

04;07;12

## Исследование рентгеновского излучения диффузного разряда в геометрии стержень—плоскость при атмосферном давлении

© П.Б. Репин, А.Г. Репьев

Всероссийский научно-исследовательский институт экспериментальной физики,  
607188 Саров, Нижегородская область, Россия  
e-mail: ra30@yandex.ru

(Поступило в Редакцию 11 сентября 2003 г. В окончательной редакции 15 декабря 2003 г.)

Экспериментально исследованы пространственные параметры рентгеновского излучения высоковольтного наносекундного разряда, развивающегося в воздухе атмосферного давления в электродной системе стержень(катод)—плоскость при межэлектродном зазоре 10 см. При этом на катод подавался импульс напряжения амплитудой  $\sim 200$  кВ со временем нарастания  $\sim 10$  нс и полной длительностью  $\sim 170$  нс. Фотоэлектронным методом при тех же условиях исследованы интегральные по промежутку характеристики излучения, в частности время генерации. Установлено, что при величине источника рентгеновского излучения не меньше размеров области диффузного свечения разряда, в основном излучение регистрируется из прикатодной области промежутка, т.е. области с резконеоднородным распределением электрического поля. Генерация рентгеновского излучения наблюдается, как правило, после переключения разрядного промежутка, при этом время нарастания рентгеновского импульса составляет  $\sim 3$  нс, длительность  $\sim 10$  нс, эффективная энергия излучения  $\sim 6$  кэВ.

Интерес к исследованию высоковольтного наносекундного разряда, формируемого в газовой среде повышенного давления ( $\leq 10^5$  Па) в длинных промежутках ( $\geq 10$  см) с резконеоднородным распределением электрического поля обусловлен как применением такого типа разряда в ряде устройств [1–3], так и с точки зрения углубления фундаментальных знаний о природе газового разряда. Диффузный разряд, развивающийся в классической электродной геометрии стержень—плоскость, исследован недостаточно хорошо. До сих пор нет полной ясности о механизмах формирования данного разряда, накопились вопросы, связанные с генерацией сопровождающих разряд потоков ионизирующих излучений, практически отсутствуют данные о характеристиках излучения разряда в рентгеновском диапазоне. При этом наблюдаемое от импульса к импульсу изменение внешнего вида разряда (от одноканальной — объемной формы свечения до более сложных — многоканальных форм) характеризуется существенной вариацией электрических и излучательных параметров разряда, что стимулирует проведение экспериментальных исследований.

В настоящей работе приведены результаты исследований пространственных параметров рентгеновского излучения диффузного разряда, развивающегося в воздухе атмосферного давления в электродной системе стержень(катод)—плоскость, при межэлектродном зазоре 10 см. Выполнена оценка эффективной энергии излучения разряда в рентгеновском диапазоне. Исследованы интегральные по промежутку временные характеристики излучения (определены время начала и длительность генерации). При этом амплитуда напряжения на промежутке составляла  $\sim 200$  кВ при времени нарастания  $\sim 10$  нс и полной длительности импульса  $\sim 170$  нс. Ток разряда достигал 600 А.

На рис. 1 представлена электрическая схема стенда. В качестве источника питания *I* применялся блочный импульсный наносекундный генератор БИНГ-6 [4], нагруженный на трансформатор Льюиса [5]. Трансформатор собран на шести семнадцатиметровых отрезках коаксиального кабеля, выходные концы которых соединены последовательно в верхней части разрядной камеры 2. Корпус камеры представляет собой металлическую полость  $\varnothing 60$  и высотой 60 см. Максимальное напряжение выводится в центр камеры, где на ее оси зацеплен стержневой катод из нержавеющей стали  $\varnothing 1$  и длиной 19 см. Катод со стороны анода имеет торец пулеобразной формы: поверхность торца сопряжена с боковой цилиндрической поверхностью катода при помощи вращения дуги окружности радиусом  $\sim 30$  мм (в ряде экспериментов вместо пулеобразного использовался катод с полусферической поверхностью торца). Анод (алюминиевая токосъемная площадка  $\varnothing 18$  см) расположен симметрично катоду внизу камеры и геометрически является частью ее плоского заземленного основания, что обеспечивает вблизи поверхности данного электрода высокую однородность электрического поля.

В экспериментах регистрировались напряжение на разрядном промежутке и ток разряда малоиндуктивны-

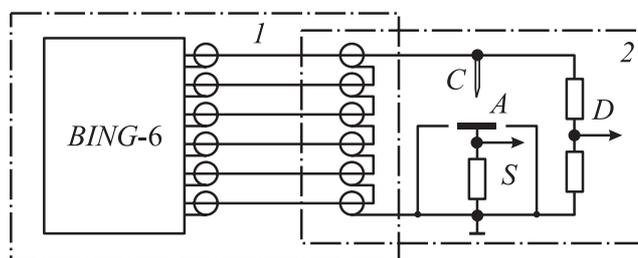


Рис. 1. Схема стенда.

ми резистивными делителем  $D$  и шунтом  $S$ , а также интегральное по длине промежутка излучение разряда в оптическом (300...600 nm) и рентгеновском диапазонах с использованием быстродействующего фотоэлектронного умножителя. При регистрации рентгеновского излучения ФЭУ снабжался пластмассовым сцинтиллятором (3% *p*-терфенила + 0.06% РОРОР в полистироле, время высвечивания < 1 ns), защита от оптического излучения обеспечивалась двухслойным алюминиевым фильтром общей толщиной 20  $\mu\text{m}$ . Наряду с фотоэлектрическим методом параметры рентгеновского излучения исследовались также при помощи фотоэмульсий.

Регистрация электрических сигналов осуществлялась на цифровом осциллографе с полосой пропускания 500 МГц. Сшивка осциллограмм производилась с учетом расстояния между датчиком рентгеновского излучения и разрядом, длины измерительных кабелей и собственного пролетного времени фотоумножителя. Последнее определялось в специальных экспериментах с одновременной регистрацией импульса азотного лазера (длина волны 337 nm, длительность  $\sim 10$  ns) калибруемым ФЭУ и детектором с близким к нулю пролетным временем. Временное разрешение электрических сигналов не хуже 0.5 ns для тока и напряжения и  $\sim 2$  ns для рентгеновского импульса. В экспериментах контролировался визуально и фотографировался внешний вид разряда.

Установлено, что исследуемый разряд при одинаковой геометрии промежутка реализуется с различными формами диффузного свечения. Наблюдаемые формы можно разделить на три основных морфологических типа: объемный, многоканальный и переходной. Разряд объемной формы (вероятность реализации при пулеобразном катоде  $\sim 0.7$ ) представляет собой ярко выделенный центральный канал, размер и интенсивность которого существенно отличаются от остальных каналов. При исследуемом зазоре форма свечения такого разряда визуально представляет собой два конуса с общим основанием  $\varnothing 5$  см вблизи середины промежутка, при этом вершина одного конуса совпадает с острием катода, вершина второго усечена плоскостью анода таким образом, что диаметр разряда в этой плоскости, как правило, не превышает 2 см. Разряд многоканальной формы (преобладающий при полусферическом катоде), как правило, состоит из 4...60 каналов соизмеримого друг с другом диаметра и интенсивности свечения, равномерно распределенных в плоскости анода внутри круга  $\varnothing 6...16$  см. К сравнительно редким разрядам переходного типа относятся остальные, как правило несимметричные, формы диффузного свечения. Изменение формы свечения сопровождается изменением электрических и излучательных характеристик разряда. Кроме того, для разрядов с одинаковой формой свечения наблюдается статистический разброс этих параметров. В итоге вариации тока разряда от импульса к импульсу при постоянных условиях формирования лежат в пределах 170...340 А при объемной форме разряда (пулеобразный катод) и 370...600 А при многоканальной

форме (полусферический катод). В данной работе наибольшее внимание уделено изучению разряда объемной формы, поскольку для него отмечается более высокая стабильность ряда электрических и пространственных параметров, чем у разрядов с другими формами свечения. Это упрощает анализ экспериментальных данных и выявление общих для всех форм разряда закономерностей его формирования.

Фотоэлектронным методом установлено, что при объемной форме свечения рентгеновское излучение регистрируется в среднем у трети разрядных импульсов. Амплитуда рентгеновского импульса в пределах динамического диапазона применяемой методики регистрации варьируется примерно в 10 раз. При этом, как правило, наблюдается корреляция амплитуды тока разряда с интенсивностью его излучения в УФ видимом и рентгеновском диапазонах. При других формах диффузного свечения в среднем также наблюдается корреляция между током разряда и его излучением.

Фотографическим методом было установлено, что доза рентгеновского излучения от нескольких разрядных импульсов достаточна для равномерного надежно фиксируемого почернения немаскированных областей фотопленки, расположенной как в плоскости анода, так и сбоку от разряда при экспонировании через алюминиевую фольгу толщиной 10...20  $\mu\text{m}$ . Оценка эффективной энергии рентгеновского излучения разряда по поглощению в девятиступенчатом алюминиевом клине с толщиной до  $\sim 40$  mg/cm<sup>2</sup> [6,7] дает  $\sim 6$  keV.

Пространственное распределение источников рентгеновского излучения исследовалось фотографическим методом при помощи специально сконструированных кассет, устанавливаемых в двух взаимно перпендикулярных плоскостях. В качестве рентгеночувствительного материала применялась изохраматическая фотопленка (со спектральной чувствительностью до 640 nm). В основном использовались кассеты двух конструкций: одна из кассет располагалась на расстоянии  $\sim 9$  см сбоку от оси разряда (рис. 2), другая устанавливалась под анодом (рис. 3).

На рис. 2 представлена схема диагностики распределения источников рентгеновского излучения вдоль оси раз-

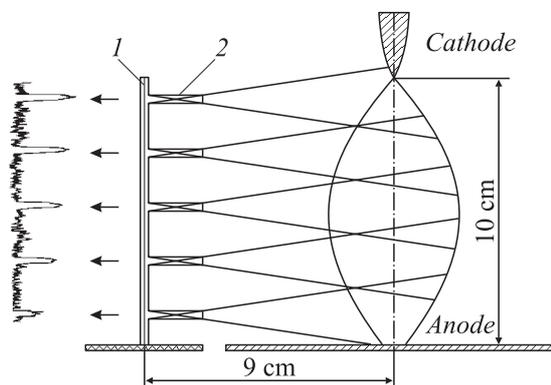
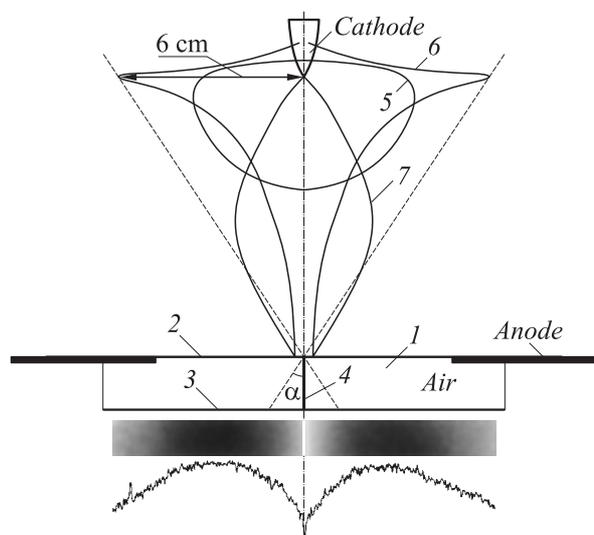


Рис. 2. Схема эксперимента по исследованию рентгеновского излучения вдоль оси разряда.



**Рис. 3.** Диагностика пространственных характеристик рентгеновского излучения теньевым методом (1 — контур объемной формы разряда; 2, 3 — контуры предполагаемой формы источника рентгеновского излучения).

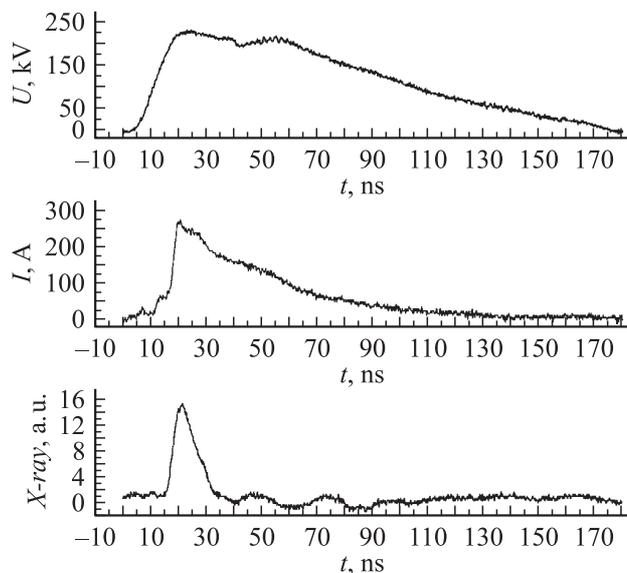
ряда. Фотопленка 1 располагалась эмульсией к разряду в светонепроницаемой кассете 2, изготовленной из электротехнического картона толщиной  $\geq 2$  мм. При этом межэлектродный промежуток условно разбивался на 5 поперечных оси разряда слоев толщиной около 2 см, излучение которых благодаря использованию входящих в состав кассеты плоских коллиматоров воздействовало на пять прямоугольных горизонтально расположенных участков фотопленки размером  $50 \times 3$  мм. Внешние торцы коллиматоров закрывались полосками алюминиевой фольги толщиной  $\sim 10 \mu\text{m}$ . Такая конструкция обеспечивала отсутствие скользящих по поверхности кассеты разрядов даже при размещении ее на достаточно малом расстоянии от оси камеры. За счет этого удалось снизить требуемое для получения поддающихся анализу почернений пленки число разрядных импульсов до 50...150. Типичный профиль плотности почернения полученного на пленке изображения представлен на рис. 2 (слева). Видно, что источник сопровождающего разряд рентгеновского излучения характеризуется неравномерным по длине промежутка распределением дозы излучения. По мере приближения к прикатодной области интенсивность рентгеновского излучения возрастает нелинейным образом. На это указывает вид зависимости плотности почернения от расстояния до катода.

При исследовании рентгеновского излучения разряда в перпендикулярном оси разряда сечении использовалась теньевая методика (рис. 3). Эксперимент, как правило, состоял из 10...50 разрядных импульсов. Под анодом размещался светонепроницаемый металлический контейнер 1 (стакан  $\varnothing 16$  и высотой  $\sim 2$  см), покрытый сверху алюминиевой фольгой 2 толщиной  $20 \mu\text{m}$ . Фольга использовалась в качестве фильтра, отсекающего

излучение в видимом и ультрафиолетовом диапазонах, и служила анодом, обеспечивающим беспрепятственное протекание тока разряда. Под фольгой эмульсией к разряду размещалась фотопленка 3, прижатая к дну контейнера непроницаемым для исследуемого рентгеновского излучения ножом 4 из меди толщиной 0.5 и высотой 18 мм, при этом нож вертикально разделял внутреннюю полость кассеты на две половины. Тень от ножа в рентгеновских лучах участвует в формировании изображения на пленке. Вблизи ножа рентгеновское излучение из одной половины разрядного промежутка не может попасть на пленку, экспонируемую излучением из другой половины, если только источник излучения полностью не локализован вдоль оси разряда на расстоянии, сравнимом с толщиной ножа ( $\sim 1$  мм).

Изображение интегрального теневого отпечатка рентгеновского источника, полученное в одном из экспериментов, и соответствующий отпечатку, перпендикулярный ножу профиль плотности почернения пленки представлены на рис. 3 (внизу). Практически нулевой уровень почернения вблизи ножа показывает, что в поперечном оси разряда сечении пространственное распределение источников рентгеновского излучения в среднем не является локализованным у оси разряда. При удалении от ножа поток воздействующего на пленку излучения сразу не выводит почернение на уровень постоянного значения, где практически суммируется излучение от обеих частей разряда; следовательно, влияние ножа реализуется для источников излучения, расположенных на расстоянии от оси разряда, определяемом углом  $\alpha$  (рис. 3). При зазоре 10 см  $\alpha$  в среднем составляет не менее  $34^\circ$ , что соответствует поперечному размеру источника рентгеновского излучения не меньше видимой области диффузного свечения разряда и расположению излучающих точек, согласно экспериментам, описанным выше, преимущественно в верхней части разрядного промежутка (вблизи катода). Снижение почернения при дальнейшем удалении по кривой профиля от оси разряда обуславливается в основном влиянием основания разрядной камеры. Анализ распределения плотности почернения позволяет предполагать, что источник рентгеновского излучения может иметь форму, контур которой находится в пределах линий 5 и 6, показанных на рис. 3 на фоне контура объемной формы разряда.

В специальной серии экспериментов исследовалось пространственное распределение источника рентгеновского излучения по жесткости. Для этого применялась описанная выше теньевая методика, дополненная девятиступенчатым алюминиевым клином, обеспечивающим оценку эффективной энергии излучения по поглощению в слоях материала разной толщины [6,7]. Клин помещался между ножом 4 (рис. 3) и фотопленкой 3 таким образом, что ступени клина были перпендикулярны ножу. Получаемое на пленке после экспонирования излучением разряда изображение в такой постановке эксперимента представляет собой девять полосок с разной плотностью почернения. Распределение плотности почернения в перпендикулярном ножу направлении



**Рис. 4.** Характерные осциллограммы импульсов напряжения, тока и рентгеновского излучения.

формируется аналогичным вышеописанному образом, а вдоль ножа определяется долей излучения, прошедшего через соответствующую ступень клина. Чем толще слой алюминия, тем в большей степени получаемое изображение обусловлено высокоэнергетичной частью спектра рентгеновского излучения. Анализ полученных в экспериментах профилей плотности почернения изображений в перпендикулярном ножу направлении для разных ступеней клина показал, что они аналогичны профилю, показанному на рис. 3, и имеют практически идентичный друг другу характер. В частности, для всех ступеней клина расстояние от ножа до максимума плотности почернения одинаково. Это дает основания полагать, что пространственное распределение источника рентгеновского излучения разряда по жесткости излучения в среднем однородно. В самом деле, если бы жесткость излучения монотонным образом менялась от оси к периферии разряда, то это привело бы к смещению максимумов плотности почернения изображений вдоль клина.

Характерные при объемной форме разряда осциллограммы рентгеновского импульса, тока разряда и напряжения на промежутке представлены на рис. 4. Следует отметить, что амплитудно-временные параметры рентгеновского излучения заметным образом варьируются от импульса к импульсу. Тем не менее анализ осциллограмм нескольких сот разрядных импульсов позволил выявить некоторые общие закономерности. Как правило, увеличение амплитуды тока разряда ведет к росту длительности импульса рентгеновского излучения на полувысоте, составляющей 6...30 ns. Время нарастания рентгеновского импульса (по уровню 0.1...0.9) составляет ~3 ns, что близко к временному разрешению применяемой диагностики. Следовательно, реальное время нарастания лишь не превышает указанного

значения. Начало рентгеновского импульса, как правило, совпадает с началом тока проводимости разряда, фиксируемого по резкому росту сигнала на осциллограмме тока (~16-я...17-я наносекунда на рис. 4). Для ряда импульсов наблюдается задержка (до 4 ns) рентгеновского излучения относительно начала тока проводимости. Опережающий ток проводимости импульсов рентгеновского излучения не зарегистрировано. Отметим, что начало тока проводимости варьируется от импульса к импульсу относительно начала производной напряжения в пределах 13...24 ns.

Таким образом, установлено, что временные параметры рентгеновского импульса коррелируют с током проводимости разряда — начало излучения совпадает с завершением фазы переключения промежутка и соответствует началу тока проводимости, т.е. по временным параметрам рентгеновское излучение близко к регистрируемому в многоканальном диффузном разряде в электродной системе проволока—плоскость [8]. Это может свидетельствовать о родственном происхождении рентгеновского излучения в наших экспериментах и в [8].

Обнаружено также, что вероятность генерации и интенсивность рентгеновского излучения связаны со стадиями разряда, предшествующими проводимости. Результаты детальных статистических исследований рентгеновского излучения в зависимости от параметров начальных стадий разряда планируется опубликовать в ближайшее время.

Таким образом, в экспериментах установлено, что высоковольтный диффузный разряд, развивающийся в воздухе атмосферного давления в электродной системе стержень(катод)—плоскость, сопровождается импульсом рентгеновского излучения. Область генерации рентгеновского излучения занимает практически весь разрядный промежуток и характеризуется неоднородным распределением интенсивности излучения по длине промежутка. Размер наиболее интенсивно излучающей области (вблизи катода) по крайней мере не меньше видимого размера свечения разряда. Эффективная энергия излучения одинакова во всей области генерации и составляет ~6 keV. Рентгеновский импульс наблюдается не в фазе распространения стримерных каналов в промежутке, а после его переключения, что характерно для диффузных высоковольтных разрядов, формируемых в промежутках с резконеоднородным распределением электрического поля.

## Список литературы

- [1] Буранов С.Н., Горохов В.В., Карелин В.И. и др. // Квантовая электрон. 1991. Т. 18. № 7. С. 891–893.
- [2] Буранов С.Н., Воеводин С.В., Воеводина И.А. и др. Исследования по физике плазмы / Под ред. В.Д. Селемира, А.Е. Дубинова. Саров: РФЯЦ–ВНИИЭФ, 1998. С. 339–361.
- [3] Буранов С.Н., Воеводин С.В., Воеводина И.А. и др. // Сб. тез. докл. Седьмой Нижегородской сессии молодых ученых. Н. Новгород: Изд-во ИПФ РАН, 2002. С. 130.

- [4] *Kudasov B.G., Pavlov S.S., Tananakin V.A. et al.* // 11<sup>th</sup> IEEE Intern. Pulsed Power Conf. / Ed. Cooperstein G., Vitkovitsky I. 1998. P. 1572.
- [5] *Льюис И., Уэлс Ф.* Миллимикросекундная импульсная техника. М.: ИЛ, 1956.
- [6] Радиационная дозиметрия / Под ред. Дж. Хайна, Г. Брау-пелла. М.: ИЛ, 1958. С. 3–108.
- [7] Физические измерения в газовой динамике и при горении. Пер. с англ. / Под ред. Ю.Ф. Дитякина. М.: ИЛ, 1957.
- [8] *Буранов С.Н., Горохов В.В.* и др. Исследования по физике плазмы / Под ред. В.Д. Селемира, А.Е. Дубинова. Саров: РФЯЦ–ВНИИЭФ, 1998. С. 39–67.