

## Исследование динамики искрового разряда в воздухе в промежутке острие–плоскость методом теневого фотографирования

© К.И. Алмазова, А.Н. Белоногов, В.В. Боровков, Е.В. Горелов, И.В. Морозов, А.А. Тренькин, С.Ю. Харитонов

Российский Федеральный ядерный центр  
Всероссийский научно-исследовательский институт экспериментальной физики,  
607190 Саров, Россия  
e-mail: trenkin@ntc.vniief.ru

(Поступило в Редакцию 5 мая 2018 г.)

С использованием метода теневого фотографирования исследована микроканальная структура искрового разряда в промежутке острие–плоскость длиной 1.5 mm. Зарегистрирована динамика разряда на временах от единиц до сотен наносекунд, включающая развитие микроканалов от острия вглубь разрядного промежутка, ветвление, переключение разрядного промежутка, расширение микроканалов, формирование общего фронта ударной волны искры и его движение. Обнаружены структуры полукольцевой формы, которые отождествлены с полусферическими ударными волнами, источниками которых являются процессы формирования микрократеров в областях контакта микроканалов с плоским электродом.

DOI: 10.21883/JTF.2019.01.46964.178-18

### Введение

Настоящая работа является продолжением работы [1], в которой методом теневого фотографирования исследовалось развитие пространственной структуры искрового разряда в воздухе атмосферного давления в промежутке острие–плоскость в режиме однократных импульсов. Было обнаружено, что на начальной стадии разряд развивается в форме микроканальной структуры — пучка большого количества каналов микронного диаметра. Динамика структуры на временах от единиц до десятков наносекунд включает развитие микроканалов от острия вглубь разрядного промежутка их ветвление и расширение. Одновременно с этим на поверхности плоского электрода была зарегистрирована обусловленная разрядом эрозионная микроструктура в виде совокупности большого количества микрократеров.

Следует, однако, отметить, что в [1] в поле зрения оптической системы регистрации попадала только половина разрядного промежутка, включающая электрод–острие, что не позволяло визуализировать динамику процессов вблизи плоского электрода.

В настоящей работе с целью расширения диапазона данных проведена серия экспериментов, в которой получены тенеграммы всего межэлектродного промежутка.

### Экспериментальная аппаратура и методика

Подробно экспериментальная аппаратура и методика теневого фотографирования описаны в [1]. В общих чертах эксперименты заключались в следующем. На разрядный промежуток с генератора импульсов напряжения посредством кабельной линии подавался импульс напряжения амплитудой 25 kV и длительность фронта по уровню 0.1–0.9 около 7 ns. Электродная система

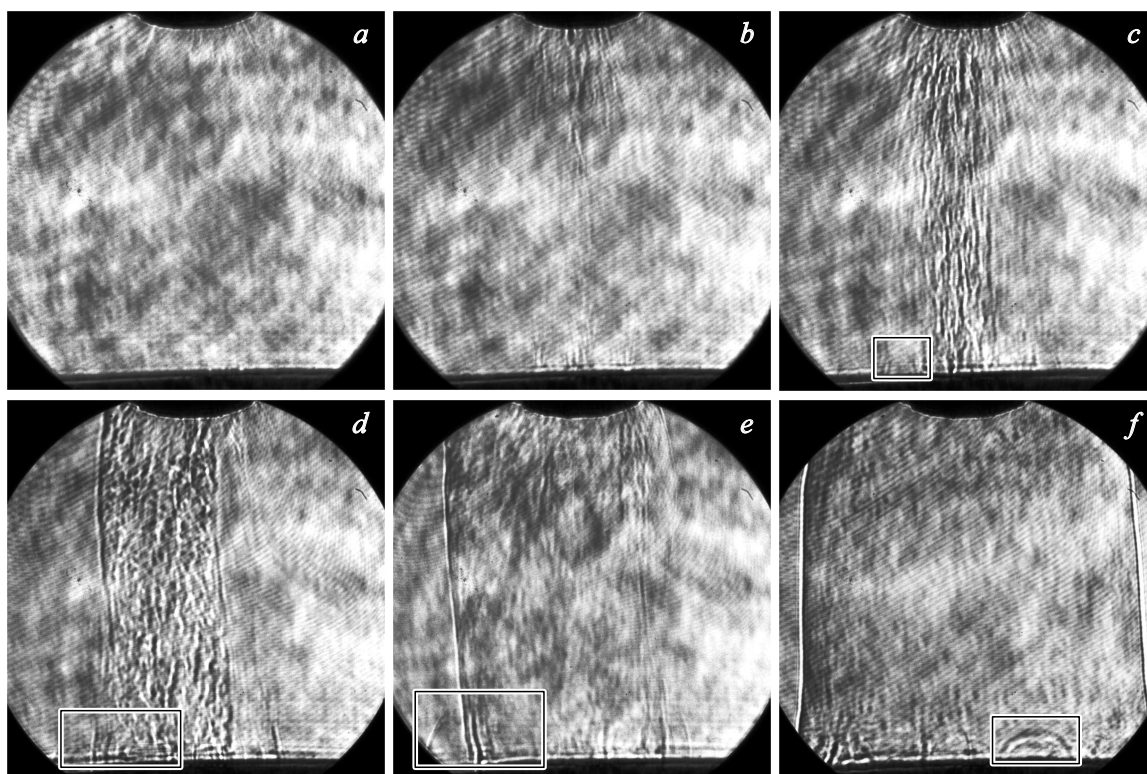
имела геометрию „острие–плоскость“. Электрод–острие длиной 5 cm, диаметром 15 mm с углом при вершине 80° и радиусом кривизны 0.2 mm изготовлен из алюминиевого сплава. В экспериментах в качестве материала плоского электрода использовались нержавеющая сталь, медь и алюминиевый сплав.

После пробоя промежутка в разрядной цепи возникал колебательный процесс с экспоненциальным затуханием тока и напряжения. Длительность полуволны составляла 0.5  $\mu$ s, амплитуда тока и время его затухания соответственно 1.5 kA и 2  $\mu$ s [1]. За момент пробоя условно был принят момент начала роста тока и соответственно спада напряжения.

Теневая съемка разряда осуществлялась в одноканальном режиме с помощью цифрового электронно-оптического регистратора. Экспозиция кадра определялась длительностью импульса зондирующего излучения. В качестве источника зондирующего излучения использовался твердотельный лазер с длиной волны 532 nm и длительностью импульса на полувысоте 5 ns. Сдвигом момента запуска лазера и оптической системы регистрации относительно момента пробоя обеспечивалась визуализация различных стадий разрядного процесса. В работе [1] межэлектродный зазор составлял 3.5 mm. В настоящих экспериментах для обеспечения съемки всего межэлектродного зазора при неизменной разрешающей способности оптической системы (не хуже 5  $\mu$ m) межэлектродный зазор был уменьшен до 1.5 mm.

### Экспериментальные результаты и их обсуждение

На рисунке представлены тенеграммы разряда в различные моменты времени относительно пробоя. Видно, что, как и в [1], разряд развивается в микроканальной



Тенеграммы разряда в различные моменты времени относительно начала пробоя:  $a$  — 0,  $b$  — 5,  $c$  — 30,  $d$  — 70,  $e$  — 135,  $f$  — 335 ns. Электрод-острие находится сверху, межэлектродное расстояние 1.5 mm. Прямоугольниками выделены области присутствия полукольцевых структур.

форме. При этом раньше всего микроканалы регистрируются вблизи острия (рисунок,  $a$ ), затем они развиваются вглубь промежутка, ветвятся. К 5 ns микроканалы регистрируются во всем промежутке, в том числе у поверхности плоского электрода, где возникают точки привязки (рисунок,  $b$ ). С течением времени микроканалы расширяются (рисунки  $b$  и  $c$ ). Оцененная по тенеграммам скорость их расширения, по крайней мере, на временах до 30 ns составляет около 750 m/s, что заметно превосходит скорость звука и, по-видимому, соответствует ударному режиму расширения микроканалов. Отметим, что данное значение близко к скорости расширения микроканалов, полученной в расчетах [2] и оценках [3].

К 70 ns формируется общий фронт ударной волны искры (рисунок,  $d$ ), скорость которой снижается от 10 до 2 km/s на временах от 70 до 150 ns и затем в интервале времени от 150 до 350 ns находится в диапазоне от 2 до 4 km/s. На более поздних временах фронт ударной волны (граница канала искры) выходит за пределы поля зрения оптической системы регистрации.

В экспериментах [1] была зарегистрирована эрозионная микроструктура на поверхности плоского электрода. Так, на медном электроде отпечаток канала представляет собой скопление около 80 микрократеров диаметрами от 5 до 35  $\mu\text{m}$  [1]. Причем их количество, по-видимому, сильно занижено ввиду использования для визуализации

оптического микроскопа с относительно малой кратностью увеличения. Более детальное исследование эрозионной структуры плоского электрода проводилось в работах [4,5] с использованием сканирующего электронного микроскопа.

Полученные результаты дают основания предполагать, что микрократеры сформировались в результате выдавливания или выброса вещества материала электрода. Можно предположить, что вещество из микрократеров перешло в жидкое, сублимированное или в плазменное состояние. Для этого необходим достаточно мощный энерговклад в область микрократеров, особенно с учетом относительно высокой теплопроводности меди.

В этой связи следует особо отметить присутствие на тенеграммах вблизи поверхности плоского электрода структур полукольцевой формы, опирающихся на плоский электрод (см. рисунок). Центры этих структур расположены на поверхности плоского электрода и находятся в области разряда. Полукольцевые структуры присутствуют на тенеграммах, начиная с 30 ns и вплоть до выхода границы канала искры за пределы поля зрения оптической системы регистрации (на больших временах регистрация не осуществлялась).

Судя по внешнему виду указанные структуры можно отождествить с полусферическими ударными волнами, источники которых (области энерговыведения) распо-

ложены на поверхности плоского электрода. Оценка скорости фронта волны дает значения от 1 до 10 km/s, что соответствует ударному режиму.

Данные структуры различимы на большинстве, однако, не на всех полученных тенеграммах. Причинами этого, скорее всего, являются определенная вероятность их попадания в область фокусировки оптической системы регистрации, а также „помеховое“ влияние возмущенной газовой среды в разрядной области. Видимо поэтому, наиболее четко полукольцевые структуры, точнее их части, различимы за границей канала искры — в невозмущенных областях.

Поскольку при минимальном зарегистрированном радиусе полукольцевой структуры около 100  $\mu\text{m}$  она обладает правильной формой, можно предположить, что источник волны „точечный“, т.е. имеет размер  $\ll 100 \mu\text{m}$ . Таким источником может являться процесс энерговыделения в области с пространственным масштабом, соответствующего размеру микрократера.

На некоторых тенеграммах (рисунок, *e*) отчетливо видно, что в центре полукольцевой структуры находится область контакта микроканала с поверхностью электрода.

Указанные факты свидетельствуют о том, что источником регистрируемых полусферических ударных волн являются процессы формирования микрократеров в области контакта микроканала с плоским электродом.

В этом случае полученные результаты позволяют сделать следующие выводы.

Во-первых, причиной формирования микрократеров являются микроканалы. Свидетельством этому является более раннее формирование микроканалов и областей их контакта с плоским электродом по сравнению с моментом появления полукольцевых структур. В противном случае эти структуры регистрировались бы и на ранних (менее 30 ns) стадиях разряда, особенно в условиях невозмущенной на этих временах среды (рисунок, *a* и *b*).

Во-вторых, формирование микрократеров может происходить непрерывно в течение разряда вплоть до его поздних стадий.

Исходя из полученных тенеграмм, наиболее ранние моменты появления источников полусферических ударных волн находятся в интервале от 15 до 30 ns. Интересно отметить, что именно в этом интервале завершается формирование ядра разряда, обуславливающего переход от диффузной фазы к искровой [6,7]. Кроме того, на этих временах начинается генерация рентгеновского излучения в многоканальном разряде, также обладающем микроструктурой [3].

## Заключение

Методом теневого фотографирования исследована пространственная структура искрового разряда в воздухе атмосферного давления в промежутке острие–плоскость длиной 1.5 mm.

Показано, что в начальной стадии разряд развивается в форме микроканальной структуры–пучка большого количества каналов микронного диаметра. Микроструктура раньше всего возникает вблизи острия и к 5 ns микроканалы регистрируются во всем промежутке, в том числе у поверхности плоского электрода.

Зарегистрирована динамика разряда на временах от единиц до сотен наносекунд, включающая развитие микроканалов от острия вглубь разрядного промежутка, ветвление, расширение микроканалов, формирование общего фронта ударной волны искры и его движение.

Обнаружены структуры полукольцевой формы, опирающиеся на плоский электрод, которые присутствуют на тенеграммах, начиная с 30 ns от момента пробоя. Центры структур расположены на поверхности плоского электрода и находятся в области разряда. Структуры отождествлены с полусферическими ударными волнами, распространяющимися со скоростью от 1 до 10 km/s.

Установлено, что источниками полусферических ударных волн могут являться процессы формирования микрократеров в областях контакта микроканалов с плоским электродом.

Авторы благодарны В.И. Карелину за поддержку работы.

## Список литературы

- [1] Алмазова К.И., Белоногов А.Н., Боровков В.В., Горелов Е.В., Морозов И.В., Тренькин А.А., Харитонов С.Ю. // ЖТФ. 2018. Т. 88. Вып. 6. С. 827–831.
- [2] Тренькин А.А., Карелин В.И., Федосеев И.Г. // Ядерная физика и инжиниринг. 2014. Т. 5. № 6. С. 524–530.
- [3] Buranov S.N., Gorokhov V.V., Karelin V.I., Repin P.B., Rep'ev A.G., Trenkin A.A. Generation of high-energy electrons and X-rays in high-voltage diffuse discharges at atmospheric pressure with interelectrode gaps up to tens of centimeters. In book „Generation of Runaway Electron Beams and X-ray in high pressure gases“. Vol. 1. Techniques and Measurements. Ed. V.F. Tarasenko. N.Y.: Nova Publishers, 2016.
- [4] Карелин В.И., Тренькин А.А., Шибитов Ю.М., Блинова О.М., Ясников И.С. // ЖТФ. 2016. Т. 86. Вып. 10. С. 54–57.
- [5] Карелин В.И., Тренькин А.А., Шибитов Ю.М., Блинова О.М., Ясников И.С. // ЖТФ. 2017. Т. 87. Вып. 9. С. 1411–1415.
- [6] Бакихт Е.Х., Блинова О.М., Ерофеев М.В., Карелин В.И., Рипенко В.С., Тарасенко В.Ф., Тренькин А.А., Шибитов Ю.М., Шулепов М.А. // ФП. 2016. Т. 42. № 9. С. 859–870.
- [7] Тренькин А.А. // Известия вуз. Физика. 2016. Т. 59. № 9/3. С. 147–151.