

**Динамика импульсного рентгеновского излучения плазмы
микропинчевого разряда***И. Г. Григорьева, В. А. Костюшин, Г. Х. Салахутдинов*

Создан комплекс диагностической аппаратуры с многоканальным сцинтилляционным спектрометром рентгеновского излучения в энергетическом диапазоне 2÷70 кэВ с наносекундным временным разрешением и разработана методика измерений. Исследована динамика спектрального состава импульсного рентгеновского излучения плазмы микропинчевого разряда на установке типа «низкоиндуктивная вакуумная искра». Проведенные исследования позволили получить экспериментальные результаты динамики электронной температуры T_e плазмы в процессе микропинчевого разряда и определить последовательность образования жесткого рентгеновского излучения.

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

Ссылка: Григорьева И. Г., Костюшин В. А., Салахутдинов Г. Х. // Успехи прикладной физики. 2019. Т. 7. № 2. С. 107.

Reference: I. G. Grigoryeva, V. A. Kostyushin, and G. Kh. Salakhutdinov, Usp. Prikl. Fiz. 7 (2), 107 (2019).

Введение

Исследования спектрального состава импульсного высокоинтенсивного рентгеновского излучения ведутся во многих областях науки и техники, в том числе и в диагностике плазмы. Рентгеновское излучение плазмы является одним из основных источников информации о параметрах и физических процессах, протекающих в плазменном объекте сильноточного импульсного электрического разряда [1–5].

Интерес к сильноточным импульсным электроразрядным устройствам (Z-пинчам)

связан с образованием в них плотной, горячей, многократно ионизованной плазмы, которая является интенсивным источником вакуумного ультрафиолета, рентгеновского излучения и потока заряженных частиц. К классу сильноточных импульсных электроразрядных устройств относятся установки типа «низкоиндуктивная вакуумная искра», на которых может быть реализован режим микропинчевания, сопровождающийся образованием уникального объекта, называемого плазменной точкой или микропинчем. Данный объект представляет собой область плотной горячей плазмы ($N_e \approx 10^{20} \div 10^{23} \text{ см}^{-3}$, $T_e \approx 1 \div 10 \text{ кэВ}$) микронного размера, интенсивно излучающей рентгеновское излучение (более 10^{16} квантов за вспышку), причем со временем жизни не более 10 нс [1, 2].

Плазма, генерируемая на установках типа «низкоиндуктивная вакуумная искра», имеет высокие энергетические параметры. Относительная простота конструкции данных установок делает их перспективными как для фундаментальных исследований, так и для

Григорьева Ирина Гаяровна, аспирант.
Костюшин Владимир Андреевич, аспирант.
Салахутдинов Гаяр Харисович, д.ф.-м.н., 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 4 февраля 2019 г.

© Григорьева И. Г., Костюшин В. А.,
Салахутдинов Г. Х., 2019

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 [1–8]).

Явление микропинчевания имеет достаточно общий характер для Z-пинчевых установок (низкоиндуктивная вакуумная искра; плазменный фокус; системы проволочных сборок; Z-пинчи с импульсной инжекцией газа [1–5]). Исследования плазмы микропинчевого разряда ведутся во многих крупных лабораториях мира [3–5], однако физика явлений в плазме микропинчевого разряда далека еще от полного понимания и является предметом интенсивных исследований и дискуссий. В частности, слабо исследованы механизмы генерации жесткого рентгеновского излучения и условия его возникновения. Не приведены результаты исследований динамики электронной температуры T_e плазмы в процессе микропинчевого разряда.

Для проведения дальнейших исследований в указанных направлениях необходимо развитие и совершенствование современных методов и диагностических приборов для комплексных измерений излучательных характеристик плазменных объектов, позволяющих определить и интерпретировать физику явлений. Изучение временных параметров микропинчевого разряда оказывается важным в термоядерных исследованиях т. к. в нем образуется высокотемпературная плазма с достаточно большим значением параметра удержания плазмы $n\tau$ [1, 2, 5], где n – концентрация ионов, τ – время существования плазмы с такой концентрацией.

Целью данной работы являлась разработка методики измерений и создание многоканального сцинтилляционного спектрометра рентгеновского излучения с наносекундным временным разрешением, позволяющего в течение одного разряда получить информацию о динамике спектрального состава рентгеновского излучения плазмы микропинчевого разряда в широком энергетическом диапазоне квантов ($2\div 70$ кэВ). Подобный анализ спектрального состава импульсного рентгеновско-

го излучения плазмы микропинчевого разряда позволит получить динамику электронной температуры T_e плазмы в процессе микропинчевого разряда, определить последовательность образования жесткого рентгеновского излучения и его связь с образованием плазменной точки.

Экспериментальная установка и методика проведения эксперимента

Исследования проводились на установке типа «низкоиндуктивная вакуумная искра», конструкция и параметры которой подробно приведены в [3]. Разряд осуществлялся в вакуумной камере, откаченной до вакуума 10^{-5} Торр. Емкость накопительной конденсаторной батареи составляла 20 мкФ, зарядное напряжение достигало 23 кВ, амплитуда тока разряда достигала величины 190 кА. Рабочим веществом разряда являлись пары материала анода, изготовленного из железа. Электрод-анод имел вид цилиндра диаметром 20 мм с плоской торцевой поверхностью, стержневой электрод-катод диаметром 3 мм и длиной 15 мм был на конце заострен. Расстояние между электродами составляло 5 мм.

Рентгеновское излучение плазмы микропинчевого разряда характеризуется высокой интенсивностью (более 10^{16} квантов за вспышку) и малой длительностью (~ 100 нс), имеет сложный спектр с максимумом в области энергий около одного кэВ. Интенсивность рентгеновского излучения с ростом энергии квантов падает на несколько порядков. Образование плазмы сопровождается мощными электромагнитными помехами.

При таких условиях классическая спектрометрия отдельных квантов рентгеновского излучения плазмы микропинча практически невозможна. Здесь, как правило, для получения информации о спектре излучения применяются различные ядерно-физические методы. Одним из таких методов является метод фильтров поглощения [4–11], основанный на спектральной селекции первичного рентгеновского излучения с помощью фильтров поглощения различной толщины. В данном методе измеряется кривая ослабления импульсного рентгеновского излучения, представляющей собой зависимость энергии J из-

лучения, прошедшей сквозь фильтр, от толщины данного фильтра x . По результатам измеренной кривой ослабления восстановление спектров рентгеновского излучения проводятся математическими методами [4–11]. Однако данная одноканальная спектрометрия не позволяет получить необходимый объем данных за один рабочий импульс.

Для исследования временной зависимости спектрального состава импульсного рентгеновского излучения плазмы в диапазоне энергий квантов $2\div 70$ кэВ нами был создан **пятиканальный** сцинтилляционный рентгеновский спектрометр с наносекундным временным разрешением. Работа спектрометра была основана на методе фильтров поглощения. Каналы спектрометра построены по следующей схеме: диафрагма + фильтр поглощения + сцинтилляционный детектор + оптический фильтр коррекции + ФЭУ. В каналах спектрометра в качестве поглощающих фильтров использовался набор алюминиевых и медных фольг толщиной от 6 до 1000 мкм. В качестве сцинтилляторов в спектрометре используются кристаллы CdI_2 [8] (с эффективным атомным номером $Z = 51$ и временем высвечивания менее 2 нс) диаметром 10 мм и высотой 10 мм. Размеры сцинтилляторов обеспечивали эффективную регистрацию рентгеновского излучения до энергий квантов 70 кэВ. В качестве фотоэлектронного умножителя используются ФЭУ-87, временные характеристики которого подходят для данного эксперимента. В качестве регистраторов сигналов с ФЭУ были использованы осциллографы С9-4А и Tektronix TDS2024В.

Спектрометр был откалиброван с помощью генератора световых импульсов наносекундной длительности и наносекундного импульсного источника рентгеновского излучения с регистрацией импульсных сигналов на осциллографах С9-4А и Tektronix TDS2024В. Полученное временное разрешение спектрометра не хуже 6 нс, динамический диапазон спектрометра из пяти каналов достигает 10^6 [5–7].

Методика диагностики основана на измерении интенсивности рентгеновского излучения каналами регистрации спектрометра с фильтрами поглощения различной толщины. По результатам измерения строилась зависимость интенсивности рентгеновского излуче-

ния от времени для различных каналов регистрации с учетом коэффициента оптического фильтра коррекции в каждом канале. По полученным зависимостям поглощенного рентгеновского излучения в различных каналах (за фильтрами поглощения различной толщины) можно построить кривую ослабления рентгеновского излучения для любого момента времени микропинчевого разряда. Затем, проводя восстановление спектров рентгеновского излучения по полученным кривым ослабления, получают картину динамики спектров исследуемого импульсного рентгеновского излучения [6–12]. Рентгеновская диагностика производилась перпендикулярно оси разрядного устройства через боковые диагностические окна.

В диагностический комплекс для исследования плазмы микропинчевого разряда, кроме созданного спектрометра, входили также другие приборы и датчики: пояс Роговского или магнитный зонд для измерения импульса тока разряда от времени; бипланарный вакуумный фотодиод для регистрации вакуумного ультрафиолета и мягкого рентгеновского излучения; *pin*-диод (полупроводниковый детектор с временем разрешения 1 нс и чувствительным слоем 400 мкм); рентгеновская камера-обскура для получения пространственного изображения плазменного объекта в рентгеновских лучах [4–7].

Для временной привязки регистрируемого рентгеновского излучения к динамике разряда в межэлектродном пространстве синхронно регистрировались сигналы с пояса Роговского и бипланарного вакуумного фотодиода. Сигналы со всех каналов рентгеновского спектрометра, пояса Роговского и бипланарного вакуумного фотодиода синхронно выводились на экраны осциллографов, которые запускались от системы инициации разряда. Наблюдения за формой и режимом разряда осуществлялись с помощью рентгеновской камеры-обскуры. Контроль наличия импульсов рентгеновского излучения осуществлялся в реальном времени при помощи *pin*-диода, пояса Роговского и вакуумного рентгеновского фотодиода. Момент глубокого пинчевания и образования плазменной точки фиксировался по особенностям на осциллограмме разрядного тока.

Экспериментальные исследования проводились при амплитуде тока разряда 150 кА. Приведенные экспериментальные данные **получены в процессе одного микропинчового разряда** и являются типичными для всех микропинчевых разрядов при данном расположении электродов и амплитуде тока разряда 150 кА. Следует учитывать, что в процессе разрядов обычно происходит эрозия электродов, и, следовательно, условия разряда меняются. Особенно это заметно для конструкции анода в виде стержня. В нашем случае анод – плоский, что обеспечивает достаточно высокую стабильность характеристик плазмы микропинчового разряда во времени.

Экспериментальные результаты и их анализ

При исследованиях для каждого импульсного разряда были получены осциллограммы тока разряда с помощью пояса Роговского и сигналов ФЭУ с пяти каналов рентгеновского спектрометра. Импульс тока разряда представляет собой затухающую синусоиду (см. рис. 1) с узким выбросом (так называемые «особенности»), который соответствует моменту микропинчевания (т. е. образования плазменной точки) [1–7].

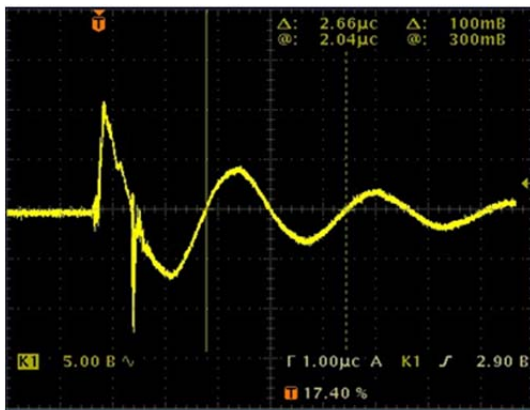


Рис. 1. Осциллограмма тока разряда. Развертка 1 мкс/дел.

Процесс микропинчевания во всех случаях сопровождался синхронными импульсами рентгеновского и ультрафиолетового излучений. Момент времени, в который достигается максимальная интенсивность рентгеновского излучения, регистрируемого во всех каналах спектрометра, и момент времени амплитуд-

ного значения тока разряда «особенности» на осциллограмме тока совпадают и соответствуют моменту времени образования плазменной точки.

На рис. 2 приведена динамика интенсивности рентгеновского излучения в процессе микропинчового разряда за фильтрами поглощения различной толщины в каналах спектрометра. Данная зависимость строилась для каждого микропинчового разряда.

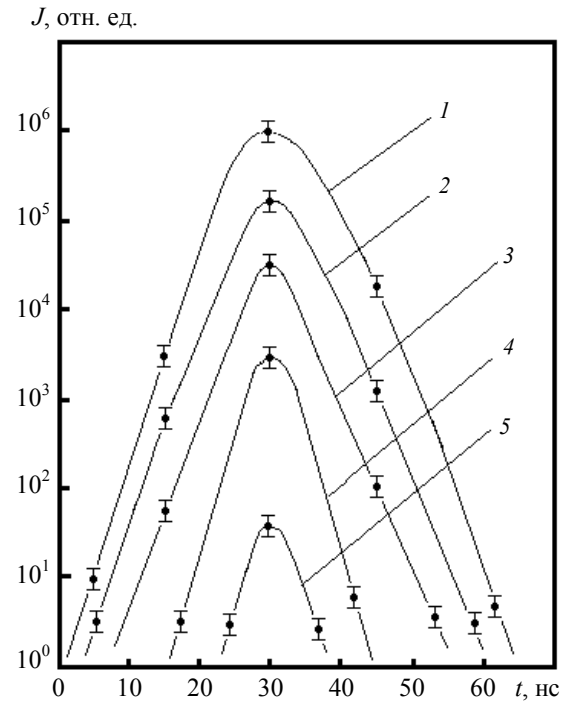


Рис. 2. Динамика интенсивности рентгеновского излучения микропинчового разряда за различными поглощающими фильтрами: кривая 1 – 25 мкм Be; 2 – 10 мкм Si; 3 – 50 мкм Si; 4 – 200 мкм Si; 5 – 600 мкм Si.

Помимо качественных выводов о спектральном составе рентгеновского излучения плазмы микропинчового разряда, приведенные измерения позволили проследить динамику спектра рентгеновского излучения в процессе образования плазменной точки и её развала. Типичные спектры рентгеновского излучения плазмы микропинчового разряда, восстановленные по методу эффективных энергий с последующей процедурой сглаживания [7], приведены на рис. 3 для моментов времени 15, 30 и 45 нс после начала процесса микропинчевания. Спектр, измеренный в момент времени 30 нс, характеризуется особо высокоинтенсивным рентгеновским излучением и наличием жесткой компоненты рент-

геновского излучения с энергией квантов более 50 кэВ и соответствует моменту образования «плазменной точки». Анализ спектров позволяет построить зависимость электронной температуры плазмы микропинчевого разряда от времени. Моменту образования «плазменной точки» соответствует максимальное значение электронной температуры T_e плазмы.

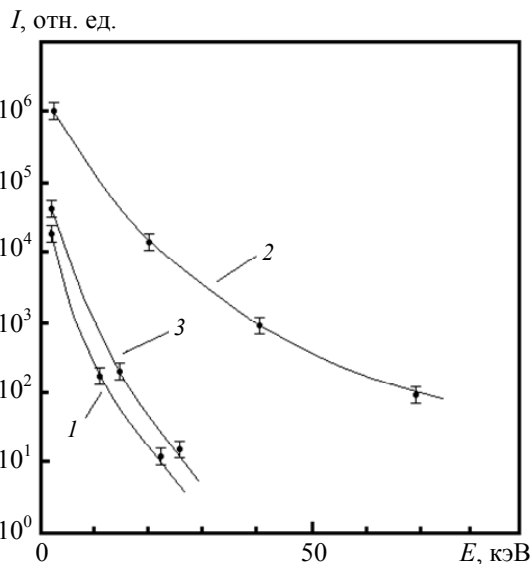


Рис. 3. Типичные мгновенные спектры рентгеновского излучения в моменты времени: кривая 1 – 15 нс; 2 – 30 нс; 3 – 45 нс от начала процесса образования плазменной точки.

Полученные результаты свидетельствуют о том, что разряд именно в стадии «плазменная точка» является мощным источником рентгеновского излучения в широком энергетическом диапазоне. Высокоинтенсивное рентгеновское излучение с энергией квантов менее 15 кэВ возникает в результате микропинчевания и его источником в значительной мере являются многократно ионизированные ионы рабочего вещества плазмы. В момент образования «плазменной точки» значение электронной температуры T_e максимально, соответственно, и излучение многократно ионизированных ионов максимально [9, 12], что продемонстрировано на рис. 3 и рис. 4. Жесткое рентгеновское излучение с энергией квантов более 50 кэВ регистрируется только в случае образования «плазменной точки». Чем выше значение электронной температуры плазмы микропинчевого разряда, тем интенсивней излучение жесткой компоненты рентгеновского излучения.

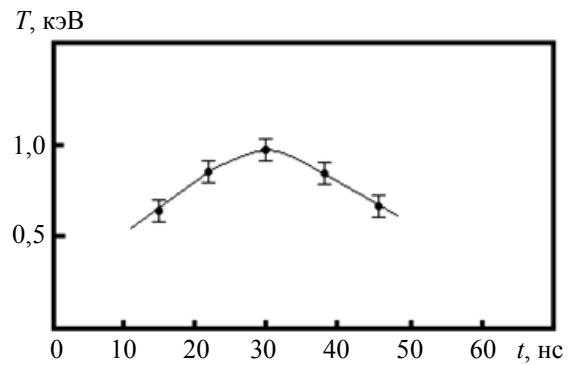


Рис. 4. Динамика электронной температуры T_e плазмы микропинчевого разряда от начала процесса образования плазменной точки.

Анализ полученных спектров рентгеновского излучения позволяет определить влияние процесса микропинчевания на механизмы генерации жесткого рентгеновского излучения. Одним из основных механизмов возникновения жесткого рентгеновского излучения является тормозное излучение электронов в плазме и на аноде разрядного устройства. Согласно работе [11], ускорение электронов происходит вследствие возрастания напряженности электрического поля при образовании микропинча. В области возникающей перетяжки, длина которой, согласно [13], при амплитуде тока 120 кА может меняться в пределах 0,2–0,8 мм, а поперечный размер – 0,05–0,2 мм, погонное сопротивление плазменного столба увеличивается как за счет уменьшения площади поперечного сечения разряда, так и вследствие турбулизации плазмы. Разность потенциалов в области перетяжки увеличивается, соответственно увеличивается и средняя напряженность электрического поля. Вследствие резкого увеличения напряженности электрического поля происходит увеличение энергии электронов и возникает интенсивное рентгеновское излучение, что и наблюдается в экспериментах.

Явление генерации электронов с «аномальной» энергией, превышающей амплитуду напряжения на разрядном промежутке, может возникать при импульсном пробое высоковольтными импульсами наносекундной длительностью. Механизм генерации электронов «аномальной» энергии заключается в том, что ускоряющиеся электроны движутся синхронно с областью движущегося электрического поля с высокой напряженностью во фронте

высокоскоростной волны ионизации [14] или перед фронтом стримера [15, 16]. Движение области электрического поля может возникнуть при образовании перетяжки микропинча и образования «плазменной точки», поскольку, как показано в работе [13], время скинирования в этих условиях меньше, чем время сжатия. Поскольку времена турбулизации плазмы из-за развития в ней микронеустойчивостей (например, ионно-звуковой, электронно-звуковой [11]), приводящих к аномальному сопротивлению, тоже много меньше времени сжатия, то генерация электронов с аномальной энергией может быть объяснена механизмами стохастического и турбулентного ускорения электронов.

Чем выше энергия квантов рентгеновского излучения (см. рис. 2), тем меньше длительность процесса их испускания из плазмы разряда. Наибольший вклад жесткой компоненты излучения наблюдается в момент достижения максимума интенсивности рентгеновского излучения. Длительность жесткой компоненты рентгеновского излучения составляет порядка $10 \div 15$ нс.

Полученные результаты хорошо согласуются с наиболее подтвержденной экспериментальными исследованиями моделью «радиационного сжатия» [1, 2, 11].

Заключение

В работе с помощью разработанной и созданной диагностической аппаратуры были исследованы спектры импульсного рентгеновского излучения плазмы микропинчевого разряда с наносекундным временным разрешением. Определено, что максимальная интенсивность рентгеновского излучения во всем спектре соответствуют моменту времени образования «плазменной точки», при котором достигается максимальное значение электронной температуры плазмы, а в спектре рентгеновского излучения присутствует жесткая компонента рентгеновского излучения.

Наличие жесткого рентгеновского излучения в плазме микропинчевого разряда мо-

жет быть объяснено механизмом ускорением электронов в пинчевом разряде вследствие быстрого роста аномального сопротивления плазмы в процессе микропинчевания. Длительность импульса жесткого рентгеновского излучения соответствует времени жизни «плазменной точки».

Полученные результаты хорошо согласуются с теоретическими представлениями о физических процессах в плазме микропинчевого разряда.

ЛИТЕРАТУРА

1. Вихрев В. В., Иванов В. В., Кошелев К. Н. // Физика плазмы. 1982. Т. 8. № 6. С. 1211.
2. Анциферов П. С., Вихрев В. В., Иванов В. В., Кошелев К. Н. // Физика плазмы. 1990. Т. 16. № 8. С. 1018.
3. Романов И. В., Паперный В. Л., Коробкин Ю. В. // Письма в ЖТФ. 2016. Т. 42. Вып. 3. С. 97.
4. Башутин О. А., Вовченко Е. Д., Додулат Э. И., Савёлов А. С., Саранцев С. А. // Физика плазмы. 2012. Т. 38. № 3. С. 261.
5. Bashutin O. A., Grigoryeva I. G., Savelov A. S., Salakhutdinov G. Kh. // Plasma Physics Reports. 2017. Vol. 43. No. 7. P. 801. doi:10.1134/S1063780X17070078
6. Vovchenko E. D., Grigoryeva I. G., Makarov V. V., Savjolov A. S., Salakhutdinov G. Kh. // Plasma Phys. Rep. 2012. Vol. 38. No. 12. P. 991. doi 10.1134/S1063780X12110104
7. Balovnev A. V., Grigoryeva I. G., Salakhutdinov G. Kh. // Instrum. Exp. Tech. 2018. Vol. 61. No. 1. P. 91. doi: 10.1134/S0020441218010128
8. Balovnev A. V., Grigoryeva I. G., Salakhutdinov G. Kh. // Instrum. Exp. Tech. 2015. Vol. 58. No. 2. P. 252. doi: 10.1134/S0020441215020049
9. Аверкиев В. В., Кушакевич Ю. П., Лыскович А. Б., Ляпидевский В. К., Розман И. М. // Журнал прикладной спектроскопии. 1988. Т. 49. С. 136.
10. Bashutin O. A., Grigoryeva I. G., Savelov A. S., Salakhutdinov G. Kh. // Instrum. Exp. Tech. 2017. Vol. 60. No. 3. P. 372. doi: 10.1134/S0020441217030034
11. Вихрев В. В., Баронова Е. О. // Прикладная физика. 1999. № 5. С. 71.
12. Баловнев А. В., Башутин О. А., Григорьева И. Г., Манохин И. Л., Салахутдинов Г. Х. // Прикладная физика. 2017. № 4. С. 22.
13. Долгов А. Н., Клячин Н. А., Прохорович Д. Е. // Успехи прикладной физики. 2015. Т. 3. № 3. С. 242.
14. Василяк Л. М., Костюченко С. В., Кудрявцев Н. Н., Филюгин И. В. // УФН. 1994. Т. 164. С. 263.
15. Бабич Л. П. // УФН. 2005. Т. 175. С. 1069.
16. Babich L. P. ISSN 1234-5678. Futurepast Inc., Arlington, Virginia, USA, 2003.

Dynamics of pulsed X-ray radiation of the micropinch discharge plasma

I. G. Grigoryeva, V. A. Kostyushin, 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 February 4, 2019

A complex of diagnostic equipment with the multi-channel X-ray scintillation spectrometer in the energy range of 2÷70 keV with nanosecond time resolution was created and a measurement technique was developed. The dynamics of a spectral composition of pulsed X-ray emission out of the micropinche discharge plasma was investigated at the “low inductivity vacuum spark” type device. Carried out researches have allowed to obtain the experimental results of the dynamics of the electron temperature T_e of the plasma in the process micropinches discharge and to determine the sequence of formation of the hard X-ray.

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

REFERENCES

1. V. V. Vikhrev, V. V. Ivanov, and K. N. Koshelev, *Sov. Fizika Plazmy* **8**, 688 (1982).
2. P. S. Antsiferov, V. V. Vikhrev, V. V. Ivanov, and K. N. Koshelev, *Sov. Fizika Plazmy* **16**, 592 (1990).
3. I. V. Romanov, V. L. Paperny, and Yu. V. Korobkin, *Technical Physics Letters* **42**, 97 (2016).
4. O. A. Bashutin, E. D. Vovchenko, E. I. Dodulat, A. S. Savelov, and S. A. Sarantsev, *Plasma Phys. Rep.* **38**, 235 (2012).
5. I. G. Grigoryeva, A. S. Savjolov, and G. Kh. Salakhutdinov, *Plasma Physics Reports* **7**, 801 (2017).
6. E. D. Vovchenko, I. G. Grigoryeva, V. V. Makarov, A. S. Savelov, G. Kh. Salakhutdinov, *Plasma Phys. Rep.* **38**, 1076 (2012).
7. A. V. Balovnev, I. G. Grigoryeva, and G. Kh. Salakhutdinov, *Instrum. Exp. Tech.*, No. 1, 91 (2018).
8. A. V. Balovnev, I. G. Grigoryeva, and G. Kh. Salakhutdinov, *Instrum. Exp. Tech.*, No. 2, 252 (2015).
9. V. V. Averkiev, Yu. P. Kushakevich, A. B. Lyskovich, V. K. Lyapidevskiy, I. M. and Rozman, *Zh. Prikl. Spektrosk.* **49**, 136 (1988).
10. O. A. Bashutin, I. G. Grigoryeva, A. S. Savelov, and G. Kh. Salakhutdinov, *Instrum. Exp. Tech.* No. 3, 372 (2017).
11. V. V. Vikhrev and E. O. Baronova, *Prikl. Fiz.*, No. 5, 71 (1999).
12. A. V. Balovnev, O. A. Bashutin, I. G. Grigoryeva, I. L. Manohin, and G. Kh. Salakhutdinov, *Prikl. Fiz.*, No. 4, 22 (2017).
13. A. N. Dolgov, N. A. Klyachin, and D. E. Prokhorovich, *Usp. Prikl. Fiz.* **3**, 242 (2015).
14. L. M. Vasilyak, S. V. Kostyuchenko, N. N. Kudryavtsev, and I. V. Pilugin, *Phys. Usp.* **164**, 263 (1994).
15. L. P. Babich, *Phys. Usp.* **175**, 1069 (2005).
16. L. P. Babich, Futurepast Inc., Arlington, Virginia, USA, ISSN 1234-5678 (2003).