

В описываемых экспериментах разряд осуществлялся в вакуумной камере, откачанной до давления $10^{-5} \div 10^{-4}$ Торр, в продуктах эрозии электродов разрядного устройства. Электроды: анод – конический, катод – плоский были изготовлены из стали марки Ст3 и 12Х18Н10Т, соответственно, таким образом, основным элементом, присутствующим в плазме разряда, было железо. Кроме того известно, что микропинч в вакуумной искре образуется в продуктах эрозии внутреннего электрода [6, 7]. Диаметр основания анода – 4 мм, диаметр обращенной к аноду плоской поверхности катода – 20 мм. Расстояние между электродами составляло в ходе экспериментов $5 \div 7$ мм. Разряд инициировался слаботочным пробоем по поверхности диэлектрика (материал – фторопласт), встроенного в катод, что вызывало инжекцию форплазмы с поверхности катода по оси симметрии системы в межэлектродное пространство. Достигаемый в разряде ток составлял 120 кА при зарядном напряжении 15 кВ на источнике тока – конденсаторе емкостью 5 мкФ. Период разряда составлял 4 мкс. Процесс пинчевания происходил через 0.7–0.8 мкс после начала протекания тока в цепи. В момент образования микропинча величина тока составляла примерно 100 кА.

Рентгеновское излучение выводилось за пределы вакуумной камеры через вакуумноплотное бериллиевое окно толщиной 100 мкм. Предварительно выполненное обскурографирование плазмы разряда показало, что, во-первых, в спектральном диапазоне $\lambda < 0.4$ нм наиболее ярким источником излучения является микропинч, во-вторых, в условиях проводимого эксперимента сжатие плазмы разряда собственным магнитным полем приводит к формированию микропинча с вероятностью около $90 \div 95$ %. Пучок исследуемого рентгеновского излучения направлял-

1) e-mail: alnikdolgov@mail.ru

ся в чувствительный слой диффузионной камеры после отражения от диспергирующего кристалла. С целью изучения спектрального состава рентгеновского излучения разряда в области K-спектра железа в диапазоне $0.17 \div 0.20$ нм использовался фокусирующий спектрограф по схеме Иоганна на кристалле LiF ($2d = 0.4026$ нм) с радиусом изгиба 300 мм и дисперсией 10^{-3} нм/мм. Диффузионная камера располагалась таким образом, чтобы круг Роуланда проходил внутри ее рабочего объема в плоскости чувствительного слоя. Входное окно в стенке диффузионной камеры, предназначенное для транспортировки регистрируемого излучения, шириной 50 мм (по горизонтали, т.е. в направлении дисперсии) и высотой 20 мм закрывалось пленкой лавсана толщиной 12 мкм. Треки освещались импульсной лампой, с временем свечения 1 мс и задержкой относительно момента разряда 300 мс и фиксировались фотоаппаратом на пленку флюорографическую медицинскую типа РФ-3 (ТАСМА, Россия). В дальнейшем при обработке снимков производилось их фотометрирование. Вид характеристической кривой плотности почернения для указанной комбинации детекторов, а именно: диффузионная камера + фотопленка, не определялся. Максимальное регистрируемое почернение фотопленки составило порядка единицы. Авторы не пытались произвести определение абсолютных значений таких параметров, как температура или плотность плазмы, путем сравнения интенсивностей наблюдаемых линий, так как посчитали подобную задачу для себя слишком сложной, и ограничились только качественным анализом полученных отображений спектров излучения.

В наших экспериментах использовалась диффузионная камера следующей конструкции. Камера имеет вертикальные стенки, выполненные из диэлектрического материала, обладающего низкой теплопроводностью, горизонтальное стеклянное окно (крышка) и массивное металлическое дно, снабженное каналами для транспортировки хладагента. В периферийной части дна камеры расположен испаритель – пропитанная рабочей жидкостью ткань при температуре, близкой к комнатной. Температура дна камеры примерно на 80 °C ниже температуры крышки и стенок камеры, что обеспечивается присутствием хладагента – сжиженного азота. Рабочая среда детектора – смесь воздуха при атмосферном давлении и паров этилового спирта. Насыщенные пары спирта диффундируют в область низких температур и постепенно становятся все более пересыщенными. В результате вблизи дна формируется горизонтальный чувствительный слой парогазовой смеси, т.е. область с пересыщением, достаточным для конденсации пара на ионах, диаметром 100 мм и толщиной примерно 3 мм. Прошедшая через чувствительный слой заряженная частица оставляет на своем пути цепочку центров конденсации – ионов, на которых вырастают капли размером до 30 мкм. Заряженными частицами в нашем случае являются вторичные электроны, рождающиеся при прохождении квантов рентгеновского излучения через парогазовую смесь. Под действием силы тяжести капли сконденсировавшейся жидкости, образующие трек, падают на дно камеры за время порядка 0.5 с.

Диффузионная камера оказалась эффективным детектором рентгеновского излучения в спектральном диапазоне $0.17 \div 0.20$ нм ($K_\alpha \div K_\beta$ железа). При сравнении спектров, зарегистрированных с помощью диффузионной камеры в единичном разряде, нетрудно увидеть их значительное качественное отличие от интегрального спектра, зарегистрированного с использованием рентенографической технической фотопленки типа РТ-1 (ТАСМА, Россия) в качестве детектора излучения в серии из 50 разрядов (рис. 1). В виде отдельных линий в спектре при использовании диффузионной камеры удалось зарегистрировать характеристическое излучение K_α и K_β железа и излучение многозарядных ионов FeXVIII $\div$ FeXXV. Излучение водородоподобного иона железа FeXXVI зарегистрировать не удалось. Линии излучения низ-

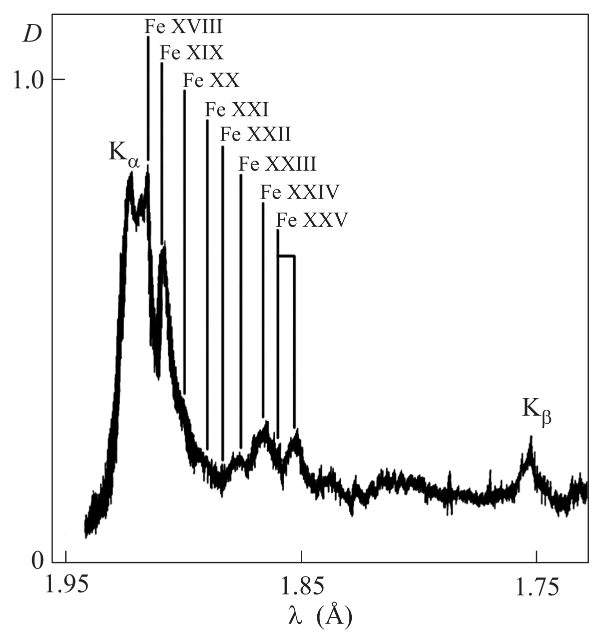

Рис. 1. Интегральный спектр, зарегистрированный с использованием рентгеновской фотопленки в качестве детектора излучения в серии из 50 разрядов

козарядных ионов сливались и не были различимы. Идентификация наблюдаемых в спектре линий характеристического излучения и линий излучения многозарядных ионов осуществлялось путем сравнения денситограмм зарегистрированных нами спектров с денситограммами спектров излучения микропинчевых разрядов в плазме железа, приводимых в научной литературе авторами, качество работ которых не может вызывать сомнений [8–10]. Форма регистрируемого спектра варьируется от разряда к разряду. Появление линии K_α в спектре регистрируемого излучения всегда сопровождается появлением излучения иона FeXVIII (рис. 2) и изображе-

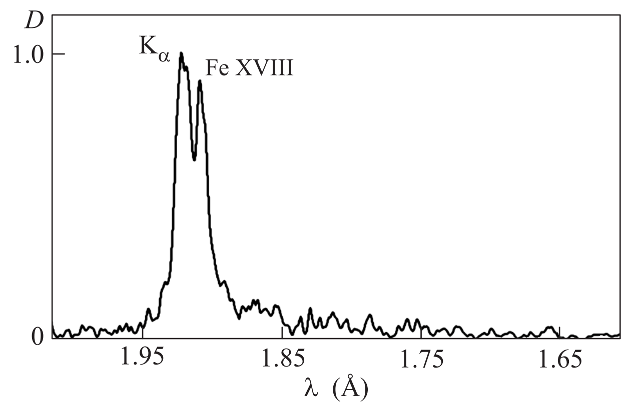

Рис. 2. Спектр, зарегистрированный с помощью диффузионной камеры. Появление линии K_α всегда сопровождается появлением излучения иона FeXVIII и изображением микропинча на обскурограмме. Регулярно наблюдается смещение от среднего положения, определяемого по положению пиков, соответствующих K_α и K_β, линий излучения ионов FeXXIII $\div$ FeXXV

нием микропинча на обскурограмме, что вполне соответствует модели радиационного сжатия [11, 12]. Регулярно наблюдается смещение от среднего положения, определяемого по положению пиков, соответствующих K_α и K_β, линий излучения ионов FeXXIII $\div$ FeXXV. Величина смещения составляет примерно $(2 \div 3) \cdot 10^{-4}$ нм, что соответствует, исходя из допплеровского механизма смещения, радиальному движению излучающих ионов со скоростью порядка $(2 \div 3) \cdot 10^5$ м/с и согласуется с ранее полученными результатами изучения корпускулярной эмиссии из микропинчевого разряда [13]. В данном случае речь не идет о движении излучающих частиц в процессе пинчевания, а имеется в виду движение в радиальном направлении участка плазменного канала тока как целого, например, в результате развития шланговой неустойчивости. Излучение линии K_β наблюдается далеко не в каждом разряде, а только примерно в 40 % случаев. Наличие в спектре излучения ионов наиболее высоких зарядностей FeXXIII $\div$ FeXXV, из числа зарегистрированных, не гарантирует появление в спектре излучения линии K_β (рис. 3, 4). Здесь можно усмотреть некоторое

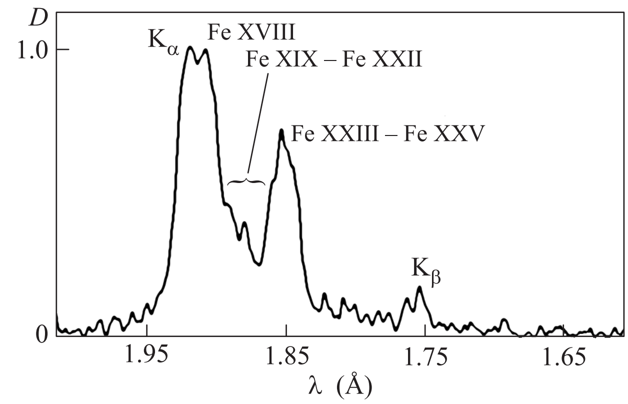

Рис. 3. Спектр, зарегистрированный с помощью диффузионной камеры. Наличие в спектре излучения ионов наиболее высоких зарядностей FeXXIII $\div$ FeXXV, из числа зарегистрированных, не гарантирует появление в спектре излучения линии K_β

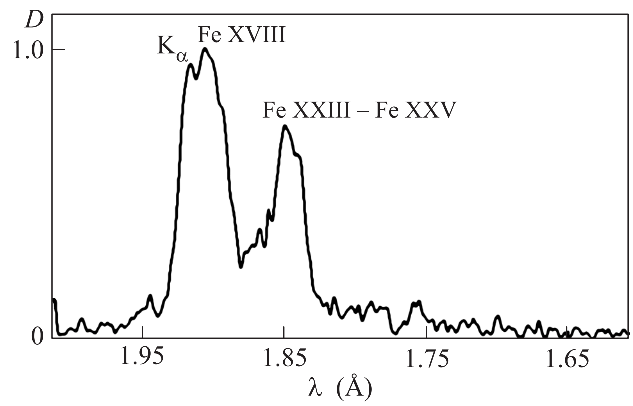

Рис. 4. Спектр, зарегистрированный с помощью диффузионной камеры. Наличие в спектре излучения ионов наиболее высоких зарядностей FeXXIII $\div$ FeXXV, из числа зарегистрированных, не гарантирует появление в спектре излучения линии K_β

противоречие между результатами эксперимента и предсказаниями модели радиационного сжатия, так как появление линий K_α и K_β принято связывать с аномальным разогревом плазмы на стадии развала микропинча, приводящим к рождению ионов высших зарядностей и ускорению электронов в квазистатическом поле резистивной природы. Если принять, что характеристическое излучение возникает под действием быстрых электронов в основном в плазме микропинча, то отсутствие K_β линии может означать, что на пути пучка электронов не оказалось ионов с кратностью ионизации ниже 16-й, а именно такая ситуация складывается в момент перехода к радиационному сжатию [11]. Напомним, что K_β линия соответствует переходам с M-оболочки на K-оболочку. При достаточно высокой степени ионизации плазмы на M-оболочке не остается электронов, и переходы под действием электронного пучка не наблюдаются. Таким образом, регулярное присутствие в спектре излучения K_β линии может свидетельствовать об опережающем развитии ускорительных процессов для электронной компоненты по отношению к процессу распада микропинча.

Компактная диффузионная камера показала себя удобным инструментом для исследования импульсной высокотемпературной плазмы, обладающим достаточно высоким пространственным разрешением для исследования особенностей линейчатого спектра рентгеновского излучения плотной плазмы методами дифракционной спектроскопии. Создание в ближайшей перспективе компактной диффузионной камеры, функционирующей при температуре выше температуры окружающей среды, отличительной чертой которой является создание температурного градиента при использовании в конструкции камеры нагреваемого элемента вместо охлаждаемого [14], позволит упростить конструкцию и эксплуатацию прибора, что даст в руки исследователей надежное и конкурентоспособное по его возможностям средство диагностики импульсных источников ионизирующего излучения.

1. В. К. Ляпидевский, УФН **66**(1), 111 (1958).
2. Н. Г. Полухина, УФН **182**(6), 656 (2012).
3. А. Н. Долгов, Н. В. Земченкова, Н. А. Клячин, Д. Е. Прохорович, Прикладная физика **37**(1), 79 (2011).
4. Н. А. Клячин, В. К. Ляпидевский, В. Ю. Максимов, ПТЭ **2**, 77 (1991).
5. Г. А. Месяц, Т. А. Шелковенко, Г. В. Иваненков et al. (Collaboration), ЖЭТФ **138**(3), 411 (2010).
6. А. Н. Долгов, Г. Х. Салахутдинов, Физика плазмы **29**(9), 818 (2003).
7. А. Н. Долгов, Н. В. Земченкова, Н. А. Клячин, Д. Е. Прохорович, Физика плазмы **36**(8), 826 (2003).
8. Э. Я. Гольц, И. А. Житник, Э. Я. Кононов, С. Л. Мандельштам, Ю. В. Сидельников, ДАН СССР **22**(3), 560 (1975).
9. Э. Я. Кононов, К. Н. Кошелев, Ю. В. Сидельников, Физика плазмы **3**, 663 (1977).
10. P. G. Burkhalter, C. M. Dozier, C. Stalling, and R. D. Cowan, J. Appl. Phys. **49**, 1092 (1978).
11. В. В. Вихрев, В. В. Иванов, К. Н. Кошелев, Физика плазмы **8**(6), 1211 (1982).
12. С. И. Блинников, В. С. Имшенник, Физика плазмы **8**, 193 (1982).
13. А. Н. Долгов, Физика плазмы **22**(6), 663 (1996).
14. Н. П. Калашников, Н. А. Клячин, О. А. Поваляев, С. В. Хоменко, Физическое образование в вузах **17**(3), 42 (2011).