

Study of electrical arcs parameters in multi-turn railgun channels

A. P. Glinov, Y. G. Dyogtev, A. K. Kondratenko, A. E. Poltanov,
V. N. Ryndin, G. I. Simonova

TRINITY State Research Center, Troitsk, Moscow Region, Russia

Data on physical parameters of the system of freely driven electrical arcs, joint sequentially in an electrical circuit, are obtained. Considered were a stability of synchronous driving of the electric arc system and effects of secondary formation of arcs. Outcomes of the research can find an application for development of various electric arc installations.

УДК 537. 525

Генерация ультрамягкого рентгеновского излучения катодной струей вакуумного разряда

М. Ф. Артамонов, В. И. Красов, В. Л. Паперный
Иркутский государственный университет, Россия

Обнаружены "вспышки" рентгеновского излучения длительностью менее 100 нс, генерируемого в начальной стадии вакуумного искрового разряда с полупериодом 1,5 мкс, амплитудой тока до 10 кА. Методом поглотителей получена зависимость от напряжения накопителя температуры электронов плазмы катодной струи, которая лежит в диапазоне 150–200 эВ при изменении напряжения накопителя от 0,6 до 1,5 кВ. Установлено, что при этом интенсивность рентгеновского излучения возрастает более чем на два порядка. Эффект связывается с образованием вследствие пинч-эффекта перетяжки во фронте расширяющейся в вакуум катодной струи.

В последнее время ведутся работы по созданию источников мягкого рентгеновского излучения, что связано с задачами микроскопии органических сред, медицинской диагностики, микролитографии и др. Для генерации коротких рентгеновских импульсов используется плазма, создаваемая при облучении твердотельной мишени пучками мощных лазеров. Основным недостатком таких источников — высокий энергозатрат, требуемый для получения горячей плазмы, а также относительно низкий КПД и большие габаритные размеры. Поэтому разработка компактных эффективных источников рентгеновского излучения с энергией квантов в области нескольких сотен электронвольт остается весьма актуальной. Перспективным представляется использование для этих целей вакуумных искровых разрядов. Действительно, вспышки рентгеновского излучения с энергией в диапазоне нескольких килоэлектронвольт регистрировались различными группами исследователей в сильноточных искровых разрядах с токами порядка сотен килоампер и энергией накопителя порядка десятков килоджоулей [1, 2].

Рентгеновское излучение со спектром, близким к тормозному, для температуры электронов $T_e \approx 1-1,5$ кэВ регистрировалось также из плазмы высоковольтного плазменного диода с амплитудой тока около 5 кА [3].

В данной работе исследована возможность генерации рентгеновского излучения плазмой вакуумного искрового разряда с относительно небольшими значениями амплитуды тока (до 10 кА) и энергии накопителя (несколько джоулей). На это указывают результаты недавних экспериментов, в которых были обнаружены пучки высокозарядных ионов материала катода, генерируемые катодной струей этого разряда [4, 5]. Для генерации ионов необходим нагрев плазмы катодной струи до значительной температуры, который должен также сопровождаться генерацией тормозного рентгеновского излучения.

Экспериментальные результаты

Измерения проводились в вакуумном разряде с напряжением накопителя U_0 до 2,5 кВ. Схема измерения изображена на рис. 1. Электродная система состояла из медного катода диаметром 1 мм и плоского заземленного сетчатого анода, расположенного на расстоянии 9 мм от торца катода, и помещалась в объем с вакуумом не хуже $(5-8) \cdot 10^{-6}$ торр. Разряд инициировался на торце катода с помощью высоковольтного пробоя по поверхности диэлектрической вставки между катодом и поджигающим электродом. Ток разряда поддерживался конденсатором ($C = 2$ мкФ) и измерялся поясом Роговского непосредственно в цепи катода. Полная индуктивность разрядной цепи не превышала 40 нГн. Для очистки поверхности катод перед началом измерений "тренировали" в течение 10^3 "выстрелов", после чего вариации параметров разряда в разных выстрелах не превышали 20 %.

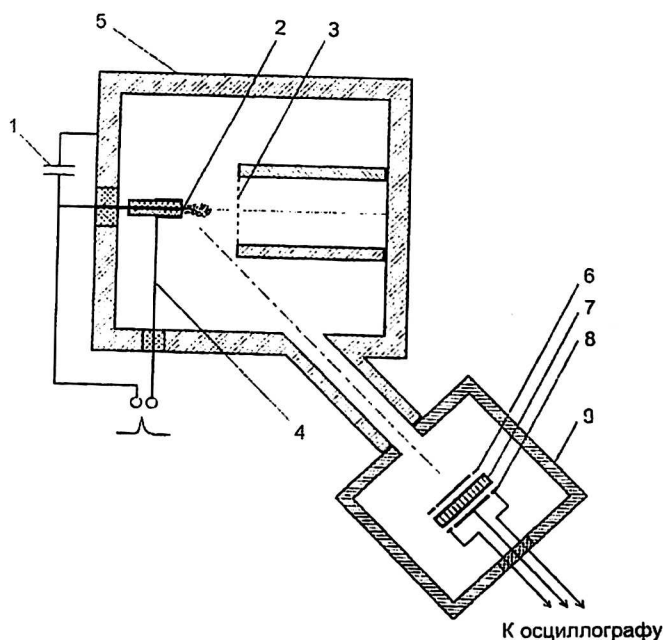


Рис. 1. Схема электродной системы:

- 1 — накопитель; 2 — катод; 3 — анод; 4 — поджигающий электрод; 5 — разрядная камера; 6 — поглотители; 7 — микроканальная пластина; 8 — коллекторы; 9 — камера датчика

Измерения характеристик рентгеновского излучения производили с помощью многоканального датчика, изготовленного на основе микроканальной пластины (МКП). Применение последней для диагностики мягкого рентгеновского излучения импульсных плазменных источников рассмотрено в работе [6]. Квантовый выход пластины достигает 0,1, и эта величина слабо меняется в диапазоне энергий квантов 0,05—1,0 кэВ. Пластина преобразует падающее на ее входную поверхность рентгеновское излучение в электронный поток, который усиливается до $\sim 10^4$ раз.

Оценка жесткости рентгеновского спектра производилась методом поглотителей. Для этого пластина разделялась на три сектора, каждый из них был закрыт поглотителем в виде полипропиленовой пленки толщиной 3,7; 7,4 и 11,1 мкм, соответственно. Пленка исключала попадание на детектор ультрафиолетового излучения и частиц плазмы и пропускала рентгеновское излучение определенного спектрального диапазона. Сигнал каждого сектора МКП попадал на отдельный коллектор и регистрировался осциллографом с временным разрешением около 40 нс. Геометрия измерений позволила исключить регистрацию детектором тормозного рентгеновского излучения анода (см. рис. 1).

На рис. 2 приведены осциллограммы сигнала пояса Роговского и типичного сигнала одного из каналов рентгеновского датчика. Из рис. 2 видно, что в начальной стадии разряда вблизи максимума абсолютной величины производной тока регистрируется рентгеновское излучение плазмы. Излучение генерируется в виде последовательности “вспышек”, каждая длительностью порядка сотен наносекунд, коррелирующих с особенностями на производной тока, причем генерация в основном заканчивается за 300—400 нс до максимума тока разряда. Отметим, что при этом не регистрируются особенности на осциллограмме самого тока разряда.

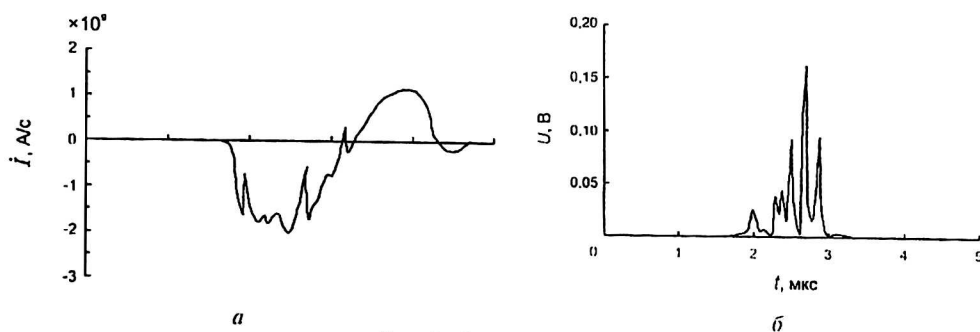


Рис. 2. Осциллограммы:
а — производной тока разряда; б — сигнала датчика

Сигналы датчика, полученные в разных выстрелах при неизменном напряжении накопителя, существенно отличались по форме и амплитуде, поэтому для получения статистически обоснованного результата отношение амплитуд сигналов, полученных с поглотителями различной толщины, усреднялись по 12 выстрелам. Найденное усредненное отношение позволяет оценить жесткость спектра излучения. Для того чтобы на основании этих данных определить энергетические характеристики плазмы (например, температуру электронов), необходимо иметь информацию о природе регистрируемого излучения (тормозное, характеристическое, рекомбинационное), а для первого случая — также о виде энергетического спектра излучающих электронов (равновесный максвелловский, наличие “хвостов” ускоренных частиц и др.).

Линейчатое излучение в данном случае связано с наличием в плазме катодной струи многозарядных ионов материала катода, регистрируемых ранее корпускулярной диагностикой [4, 5]. Используемая методика не позволяла сделать однозначного выбора в пользу какого-либо варианта. Поэтому дальнейшая обработка данных велась *в предположении* о преимущественном вкладе в сигнал тормозного излучения плазмы катодной струи, причем энергетический спектр излучающих электронов предполагался максвелловским с температурой T_e . Отметим, что при указанных значениях толщины поглотителей диапазон электронных температур, где данная методика обеспечивает приемлемую точность измерения (около 20 %), составляет 0,1–1,2 кэВ.

На рис. 3 приведена зависимость температуры плазменных электронов от напряжения накопителя, найденная в указанном предположении по отношению сигналов с двух пар поглотителей. Из рисунка видно, что значения температуры лежат в диапазоне 150–200 эВ с тенденцией к повышению при возрастании напряжения накопителя. Тот факт, что найденные по двум парам поглотителей величины оказались близкими почти во всем диапазоне изменения параметров разряда, указывает на обоснованность предположения о тормозном характере спектра излучения.

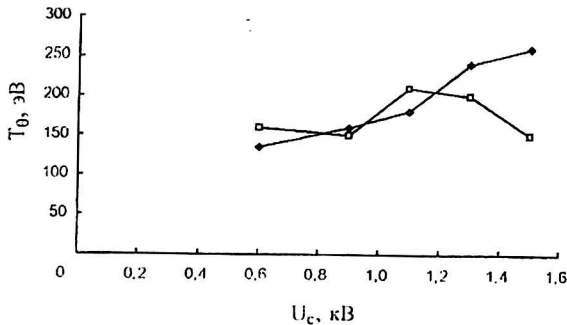


Рис. 3. Зависимость электронной температуры от напряжения накопителя:

- ◆ — для пары полипропиленовых поглотителей толщиной 3,7/7,4 мкм;
- — для поглотителей толщиной 7,4/11,1 мкм

Была исследована также зависимость от напряжения накопителя усредненных амплитуд рентгеновских сигналов со всех каналов, характеризующих интенсивность излучения в разных спектральных диапазонах. Из рис. 4, где приведена эта зависимость, видно, что на всех каналах наблюдается рост интенсивности на 2–2,5 порядка, причем на “жестком” канале рост более значителен.

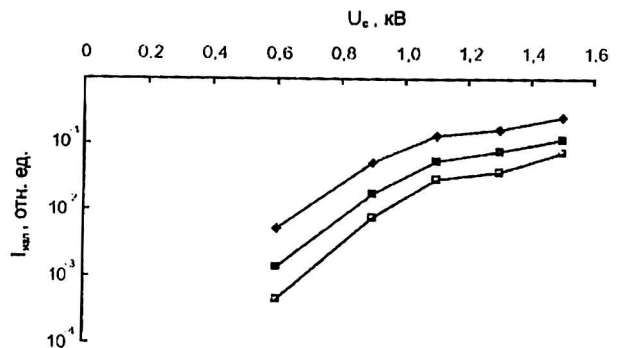


Рис. 4. Зависимость интенсивности рентгеновского излучения от напряжения накопителя:

- ◆ — канал с поглотителем 3,7 мкм;
- — канал с поглотителем 7,4 мкм;
- — канал с поглотителем 11,1 мкм

Обсуждение результатов

Результаты измерений показывают, что в начальной стадии вакуумного искрового разряда в катодной струе возникает область горячей плазмы, генерирующая рентгеновское излучение. Полученные данные не противоречат предположению о том, что регистрируется в основном тормозное излучение электронов плазмы катодной струи с температурой в диапазоне 150—200 эВ. В пользу этого предположения говорит также быстрый рост интенсивности излучения. Действительно, при возрастании напряжения накопителя от 0,6 до 1,5 кВ амплитуда тока разряда возрастает в 2,5 раза. Средняя плотность плазмы в струе также возрастает не более чем в 2,5 раза, а скорее, даже меньше, если учесть возможное увеличение токовой скорости с ростом напряжения на межэлектродном промежутке. Поэтому наблюдаемый рост интенсивности рентгеновского излучения 2—2,5 порядка можно объяснить локальным и более сильным, чем в среднем по сечению струи, возрастанием плотности плазмы в области эмиссии и/или тормозным характером излучения, интенсивность которого пропорциональна квадрату плотности плазмы и квадрату среднего ионного заряда.

Важная особенность процесса генерации рентгеновского излучения — его кратковременный “вспышечный” характер. Генерация происходит на начальной стадии разряда до достижения максимума тока, причем длительность процесса Δt составляет около сотни наносекунд и значительно меньше времени нарастания тока разряда. Это свидетельствует о малом пространственном размере области генерации δ , который можно оценить, используя измеренное значение Δt : $\delta \geq \Delta t V \approx 10^{-1}$ см (здесь $V = 1,2 \cdot 10^6$ см/с — скорость движения катодной струи в искровых разрядах).

Как известно, плазма вакуумного разряда генерируется в микроскопических областях на поверхности катода и расширяется в направлении анода в виде локализованного в пространстве катодного факела. Оценка размера факела в момент генерации излучения (~500—600 нс от начала разряда) дает величину 0,6—0,7 см, что меньше длины межэлектродного промежутка, но существенно превышает масштаб области генерации рентгеновского излучения δ . Отсюда следует, что генерация рентгеновского излучения происходит из локальной области горячей плазмы во фронте движущегося к аноду катодного факела, т. е. до заполнения плазмой межэлектродного промежутка. Причиной образования локальной области горячей плазмы может быть сжатие собственным магнитным полем тока с образованием перетяжки во фронте расширяющейся в вакуум катодной струи.

Полученные результаты согласуются с данными недавно выполненных авторами измерений, где в тех же экспериментальных условиях были зарегистрированы пучки высокозарядных ионов материала катода Cu^{n+} , генерируемые плазмой катодной струи [4, 5]. Ионы генерировались также вблизи максимума производной тока, длительность интервала генерации также составляла около сотни наносекунд. Простейшая оценка электронной температуры по зарядовому составу ионов, выполненная в предположении ионизационного равновесия (из уравнений Саха), также дала величину порядка 100 эВ.

Таким образом, результаты выполненных исследований показывают, что вакуумный искровой разряд с относительно невысокими энергетическими характеристиками может служить источником ультрамягкого рентгеновского излучения с энергией квантов порядка 100 эВ. Интенсивность излучения варьируется в широком диапазоне значений при изменении напряжения накопителя.

Л и т е р а т у р а

1. Koshelev K. N., Pereira N. R.//J. Appl. Phys. 1991. V. 69. P. R21.
2. Гулин М. А., Долгов А. Н., Кириченко Н. Н., Савелов А. С.// ЖЭТФ. 1995. Т. 108. С. 1359.
3. Varishnikov V. I., Paperny V. L.//J. Phys. D: Appl. Phys. 1995. V. 28. P. 2519.
4. Артамонов М. Ф., Красов В. И., Паперный В. Л.// ЖЭТФ. 2001. Т. 120. С. 1404.
5. Артамонов М. Ф., Красов В. И., Паперны В. Л.//J. Phys. D: Appl. Phys. 2001. V. 34. P. 1767.
6. Алтынцева А. Т., Красов В. И., Лебедев Н. В. и др.//ПТЭ. 1983. В. 6. С. 177.

Generation of ultrasoft X-ray emission from cathode jet of a vacuum discharge

M. F. Artamonov, V. I. Krasov, V. L. Paperny
Irkutsk State University, Russia

It has been found that at the initial stage of a vacuum spark burning the "flashes" of a X-ray emission were generated. Dependence of the plasma electron temperature on a capacitor voltage has been obtained with a method of absorbers. The temperature lies within a range of 150–200 eV at the capacitor voltage been varied at the range of 0.6–1.5 keV. It has been established that intensity of the X-ray emission increases therewith more than two orders of magnitude. The revealed phenomenon is due obviously with formation of a neck because of a pinch effect within a boundary of a cathode plasma jet expanding into the ambient vacuum.