

## Динамика пространственной структуры микросекундного импульсного барьерного разряда в воздухе атмосферного давления в геометрии острие–плоскость при различных полярностях питающего напряжения

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

Российский Федеральный ядерный центр — Всероссийский научно-исследовательский институт экспериментальной физики,

607190 Саров, Россия

e-mail: alexey.trenkin@gmail.com

Поступило в Редакцию 2 июля 2020 г.

В окончательной редакции 1 сентября 2020 г.

Принято к публикации 7 сентября 2020 г.

С использованием скоростного и теневого фотографирования исследована динамика микросекундного импульсного барьерного разряда в воздухе атмосферного давления в геометрии острие–плоскость с микрометровым разрешением и наносекундной экспозицией. Показано, что разряд реализуется серийно с последовательной эволюцией его структуры как в рамках одной серии, так и от серии к серии. Установлено, что при обеих полярностях импульса питающего напряжения разряд развивается от острейного электрода в виде совокупности большого числа каналов микронного диаметра. На поздних стадиях разряд представляет собой несколько ярко светящихся микроструктурированных каналов, замыкающих промежутки острие–барьер с отклонением от оси острия, и множество менее ярких каналов, радиально расходящихся вдоль поверхности барьера. Получены количественные параметры структуры.

**Ключевые слова:** барьерный разряд, теневой метод, микроканальная структура разряда.

DOI: 10.21883/JTF.2021.02.50359.217-20

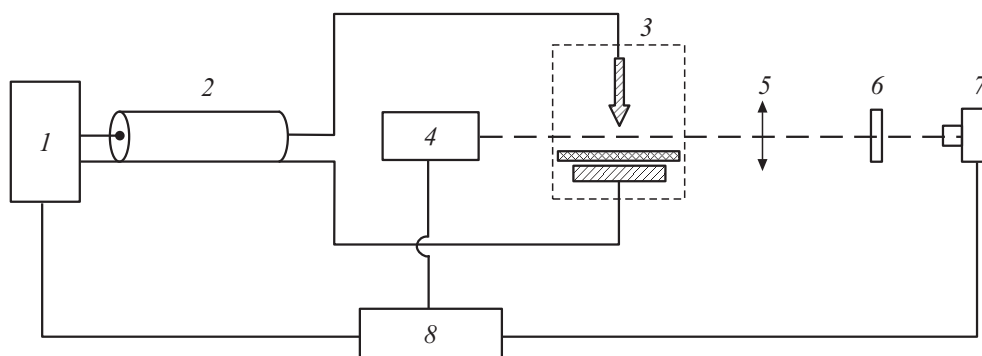
### Введение

Высоковольтные импульсные газовые разряды находят широкое практическое применение в плазмохимических реакторах [1–3], плазменных актуаторах [4–6], медицинских аппаратах [7–9], при обработке поверхностей [10] и т.д., что обуславливает актуальность их изучения. Одним из широко используемых является барьерный разряд, реализуемый как в объемной форме, так и в виде поверхностного разряда. Вместе с тем, несмотря на длительную историю исследования, многие аспекты динамики барьерного разряда являются недостаточно изученными. Это обусловлено, в первую очередь, высокой скоростью протекания процессов, их малыми пространственными масштабами, большой степенью неравновесности газоразрядной плазмы, ее нелинейным синергетическим характером динамики (см., например, обзорную статью [11] и ссылки в ней), что предъявляет повышенные требования к экспериментальному регистрирующему оборудованию и методикам.

Исследование пространственной структуры барьерного разряда весьма важно, поскольку занятая разрядом область является ареной плазмодинамических процессов и определяет многие практически важные характеристики устройств, реализуемых на основе такого разряда. Так, например, было показано, что в зависимости от условий реализации барьерного разряда в воздухе может формироваться как диффузная, так и контрагированная

(многоканальная, филаментированная) его форма [12–14]. Помимо этого, при заданных условиях структура разряда может отличаться в первой и последующих сериях [12].

Оптические измерения диаметров токопроводящих каналов барьерного разряда в воздухе при давлениях, близких к атмосферному, дают значения от 0.1 до 1 mm [15]. С другой стороны, на микроуровне импульсные разряды могут обладать структурой даже при кажущейся внешней однородности свечения канала. Так, в ряде работ с использованием метода теневого фотографирования высокой разрешающей способности, а также метода автографов было установлено, что внешне однородный канал искрового и диффузного разрядов в воздухе представляет собой пучок большого количества микроканалов [16–21]. При этом автографы (отпечатки) таких разрядов на поверхности электрода или его покрытия представляют собой скопления множества микрократеров. Следует особо отметить, что и в барьерном разряде на электроде были обнаружены группы микрократеров, которые могут являться отпечатками микроканалов [11]. Отметим также, что в работах, посвященных расчетным исследованиям, встречаются данные о микронных диаметрах каналов микрократеров, например, результаты моделирования разряда в азоте и его смесях с кислородом при атмосферном давлении дают значения от 10 до 100  $\mu\text{m}$  [22].



**Рис. 1.** Схема экспериментального стенда: 1 — ГИН, 2 — кабельная линия, 3 — разрядный промежуток, 4 — источник зондирующего сигнала (лазер), 5 — объектив, 6 — светофильтры, 7 — электронно-оптическая камера, 8 — блок синхронизации.

Таким образом, для определения количественных параметров и динамики пространственной структуры барьерного разряда в воздушном промежутке представляет интерес ее исследование методом теневого фотографирования высокой разрешающей способности. При этом с целью привязки области инициирования пробоя для обеспечения возможности применения оптических лазерных методик диагностики целесообразно использовать электрод с малым радиусом кривизны.

## 1. Экспериментальная аппаратура и методики

Эксперименты проводились на стенде, включающем генератор импульсов напряжения (ГИН), кабельную линию, разрядный промежуток, диагностическую аппаратуру и систему синхронизации [16,17]. Схема стенда представлена на рис. 1.

Генерация импульсов напряжения обеспечивалась коммутацией заряженной емкости на кабельную линию. Амплитуда напряжения на выходе ГИН составляла 30 кВ, длительность фронта по уровню 0.1–0.9 около 7 ns, полярность напряжения — положительная и отрицательная. Кабельная линия имела длину 7 м и нагружалась на разрядный промежуток.

Разрядный промежуток имел конфигурацию острие—барьер—плоскость, симметричную относительно оси острейного электрода, в качестве которого использовался электрод длиной 19 мм, диаметром 14 мм, углом при вершине 36°, радиусом кривизны 0.15 мм, изготовленный из нержавеющей стали. Плоским электродом служил электрод, изготовленный из алюминиевого сплава, с рабочей частью, близкой по форме к шаровому сегменту диаметром 4.5 см и толщиной 1.5 см. Барьером выступала стеклянная пластина толщиной 1.5 мм и диаметром 60 мм. Пластина располагалась на плоском электроде, зазор между острым электродом и барьером составлял 1.5 мм.

В экспериментах регистрировались напряжение и ток на выходе ГИН. Измерение напряжения  $U$  осуществ-

лялось емкостным делителем, тока  $I$  — резистивным шунтом. Регистрация напряжения и тока выполнялась цифровым осциллографом.

В экспериментах для регистрации пространственной структуры разряда использовалась методика теневого фотографирования и скоростная съемка свечения разряда.

В первом случае просвечивание разряда осуществлялось плоскопараллельным пучком излучения твердотельного лазера с длиной волны 532 nm и длительностью импульса на полувывоте 6 ns в направлении, перпендикулярном оси электрода — острия. В области формирования разряда поперечный размер лазерного пучка составлял примерно 1 см и имел гауссов профиль. Изображение теневой картины, локализованной в области разрядного промежутка, строилось с помощью объектива с фокусным расстоянием 23 см на фотокатод электронно-оптического регистратора. Коэффициент увеличения оптической системы построения изображения равен десяти. Экспозиция кадра определялась длительностью импульса лазера.

В экспериментах по скоростной фоторегистрации свечения разряда экспозиция кадра электронно-оптического регистратора составляла 40 ns. При фотографировании ранних стадий разряда (на временах менее 40 ns) часть времени экспозиции опережала начало формирования разряда.

Сдвигом момента запуска лазера и электронно-оптического регистратора относительно момента пробоя обеспечивалась визуализация различных стадий разрядного процесса. Съемка велась в однокадровом режиме — один кадр за импульс. Разрешающая способность оптической системы составляла 5  $\mu$ m на три пикселя.

Временная привязка кадров осуществляется относительно момента пробоя, причем для тенеграммы характеризующее ее время соответствует началу кадра, а для фотографии — его окончанию.

В ряде экспериментов осуществлялась съемка интегрального свечения разряда цифровым фотоаппаратом.

Следует отметить, что используемый однокадровый режим съемки накладывает некоторые ограничения в

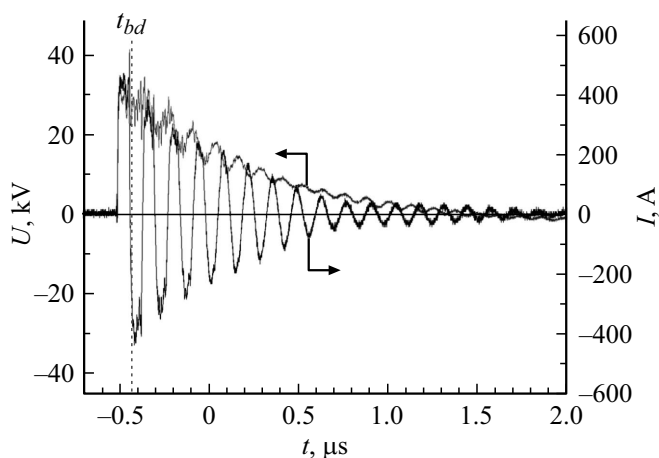
части определения детальных динамических характеристик разряда. Однако высокая степень повторяемости опытов и крупная выборка зарегистрированных изображений обеспечивает корректное исследование эволюции разряда и определение количественных характеристик его пространственной структуры.

## 2. Экспериментальные результаты и их обсуждение

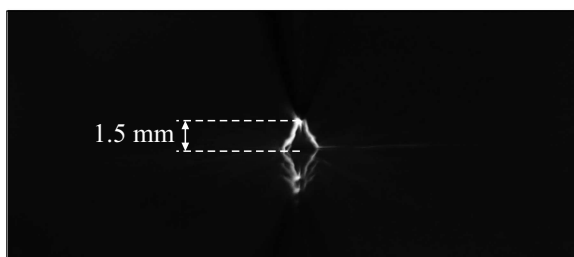
На рис. 2 представлены характерные осциллограммы тока и напряжения на выходе ГИН для случая положительной полярности. При приходе волны напряжения по кабельной линии на разрядный промежуток вначале происходил рост напряжения, затем пробой промежутка и зажигание разряда, сопровождающиеся возникновением колебаний тока в электрической цепи.

Для отрицательной полярности осциллограммы имели инверсный по отношению к рис. 2 вид и не обладали существенными отличиями.

Следует отметить, что регистрация осциллограмм на выходе ГИН не позволяет определить ток разряда и напряжение на промежутке. Так, колебания тока на осциллограмме являются следствием волновых процессов



**Рис. 2.** Осциллограммы напряжения  $U$  и тока  $I$  на выходе генератора импульсов напряжения ( $t_{bd}$  — момент времени, принятый за начало пробоя).



**Рис. 3.** Интегральная фотография разряда для положительной полярности импульса напряжения. Электрод-острие находится сверху.

с отражениями в кабельной линии. В этой связи приведенные осциллограммы дают лишь общее представление об амплитудно-временных параметрах питающего барьерный разряд импульса напряжения и длительности его горения. Видно, что барьерный разряд горит около двух микросекунд.

На рис. 3 представлена интегральная фотография свечения разряда для положительной полярности импульса напряжения. Электрод-острие находится сверху. Нижняя половина фотографии является отражением в стеклянной пластине верхней половины.

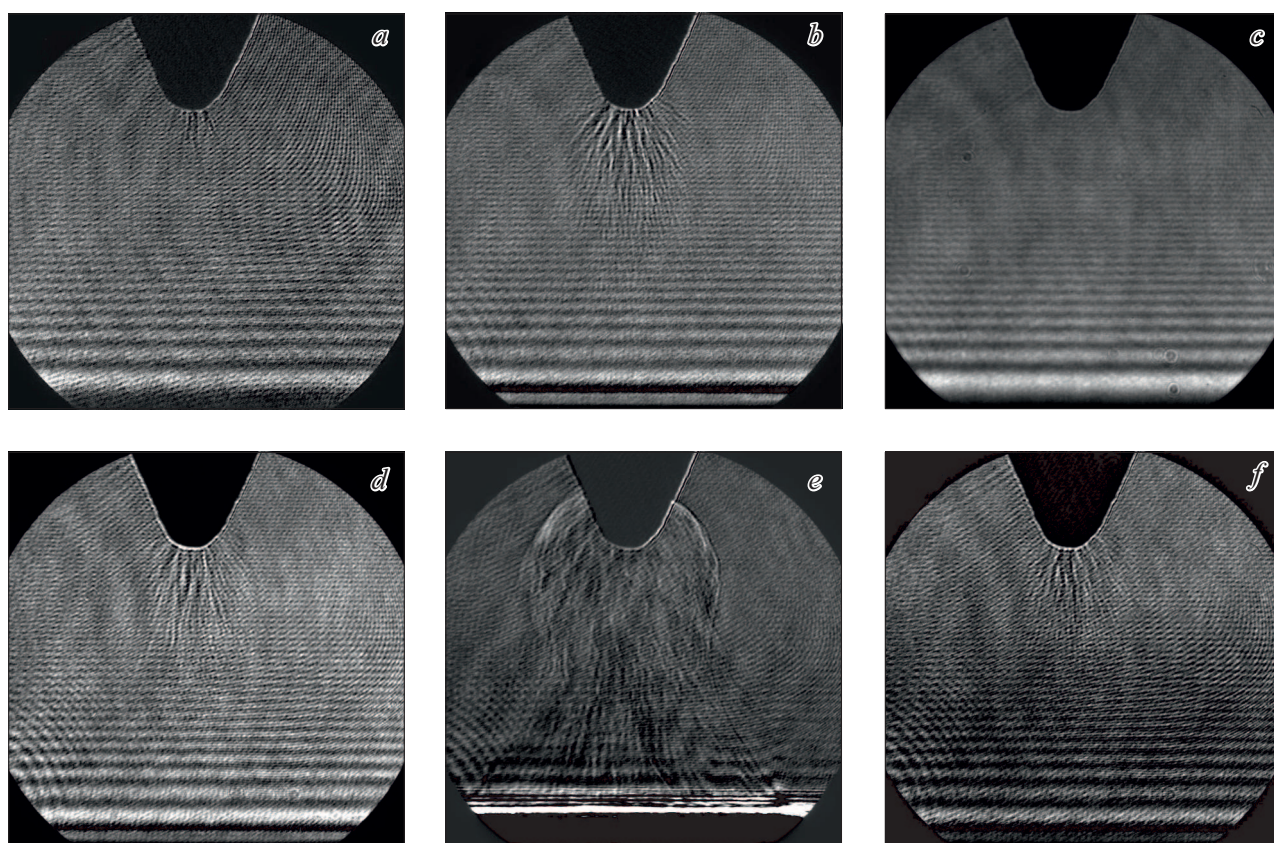
Разряд реализуется в виде ярко светящихся каналов диаметром от 0.1 до 0.3 мм, замыкающих промежутки острие—барьер, и радиально расходящихся от областей контакта вдоль поверхности барьера множества менее ярких каналов. При отрицательной полярности разряд имеет подобный вид. Характерно, что на всех полученных фотографиях каналы, замыкающие промежутки острие—барьер, отклоняются от кратчайшей траектории — оси. Аналогичная картина наблюдалась в работе [23], где барьерный разряд формировался в близкой геометрии разрядного промежутка в кислороде при различных давлениях. В работе [24] подобный эффект был обнаружен в несколько иной геометрии, там же было дано его объяснение.

Тенеграммы разряда были получены на временах до 235 нс — для положительной полярности и до 375 нс — для отрицательной полярности от момента пробоя.

На рис. 4 и 5 приведены тенеграммы разряда соответственно для положительной и отрицательной полярностей для раннего ( $a-c$ ) и позднего ( $d-f$ ) интервалов. Полосатая структура в нижней части рисунков связана с интерференционными эффектами при отражении лазерного пучка от стеклянной пластины.

Видно, что при обеих полярностях разряд развивается от острия вглубь разрядного промежутка, при этом первые структурные образования регистрируются для положительной полярности спустя 15 нс, а для отрицательной — спустя 26 нс после пробоя. Тенеграммы обнаруживают, что разряд развивается в микроканальной форме — представляет собой совокупность большого числа каналов микронного диаметра. При этом микроканальная структура наиболее выражена при положительной полярности. Диаметр микроканалов в ранней стадии развития (рис. 4,  $a$  и 5,  $a$ ) для обеих полярностей составляет около 20 мкм. Микроканальная структура присутствует и на поздних стадиях при перекрытии разрядного промежутка (рис. 4,  $e$  и 5,  $e$ ).

Хронологическая последовательность полученных тенеграмм свидетельствует о том, что разряд развивается серийно — фазы наличия признаков разряда чередуются с фазами его отсутствия. Отметим, что указанная особенность является характерной для барьерного разряда. Для примера на рис. 5,  $f$  представлена тенеграмма, на которой признаки разряда отсутствуют. Поскольку длительность экспозиции тенеграмм составляет 6 нс,



**Рис. 4.** Тенеграммы разряда при положительной полярности импульса питающего напряжения в различные моменты времени относительно пробоя (*a* — 21, *b* — 22, *c* — 23, *d* — 179, *e* — 182, *f* — 183 ns). Электрод-острие находится сверху.

данное значение можно использовать в качестве масштаба времени и полагать, что длительности пауз между разрядными фазами, а также длительности разрядных фаз — величины того же порядка.

Укажем, что все приведенные в настоящей работе хронологические ряды тенеграмм начинаются с момента времени более 20 ns после пробоя, что позволяет исключить ошибочное появление в этих рядах „пустых“ тенеграмм, связанное со статистическим разбросом времени задержки пробоя от импульса к импульсу, которое составляло несколько наносекунд.

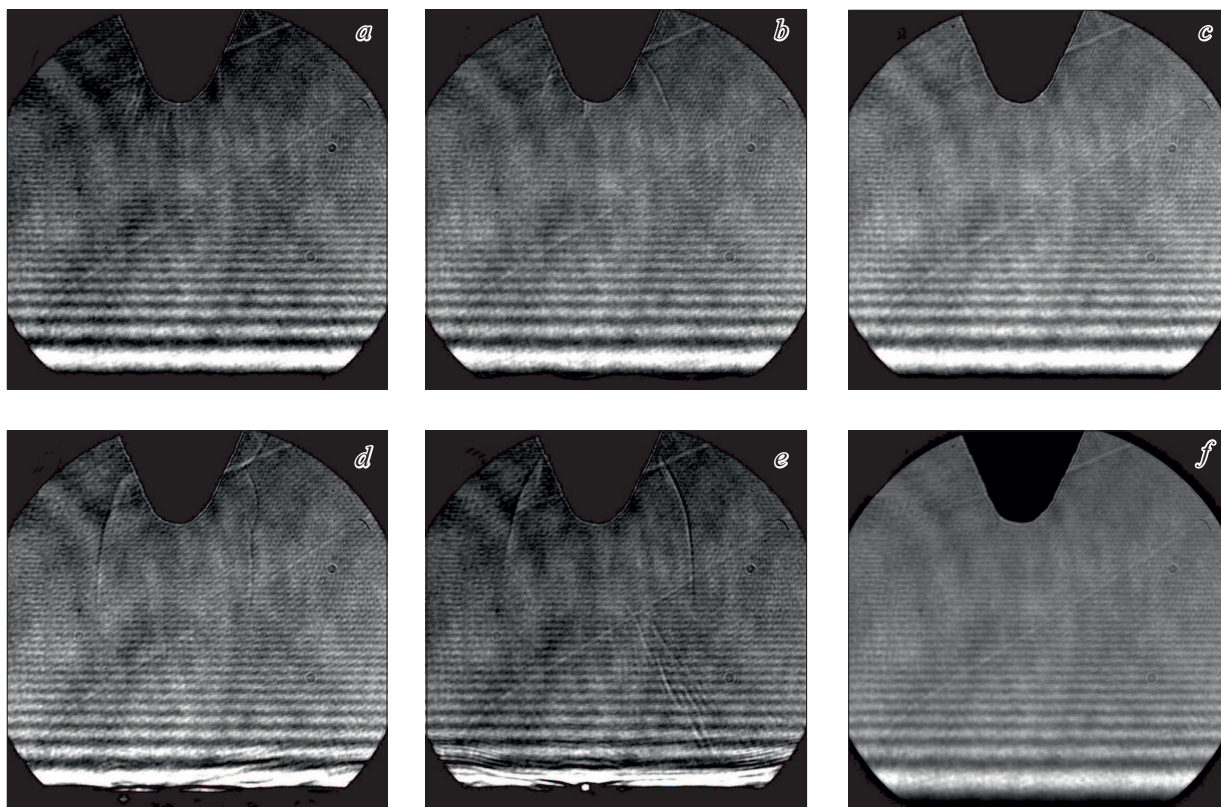
Полученные результаты свидетельствуют о достаточно быстром (в масштабах времени в единицы наносекунд) снижении концентрации электронов  $n$  в разряде после прекращения серии, таком, что структура на тенеграммах перестает регистрироваться. Следует отметить, что опыт применения используемой здесь методики теневого фотографирования совместно с интерференционной методикой [16] показывает, что граничная концентрация электронов в микроканалах, при которой микроканалы на тенеграммах не регистрируются, составляет порядка  $10^{16} \text{ cm}^{-3}$ . Выполним оценку времени рекомбинации  $t$  такой плазмы, как  $t = (\beta n)^{-1}$ , где  $\beta$  — коэффициент электрон-ионной рекомбинации [25]. По-

лагая для воздуха  $\beta \approx 10^{-7} \text{ cm}^3/\text{s}$ ,  $n = 10^{16} \text{ cm}^{-3}$ , имеем  $t \approx 1 \text{ ns}$ , что согласуется с полученными данными.

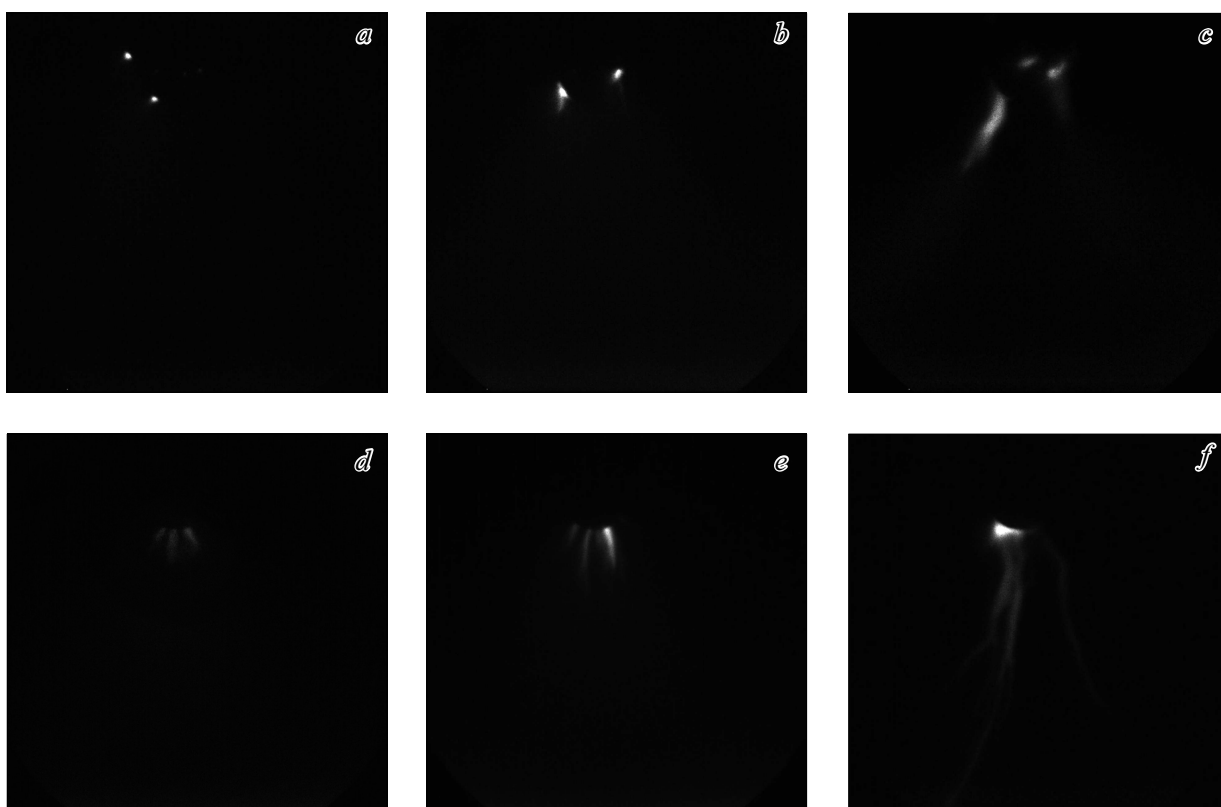
Тенденции хронологического ряда тенеграмм указывают, что более поздние серии разряда отличаются большей развитостью канала разряда: возмущенные области занимают все большую часть разрядного промежутка как по диаметру, так и по длине; со временем форма канала приобретает характерное уширение вблизи острия и вблизи барьера, а также возникает четкая внешняя граница канала; на поздних стадиях в нижней части тенеграмм (рис. 4, *e* и 5, *d, e*) возникают искажения, связанные, по-видимому, с накоплением заряда и разрядными процессами на поверхности диэлектрического барьера.

Отметим, что диаметр канала в поздней стадии (рис. 4, *e* и 5, *e*) в центральной части разрядного промежутка составляет около 1 mm.

Исходя из полученных тенеграмм, разряд приобретает структуру, подобную представленной на интегральной фотографии, не ранее 50 ns после пробоя для положительной полярности и 100 ns — для отрицательной. При этом формирование отклоненных от оси острия каналов и отсутствие свечения в области барьера, непосредственно под острием, связано, судя по всему, как и в [24],



**Рис. 5.** Тенеграммы разряда при отрицательной полярности импульса питающего напряжения в различные моменты времени относительно пробоя (*a* — 57, *b* — 58, *c* — 59, *d* — 152, *e* — 153, *f* — 154 ns). Электрод-острие находится сверху.



**Рис. 6.** Фотографии скоростной съемки разряда при отрицательной (верхний ряд) и положительной (нижний ряд) полярности импульса питающего напряжения в различные моменты времени относительно пробоя (*a* — 3, *b* — 9, *c* — 90, *d* — 6, *e* — 42, *f* — 100 ns). Электрод-острие находится сверху.

с переносом заряда в эту область в предыдущей фазе разряда.

Фотографии скоростной съемки (рис. 6) получены на временах до 120 ns — для отрицательной и до 300 ns — для положительной полярности от момента пробоя и в целом соответствуют динамике, определяемой хронологической последовательностью тенеграмм.

Дополнительно установлено, что начальной фазой свечения при отрицательной полярности импульса питающего напряжения является возникновение катодных пятен (как правило, нескольких) размером до  $100\ \mu\text{m}$  на поверхности острейного электрода. Затем от пятен вглубь промежутка развиваются ярко светящиеся каналы диаметром около  $100\ \mu\text{m}$  и более. Подобная картина регистрируется и на поздних стадиях разряда, что, по-видимому, является следствием его серийности. Отметим, что тенеграмма на рис. 5, с, вероятно, соответствует моменту формирования катодных пятен, о чем свидетельствуют полусферические структуры на поверхности острейного электрода.

Следует также указать, что детального исследования времени появления пятен в настоящих экспериментах не проводилось. Можно лишь констатировать, что в начальной фазе разряда они возникают не позднее 3 ns от момента пробоя.

При положительной полярности картина свечения несколько отличается. Ярко выраженных анодных пятен на поверхности острейного электрода не наблюдается. Регистрируется либо диффузное свечение вблизи острия, либо на его фоне выделяются отдельные каналы диаметром от  $30\ \mu\text{m}$  и более, которые прорастают от острия вглубь разрядного промежутка и на поздних стадиях замыкают его.

В завершение отметим, что зарегистрированные в настоящей работе газоразрядные процессы, протекающие вблизи острейного электрода, включая формирование микроструктурированных каналов, весьма близки к процессам в начальной стадии искрового и диффузного разрядов [16,17]. В отмеченных работах искровой и диффузный разряды формировались с использованием тех же острейных электродов и при близких параметрах импульсов напряжения, что и в настоящей работе. Несмотря на существенные различия в типах разрядов, близость указанных процессов свидетельствует об общности физики начальных стадий импульсных разрядов в плотных газах. В этой связи укажем также, что в барьерном разряде поверхность покрытого диэлектриком плоского электрода вообще не принимает участия в разрядных процессах.

## Заключение

Выполнены исследования динамики пространственной структуры импульсного барьерного разряда микросекундной длительности в воздухе атмосферного давления

в геометрии острие—плоскость при различных полярностях питающего напряжения.

Осуществлена регистрация структуры разряда с использованием интегрального, скоростного и теневого фотографирования.

Показано, что разряд реализуется серийно (фазы наличия признаков разряда чередуются с фазами его отсутствия), при этом поздние серии отличаются большей развитостью канала разряда. При обеих полярностях разряд начинает развиваться от острейного электрода и с течением времени представляет собой несколько ярко светящихся каналов в объеме промежутка острие—барьер и множество каналов, радиально расходящихся вдоль поверхности барьера.

Установлено, что начальной фазой свечения при отрицательной полярности импульса питающего напряжения является возникновение катодных пятен на поверхности острейного электрода с последующим развитием от них вглубь промежутка ярко светящихся каналов. При положительной полярности ярко выраженных анодных пятен на поверхности острейного электрода не наблюдается.

Обнаружено наличие микроструктуры разряда, когда канал представляет собой пучок большого числа каналов микронного диаметра. Микроструктура зарегистрирована для обеих полярностей на протяжении всего разряда.

Получены количественные параметры структуры разряда.

## Конфликт интересов

Авторы заявляют, что у них нет конфликта интересов.

## Список литературы

- [1] S.M. Starikovskaia. J. Phys. D: Appl. Phys., **47** (35), 353001 (2014). DOI: 10.1088/0022-3727/47/35/353001
- [2] N.A. Popov. Plasma Sources Sci. Technol., **20** (4), 045002 (2011). DOI: 10.1088/0963-0252/20/4/045002
- [3] N.L. Aleksandrov, S.V. Kindysheva, I.N. Kosarev, S.M. Starikovskaia, A.Y. Starikovskii. Proc. Combust. Inst., **32**, 205 (2009).
- [4] Yang Liu, C. Kolbakir, A.Y. Starikovskiy, R. Miles, Hui Hu. Plasma Sources Sci. Technol., **28** (1), 014001 (2019). DOI: 10.1088/1361-6595/aaedf8
- [5] A.Yu. Starikovskii, A.A. Nikipelov, M.M. Nudnova, D.V. Roupasov. Plasma Sources Sci. Technol., **18** (3), 034015 (2009). DOI: 10.1088/0963-0252/18/3/034015
- [6] E. Moreau. J. Phys. D: Appl. Phys., **40** (3), 605 (2007). DOI: 10.1088/0022-3727/40/3/S01
- [7] G. Fridman, A. Gutsol, A.B. Shekhter, V.N. Vasilets, A. Fridman. Appl. Plasma Medicine Plasma Processes Polymers, **5** (6), 503 (2008). DOI: 10.1002/ppap.200700154
- [8] S.N. Buranov, V.V. Gorokhov, V.I. Karelin, P.B. Repin. Proc. 12th IEEE International Pulsed Power Conference (Monterey, USA, 1999) p. 1421.
- [9] С.Н. Буранов, В.И. Карелин, В.Д. Селемир, А.С. Ширшин. ПТЭ, (5), 158 (2019). DOI: 10.1134/S0032816219040037

- [10] M. Erofeev, V. Ripenko, M. Shulepov, V. Tarasenko. *Eur. Phys. J. D*, **71**, 117 (2017). DOI: 10.1140/epjd/e2017-70636-6
- [11] Jiting Ouyang, Ben Li, Feng He, Dong Dai. *Plasma Sci. Technol.*, **20**, 103002 (2018). DOI: 10.1088/2058-6272/aad325
- [12] С.Н. Буранов, В.В. Горохов, В.И. Карелин, П.Б. Репин. *ЖТФ*, **74** (10), 40 (2004). [S.N. Buranov, V.V. Gorokhov, V.I. Karelin, P.B. Repin. *Tech. Phys.*, **49** (10), 1284 (2004).]
- [13] S.B. Leonov, V. Petrishchev, I.V. Adamovich. *J. Phys. D: Appl. Phys.*, **47**, 465201 (2014). DOI: 10.1088/0022-3727/47/46/465201
- [14] S.A. Shcherbanev, Ch Ding, S.M. Starikovskaia, N.A. Popov. *Plasma Sources Sci. Technol.*, **28**, 065013 (2019). DOI: 10.1088/1361-6595/ab2230
- [15] С.В. Автаева. Барьерный разряд. Исследование и применение (Изд-во КРСУ, Бишкек, 2009)
- [16] А.А. Тренькин, К.И. Алмазова, А.Н. Белоногов, В.В. Боровков, Е.В. Горелов, И.В. Морозов, С.Ю. Харитонов. *ЖТФ*, **90** (12), 2039 (2020). DOI: 10.21883/JTF.2020.12.50119.435-19
- [17] А.А. Тренькин, К.И. Алмазова, А.Н. Белоногов, В.В. Боровков, Е.В. Горелов, И.В. Морозов, С.Ю. Харитонов. *ЖТФ*, **89** (4), 512 (2019). [A.A. Trenkin, K.I. Almazova, A.N. Belonogov, V.V. Borovkov, E.V. Gorelov, I.V. Morozov, S.Yu. Kharitonov. *Tech. Phys.*, **64** (4), 470 (2019).] DOI:10.1134/S1063784219040261
- [18] А.А. Тренькин. *ЖТФ*, **89** (2), 189 (2019). [A.A. Trenkin. *Tech. Phys.*, **64** (2), 159 (2019).] DOI: 10.1134/S1063784219020245
- [19] А.В. Перминов, А.А. Тренькин. *ЖТФ*, **75** (9), 52 (2005). [A.V. Perminov, A.A. Trenkin. *Tech. Phys.*, **50** (9), 1158 (2005).]
- [20] E.V. Parkevich, M.A. Medvedev, A.I. Khirianova, G.V. Ivanenkov, A.S. Selyukov, A.V. Agafonov, K.V. Shpakov, A.V. Oginov. *Plasma Sources Sci. Technol.*, **28**, 125007 (2019). DOI: 10.1088/1361-6595/ab518e
- [21] E.V. Parkevich, M.A. Medvedev, G.V. Ivanenkov, A.I. Khirianova, A.S. Selyukov, A.V. Agafonov, Ph.A. Korneev, S.Y. Gus'kov, A.R. Mingaleev. *Plasma Sources Sci. Technol.*, **28**, 095003 (2019). DOI: 10.1088/1361-6595/ab3768
- [22] X.P. Xu, M.J. Kushner. *J. Appl. Phys.*, **48** (8), 4153 (1998).
- [23] Rui Liu, Zhe Yu, Huijuan Cao, Pu Liu, Zhitao Zhang. *Plasma Sci. Technol.*, **21**, 054001 (2019). DOI: 10.1088/2058-6272/aafbcb
- [24] С.Н. Буранов, В.В. Горохов, В.И. Карелин, А.А. Тренькин. *ЖТФ*, **74** (9), 122 (2004). S.N. Buranov, V.V. Gorokhov, V.I. Karelin, A.A. Trenkin. *Tech. Phys.*, **49** (9), 1227 (2004).
- [25] Yu.P. Raiser. *Physics of Gas Discharge (Intelligence, Dolgoprudny, 2009)*.