04

Исследование высокочастотного импульсного разряда в воздухе с помощью высокоскоростной видеосъемки

© Н.А. Шарапов,[1] С.Е. Маланичев,[1] В.Ю. Траубергс,[1,2] А.С. Белев,[1,2] Д.В. Корепин[2]

[1] Московский государственный технический университет им. Н.Э. Баумана,
105005 Москва, Россия
[2] ООО „УФ ПУЛЬС“,
[2] 603155 Нижний Новгород, Россия
E-mail: valtraubergs@gmail.com

Поступило в Редакцию 10 апреля 2025 г.
В окончательной редакции 8 июля 2025 г.
Принято к публикации 20 июля 2025 г.

Исследована динамика частотного импульсного разряда в воздухе атмосферного давления с использованием высокоскоростной видеосъемки. Проведен анализ осциллограмм разрядного тока и напряжения. Сопоставление временнóй эволюции разряда, зафиксированной на высокоскоростных изображениях, с данными, снятыми при помощи осциллографа, позволило выделить три фазы разрядного процесса. Эксперименты проводились при частоте повторения импульсов 1–10 kHz и энергии импульса 1–4 mJ. Установлен тип разряда, объясняющий его структурные особенности и механизмы формирования.

Ключевые слова: неравновесная плазма, импульсный разряд, высокочастотный разряд, импульсный дуговой разряд, динамика разряда.

DOI: 10.61011/JTF.2026.01.62036.58-25

Введение

Низкотемпературная плазма находит широкое применение в различных областях науки и техники [1]. Она используется в материаловедении, нанотехнологиях, экологии, обработке поверхности, а также в медицине и биотехнологиях. Например, в промышленности низкотемпературная плазма применяется для модификации свойств материалов [2], прецизионной очистки, что особенно важно в микроэлектронике для удаления органических загрязнений, травления подложек и улучшения адгезии тонкопленочных покрытий [3,4], в экологии — для плазмохимического разложения вредных веществ [5]. В медицине низкотемпературная плазма используется для антимикробной обработки, ускорения заживления тканей, стерилизации инструментов и генерации биологически активных соединений. Одним из примеров является синтез монооксида азота (NO) в воздушных разрядах, таких как коронный, барьерный, дуговой и др. [6–9]. Экспериментальные исследования показали, что „объемный“импульсный разряд является наиболее подходящим для генерации [10].

Под „объемным“ импульсным разрядом подразумевается разряд, который формируется в виде совокупности отдельных каналов, возникающих последовательно во времени и пространственно распределенных в пределах разрядного промежутка. Благодаря радиальной диффузии и перекрытию следов разрядных каналов, в экспозиции камеры создается визуальный эффект, при котором разряд занимает значительный объем.

Объектом исследования является частотный импульсный разряд в воздухе при атмосферном давлении. Это разряд, состоящий из последовательности импульсов, повторяющихся с определенной частотой. В предыдущей работе [11] нами была получена и описана структура разряда, его характерный вид представлен на рис. 1.

Было установлено, что разряд представляет собой проводящий канал, образующийся между двумя электродами. При каждом новом импульсе канал формируется в новом месте. Временные параметры возбуждения разряда настроены таким образом, чтобы следующий импульс подавался только после окончания активной фазы. Такой режим определяет характер существования разряда. Множество каналов, видимых на фотографиях, объясняется высокой частотой импульсов и длительностью экспозиции съемочной аппаратуры.

Для дальнейшего совершенствования технологий применения низкотемпературной плазмы необходимо детальное изучение механизмов формирования и развития разряда.

Целью настоящего исследования является детальное изучение единичного импульса разряда и описание его динамики на основе покадрового анализа видеозаписи, полученной с помощью высокоскоростной камеры.

1. Описание экспериментальной установки

Для детального исследования динамики отдельного импульса было принято решение перейти от коаксиальной системы электродов, описанной в [11], к аксиальной, что позволило более точно отслеживать развитие разряда. Исследование динамики формирования и развития

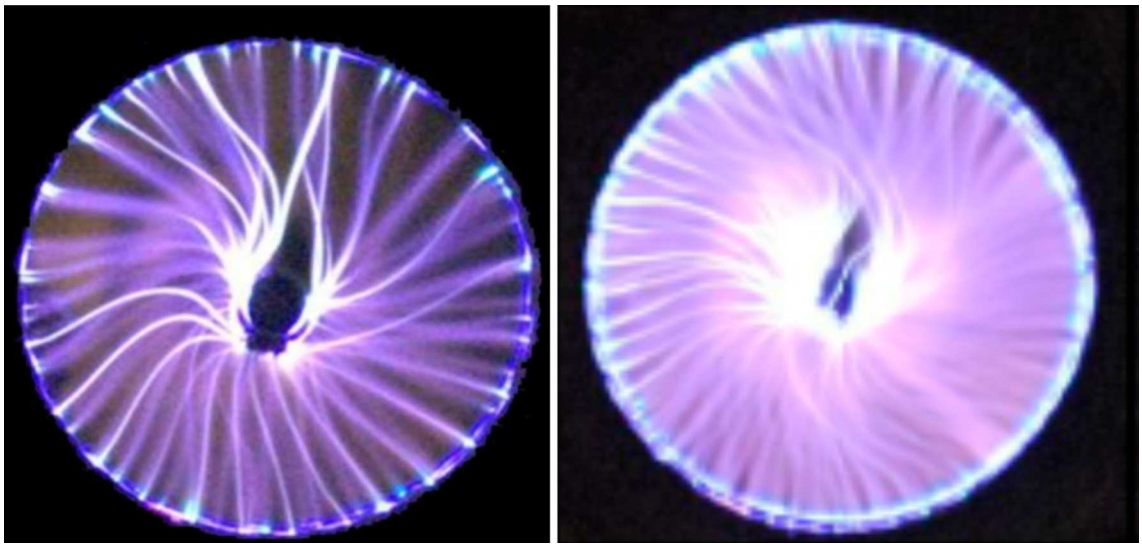

Рис. 1. Внешний вид разряда (частота импульсов 1300 Hz и 2800 Hz соответственно, экспозиция 1/50 s) [11].

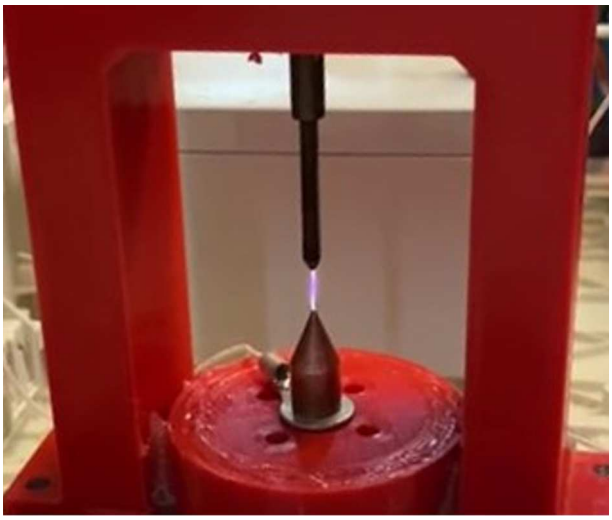

Рис. 2. Разряд в системе электродов.

частотного импульсного разряда проводилось на специализированном экспериментальном стенде, позволяющем управлять частотой повторения импульсов в диапазоне от 1 до 10 kHz, расходом атмосферного воздуха в диапазоне 1–10 l/min и энергией, вкладываемой в каждый импульс, в пределах 1–4 mJ. Формирование импульсов напряжения осуществлялось с использованием импульсного генератора. Система вертикальных электродов крепится в рамочной разъемной конструкции, изготовленной из пластика с применением технологии 3D-печати, основание снабжено отверстиями для истечения рабочего газа (рис. 2). Межэлектродное расстояние — (5 ± 0.1) mm. Материал верхнего электрода — латунь, нижнего — медь.

Для регистрации разрядного процесса использовалась высокоскоростная камера Phantom v2512, работающая с частотой 675 200 кадров в секунду и экспозицией 0.97 μs. Камера располагалась на расстоянии 38 cm от области разряда.

Измерение напряжения на разрядном промежутке осуществлялось с помощью емкостного делителя напряжения, а измерение тока — с использованием датчиков тока. Сигналы с делителя и датчика тока подавались на цифровой запоминающий осциллограф АКИП-4122. Схема измерительной установки представлена на рис. 3.

Перед началом эксперимента проводилась тарировка измерительной системы для компенсации систематической погрешности. Были определены коэффициенты деления напряжения k_1 и пропорциональности датчи-

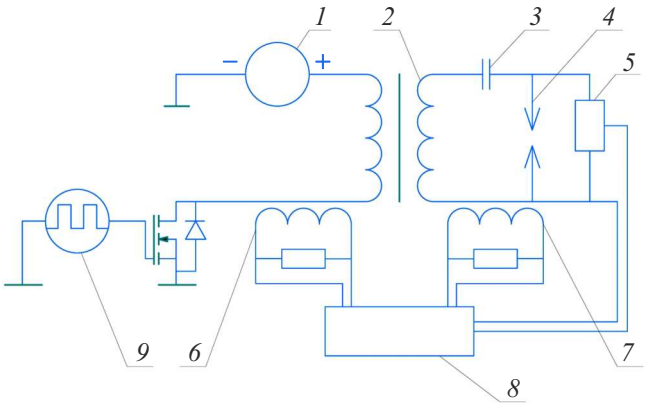

Рис. 3. Схема измерительной установки: *1* — источник, *2* — импульсный трансформатор, *3* — ограничивающий конденсатор, *4* — система электродов, *5* — высоковольтный пробник, *6* — датчик тока первичной обмотки, *7* — датчик тока вторичной обмотки, *8* — регистрирующая система, *9* — импульсный генератор.

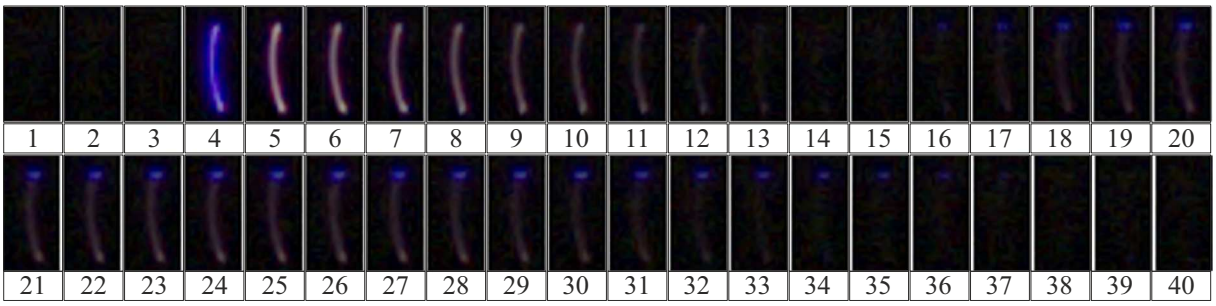

Рис. 4. Динамика развития импульса разряда.

ка тока k_2. В результате были получены следующие значения: $k_1 = 1000$; $k_2 = 1$ A/V. Полоса пропускания емкостного делителя составила — 1 kHz–20 MHz, а полоса пропускания датчика тока — 1 kHz–1 MHz.

Однако точное определение размеров канала невозможно без установления соответствия между полученными изображениями и реальными размерами. Этот параметр определяется через коэффициент пропорциональности, равный отношению известного характерного размера к его аналогу на изображении. В качестве характерного размера использовалось расстояние между электродами $L = (5 \pm 0.1)$ mm, которое было предварительно сфотографировано при том же положении камеры относительно стенда и с тем же разрешением. Анализ изображения в растровом редакторе GIMP показал, что расстояние между электродами на фотографии составляет 25 пикселей, что позволяет определить коэффициент пересчета: 1 пиксель соответствует 0.2 mm.

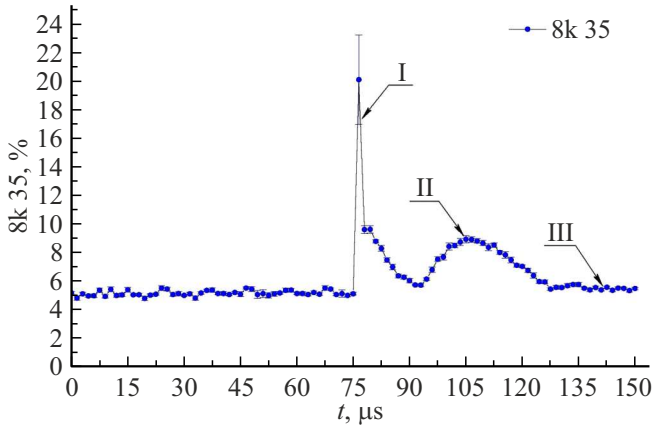

Рис. 5. Засвеченность кадра (в процентах): фаза I — формирование ионизационного канала, фаза II — энерговыделение, фаза III — деионизация.

2. Результаты эксперимента

Характерная продолжительность разряда составляла 50 μs, а временное разрешение использованной видеокамеры — 1.5 μs, что позволило зафиксировать картину развития разряда (рис. 4).

При обработке изображений анализировалась область в непосредственной близости от разряда размером 18×36 пикселей (3.6×7.2 mm соответственно).

Для оценки уровня засвеченности (яркости) кадров был проведен покадровый анализ гистограммы изображений в оттенках серого. Это означает, что для каждого кадра анализировалось распределение яркостей пикселей. В качестве эталонных значений приняты: 100 % — полностью засвеченное (белое) изображение, 0 % — полностью черное изображение. По результатам построен график зависимости относительной засвеченности кадров от времени, который отражает изменение яркости разряда на различных стадиях его развития (рис. 5).

Одновременно фиксировались осциллограммы разрядного тока и напряжения (рис. 6 — частота 8 kHz, энергия импульса — 4 mJ, расход — 10 l/min). Они наглядно демонстрируют развитие разряда и позволяют лучше понять его особенности. Кривая *1* представляет собой форму тока в первичном обмотке, кривая *2* — напряжение на разрядном промежутке, кривая *3* представляет собой форму тока разряда в экспериментальной модели устройства.

Одной из ключевых особенностей импульсного разряда является способ ввода энергии в разрядный объем (контур) [10]. Рабочая камера является элементом колебательного контура с внешним импульсным возбуждением, в котором происходит выделение энергии. Схема включения в цепь колебательного контура представлена на рис. 7.

Специфика данного разряда, как уже упоминалось, заключается в способе ввода энергии в разрядный объем. Разрядная камера является элементом колебательного контура, в который энергия вводится дозированно и контролируется в каждом импульсе.

Амплитуда, форма и временные характеристики разрядного тока зависят от геометрии камеры, параметров колебательного контура, расхода газа и величины вводимой энергии.

Ввод энергии в контур осуществляется следующим образом. В момент времени T_1 (см. эквивалентную схему — рис. 5, *a*) низковольтная обмотка импульсного

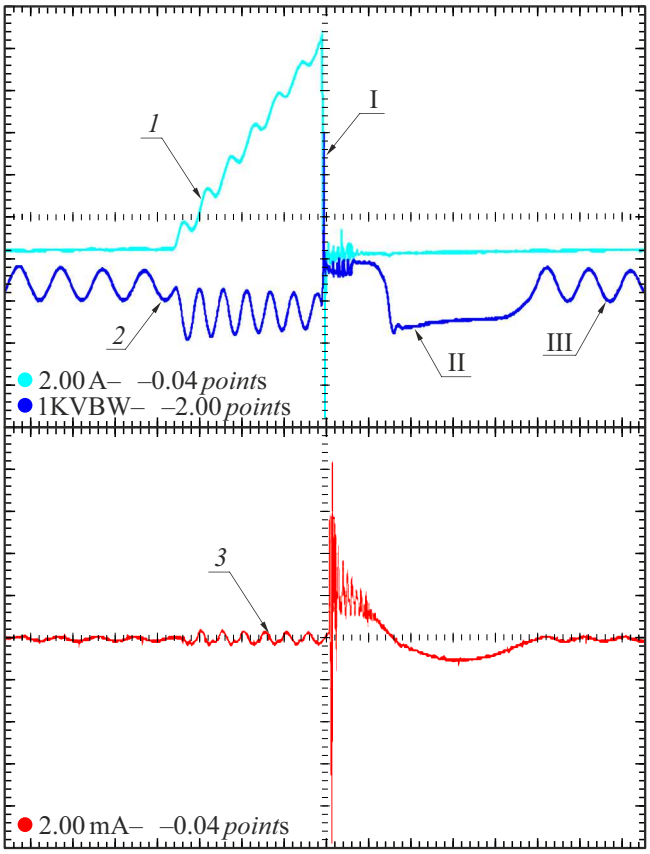

Рис. 6. Кривая *1* — осциллограмма тока на первичной обмотке трансформатора, кривая *2* — осциллограмма напряжения, кривая *3* — осциллограмма тока на вторичной обмотке трансформатора. Масштаб 10 μs. Фаза I — формирование ионизационного канала, фаза II — энерговыделение, фаза III — деионизация.

трансформатора L_1 подключается к источнику напряжения. При этом ток через нее плавно нарастает до заданного значения (амплитуда тока определяет величину энергии, вводимой в разряд). Ток же на вторичной обмотке L_2 отсутствует, так как появившегося напряжения на вторичной обмотке (уровень напряжения определяется коэффициентом трансформации импульсного трансформатора) недостаточно для пробоя межэлектродного промежутка. Затем, в момент времени T_2, электрическая цепь размыкается.

В общем случае, не вся энергия, запасенная в индуктивном элементе, будет введена в разряд, так как неизбежны потери в сердечнике, омическом сопротивлении обмоток трансформатора и электромагнитном излучении системы.

Следующая стадия (фаза I — рис. 6) процесса происходит в момент размыкания электронного ключа в первичной цепи схемы. Синхронно на вторичной стороне импульсного трансформатора происходит изменение полярности напряжения, а его уровень резко возрастает. В данный момент времени разряд отсутствует, так как его активное сопротивление бесконечно, и система представляет собой последовательный колебательный контур, в котором возникает резонанс напряжения на разрядном промежутке. В контуре (см. эквивалентную схему — рис. 5, *b*) возникают высокочастотные колебания тока на фоне приложенного высоковольтного импульсного напряжения, и происходит пробой межэлектродного промежутка.

Таким образом, разряд представляет собой высокочастотный пробой в объеме. Амплитуда тока и частота колебаний определяются элементами схемы контура и также влияют на предварительную ионизацию среды.

Сразу вслед за пробоем (предварительной ионизацией среды) начинается следующая стадия — стадия формирования разряда (фаза II — рис. 6). Как известно, самостоятельный объемный разряд высокого давления (атмосферного) является нестационарным, т. е. спустя некоторое время он контрагируется и переходит в искровой. Считается, что основной ввод энергии в газ происходит на этой стадии (в нашем случае соответствует фазе энерговвода, (рис. 5, *c*), а максимальное количество энергии, введенной в разряд, зависит в том числе и от энергии, затраченной на предварительную ионизацию, и эта зависимость имеет линейный характер.

Анализ развития разряда на полученных фотографиях и их сравнение с осциллограммой позволили выделить три фазы разрядного процесса: предварительная ионизация, выделение энергии в канале и деионизация.

Первая фаза (I, рис. 6) соответствует формированию ионизационного канала, представленного на рис. 7. В начальный момент времени разряд отсутствует, и активное сопротивление среды бесконечно. Колебательный контур с реактором возбуждается на резонансной частоте (20–40 MHz) с амплитудой напряжения до 50 kV. В сформировавшемся высокочастотном поле происходит ионизация среды в межэлектродном промежутке (длительность процесса составляет 1–2 μs). Геометрия канала определяется частотой и амплитудой ВЧ-тока, протекающего через разрядный промежуток (рис. 8).

Для пояснения механизма первой фазы на рис. 9 представлена осциллограмма ВЧ-тока, проходящего через разрядный промежуток в данной фазе (кривая *1*), при искусственном смоделированном режиме отсутствия пробоя. Этот режим был создан путем увеличения разрядного промежутка между электродами выше порога пробоя по напряжению.

На данном этапе ионизация среды происходит в объеме, что приводит к лавинообразному увеличению концентрации электронов в разрядном промежутке. Как только концентрация электронов достигает критического значения, начинается вторая фаза разряда (II, рис. 6). Вторая фаза характеризуется образованием проводящего канала с конечным сопротивлением, что приводит к изменению параметров колебательного контура и выделению запасенной в нем энергии. Амплитуда тока определяется волновым сопротивлением разрядного контура:

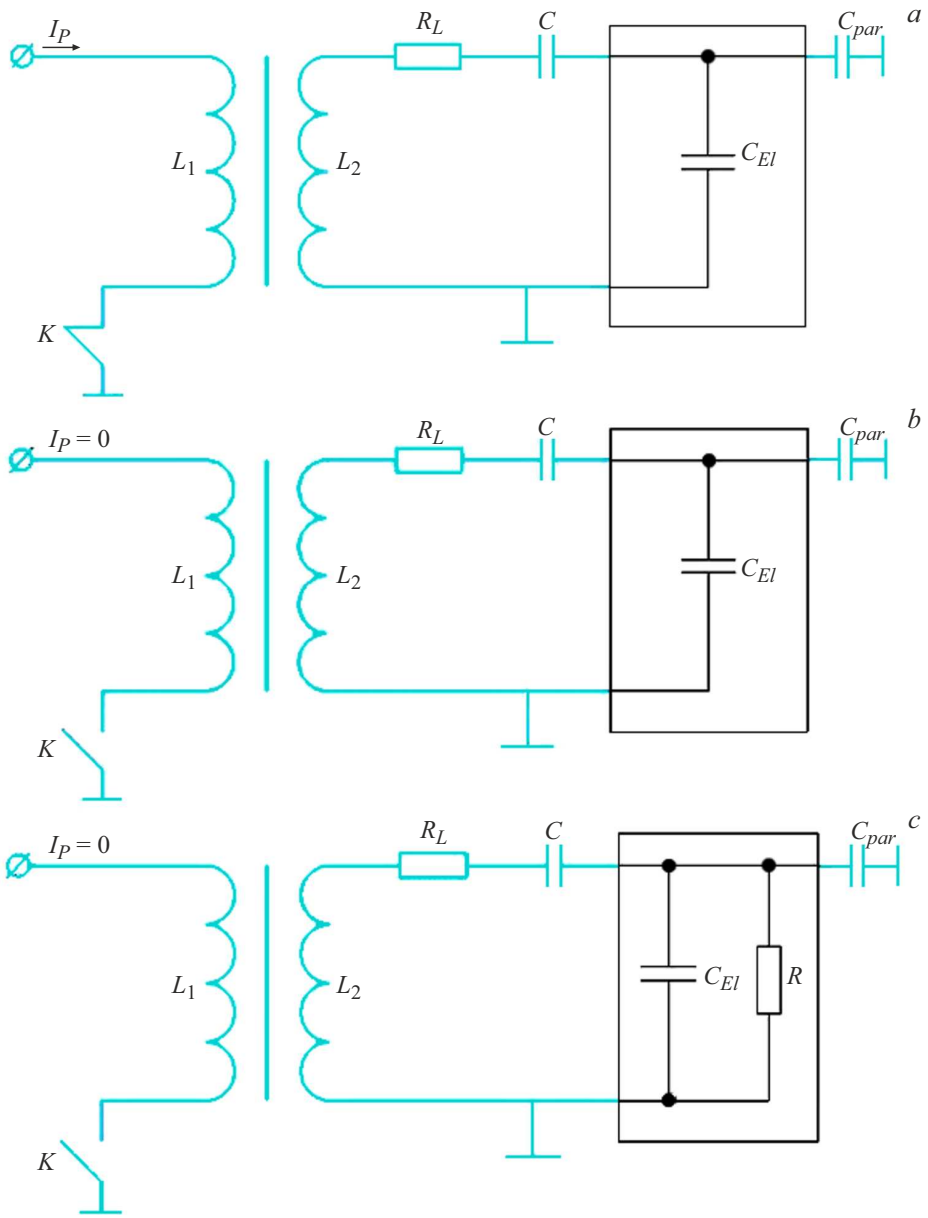

Рис. 7. Эквивалентная электрическая схема: *a* — стадия накачки контура энергией, восстановление электропрочности газоразрядного промежутка; *b* — стадия пробоя межэлектродного промежутка и формирование разряда, *c* — стадия энерговыделения в разряде; I_P — ток накачки (амплитудное значение тока), L_1 — первичная обмотка трансформатора, L_2 — вторичная обмотка трансформатора, R_L — сопротивление катушки, R — эквивалентное сопротивление разрядного канала, C — ограничивающая емкость, C_{par} — паразитная емкость, C_{El} — эквивалентная емкость разрядного промежутка.

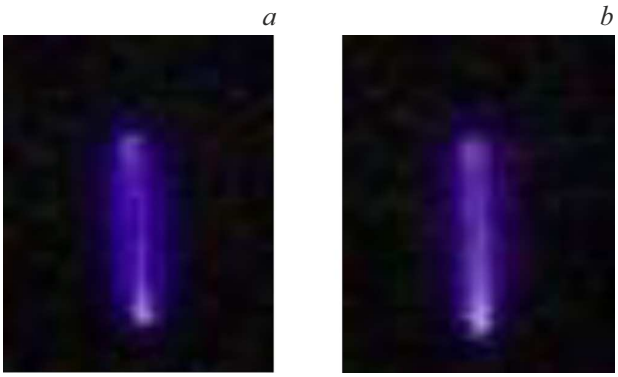

Рис. 8. Внешний вид ионизационного канала.

реактивным сопротивлением индуктивности и емкости, а также активным сопротивлением разряда.

В результате частота колебаний тока уменьшается на несколько порядков и определяется параметрами внешних элементов, входящих в состав колебательного контура. Характерный внешний вид разряда на стадии энерговыделения представлен на рис. 10.

В третьей фазе (III, рис. 6) происходит деионизация канала. На этом этапе ток в разряде прекращается, сопротивление разрядного промежутка резко возрастает. Колебательный контур возвращается в состояние, аналогичное стадии предварительной ионизации. Оставшаяся

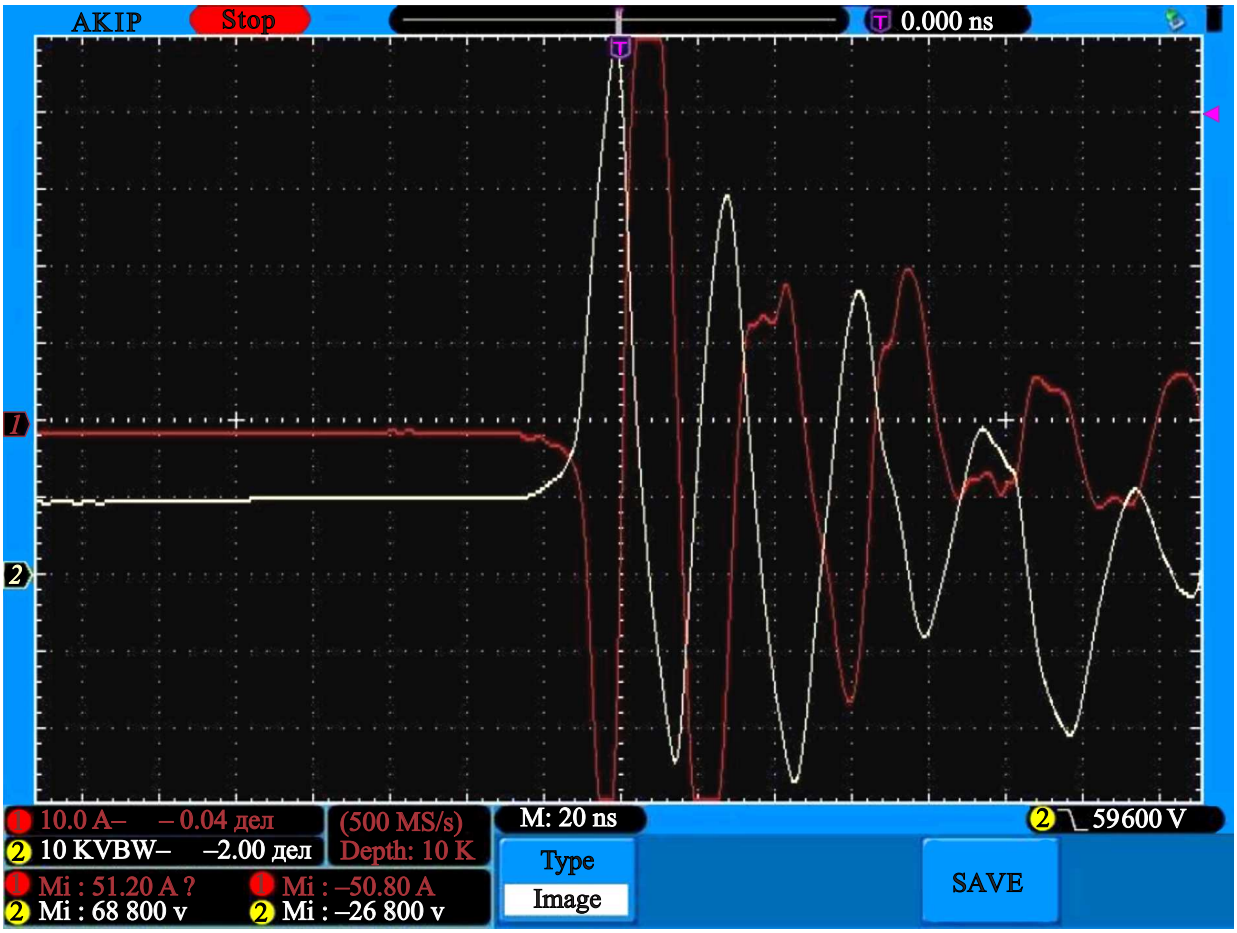

Рис. 9. Осциллограммы напряжения на выходной обмотке импульсного трансформатора (кривая *2*) и ВЧ-колебаний тока в цепи реактора (кривая *1*).

энергия в контуре возбуждает ВЧ-колебания, аналогичные первому участку.

3. Определение геометрии разряда

Как было отмечено ранее, параметры плазмы в рабочей камере могут быть определены через геометрию разрядного канала. Наибольший интерес представляет состояние плазмы в первых двух фазах, особенно на этапе предварительной ионизации.

Для анализа были измерены диаметры разрядного канала на рис. 8 (фаза I) и 10 (фаза II). С учетом коэффициента пропорциональности $k = 0.0684$ получены следующие значения средних диаметров разрядного канала:

Фаза I: $d_1^{\mathrm{I}} = 0.08\,\mathrm{mm}$, $d_2^{\mathrm{I}} = 0.068\,\mathrm{mm}$, где d_1^{I}, d_2^{I} — средний диаметр каналов на рис. 8, *a, b* соответственно.

Фаза II: $d_1^{\mathrm{II}} = 0.089\,\mathrm{mm}$, $d_2^{\mathrm{II}} = 0.084\,\mathrm{mm}$, $d_3^{\mathrm{II}} = 0.064\,\mathrm{mm}$, где d_1^{II}, d_2^{II}, d_3^{II} — средний диаметр каналов на рис. 10, *a*–*c* соответственно.

Заключение

В ходе проведенного исследования была изучена временна́я структура частотного импульсного разряда с частотой повторения импульсов от 1 до 10 kHz и энергией импульса в диапазоне 1–4 mJ в воздухе при атмосферном давлении, а также зарегистрированы осциллограммы разрядного тока и напряжения разрядного промежутка. Анализ осциллограммы вместе с динамикой разряда показал, что разрядный процесс состоит из трех стадий, а именно формирование ионизационного канала в ВЧ-поле, фаза основного энерговыделения и деионизация среды. На основе высокоскоростных изображений были измерены диаметры разрядных каналов на первых двух стадиях (I и II), что позволило получить количественные характеристики их развития.

В дальнейших исследованиях на основе полученных данных планируется расчет ключевых параметров плазмы на каждой стадии формирования и эволюции разряда, что позволит более детально описать механизмы его развития.

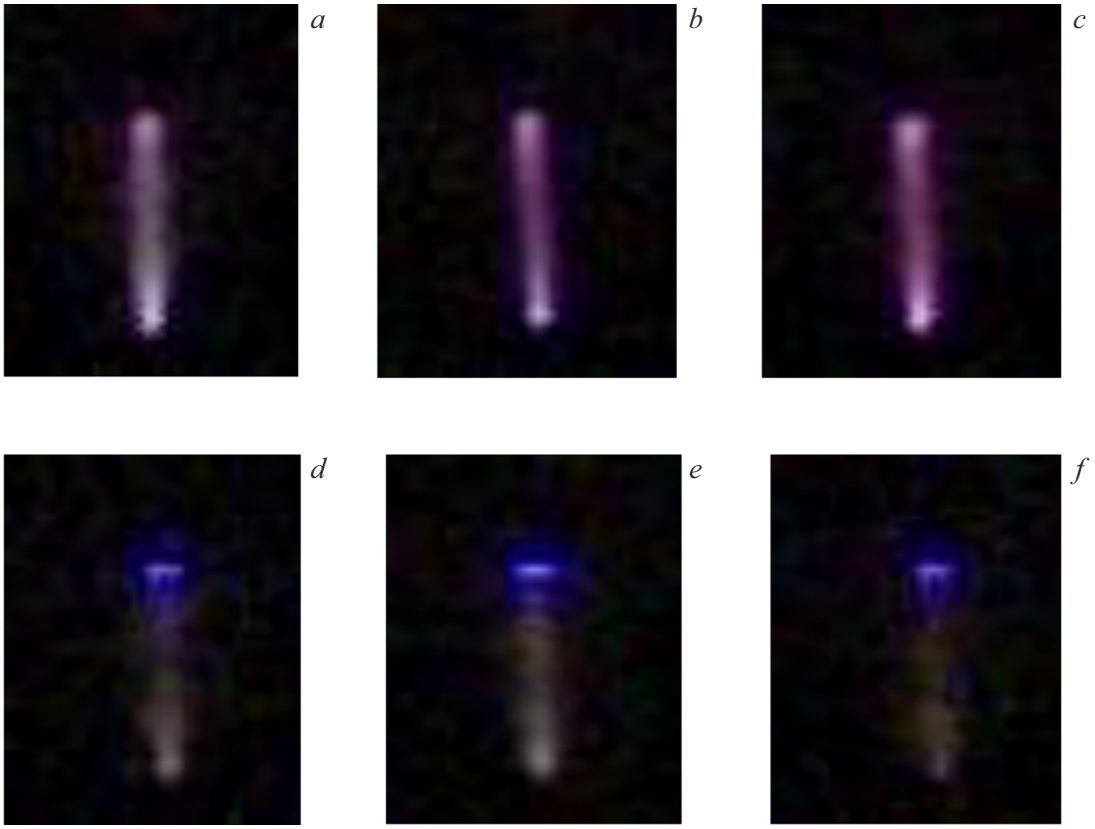

Рис. 10. Внешний вид разряда на стадии энерговыделения: *a–c* — первая полуволна, *d–f* — вторая полуволна.

Благодарности

Авторы благодарят кафедру СМ-4 МГТУ им. Н.Э. Баумана в лице заведующего кафедрой д.т.н. В.В. Селиванова и технических работников Н.Д. Галина и Д.А. Лысова за проведенные высокоскоростные съемки экспериментов.

Авторы выражают искреннюю благодарность компании ООО „УФ ПУЛЬС“ за содействие и поддержку в подготовке статьи.

Конфликт интересов

Авторы заявляют, что у них нет конфликта интересов.

Список литературы

[1] Ю.С. Акишев. Изв. вузов. Химия и хим. технология, **62** (8), 26 (2019). DOI: 10.6060/ivkkt.20196208.5908

[2] G. Borcia, N.M.D. Brown. J. Phys. D: Appl. Phys., **40** (7), 1927 (2007). DOI: 10.1088/0022-3727/40/7/015

[3] R. Deltschew, D. Hirsch, H. Neumann, T. Herzog, K.J. Wolter, M. Nowottnick, K. Wittke. Plasma Treatment for Fluxless Soldering, **142–144**, 803 (2001). DOI: 10.1016/s0257-8972(01)01181-1

[4] G. Takyi, N.N. Ekere. Soldering Surface Mount Technol., **22** (2), 37 (2010). DOI: 10.1108/09540911011036271

[5] E.S.M. Mouele, J.O. Tijani, O.O. Fatoba, L.F. Petrik. Environmental Science and Pollution Research, **22** (23), 18345 (2015). DOI: 10.1007/s11356-015-5386-6

[6] G. Sathiamoorthy, S. Kalyana, W.C. Finney, R.J. Clark, B.R. Locke. Ind. Eng. Chem. Res., **38** (5), 1844 (1999).

[7] Y. Qi, H. Hu, C. Weipeng, X. Jie, Z. Jinli, W. Shuang. Plasma Sci. Technol., **13** (6), 702 (2011).

[8] K. Heuer, M.A. Hoffmanns, E. Demir, S. Baldus, Ch.M. Volkmar, M. Röhle, P.C. Fuchs, P. Awakowicz, Ch.V. Suschek, Ch. Opländer. Nitric Oxide: Biol. Chem., **44**, 52 (2015). DOI: 10.1016/j.niox.2014.11.015.PMID: 25435001

[9] H. Hu, H. Liang, J. Li, Q. Zhao, J. He. IEEE Transactions on Plasma Sci., **35** (3), 619 (2007). DOI: 10.1109/TPS.2007.896782

[10] Н.А. Шарапов, В.И. Чуканов, Р.Р. Дистанов, Н.П. Козлов, А.В. Пекшев, В.А. Хоменко, А.Б. Вагапов, Р.Р. Дусалиева. Инженер. журн.: наука и инновации, **10** (22), 32 (2013).

[11] Н.А. Шарапов, А.А. Хинкис, С.И. Гаджихалилова, Т.В. Мельник, А.В. Парфенов. ВАНТ. Сер. Термоядерный синтез, **40** (2), 61 (2017).