

МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ СПЕКТРОВ ИМПУЛЬСНОГО РЕНТГЕНОВСКОГО ИЗЛУЧЕНИЯ И ЭМИССИИ ЭЛЕКТРОНОВ ПЛАЗМЫ МИКРОПИНЧЕВОГО РАЗРЯДА

© 2020 г. О. А. Башутин^а, И. Г. Григорьева^а, А. Н. Корф^а, Г. Х. Салахутдинов^{а,*}

^а Национальный исследовательский ядерный университет “МИФИ”
Россия, 115409, Москва, Каширское ш., 31

*e-mail: saip07@mail.ru

Поступила в редакцию 02.12.2019 г.

После доработки 02.12.2019 г.

Принята к публикации 15.12.2019 г.

Приведены результаты экспериментальных исследований спектрального состава импульсного рентгеновского излучения и эмиссии электронов плазмы микропинчового разряда в широком, 1–300 кэВ, энергетическом диапазоне. Исследования проводились на установке “низкоиндуктивная вакуумная искра” при различных токах разряда. Полученные результаты позволяют определить влияние тока разряда на спектральный состав рентгеновского излучения и эмиссии электронов плазмы микропинчового разряда.

DOI: 10.31857/S0032816220030088

ВВЕДЕНИЕ

Исследования спектрального состава импульсного высокоинтенсивного рентгеновского излучения ведутся во многих областях науки и техники, в том числе и в физике плазмы. Рентгеновская диагностика плазменных объектов является важным источником информации о параметрах излучающей плазмы и протекающих в ней физических процессах [1–5].

Особый интерес вызывает исследование рентгеновского излучения плазмы, генерируемой на импульсных сильноточных электроразрядных установках. К последним относятся и установки типа “низкоиндуктивная вакуумная искра”, на которых при определенных условиях реализуется режим микропинчевания. Этот режим сопровождается образованием уникального объекта – плазменной точки или микропинча, представляющего собой область плотной горячей плазмы ($N_e \approx 10^{20}–10^{22} \text{ см}^{-3}$, $T_e \approx 1–10 \text{ кэВ}$) микронного размера, интенсивно излучающей рентгеновское излучение (до 10^{16} квантов за вспышку), с временем жизни $\leq 10 \text{ нс}$ [1–8]. При высоких параметрах образующей плазмы такие установки имеют относительно простую конструкцию и надежны в эксплуатации, что делает их перспективными как для фундаментальных исследований, так и для решения чисто прикладных задач в качестве мощных импульсных источников рентгеновского излучения.

Явление микропинчевания имеет достаточно общий характер для Z-пинчевых установок (“низкоиндуктивная вакуумная искра”, “плазменный фокус”, Z-пинчи с импульсной инжекцией газа) [1–4]) и является предметом интенсивных исследований, которые невозможно проводить без создания диагностической аппаратуры, позволяющей получать надежную информацию о физических процессах в плазме [5–10].

Измерение спектров импульсного рентгеновского излучения плазмы имеет ряд сложностей, связанных с тем, что при импульсе излучения малой длительности (от единиц до сотен наносекунд) возникает большое число квантов рентгеновского излучения ($\approx 10^{16}$), сопровождаемого сильной электромагнитной наводкой. В таких условиях эксперимента раздельная регистрация частиц, а следовательно, и их раздельная спектрометрия становится невозможной и, как правило, применяют различные многоканальные спектрометрические системы с предварительным разделением квантов по энергиям с помощью фильтров Россса или рентгеновских фильтров поглощения (метод “серых” фильтров) [3, 9].

Для дальнейшего исследования процессов, происходящих в плазме микропинчового разряда, авторами был создан и использован комплекс диагностической аппаратуры [9–11], позволяющий за один разряд в широком энергетическом диапазоне, от 1 до 300 кэВ, получить информацию о спектральном составе импульсного рентге-

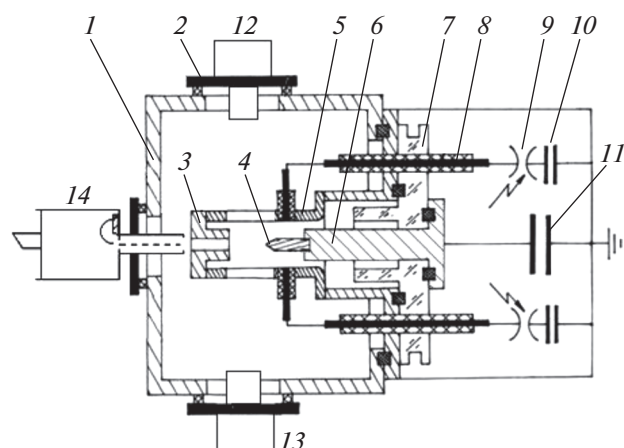


Рис. 1. Общая схема разрядной камеры и расположения диагностических приборов. 1 – вакуумная камера; 2 – диагностические окна; 3 – анод; 4 – катод; 5 – внешний токовод; 6 – внутренний токовод; 7 – разделительный изолятор; 8 – триггерное устройство; 9 – разрядник; 10 – конденсаторная батарея триггерного устройства; 11 – конденсаторная батарея в контуре основного разряда; 12, 13 – сцинтилляционные спектрометры, спектрометры на основе термолюминесцентных детекторов и ядерной эмульсии, воздушные камеры-обскуры, $p-i-n$ -диоды; 14 – магнитный спектрометр электронов.

новского излучения и эмиссии электронов плазмы в зависимости от тока разряда. Такие исследования дают возможность определить влияние как тока разряда на физические процессы, протекающие в микропинчевом разряде, так и микропинчевания на процесс образования жесткого рентгеновского излучения.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ МЕТОДИКА И РЕЗУЛЬТАТЫ

Эксперименты проводились на сильноточной импульсной электроразрядной установке “низкоиндуктивная вакуумная искра” (НИЯУ “МИФИ”), конструкция и параметры которой описаны в [8, 11]. Разряд в установке осуществлялся в вакуумной камере, откачанной до вакуума не хуже 10^{-4} Торр. Рабочим веществом разряда являлись пары материалов анода разрядного устройства, выполненного из железа. Импульсный источник тока – батарея конденсаторов с суммарной емкостью 20 мкФ, период разряда – 8.5 мкс.

Общая схема разрядной камеры установки и расположение диагностической аппаратуры показаны на рис. 1. Плоский электрод-анод выполнен в виде цилиндра диаметром 20 мм с плоской торцевой поверхностью. Стержневой электрод-катод диаметром 3 мм и длиной 15 мм на конце заострен. Расстояние между электродами 5 мм. Конструкция разрядной системы позволяла изменять полярность электродов.

Исследования импульсного рентгеновского излучения плазмы в энергетическом диапазоне квантов 1–300 кэВ проводились с использованием разработанного авторами комплекса спектрометров рентгеновского излучения [9–11]. В частности, для исследования спектрального состава импульсов рентгеновского излучения плазмы в диапазоне энергий квантов 1–25 кэВ был использован малогабаритный спектрометр ($\varnothing 5 \times 10$ мм), представляющий собой сборку из одиннадцати детекторов из LiF, расположенных друг за другом [10]. Фильтрами поглощения, осуществляющими спектроселекцию рентгеновского излучения, служили термолюминесцентные детекторы.

Спектральный состав рентгеновского излучения в диапазоне 15–100 кэВ измерялся помехоустойчивым многоканальным спектрометром на основе сцинтилляторов из кристаллического иодида цезия с активационной добавкой таллия CsJ(Tl) (с большим атомным зарядом $Z_{эф} = 54$ и размером $\varnothing 15 \times 20$ мм) в непосредственном оптическом контакте с входными окнами малогабаритного ФЭУ-60.

В жесткой части спектра (свыше 80 кэВ) исследования подробно проводились с использованием четырехканального сцинтилляционного спектрометра. Для повышения эффективности регистрации и точности измерения были использованы кристаллы иодида цезия с активационной добавкой таллия CsJ(Tl) ($\varnothing 30 \times 35$) больших размеров в непосредственном оптическом контакте со спектрометрическим ФЭУ-85 [9].

Калибровка спектрометров проведена с помощью точечных радиоактивных источников с различными энергиями γ -квантов и рентгеновских трубок. В процессе калибровки был определен динамический диапазон комплекса спектрометров, который составил 10^{12} .

Сцинтилляционные спектрометры крепились к диагностическим окнам разрядной камеры и регистрировали рентгеновское излучение из области разрядных электродов (см. рис. 1).

В ходе экспериментов регистрировались интегральные по времени спектры рентгеновского излучения однократных сильноточных разрядов при токах разряда: 40, 90, 140, 190 кА (рис. 2).

Для исследования и измерения энергетических спектров электронов плазмы был разработан портативный спектрометр электронов на постоянных магнитах с поворотом пучка электронов на 180° . Прибор имел рабочий диапазон 10–500 кэВ и был откалиброван на электронном пучке. Спектрометр размещен в разрядной камере установки таким образом, чтобы его входная щель была соосна отверстию во внешнем электроде разрядного устройства. В качестве регистратора электронов использовалась ядерная эмульсия. Экспонирова-

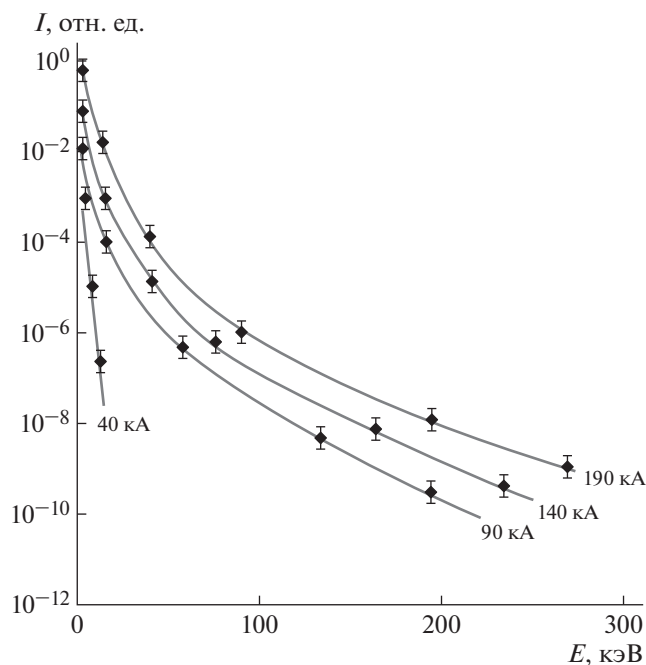


Рис. 2. Типичные спектры рентгеновского излучения плазмы железа, полученные при различных токах разряда (цифры у кривых).

ние осуществлялось за один микропинчевый разряд. Результаты эксперимента приведены на рис. 3.

Момент микропинчевания фиксировался по “особенностям” на осциллограмме разрядного тока, измеренного поясом Роговского, и по импульсам рентгеновского излучения, зарегистрированным *p-i-n*-диодом (с временным разрешением 1 нс). С использованием *p-i-n*-диода определялся момент генерации жесткого рентгеновского излучения относительно момента микропинчевания. Жесткое рентгеновское излучение исследовалось с применением фильтра отсечки. Перед детектором рентгеновского излучения устанавливалась медная фольга толщиной 300 мкм, которая на детектор пропускала только жесткое рентгеновское излучение, поглощая мягкое. Было определено, что максимальная величина жесткой компоненты рентгеновского излучения возникает одновременно с плазменной точкой. Длительность жесткой компоненты рентгеновского излучения составляла порядка 10–15 нс.

Исследование пространственной структуры плазменного объекта в диапазоне рентгеновского излучения квантов с энергией более 3 кэВ проводилось с помощью камеры-обскуры с разрешением не хуже 0.1 мм.

ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

Согласно модели “радиационного сжатия” [1, 4], наиболее подтвержденной экспериментальными

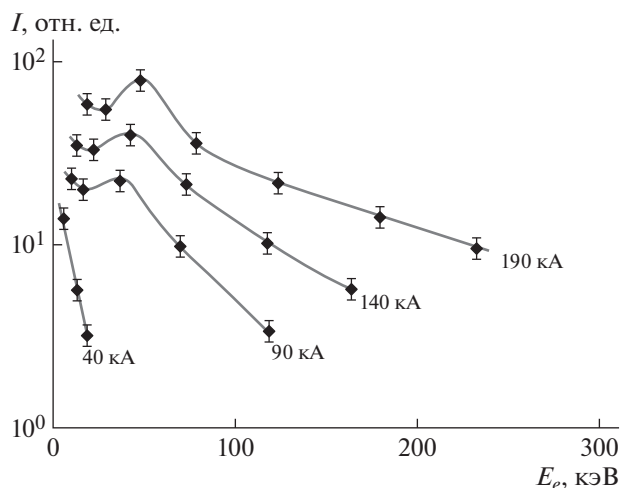


Рис. 3. Спектры быстрых электронов из плазмы железа при различных значениях тока разряда (цифры у кривых).

исследованиями, величина электронной температуры T_e плазмы увеличивается пропорционально росту разрядного тока. Величиной разрядного тока определяется степень сжатия и нагрева плазмы, количество и степень ионизации рабочего вещества плазмы. Процесс микропинчевания имеет пороговый характер, определяемый значением критического тока $I_{кр}$. При разрядном токе, превышающем значение критического тока ($I_p > I_{кр}$), происходит микропинчевание (для плазмы железа $I_{кр} = 50$ кА). Величина критического тока определяется балансом между потерями энергии на излучение и джоулевым тепловыделением в разряде. С ростом тока разряда (при условии $I_p > I_{кр}$) повышается интенсивность рентгеновского излучения.

Пороговый характер образования микропинча демонстрируют полученные обскурограммы (рис. 4). При токах разряда $I_p < I_{кр} = 50$ кА пинчевания не происходит (рис. 4а), а при $I_p > I_{кр}$ происходит пинчевание с образованием плазменной точки (рис. 4б).

Анализ спектров рентгеновского излучения плазмы микропинчевого разряда при различных токах разряда (см. рис. 2) показал, что при $I_p < I_{кр} = 50$ кА отсутствует жесткая составляющая рентгеновского излучения. Вид спектра существенно отличается от спектра с эффектом пинчевания.

На основании полученных результатов (см. рис. 2) для каждого измеренного спектра определялась электронная температура T_e плазмы. Установлено, что T_e плазмы увеличивается с ростом разрядного тока. С ростом тока разряда повышается степень сжатия и нагрева плазмы, количество и степень ионизации рабочего вещества плазмы, что

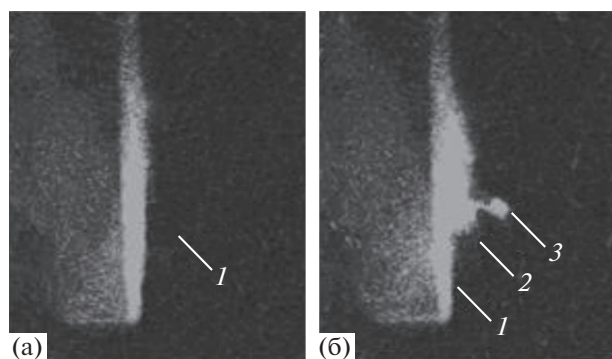


Рис. 4. Обскурограммы ($h\nu > 3$ кэВ) сильноточного электрического разряда (анодом является плоский электрод) при токах: < 50 кА (а) и > 50 кА (б) (ток разряда 150 кА). 1 – электрод; 2 – приэлектродная плазма; 3 – плазменные точки.

приводит к росту интенсивности рентгеновского излучения.

Интерес вызывает генерация мягкого ($h\nu < 15$ кэВ) и жесткого ($h\nu > 80$ кэВ) рентгеновского излучения и их взаимосвязь.

Высокоинтенсивное рентгеновское излучение с энергией $h\nu < 15$ кэВ возникает в результате микропинчевания, и его источником в значительной степени являются многократно ионизированные ионы рабочего вещества плазмы. В ходе экспериментов авторами статьи [11] было определено, что в плазме микропинчового разряда количество многократно ионизированных ионов и степень их ионизации возрастают с ростом разрядного тока, следовательно, повышается и интенсивность рентгеновского излучения. Следует отметить, что рентгеновское излучение из плазменной точки значительно выше, чем из прианодной плазмы [10] (количество многократно ионизированных ионов и их степень ионизации в плазменной точке значительно выше, чем в прианодной плазме [11]).

Полученные зависимости спектров рентгеновского излучения от тока микропинчового разряда позволяют определить влияние процесса микропинчевания на механизмы генерации жесткого рентгеновского излучения ($h\nu > 80$ кэВ). С ростом разрядного тока повышаются электронная температура T_e плазмы микропинча, а также интенсивность жесткого рентгеновского излучения (см. рис. 2).

Одним из основных механизмов, приводящих к возникновению жесткого рентгеновского излучения, является тормозное излучение ускоренных электронов. Ускорение электронов происходит в сильных электрических полях. В области перетяжки в результате аномально роста омического сопротивления R перетяжки плазменного столба [4] образуются спонтанные электрические поля с напряжениями, большими, чем на

разрядных электродах. Рост аномально высокого сопротивления перетяжки может быть объяснен турбулентными процессами, протекающими в плазме из-за развития в ней микронеустойчивостей (например, ионно-звуковой, электронно-звуковой) [4, 6, 7].

Непосредственная регистрация электронов магнитным спектрометром и одновременное измерение спектра рентгеновского излучения позволили сравнить полученные спектры. На обоих спектрах: эмиссии электронов (см. рис. 3) и рентгеновского излучения (см. рис. 2), измеренных при $I_p < I_{кр} = 50$ кА, отсутствует жесткая энергетическая составляющая излучения.

Эксперименты показали, что пик в спектре эмиссии электронов соответствует моменту образования плазменной точки на обскурограмме. Интенсивность эмиссии электронов определяется величиной тока микропинчового разряда.

Полученные экспериментальные зависимости спектров рентгеновского излучения и эмиссии электронов плазмы от тока разряда хорошо согласуются с моделью “радиационного сжатия” [1, 2].

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

С помощью комплекса диагностической аппаратуры были проведены исследования спектрального состава рентгеновского излучения и электронной эмиссии плазмы микропинчового разряда в энергетическом диапазоне 1–300 кэВ в зависимости от тока разряда.

Полученные результаты позволяют определить влияние тока разряда на спектральный состав рентгеновского излучения и эмиссии электронов плазмы микропинчового разряда. Показана взаимосвязь между спектрами рентгеновского излучения и одновременно измеренными с ними спектрами эмиссии электронов плазмы микропинчового разряда.

ФИНАНСИРОВАНИЕ РАБОТЫ

Работа выполнена при финансовой поддержке Программы повышения конкурентоспособности НИЯУ МИФИ (Соглашение с Минобрнауки РФ, проект № 02.a03.21.0005 от 27.08.2013).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Вихрев В.В., Иванов В.В., Кошелев К.Н. // Физика плазмы. 1982. Т. 8. Вып. 6. С. 1211.
2. Анциферов П.С., Вихрев В.В., Иванов В.В., Кошелев К.Н. // Физика плазмы. 1990. Т. 16. Вып. 8. С. 1018.
3. Кушин В.В., Ляпидевский В.К., Пережогин В.Б. // Ядерно-физические методы диагностики плазмы. М.: МИФИ, 1985.
4. Вихрев В.В., Баронова Е.О. // Прикладная физика. 1999. № 5. С. 71.

5. Романов И.В., Паперный В.Л., Коробкин Ю.В., Подвязников В.А., Рупасов А.А., Чевокин В.К., Шиканов А.С. // Письма в ЖТФ. 2016. Т. 42. № 3. С. 97.
6. Spielman R.V., Deeney C., Changler J.A. // Phys. Plasmas. 1998. V. 5. № 5. P. 2105.
7. Kania D.R., Jones L.A. // Phys. Rev. Letters. 1984. V. 53. № 2. P. 166.
8. Башутин О.А., Вовченко Е.Д., Додулат Э.И., Савелов А.С. // Физика плазмы. 2012. Т. 38. № 3. С. 261.
9. Баловнев А.В., Григорьева И.Г., Салахутдинов Г.Х. // ПТЭ. 2015. № 2. С. 89.
<https://doi.org/10.7868/S0032816215020044>
10. Баловнев А.В., Григорьева И.Г., Салахутдинов Г.Х. // ПТЭ. 2018. № 1. С. 84.
<https://doi.org/10.7868/S0032816218010135>
11. Башутин О.А., Григорьева И.Г., Савелов А.С., Салахутдинов Г.Х. // ПТЭ. 2017. № 3. С. 70.
<https://doi.org/10.7868/S003281621703003X>