

04;07;12

## Рентгеновское излучение из объемного слаботочного разряда в воздухе атмосферного давления

© И.Д. Костыря, В.Ф. Тарасенко

Институт сильноточной электроники СО РАН, Томск

E-mail: VFT@loi.hcei.tsc.ru

*В окончательной редакции 12 декабря 2007 г.*

Исследован пробой промежутков с катодом малого радиуса кривизны при воздействии наносекундных импульсов высокого напряжения. В воздухе атмосферного давления зарегистрировано рентгеновское излучение из области разрядного промежутка со слаботочным объемным (диффузным) разрядом. Показано, что при разряде с малой интенсивностью свечения в видимой области спектра рентгеновское излучение генерируется как из промежутка, так и из анода.

PACS: 52.80.Mg

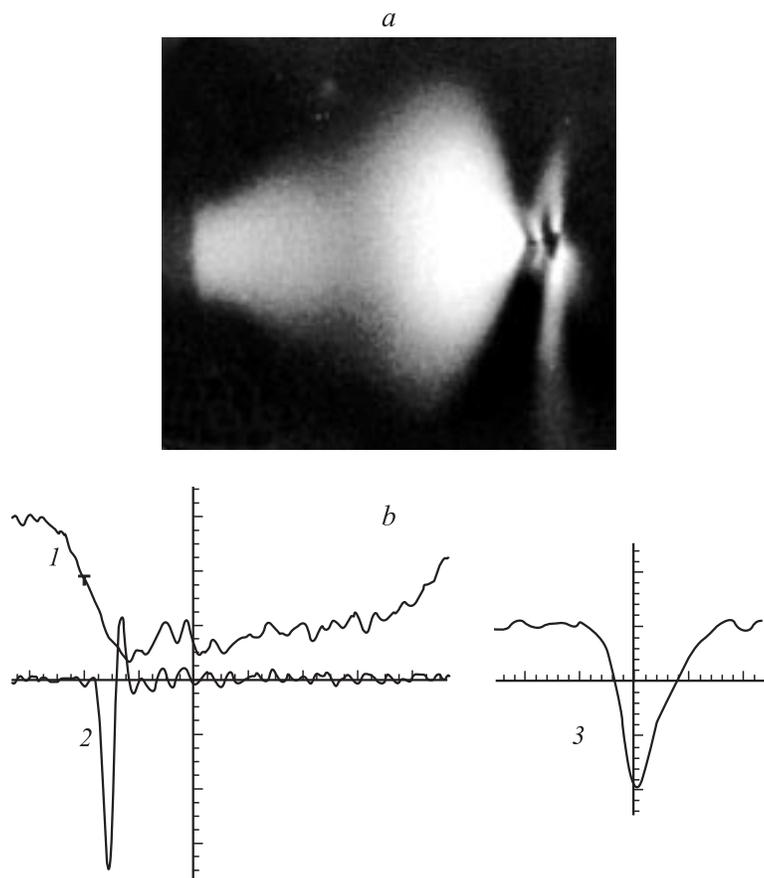
1. Рентгеновское излучение, а также пучки убегающих электронов, при формировании разрядов различных типов в неоднородном электрическом поле исследовались во многих работах (см. монографию [1] и обзор [2], а также ссылки в них). Данный вопрос имеет фундаментальное значение, поскольку быстрые электроны и рентгеновское излучение в разрядных промежутках влияют на пробивное напряжение и форму разряда. В работах [3,4] сообщалось о регистрации рентгеновского излучения и пучка убегающих электронов в воздухе атмосферного давления при микросекундных импульсах высокого напряжения. На интегральной картине свечения разряда в [3,4] наблюдался искровой канал, однако информация об ионизирующем излучении существенно отличалась. В работе [3] при напряжениях  $\sim 280$  kV в предпробойной стадии разряда из разрядного промежутка регистрировалось мягкое рентгеновское излучение, а в работе [4] сообщалось, что при микросекундном фронте импульса напряжения амплитудой  $\sim 70$  kV в момент роста тока проводимости за фольгой зарегистрирован пучок убегающих электронов. Оценки энергии рентгеновских квантов [3] дали величину

2–4 keV, а в [4] утверждалось, что в промежутке генерируются электроны с энергией, соответствующей приложенному напряжению,  $\sim 70$  keV. В работе [5] на промежуток в конфигурации острие–плоскость подавались импульсы напряжения амплитудой 200 kV с полной длительностью 170 ns и фронтом 10 ns. Потенциальным электродом являлось острие, которое было катодом. Эффективная энергия рентгеновского излучения, измеренная в работе [5], составила 6 keV и не зависела от места на оси межэлектродного промежутка.

Цель данной работы — провести исследования рентгеновского излучения в воздухе атмосферного давления из различных областей разряда, в том числе из области со слаботочным объемным (диффузным) разрядом, а также в предпробойной стадии разряда.

2. Экспериментальные исследования были проведены с использованием трех наполненных воздухом атмосферного давления промежутков, которые подключались к трем импульсным генераторам. Генераторы РАДАН-220, РАДАН-303 и АРИНА формировали импульсы напряжения отрицательной полярности с амплитудой от 100 до 400 kV, длительностью на полувысоте  $\sim 2$ –5 ns и переднем фронте 0.5–1.5 ns. Промежуток между плоским или цилиндрическим анодом и катодом изменялся от 1 до 8 см. Катод выполнялся из иглы, или трубки из фольги диаметром 6 mm (установка № 1), или из стержня диаметром 1–6 mm и длиной до 19 cm (установка № 2). В последнем случае разряд формировался между цилиндрическим анодом с внутренним диаметром 160 mm и боковой поверхностью стержня. При плоском аноде использовались два газовых диода с внутренними диаметрами 160 (установка № 1) и 50 (установка № 3) mm.

Интегральная картина свечения разряда фотографировалась пленочным фотоаппаратом ЗЕНИТ или цифровым фотоаппаратом Olympus Camedia C-2020 Z. Экспозиционная доза рентгеновского излучения определялась с помощью дозиметров Argow-Tech, Inc (Model 138), которые были чувствительны к излучению с энергией квантов более 16 keV. Кроме того, рентгеновское излучение фиксировалось по засветке пленки РФ-3, которая помещалась в черную бумагу толщиной  $\sim 100$   $\mu$ m. Форма импульсов рентгеновского излучения регистрировалась с помощью детектора СППД11-04, временное разрешение которого составляло  $\sim 2$  ns. Для измерения электрических сигналов использовались цифровые осциллографы TDS6604 (6 GHz, 20 GS/s) и TDS-3034 (0.3 GHz, 2.5 GS/s).



**Рис. 1.** Фотография излучения разряда, полученная на установке № 1 при зазоре 54 мм (*a*). Катод игла (справа), анод плоскость. Осциллограммы импульсов (*b*) напряжения на газовом диоде (1), СЛЭП (2) и рентгеновского излучения (3), полученные на установке № 3 с генератором РАДАН-303. Масштаб по горизонтали 0.5 ns/div (1, 2) и 2 ns/div (3). Масштаб по вертикали 64 kV/div (1), 50 (2) и 5 V/div. Импульсы (1) и (2) синхронизованы во времени.

3. При подаче наносекундных импульсов напряжения при больших разрядных промежутках на всех трех установках формировался диффузный (объемный) разряд. На рис. 1, *a* показана фотография разряда

между острием и плоским катодом (установка № 1). При зазоре 54 mm разряд имел форму двух диффузных конусов с сомкнутыми на расстоянии  $\sim 15$  mm от катода основаниями. Кроме того, с катододержателя, в месте стыковки с катодом, были видны отдельные струи, не доходящие до боковых стенок камеры. Данная форма разряда фиксировалась фотоаппаратами за один импульс. Контракция разряда наблюдалась только при малых зазорах,  $\sim 12$  mm и менее.

При уменьшении напряжения до  $\sim 100$  kV и диаметре цилиндрического катода 6 mm (установка № 2) около катода в темноте визуально наблюдалось слабое диффузное свечение, которое не регистрировалось фотоаппаратами за десятки импульсов. При уменьшении диаметра катододержателя до 1 mm или (и) при увеличении напряжения генератора до  $\sim 150$  kV и более форма разряда изменялась, по всей длине катода формировались диффузные струи, которые достигали боковой стенки камеры. Интенсивность свечения разряда увеличивалась.

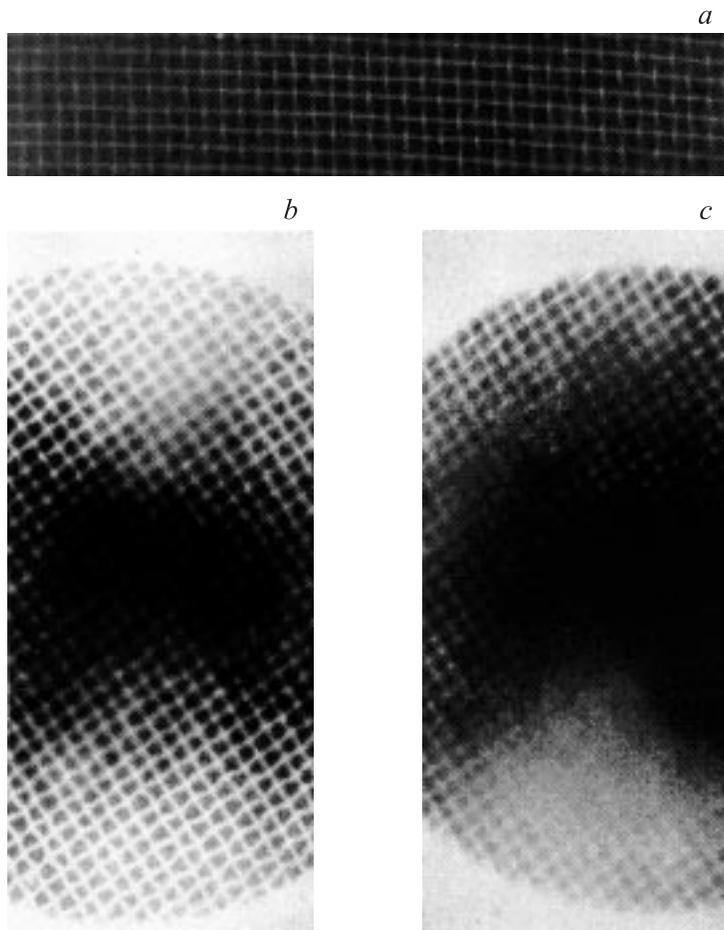
На установке № 3 при зазорах 12–16 mm формировался сильноточный (ярко светящийся) разряд между острой кромкой катода и анодом. Разряд имел форму отдельных диффузных струй, расширяющихся к аноду. Диаметр ярко светящейся области у анода при межэлектродном зазоре 12 mm не превышал 16 mm. В остальной части газового диода при съемках фотоаппаратом свечение разряда не регистрировалось. Однако при экранировке излучения основного разряда можно было заметить более слабое свечение по всему объему газового диода. Осциллограмма напряжения на промежутке ( $I$ ), полученная на установке № 3 с генератором РАДАН-303, приведена на рис. 1 при напряжении холостого хода генератора 280 kV. Напряжение на промежутке примерно в два раза меньше напряжения холостого хода, что обусловлено формированием сильноточного разряда, ток через промежуток при котором составляет около 2.5 kA. Ток разряда на установке № 2 при напряжении  $\sim 100$  kV и диаметре катода 6 mm не превышал нескольких десятков ампер. Таким образом, при подаче на газовый диод наносекундных импульсов высокого напряжения можно выделить четыре формы диффузного разряда: 1. Сильноточный диффузный (объемный) разряд с ярким свечением в виде струй или конусов, которые заканчивались на аноде, плотность тока на аноде на установке № 3 превышала  $1$  kA/cm<sup>2</sup>. Интенсивность свечения разряда зависела от межэлектродного зазора, радиуса кривизны катода и напряжения генератора. 2. Разряд в виде диффузных струй с относительно ярким свечением, которые обрывались в межэлектродном зазоре (импульсный коронный разряд). 3. Разряд со

слабой интенсивностью излучения, визуально видимый у катода и имеющий плотностью тока на аноде менее  $1 \text{ A/cm}^2$ . 4. Разряд с относительно слабой интенсивностью излучения, визуально наблюдаемый во всем объеме газового диода, параллельно с которым в местах с наибольшим усилением электрического поля промежутков замыкался сильноточным диффузным разрядом. При первых двух формах разряда, а также при 4-й форме в области сильноточного разряда, на катоде были хорошо видны яркие пятна.

Интенсивность и энергия квантов рентгеновского излучения из газового диода зависела от формы разряда. Наибольшая интенсивность рентгеновского излучения регистрировалась в условиях формирования сильноточного лавинного электронного пучка (СЛЭП) [6,7]. Длительность СЛЭП на установке № 3 составляла  $\sim 100 \text{ ps}$  на полувывоте, а его амплитуда  $\sim 100 \text{ A}$  (рис. 1, 2). Регистрируемая длительность импульса рентгеновского излучения в этих условиях определялась разрешающей способностью имеющегося детектора СППД11-04 и составила на полувывоте  $\sim 2 \text{ ns}$  (рис. 1, 3). Спектр регистрируемого рентгеновского излучения был очень широк (от 10 до  $200 \text{ keV}$  [7]). Причем доля рентгеновских квантов с энергией, превышающей напряжение на промежутке, была менее 5%. В этих условиях были зарегистрированы максимальные экспозиционные дозы за анодом из медной фольги толщиной  $25 \mu\text{m}$ . Средняя доза за один импульс в серии из 200 импульсов составила  $\sim 0.4 \text{ mR}$ . Если учесть нестабильность амплитуды тока пучка в отдельных импульсах, то можно утверждать, что максимальная экспозиционная доза в отдельных импульсах превышала  $1 \text{ mR}$ .

На установках № 1 и 2 при напряжении  $150 \text{ kV}$  за тонкими фольгами также регистрировались длительности рентгеновских импульсов  $\sim 2 \text{ ns}$  (сбоку и с торца). Амплитуда сигнала при одинаковых фольгах и расстояниях от границы ярко светящейся области разряда в оптимальных условиях была в несколько раз больше с торца за плоским анодом, чем сбоку. Форма импульса рентгеновского излучения за плоским анодом и сбоку от оси разряда при данном разрешении детектора совпала. На установке № 1 при зазоре  $54 \text{ mm}$  средняя экспозиционная доза за один импульс в серии из 650 импульсов составила  $\sim 0.09 \text{ mR}$ , а за боковым окном  $0.03 \text{ mR}$ . При напряжении  $\sim 100 \text{ kV}$  зарегистрировать импульсы рентгеновского излучения детектором СППД11-04 на установке № 2 не удалось. Также в этих условиях за 1000 импульсов рентгеновское излучение не регистрировалось дозиметром.

На фотопленке автографы рентгеновского излучения были зарегистрированы на всех установках, в том числе на установке № 2 при напряжении  $\sim 100$  kV. На рис. 2, *a* приведены автографы рентгеновского излучения, полученные на установке № 2 при напряжении 100 kV за сеткой на боковом окне. Энергия квантов рентгеновского излучения на установке № 2 не превышала 16 keV, и они излучались из промежутка. Изображение проволок сетки, которые располагались параллельно катододержателю, на автографе было более четким (рис. 2, *a*); из этого следует, что рентгеновское излучение генерировалось в основном из прикатодной области. Весьма интересными оказались автографы за анодом, полученные на установке № 3 (рис. 2, *b, c*), напряженность электрического поля в промежутке для которой была максимальной. Диаметр автографа ( $\sim 50$  mm) был равен диаметру фольги (плоской части анода), а отпечаток сетки зависел от мест положения сетки и фольги. При разряде на сетку изображение сетки по краям автографа имеет неправильную форму и резкие границы. При разряде на фольгу (сетка располагалась за фольгой перед конвертом с фотопленкой) изображение сетки по краям автографа имеет правильную форму (рис. 2, *c*) и видно, что сетка плетеная. Данную особенность можно объяснить тем, что на край фольги в первом случае попадают электроны, которые движутся под углом к центральной оси. Эти электроны проходят через ячейки сетки и генерируют рентгеновское излучение из отдельных областей фольги. Автограф на пленке соответствует пучку электронов, прошедших сетку под углом. При аноде из фольги электроны бомбардируют анод на его краях также под углом, однако при этом создается источник рентгеновского излучения со всей поверхности анода соответственно и на автографе сохраняется форма сетки и проявляется ее структура. В центре автографа видна область с более интенсивной засветкой. К области с интенсивной засветкой фотопленки примыкает разряд с ярким свечением. В этой области при разряде на сетку и увеличении толщины фольги на пленке автограф состоит из отдельных круглых пятен, что можно связать с влиянием сетки на формирование пучка электронов в прианодной области. Из экспериментов на установке № 3 следует, что основной вклад в рентгеновское излучение из области слаботоочного разряда с увеличением напряженности поля дают электроны, которые тормозятся на аноде, а не в промежутке. Отметим, что в данных условиях, которые существенно отличаются от условий работы [8], рентгеновское излучение из незавершенного разряда по поверхности изолятора газового диода не регистрировалось.



**Рис. 2.** Автографы на фотопленке, полученные на установке № 2 сбоку от оси разряда за 650 импульсов при напряжении  $\sim 100$  kV (*a*) и на установке № 3 за анодом за один импульс (*b, c*). Анод—сетка и за ней алюминиевая фольга толщиной  $100\ \mu\text{m}$  (*b*); анод—алюминиевая фольга толщиной  $100\ \mu\text{m}$  и за ней сетка (*c*).

4. Таким образом, в данной работе показано, что при подаче отрицательных наносекундных импульсов высокого напряжения в промежутках с неоднородным распределением электрического поля практически у всей поверхности катода в широком диапазоне экспериментальных условий формируется разряд со слабой интенсивностью свечения. Данный диффузный разряд является источником рентгеновского излучения и имеет место как при параллельном сильноточном разряде в местах с максимальным электрическим полем, так и при отсутствии пробоя промежутка.

Работа выполнена при поддержке программы „Фундаментальные проблемы нано- и пикосекундной электроники большой мощности“ и МНТЦ (проект № 2596).

## Список литературы

- [1] *Королев Ю.Д., Месяц Г.А.* Физика импульсного пробоя газов. М.: Наука, 1991.
- [2] *Тарасенко В.Ф., Яковленко С.И.* // УФН. 2004. Т. 174. № 9. С. 953–971.
- [3] *Босамыкин В.С., Карелин В.И., Павловский А.И., Репин П.Б.* // ЖТФ. 1980. Т. 6. В. 14. С. 885–888.
- [4] *Лойко Т.В.* // ЖТФ. 1980. Т. 50. В. 2. С. 392–393.
- [5] *Репин П.Б., Репьев А.Г.* // ЖТФ. 2004. Т. 74. В. 7. С. 33–37.
- [6] *Tarasenko V.F., Shpak V.G., Shunailov S.A., Kostyrya I.D.* // Laser and Particle Beams. 2005. V. 23. N 4. P. 545–551.
- [7] *Тарасенко В.Ф., Костыря И.Д., Петин В.К., Шляхтун С.В.* // ЖТФ. 2006. Т. 76. В. 12. С. 35–46.
- [8] *Дашук П.Н., Кулаков С.Л., Рыбин Ю.В.* // Письма в ЖТФ. 1985. Т. 11. В. 7. С. 438–442.