

УДК 533.9.082

Зависимость спектра рентгеновского излучения плазмы микропинчевого разряда от материала анода разрядной системы

И. Г. Григорьева, А. С. Савелов, Г. Х. Салахутдинов

Проведены исследования рентгеновского излучения плазмы микропинчевого разряда на установке типа «низкоиндуктивная вакуумная искра» в зависимости от элементного состава материала анода разрядной системы. Установлена зависимость параметров плазмы и вид спектра рентгеновского излучения от элементного состава материала анода разрядной системы. Эксперименты показали, что с ростом атомного заряда ядра Z материала анода разрядной системы увеличивается электронная температура T_e плазмы и возрастает интенсивность жесткого рентгеновского излучения.

PACS: 52.38 Ph

Ключевые слова: рентгеновское излучение, Z -пинч, плазма, метод фильтров поглощения, спектрометры рентгеновского излучения.

Введение

Интерес к сильноточным импульсным электроразрядным устройствам (Z -пинчам) связан с образованием в них плотной, горячей, многократно ионизованной плазмы, которая является интенсивным источником рентгеновского и корпускулярного излучения. К классу сильноточных импульсных электроразрядных устройств относятся и установки типа «низкоиндуктивная вакуумная искра», на которых при определенных условиях реализуется режим микропинчевания, сопровождающийся образованием уникального объекта, называемого плазменной точкой (ПТ) или микропинчем, представляющим собой область плотной горячей плазмы ($N_e \approx 10^{20} \div 10^{22} \text{ см}^{-3}$, $T_e \approx 1 \div 10 \text{ кэВ}$) микронного размера, интенсивно излучающей рентгеновское излучение (до 10^{16} квантов за вспышку), причем с временем жизни не более 10 нс [1—3].

Заметим, что явление микропинчевания имеет достаточно общий характер для Z -пинчевых уста-

новок (низкоиндуктивная вакуумная искра; плазменный фокус; системы проволочных сборок; Z -пинчи с импульсной инжекцией газа).

Высокие параметры плазмы микропинчевого разряда, относительная простота конструкции и эксплуатации делает установки «низкоиндуктивная вакуумная искра» перспективными как для фундаментальных исследований [1, 2], так и для решения чисто прикладных задач (источник рентгеновского и вакуумного ультрафиолетового излучения; источник многозарядных ионов для ядерно-физических экспериментов; рентгеновская литография; рентгеновская микроскопия биологических объектов; полировка поверхности; напыление тонких пленок [3—6]).

Экспериментальные исследования по определению зависимости электронной температуры T_e плазмы микропинчевого разряда на установке типа «низкоиндуктивная вакуумная искра» от элементного состава материала анода разрядной системы проводились ранее в работе [3].

Целью данной работы являлось экспериментальное исследование рентгеновского излучения плазмы, образованной в результате сильноточного импульсного электрического разряда на установке типа «низкоиндуктивная вакуумная искра», в широком энергетическом диапазоне квантов $1 \div 300 \text{ кэВ}$ в зависимости от элементного состава материала анода разрядной системы. Предполагалось, что подобные исследования позволят интерпретировать последовательность физических процессов протекающих в импульсном сильноточном элек-

Григорьева Ирина Гаяровна, аспирант.
 Савелов Александр Сергеевич, профессор.
 Салахутдинов Гаяр Харисович, профессор.
 Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ».

Россия, 115409, Москва, Каширское шоссе, 31.
 Тел. 8 (495) 344-14-99. E-mail: saip07@mail.ru

Статья поступила в редакцию 20 августа 2016 г.

© Григорьева И. Г., Савелов А. С., Салахутдинов Г. Х., 2016

трическом разряде и установить связь между процессами микропинчевания и ускорительными процессами. Подобные исследования в указанных условиях ранее не проводились.

Описание установки и методики проведения экспериментов

Эксперименты производились на сильноточной импульсной электроразрядной установке типа «низкоиндуктивная вакуумная искра» «Зона-2» (НИЯУ МИФИ), конструкция и параметры которой приведены в [4]. Разряд в установке осуществлялся в вакуумной камере, откаченной до вакуума на уровне не хуже 10^{-4} Торр. Рабочим веществом разряда являлись пары материалов анода разрядного устройства. Импульсный источник тока — батарея конденсаторов суммарной емкостью $C = 20$ мкФ. Период разряда составлял 8,5 мкс.

Общая схема разрядной камеры установки показана на рис. 1. Плоский электрод имел вид цилиндра диаметром 20 мм с плоской торцевой поверхностью. Стержневой электрод имел диаметр 3 мм и длину 15 мм и был на конце заострен. Расстояние между электродами составляло 5 мм. В ходе экспериментов была предусмотрена возможность замены электродов разрядной системы.

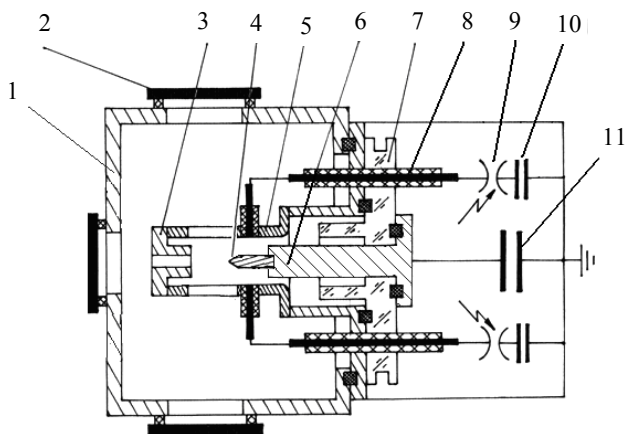


Рис. 1. Общая схема разрядной камеры: 1 — вакуумная камера; 2 — диагностические окна; 3 — катод; 4 — анод; 5 — внешний токовод; 6 — внутренний токовод; 7 — раздельный изолятор; 8 — триггерное устройство; 9 — разрядник; 10 — конденсаторная батарея триггерного устройства; 11 — конденсаторная батарея в контуре основного разряда.

Исследование спектра рентгеновского излучения плазмы проводилось при стержневом аноде, изготовленном из различных материалов, а именно: Al^{13} , Fe^{26} , Cu^{29} , W^{74} . Катодом служил плоский электрод, изготовленный из железа. Амплитуда импульсного разрядного тока была равна 150 кА. В ходе экспериментов параметры установки и условия разряда не изменялись.

Рентгеновское излучение плазменных объектов характеризуется высокой интенсивностью (более 10^{16} квантов за вспышку) и малой длительностью ($\sim 10^{-8}$ с), причем имеет довольно сложный спектр с максимумом в области 1 кэВ. Интенсивность рентгеновского излучения с ростом энергии квантов падает на несколько порядков.

При таких условиях эксперимента для получения информации о спектре излучения применяются различные многоканальные спектрометрические системы [6—12] с разделением квантов по энергиям с помощью фильтров поглощения различной толщины. В данном методе измеряется кривая ослабления, представляющая собой зависимость интенсивности рентгеновского излучения, прошедшего сквозь фильтр, от толщины данного фильтра.

По показаниям с детекторов излучения строилась кривая ослабления. По результатам полученной в эксперименте кривой ослабления проводили восстановление спектров рентгеновского излучения различными математическими методами [6—12].

Для проведения исследований импульсного рентгеновского излучения плазмы в широком энергетическом диапазоне квантов $1 \div 300$ кэВ был создан комплекс спектрометров рентгеновского излучения.

Для исследования спектрального состава импульсов рентгеновского излучения плазмы в диапазоне энергий квантов 1,0—25 кэВ был использован малогабаритный спектрометр ($\varnothing 5 \times 10$ мм), представляющий сборку из десяти детекторов из фторида лития LiF, расположенных друг за другом. В данном случае фильтрами поглощения, осуществляющими спектроселекцию рентгеновского излучения, служили сами термоллюминесцентные детекторы. При использовании наполнителя из свинца и учитывая, что спектрометр можно расположить рядом с разрядной системой (для увеличения светосилы прибора), возможно проводить измерения спектра до 150 кэВ [7, 9].

Для измерения спектрального состава рентгеновского излучения от 15 до 100 кэВ был использован помехоустойчивый многоканальный спектрометр на основе сцинтилляторов из кристаллического иодида цезия с активационной добавкой таллия CsJ(Tl) (с большим зарядом ядра атома $Z_{эф} = 54$ и размером $\varnothing 15 \times 20$ мм) в непосредственном оптическом контакте с входными окнами малогабаритного ФЭУ-60 [6, 8, 10].

Подробно исследования спектра в жесткой части (свыше 80 кэВ) проводились с использованием четырехканального сцинтилляционного спектрометра. Для увеличения эффективности регистрации и точности измерения были использо-

ваны кристаллы иодида цезия с активационной добавкой таллия CsJ(Tl) ($\varnothing 30 \times 35$) больших размеров в непосредственном оптическом контакте с спектрометрическим ФЭУ-85 [6, 8].

Калибровка и работоспособность спектрометров осуществлялась с помощью точечных радиоактивных источников с различными энергиями гамма-квантов и рентгеновских трубок аналогично методике калибровки, проведенной в работах [8, 10—13].

Детекторы были откалиброваны с использованием точечных радиоактивных источников гамма-квантов с различными энергиями ^{54}Mn (5,45 кэВ); ^{241}Am (59,5 кэВ); ^{57}Co (122 кэВ); ^{139}Ce (33 кэВ, 165 кэВ); ^{203}Hg (72 кэВ, 272 кэВ); ^{137}Cs (662 кэВ) и импульсной рентгеновской трубки с эмиттерами характеристического излучения из различных материалов (Al, Ti, Fe, Cu, Ge, In).

Проверка работоспособности спектрометров осуществлялась путем измерения кривых ослабления интенсивности излучения импульсной рентге-

новской трубки. Спектр излучения импульсной рентгеновской трубки был предварительно измерен методом амплитудного анализа. По полученным кривым ослабления были восстановлены спектры импульсной рентгеновской трубки. Восстановленные по кривой ослабления рентгеновские спектры (методом эффективных энергий) и спектр импульсной рентгеновской трубки, измеренный методом амплитудного анализа, совпали с точностью не хуже 5 %.

Динамический диапазон комплекса спектрометров достигал 10^{14} . Сцинтилляционные спектрометры крепились к диагностическим окнам разрядной камеры и регистрировали рентгеновское излучение из области микропинчевого разряда.

Оперативный контроль за моментом микропинчевания фиксировался по «особенностям» на осциллограмме разрядного тока, полученным с пояса Роговского, и импульсам рентгеновского излучения, зарегистрированным $p-i-n$ -диодом (рис. 2).

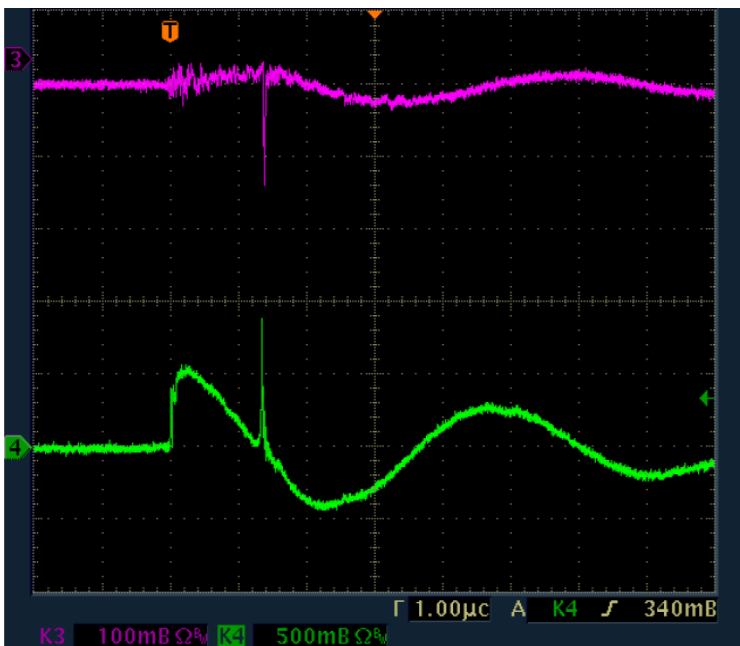


Рис. 2. Фотография осциллограммы с микросекундной разверткой сигналов разрядного тока с пояса Роговского (нижний луч) и $p-i-n$ -диода (верхний луч), регистрирующей рентгеновское излучение вакуумной искры.

Экспериментальные результаты и их анализ

Плазма импульсного сильноточного электрического разряда формируется из продуктов эрозии материала анода [1—5], следовательно, элементный состав плазмы определяется элементным составом материала анода разрядной системы установки.

Исследование спектров рентгеновского излучения плазмы, получаемой с анодом из различных материалов (Al^{13} , Fe^{26} , Cu^{29} , W^{74}), показали зависимость вида спектра от атомного заряда ядра Z материала анода (см. рис. 3). Эксперименты пока-

зали, что с ростом атомного заряда ядра Z материала анода разрядной системы растет электронная температура T_e плазмы (см. рис. 4). Данный результат хорошо согласуется с результатом, полученным ранее в работе [3].

Интенсивное мягкое рентгеновское излучение ($h\nu < 10$ кэВ) возникает в момент микропинчевания (образование микропинча-источника интенсивного рентгеновского излучения многократно ионизированных ионов) [1—4]. Жесткое рентгеновское излучение ($h\nu > 80$ кэВ) возникает в момент развала микропинча и образуется в результате ускорительных процессов [6].

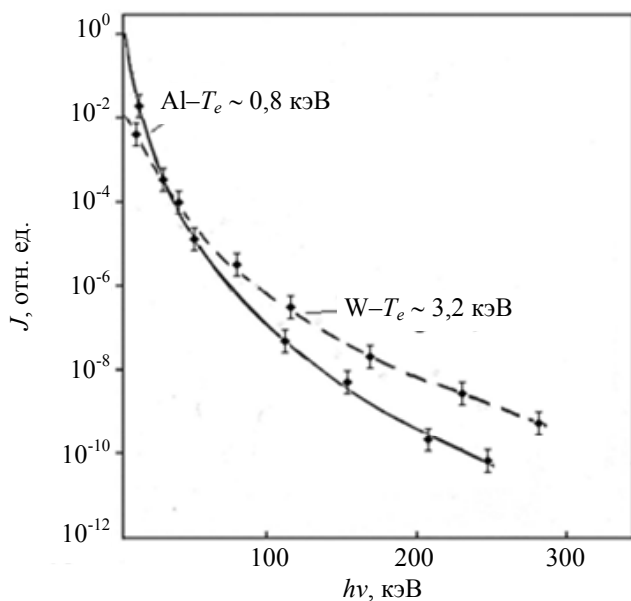


Рис. 3. Спектры излучения плазмы микропинчевого разряда (ток разряда 150 кА) при использовании анода из W и Al.

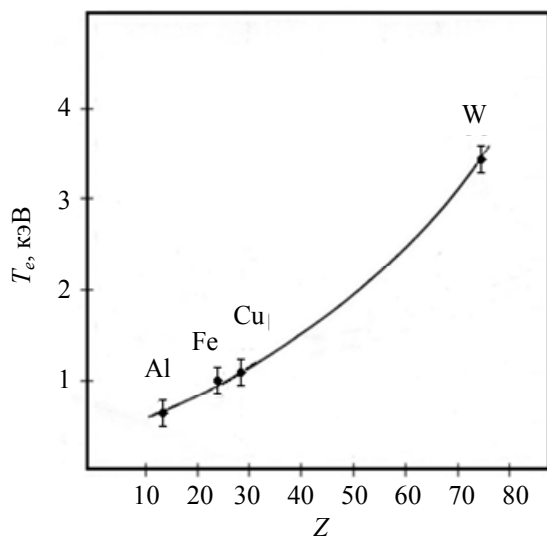


Рис. 4. Электронная температура плазмы в зависимости от атомного заряда ядра Z материала анода разрядной системы.

В экспериментах в сильноточный электрический разряд вкладывалась одинаковая энергия. Образование плазмы происходит в парах эрозии анода, причем чем выше атомный заряд ядра Z материала анода, тем выше требуется электронная температура T_e для образования микропинчевого режима. С ростом атомного заряда ядра материала анода растет и электронная температура T_e микропинча. Величина критического тока, при котором осуществляется микропинчевание, растет с увеличением атомного заряда ядра материала анода [1, 2].

При равных условиях вложенной энергии в разряд, в разрядной системе с анодом из металла с большим атомным зарядом ядра интенсивность

мягкого рентгеновского излучения будет меньшей, чем в разрядной системе с анодом с меньшим атомным зарядом ядра.

С ростом электронной температуры T_e микропинча растет интенсивность жесткого рентгеновского излучения. Одним из основных механизмов, приводящим к рождению жесткого рентгеновского излучения ($h\nu > 80$ кэВ), является возникновение спонтанных электрических полей со значительно большими напряжениями, чем на разрядных электродах. Данные электрические поля образуются в результате аномального роста омического сопротивления R перетяжки плазменного столба, возникающего на стадии развала микропинча [6]. С ростом электронной температуры T_e микропинча происходит рост омического сопротивления R перетяжки, что приводит к росту ускоряющего напряжения в возникших электрических полях и росту интенсивности жесткого рентгеновского излучения.

Покрытие или добавки тяжелых элементов (с большим Z) в электроды разрядной системы, изготовленных из легких материалов, позволяет значительно поднять электронную температуру T_e микропинча, что позволяет увеличить выход мягкого рентгеновского излучения.

Отметим, что в плазмодифокусных установках используют вставки из тяжелых элементов в аноде для увеличения электронной температуры T_e микропинча, приводящей к росту интенсивности нейтронного излучения [12].

Заключение

В работе приводятся результаты по исследованию зависимости рентгеновского излучения плазмы сильноточного импульсного электрического разряда на установке типа «низкоиндуктивная вакуумная искра» от элементного состава материала анода разрядной системы. Созданная диагностическая аппаратура позволила провести исследования рентгеновского излучения в широком энергетическом диапазоне квантов 1—300 кэВ. Была обнаружена зависимость вида спектра рентгеновского излучения от материала анода разрядной системы установки. Интенсивность мягкого ($h\nu < 10$ кэВ) и жесткого ($h\nu > 80$ кэВ) рентгеновского излучения плазмы микропинчевого разряда в зависимости от материала анода разрядной системы может отличаться более чем на два порядка.

Подтвержден рост электронной температуры T_e плазмы в зависимости от роста атомного заряда ядра Z материала анода разрядной системы.

Полученные результаты можно использовать в различных Z -пинчевых установках для оптимизации их излучательных характеристик.

ЛИТЕРАТУРА

1. Короп Е. Д., Мейерович Б. Э., Сидельников Ю. В., Сухоруков С. Т. // Успехи физических наук. 1979. Т. 129. Вып. 1. С. 87.
2. Вихрев В. В., Иванов В. В., Кошелев К. Н. // Физика плазмы. 1982. Т. 8. Вып. 6. С. 1211.
3. Анциферов П. С., Вихрев В. В., Иванов В. В. и др. // Физика плазмы. 1990. Т. 16. Вып. 8. С. 1018.
4. Башутин О. А., Вовченко Е. Д., Додулат Э. И. и др. // Физика плазмы. 2012. Т. 38. № 3. С. 261.
5. Долгов А. Н., Салахутдинов Г. Х. // Физика плазмы. 2003. Т. 29. № 9. С. 818.
6. Вовченко Е. Д., Григорьева И. Г., Макаров В. В. и др. // Физика плазмы. 2012. Т. 38. № 12. С. 1076.
7. Баловнев А. В., Григорьева И. Г., Салахутдинов Г. Х. // ПТЭ. 2015. № 1. С. 100.
8. Баловнев А. В., Григорьева И. Г., Салахутдинов Г. Х. // ПТЭ. 2015. № 2. С. 89.
9. Баловнев А. В., Григорьева И. Г., Додулат Э. И. и др. // Прикладная физика. 2013. № 4. С. 23.
10. Долгов А. Н., Савелов А. С., Салахутдинов Г. Х. // Прикладная физика. 2008. № 5. С. 103.
11. Долгов А. Н., Ляпидевский В. К., Савелов А. С. и др. // Прикладная физика. 2007. № 1. С. 88.
12. Колтунов М. В., Лемешко Б. Д., Савелов А. С. и др. // Прикладная физика. 2010. № 4. С. 52.
13. Киреченко Н. Н., Ляпидевский В. К., Пережогин В. Б. и др. // ПТЭ. 1992. № 3. С. 206.

The micropinch discharge plasma X-ray spectral characteristics in relation to the anode material of a discharge system

I. G. Grigoryeva, A. S. Savelov, and G. Kh. Salakhutdinov

National Research Nuclear University "MEPhI" (Moscow Engineering Physics Institute)
31 Kashirskoe shosse, Moscow, 115409, Russia
E-mail: saip07@mail.ru

Received August 20, 2016

We represent the research of the heavy-current impulse discharge plasma x-ray emission in «low-inductive vacuum spark» device depending on the anode elemental composition of the discharge system. The plasma parameters and a form of the X-ray spectrum in relation to the anode elemental composition of the discharge system was shown.

PACS: 52.38Ph

Keywords: X-ray, Z-pinch, plasma, absorbing filters method, X-ray spectrometers.

REFERENCES

1. E. D. Korop, B. E. Meierovich, Yu. V. Sidelnikov, and S. T. Sukhorukov, *Physics-Uspekhi* **129**, 87 (1979).
2. V. V. Vikhrev, V. V. Ivanov, and K. N. Koshelev, *Plasma Phys. Rep.* **8**, 1211 (1982).
3. P. S. Antsiferov, V. V. Vikhrev, V. V. Ivanov, et al., *Plasma Phys. Rep.* **16**, 1018 (1990).
4. O. A. Bashutin, E. D. Vovchenko, E. I. Dodulat, et al., *Plasma Phys. Rep.* **38**, 261 (2012).
5. A. N. Dolgov and G. Kh. Salakhutdinov, *Plasma Phys. Rep.* **29**, 818 (2003).
6. E. D. Vovchenko, I. G. Grigoryeva, V. V. Makarov, et al., *Plasma Phys. Rep.* **38**, 1076 (2012).
7. A. V. Balovnev, I. G. Grigoryeva, and G. Kh. Salakhutdinov, *Instrum. Exp. Tech.*, No. 1, 100 (2015).
8. A. V. Balovnev, I. G. Grigoryeva, and G. Kh. Salakhutdinov, *Instrum. Exp. Tech.*, No. 2, 89 (2015).
9. A. V. Balovnev, I. G. Grigoryeva, E. I. Dodulat, et al., *Prikl. Fiz.*, No. 4, 23 (2013).
10. A. N. Dolgov, A. S. Savelov, and G. Kh. Salakhutdinov, *Prikl. Fiz.*, No. 5, 103 (2008).
11. A. N. Dolgov, V. K. Lyapidevskii, A. S. Savelov, et al., *Prikl. Fiz.*, No. 1, 88 (2007).
12. M. V. Koltunov, B. D. Lemeshko, A. S. Savelov, et al., *Prikl. Fiz.*, No. 4, 52 (2010).
13. N. N. Kirichenko, V. K. Lyapidevskii, V. B. Perezhogin, et al., *Instrum. Exp. Tech.*, No. 3, 206 (1992).