

Исследование спектрального состава рентгеновского излучения из различных областей плазмы микропинчевого разряда*А. В. Баловнев, О. А. Башутин, И. Г. Григорьева, Г. Х. Салахутдинов*

Представлена методика и результаты исследования спектрального состава рентгеновского излучения из различных областей плазмы микропинчевого разряда на установке типа «низкоиндуктивная вакуумная искра». Измерены спектры рентгеновского излучения в диапазоне энергий квантов 1–30 кэВ из области плазменной точки, из области прианодной плазмы и анода плазмы микропинчевого разряда. Экспериментально установлено, что интенсивность рентгеновского излучения плазменной точки превышает интенсивность рентгеновского излучения из области прианодной плазмы и анода в исследуемом диапазоне энергий.

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

Введение

Установки типа «низкоиндуктивная вакуумная искра» относятся к классу сильноточных импульсных электроразрядных устройств (Z-пинчей), на которых реализуется режим микропинчевания, сопровождающийся образованием объекта, называемого плазменной точкой или микропинчем. Он представляет 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].

Данные установки имеют высокие параметры образованной плазмы, относительно простую конструкцию, 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 [3].

Явление микропинчевания имеет достаточно общий характер для всех Z-пинчевых установок (низкоиндуктивная вакуумная искра; плазменный фокус; системы проволочных сборок; Z-пинчи с импульсной инъекцией газа) [4, 5].

Физическая картина явлений в плазме микропинчевого разряда ещё далека от полного понимания и является предметом интенсивных исследований [1, 2, 6].

В данной статье приведены методика проведения экспериментов и результаты измерения спектров рентгеновского излучения из различных областей плазменного объекта микропинчевого разряда, образованного на установке типа «низкоиндуктивная вакуумная искра». Данные исследования позволили детально определить спектральный состав рентгеновского излучения из различных областей плазмы микропинчевого разряда и их степень ионизации.

Экспериментальная методика и результаты

Эксперименты производились на сильноточной импульсной электроразрядной установке типа «низкоиндуктивная вакуумная искра» «Зона-2» (НИЯУ МИФИ), конструкция и параметры которой подробно приведены в [7].

Разряд осуществлялся в вакуумной камере, откаченной до давления не выше 10^{-5} Торр. Рабочим веществом разряда являлись пары материала электродов разрядного устройства, изготовленных из железа. При этом период разряда – 8,5 мкс. Емкость накопительной конденсаторной батареи установки составляла $C_0 = 20 \text{ мкФ}$.

Плоский электрод имел вид цилиндра диаметром 20 мм с плоской торцевой поверхностью. Стержневой электрод имел диаметр 3 мм и длину 15 мм, причем он был на конце заострен. Расстояние между электродами составляло 5 мм. Эксперименты проводились при токе разряда 150 кА.

Баловнев Алексей Владимирович, аспирант.
Башутин Олег Алексеевич, научный сотрудник.
Григорьева Ирина Гаяровна, аспирант.
Салахутдинов Гаяр Харисович, профессор.
Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ» (НИЯУ МИФИ).
Россия, 115409, Москва, Каширское шоссе, 31.
Тел. 8 (495) 344-14-99. E-mail: saip07@mail.ru

Статья поступила в редакцию 23 марта 2017 г.

© Баловнев А. В., Башутин О. А., Григорьева И. Г., Салахутдинов Г. Х., 2017

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. Изображение регистрировалось на рентгеновской фотопленке РТ-1 и ядерной эмульсии типа Р. Диафрагма камеры представляла собой свинцовую пластину толщиной 1 мм с отверстием 0,05 мм. Её ось была направлена перпендикулярно к оси разряда, что позволяло фотографировать всю разрядную зону.

Между диафрагмой и разрядной зоной помещалась бериллиевая фольга толщиной 0,1 мм. Расстояние от оси разряда до рентгеновской пленки составляло 200 мм, до диафрагмы – 100 мм. Данные исследования позволили определить локальные источники рентгеновского плазмы, образованной в результате микропинчевого разряда.

На рис. 1 показана типичная обскурграмма, полученная в результате микропинчевого разряда. На ней отчетливо видны основные источники рентгеновского излучения, а именно: анод, прианодная плазма, плазменная точка.

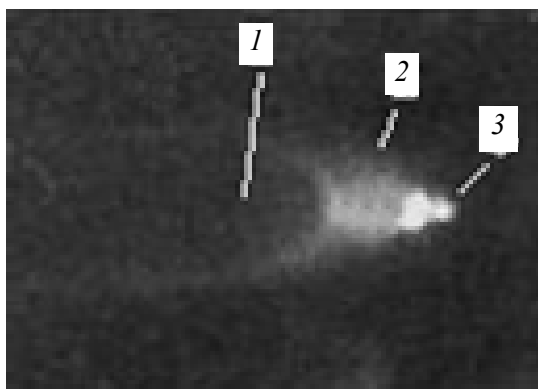


Рис. 1. Обскурграммы микропинчевого разряда (для плазмы железа, ток разряда 150 кА, энергия рентгеновских квантов $h\nu > 3$ кэВ): 1 – электрод (анод); 2 – прианодная плазма; 3 – плазменные точки.

После определения местонахождения источников рентгеновского излучения были измерены спектры рентгеновского излучения из данных областей (бериллиевая фольга была удалена).

Рентгеновское излучение плазмы сильноточного импульсного электрического разряда характеризуется высокой интенсивностью (более 10^{16} квантов за вспышку) и малой длительностью ($\sim 10^{-8}$ с), сопровождаемое мощными электромагнитными помехами [7].

Одним из наиболее распространенных методов измерения спектра импульсного рентгеновского излучения при таких условиях эксперимента является метод фильтров поглощения [9, 10]. Метод основан на спектральной селекции первичного рентгеновского излучения с помощью филь-

тров поглощения различной толщины. В данном методе измеряется кривая ослабления, представляющая собой зависимость поглощенной в детекторе энергии рентгеновского излучения, прошедшего сквозь фильтр, от толщины данного фильтра. По результатам измеренной в эксперименте кривой ослабления проводят восстановление спектров рентгеновского излучения различными математическими методами [3, 4].

Для исследования спектрального состава импульсов рентгеновского излучения плазмы в диапазоне энергий квантов 1,0–25 кэВ был использован малогабаритный спектрометр (с размерами $\varnothing 5 \times 10$ мм), представляющий сборку из двенадцати детекторов из фторида лития LiF, расположенных друг за другом. В данном случае фильтрами поглощения, осуществляющими спектроселекцию рентгеновского излучения, служили сами термолюминесцентные детекторы. Конструктивно термолюминесцентные детекторы выполняются в виде диска с диаметром порядка 5 мм и высотой 0,9 мм. Для увеличения точности измерения первый термолюминесцентный детектор имел толщину 0,1 мм.

Суммарный сигнал со всех термолюминесцентных детекторов соответствовал поглощенной энергии рентгеновского излучения всего исследуемого спектра в энергетическом диапазоне, в котором были зарегистрированы рентгеновские кванты в спектрометре. Сигналы с каждого отдельного детектора определяли степень ослабления рентгеновского излучения при прохождении рентгеновского излучения. Спектр рентгеновского излучения плазмы восстанавливался по измеренной кривой поглощения [9, 11, 12].

Принцип действия термолюминесцентных детекторов основан на измерении термолюминесцентного излучения, пропорционального поглощенной дозе рентгеновского излучения в детекторе. Термолюминесцентные детекторы LiF ($Z = 8,2$) не чувствительны к электромагнитным наводкам, практически не чувствительны к ультрафиолетовому излучению, не имеют мертвого поверхностного слоя, обладают линейной зависимостью термолюминесцентного излучения от поглощенной дозы рентгеновского излучения в достаточно широком диапазоне, а именно, от 20 миллизиверт до 10 зиверт [11].

Показания с термолюминесцентных детекторов считывались с помощью прибора ДВГ-02ТМ (данный прибор проводил нагрев детектора и регистрировал собственно термолюминесцентный сигнал) [11].

Схема эксперимента по измерению спектра рентгеновского спектра из различных областей плазмы показана на рис. 2. Спектрометры распо-

лагались за диафрагмой, причем на местах, где ранее на рентгеновской пленке были зафиксированы источники рентгеновского излучения, т. е. анод, прианодная плазма, плазменная точка.

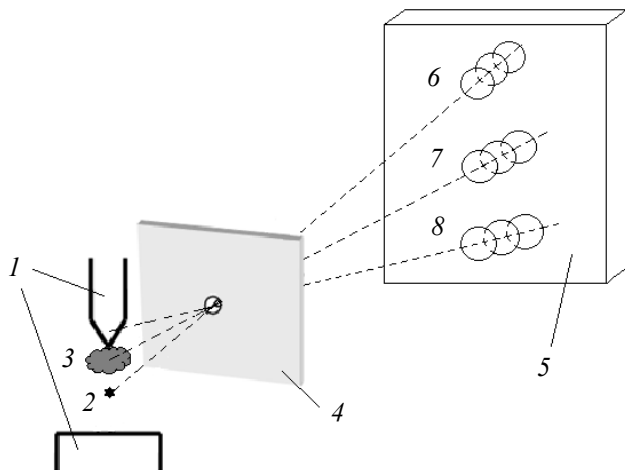


Рис. 2. Схема эксперимента по измерению спектра рентгеновского излучения из различных областей плазмы: 1 – электроды разрядной системы установки (стержневой электрод-анод, плоский электрод-катод), 2 – плазменная точка, 3 – прианодная плазма, 4 – диафрагма, 5 – система крепления спектрометров из термолюминесцентных детекторов, 6 – спектрометр, измеряющий спектр из области плазменной точки, 7 – спектрометр, измеряющий спектр из области прианодной плазмы, 8 – спектрометр, измеряющий спектр из области анода.

Разработанная методика позволила измерить спектры импульсного рентгеновского излучения из основных излучающих областей микропинчового разряда. Соответствующие данные представлены на рис. 3.

Следует отметить, что в ряде работ, например в [13], уже проводились спектрометрические исследования различных источников рентгеновского излучения в микропинчовом разряде с использованием в качестве детектора ядерной эмульсии (типа Р) по трекам вторичных электронов. Однако такая методика позволяла измерить спектр рентгеновского излучения с энергией только более 6 кэВ.

Обсуждение полученных результатов

Рентгеновское излучение плазмы микропинчового разряда состоит из тормозного излучения ускоренных электронов и излучения многократно ионизированных ионов. Экспериментально установлено, что интенсивность рентгеновского излучения плазменной точки превышает интенсивность рентгеновского излучения из области прианодной плазмы и анода в диапазоне энергий рентгеновских квантов $h\nu < 6$ кэВ для плазмы железа. В плазменной точке многократно ионизированных ионов значительно больше, чем в области прианодной плазмы и анода, что было ранее подтверждено исследованиями эмиссии ионов из плазмы [14, 15].

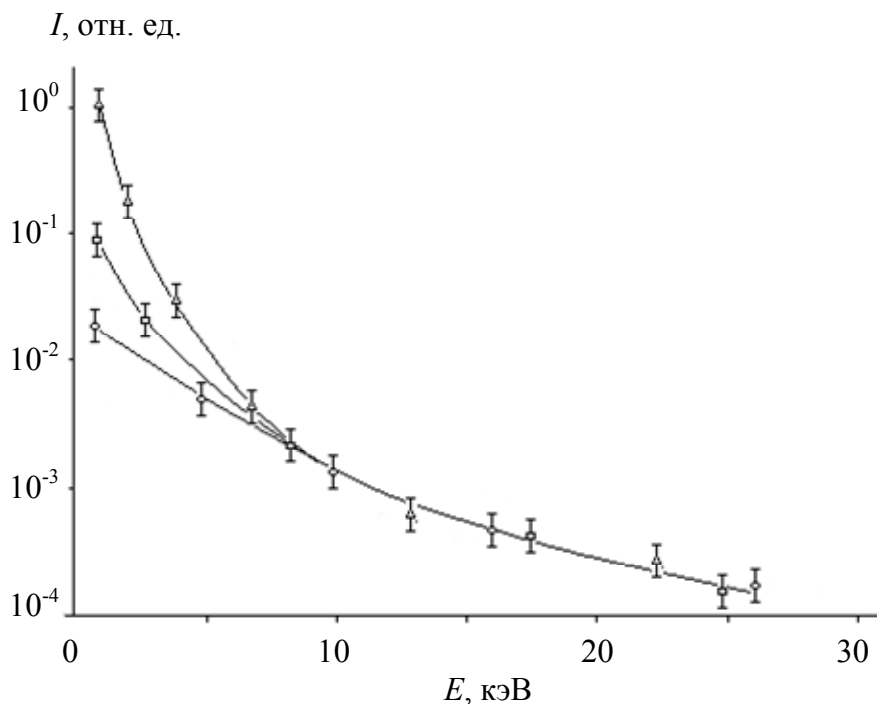


Рис. 3. Спектры импульсного рентгеновского излучения из основных излучающих областей (Δ – плазменная точка, □ – прианодная плазма, ○ – поверхность анода) при микропинчовом разряде (для плазмы железа, ток разряда 150 кА).

В указанных работах [14, 15] были проведены исследования эмиссии ионов из различных областей плазмы микропинчового разряда на установке «Зона-2», причем в экспериментальных условиях, идентичных условиям экспериментов, проведенных авторами данной статьи. Эксперименты проводились с использованием созданных диагностических приборов, а именно, камеры-обскуры и спектрометра ионов. Здесь в качестве детектора ионов использовался твердотельный трековый детектор CR-39. CR-39 – это тонкая полимерная пленка толщиной 0,1 мм, позволяющая определить спектр эмиссии ионов из различных областей плазмы по виду трека в детекторе CR-39 после его обработки методом травления в щелочном растворе. Ранее [15] в ходе экспериментов было установлено, что в области плазменной точки обнаружены многократно ионизированные ионы кратностью Fe^{+15} и более, а в области прианодной плазмы кратность ионизации достигает не более Fe^{+4} , при этом ионная компонента плазмы в основном состоит из однозарядных ионов Fe^{+1} .

Плазма импульсного сильноточного электрического разряда формируется из продуктов эрозии материала анода [1–3], т.е. элементный состав плазмы определяется элементным составом материала анода разрядной системы установки. Энергетическая область, в которой происходит ионизация атомов, зависит от элементного состава плазмы. В данной энергетической области интенсивность рентгеновского излучения плазменной точки превышает интенсивность рентгеновского излучения из области прианодной плазмы и анода (см. рис. 3).

Отметим характерные особенности для всех измеренных спектров. Вид спектра рентгеновского излучения плазмы микропинчового разряда практически одинаков в диапазоне энергий квантов 6–30 кэВ для всех излучающих областей разряда. Это, видимо, говорит о том, что энергетические спектры ускоренных электронов, присутствующих в плазме микропинча, приэлектродной плазме и бомбардирующей поверхность электрода, аналогичны [5].

Заключение

Экспериментально установлено, что интенсивность рентгеновского излучения плазменной точки превышает интенсивность рентгеновского

излучения из области прианодной плазмы и анода в диапазоне энергий рентгеновских квантов $h\nu < 6$ кэВ в более 10 раз для плазмы железа. С другой стороны, в диапазоне энергий рентгеновских квантов 6–30 кэВ интенсивность рентгеновского излучения для всех излучающих областей микропинчового разряда практически одинакова.

Проведенные исследования экспериментально доказали, что согласно существующим моделям образования плазмы железа в микропинчовом разряде [1], существенный вклад в спектр рентгеновского излучения в диапазоне энергий $h\nu < 6$ кэВ вносит плазменная точка (т.е. излучение многократно ионизированных ионов).

ЛИТЕРАТУРА

1. Вихрев В. В., Иванов В. В., Кошелев К. Н. // Физика плазмы. 1982. Т. 8. № 6. С. 1211.
2. Корон Е. Д., Мейерович Б. Э., Сидельников Ю. В., Сухоруков С. Т. // Успехи физических наук. 1979. Т. 129. Вып. 1. С. 87.
3. Долгов А. Н., Салахутдинов Г. Х. // Физика плазмы. 2003. Т. 29. № 9. С. 818.
4. Колтунов М. В., Лемешко Б. Д., Савелов А. С., Салахутдинов Г. Х., Юрков Д. И., Сидоров П. П. // Прикладная физика. 2010. № 4. С. 52.
5. Вовченко Е. Д., Григорьева И. Г., Макаров В. В., Савелов А. С., Салахутдинов Г. Х. // Физика плазмы. 2012. Т. 38. № 12. С. 1076.
6. Долгов А. Н., Ляпидевский В. К., Савелов А. С., Салахутдинов Г. Х. // Прикладная физика. 2007. № 1. С. 88.
7. Баишутин О. А., Алхимова М. А., Вовченко Е. Д., Додулат Э. И., Савёлов А. С., Саранцев С. А. // Физика плазмы. 2013. Т. 39. № 11. С. 1006.
8. Долгов А. Н., Савелов А. С., Салахутдинов Г. Х. // Прикладная физика. 2008. № 5. С. 103.
9. Кушин В. В., Ляпидевский В. К., Пережогин В. Б. Ядерно-физические методы диагностики плазмы. – М.: МИФИ, 1985.
10. Баловнев А. В., Григорьева И. Г., Салахутдинов Г. Х. // ПТЭ. 2015. № 2. С. 89.
11. Баловнев А. В., Григорьева И. Г., Салахутдинов Г. Х. // ПТЭ. 2015. № 1. С. 100.
12. Киреченко Н. Н., Ляпидевский В. К., Пережогин В. К., Салахутдинов Г. Х., Самойлова Л. Б. // ПТЭ. 1992. № 3. С. 206.
13. Долгов А. Н., Ляпидевский В. К., Прохорович Д. Е., Савелов А. С., Салахутдинов Г. Х. // Физика плазмы. 2005. Т. 31. № 2. С. 192.
14. Balovnev A. V., Vovchenko E. D., Grigoryeva I. G., Dodulad E. I., Savelov A. S., Salakhutdinov G. Kh. // Physics Procedia. 2015. Vol. 71. P. 146.
15. Баловнев А. В., Вовченко Е. Д., Григорьева И. Г., Додулат Э. И., Клячин Н. А., Савелов А. С., Салахутдинов Г. Х. Препринт НИЯУ МИФИ, 2016. № 001-2016.

Investigation of the X-ray spectrum in various plasma regions of a micropinch discharge

A. V. Balovnev, O. A. Bashutin, I. G. Grigoryeva, and G. Kh. Salakhutdinov

National Research Nuclear University MEPhI
31 Kashirskoye shosse, Moscow, 115191, Russia
E-mail: saip07@mail.ru

Received March 23, 2017

Consideration is given to the technique and results of the investigation of a spectral composition of the X-ray radiation from various regions of the micropinch plasma to be created in the "low-inductance vacuum spark" installation. The X-ray spectra were measured in the 1-30 keV energy range from the region of the plasma point, from the region of the anode plasma and the anode of the plasma of the micropinch discharge. It was experimentally established that the intensity of the X-ray radiation of the plasma point exceeds the intensity of X-ray radiation from the region of the anode near the anode and the anode in the energy range under study.

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

REFERENCES

1. V. V. Vikhrev, V. V. Ivanov, and K. N. Koshelev, *Plasma Phys. Rep.* **8** (6), 1211 (1982).
2. E. D. Korop, B. E. Meierovich, Yu. V. Sidelnikov, and S. T. Sukhorukov, *Phys. Usp.* **22**, 727 (1979).
3. A. N. Dolgov and G. Kh. Salakhutdinov, *Plasma Phys. Rep.* **29** (9), 818 (2003).
4. M. V. Koltunov, B. D. Lemeshko, A. S. Savelov, G. Kh. Salakhutdinov, D. I. Yurkov, P. P. Sidorov, *Plasma Phys. Rep.* **37** (13), 1215 (2011).
5. E. D. Vovchenko, I. G. Grigoryeva, V. V. Makarov, A. S. Savelov, and G. Kh. Salakhutdinov, *Plasma Phys. Rep.* **38** (12), 991 (2012).
6. A. N. Dolgov, V. K. Lyapidevskii, A. S. Savelov, and G. Kh. Salakhutdinov, *Prikl. Fiz.*, No. 1, 88 (2007).
7. O. A. Bashutin, M. A. Alhimova, E. D. Vovchenko, E. I. Dodulat, A. S. Savjолоv, and S. A. Sarantsev, *Plasma Phys. Rep.* **39** (11), 1006 (2013).
8. A. N. Dolgov, A. S. Savelov, and G. Kh. Salakhutdinov, *Prikl. Fiz.*, No. 5, 103 (2008).
9. V. V. Kushin, V. K. Lyapidevskii, and V. B. Perezhogin, *Nuclear-Physical Methods of Plasma Diagnostics* (Mos. Inzh. Fiz. Inst., Moscow, 1985) [in Russian].
10. A. V. Balovnev, I. G. Grigoryeva, and G. Kh. Salakhutdinov, *Instrum. Exp. Tech.* **58** (2), 252 (2015).
11. A. V. Balovnev, I. G. Grigoryeva, and G. Kh. Salakhutdinov, *Instrum. Exp. Tech.* **58** (1), 98 (2015).
12. N. N. Kirichenko, V. K. Lyapidevskii, V. B. Perezhogin, G. Kh. Salakhutdinov, and L. B. Samoylova, *Instrum. Exp. Tech.*, No. 3, 206 (1992).
13. A. N. Dolgov, V. K. Lyapidevskii, D. E. Prohorovich, A. S. Savelov, and G. Kh. Salakhutdinov, *J. Plasma Phys. Rep.* **31** (2), 192 (2005).
14. A. V. Balovnev, E. D. Vovchenko, I. G. Grigoryeva, E. I. Dodulat, A. S. Savelov, and G. Kh. Salakhutdinov, *Physics Procedia.* **71**, 146 (2015).
15. A. V. Balovnev, E. D. Vovchenko, I. G. Grigoryeva, E. I. Dodulat, N. A. Klyachen, A. S. Savelov, and G. Kh. Salakhutdinov, *Preprint of National Research Nuclear University MEPhI № 001-2016*, (Moscow: National Research Nuclear University MEPhI, 2016) [in Russian].