

Динамика пространственной структуры импульсного разряда в азоте и аргоне при различных давлениях в промежутке „острие—плоскость“

© А.А. Тренькин, К.И. Алмазова, А.Н. Белоногов, В.В. Боровков, А.С. Долотов, И.В. Морозов

Российский Федеральный ядерный центр — Всероссийский научно-исследовательский институт экспериментальной физики,
607190 Саров, Россия
e-mail: alexey.trenkin@gmail.com

Поступило в Редакцию 23 марта 2022 г.

В окончательной редакции 20 апреля 2022 г.

Принято к публикации 4 мая 2022 г.

С применением скоростной съемки и метода теневого фотографирования исследована пространственная структура импульсного разряда в промежутке „острие (катод)—плоскость“ длиной 1.5 мм в азоте и аргоне в диапазоне давлений от 0.25 до 2 atm. Получено, что в азоте реализуется искровая, а в аргоне — диффузная форма разряда. Для обоих случаев обнаружено наличие микроструктуры разрядов в исследованном диапазоне давлений, когда разряд представляет собой множество каналов микронного диаметра. Показано, что для каждого газа динамика структуры свечения разряда сохраняет подобие при различных давлениях. Установлено, что свечение и микроструктура разряда в азоте аналогичны разряду в воздухе.

Ключевые слова: искровой разряд, диффузный разряд, микроструктура, метод теневого фотографирования, скоростная съемка.

DOI: 10.21883/JTF.2022.09.52925.58-22

Введение

Понимание совокупности процессов, протекающих в газовых разрядах, важно как с фундаментальной точки зрения, так и в плане развития газоразрядных технологий. Так, например, высоковольтные импульсные газовые разряды находят широкое практическое применение в плазмохимических реакторах [1–3], плазменных актуаторах [4–6], электроразрядных газовых лазерах [7–9], при обработке поверхностей [10].

Несмотря на длительный период исследований, ряд газоразрядных явлений остается малоизученным. К их числу относится микроструктура разряда [11–25], когда токовый канал представляет собой совокупность большего числа микроканалов (филаментов). Микроструктура была обнаружена при разрядах в воздухе атмосферного давления: первоначально методом автографов на поверхности плоского электрода [11–18], затем теневыми и интерференционными методами высокого пространственно-временного разрешения в объеме разрядного промежутка [18–25]. Необходимо особо отметить, что оптическими и электронно-оптическими методами микроканальная структура на фоне свечения разрядов была неразрешима [19]. Установлено, что микроструктура возникает в начальной фазе разряда и существует в дальнейшем, а механизмом ее формирования, по-видимому, является неустойчивость фронта волны ионизации (см. [24] и ссылки в ней). Было также показано, что наличие микроструктуры может обеспечивать ряд специфических эффектов, отсутству-

ющих в бесструктурных (однородных) каналах: генерация высокоэнергичных электронов в микроканалах, ускорение головок каналов в фазе перемигания промежутка, повышенные значения температуры электронов и др. [25–28].

Представляется, однако, что наличие микроструктуры разрядов обделено должным вниманием как в плане учета данного явления при расчетно-теоретическом моделировании, так и в утилитарных газоразрядных технологиях. Отчасти это может быть связано с представлением о „специфичности“ данного явления — его реализации в узком диапазоне условий. Вместе с тем микроструктура обнаружена во многих типах разрядов: в диффузных разрядах в промежутках „стержень—плоскость“, „проволочка, параллельная плоскости“ [11,14,15,18]; барьерных и искровых разрядах в геометрии „острие—плоскость“ и в однородных промежутках [12,16–25]; в бесстримерном разряде в однородном промежутке [13]. Отметим, однако, что все указанные разряды реализованы в воздухе атмосферного давления. Поэтому развитие представления о степени распространенности микроструктуры требует расширения условий реализации газовых разрядов (виды газов и их смеси, давление рабочей среды, параметры питающего напряжения, электродные конфигурации) и исследования наличия в них микроструктуры. В этой связи в настоящей работе проведено изучение пространственной структуры разрядов в азоте и аргоне в диапазоне давлений от 0.25 до 2 atm.

1. Экспериментальная аппаратура и методики

Схема экспериментального стенда представлена на рис. 1. Часть элементов схемы подробно описаны в [19,21]. Генератор импульсов напряжения обеспечивал на выходе импульс отрицательной полярности амплитудой 25 кВ и длительностью фронта по уровню 0.1–0.9 около 7 нс. Через кабельную линию длиной 7 м импульс подавался на разрядный промежток. Измерение напряжения и тока осуществлялось на выходе генератора импульсов напряжения соответственно емкостным делителем и резистивным шунтом. Временное разрешение делителя и шунта не хуже 1 нс. Регистрация сигналов производилась осциллографом с полосой пропускания 500 МГц и скоростью оцифровки 2 Гс/с.

Электродная система имела геометрию „острие–плоскость“. Осесимметричный острый электрод изготовлен из нержавеющей стали; его длина 19 мм, диаметр 14 мм, угол при вершине 36°, радиус кривизны 0.15 мм. В качестве плоского электрода использовался электрод, изготовленный из алюминиевого сплава, с рабочей частью близкой по форме к шаровому сегменту диаметром 4.5 см толщиной 1.5 см. Межэлектродный зазор составлял 1.5 мм.

Электродная система размещалась соосно внутри металлической вакуумной камеры цилиндрической формы. Диаметр камеры 310 мм, высота 800 мм. Ввод и вывод лазерного излучения осуществлялись через окна камеры, изготовленные из стекла марки КУ-1 диаметром 80 мм и толщиной 15 мм. Система вакуумирования и газонапуска обеспечивала рабочую среду для разряда из различных газов при разных давлениях. В настоящей работе использовались: азот в диапазоне давления от 0.25 до 1 атм и аргон — от 0.5 до 2 атм.

В составе стенда применялась система оптической регистрации разряда. Система включала в себя источник зондирующего излучения — твердотельный лазер (длина волны 532 нм, длительность импульса на полувысо-

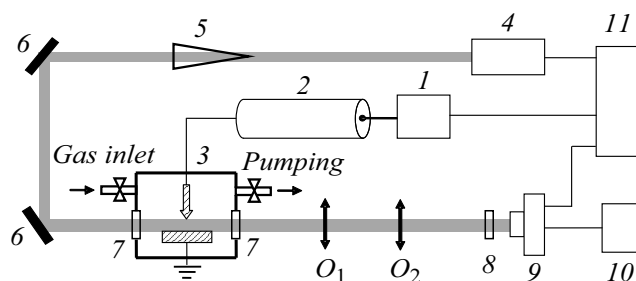


Рис. 1. Принципиальная схема экспериментального стенда: 1 — генератор импульсов напряжения, 2 — кабельная линия, 3 — вакуумная камера с разрядным промежутком, 4 — источник зондирующего сигнала (лазер), 5 — коллиматор, 6 — поворотное зеркало, 7 — окно, O_1 и O_2 — объективы, 8 — светофильтры, 9 — электронно-оптический регистратор, 10 — персональный компьютер, 11 — блок синхронизации.

те 6 нс), коллиматор, объективы, светофильтры и цифровую электронно-оптическую камеру. Плоскопараллельный пучок лазерного излучения, проходя через область разряда перпендикулярно оси электрода–острия, регистрировался электронно-оптической камерой. В области формирования разряда поперечный размер лазерного пучка составлял примерно 1 см и имел гауссов профиль. Поскольку межэлектродный зазор значительно меньше размера пучка, это обеспечивало достаточно однородное поле лазерного излучения в области разряда.

Применение в отличие от предшествующих экспериментов [19–21,24] вакуумной камеры потребовало изменения оптической схемы. Использовался дополнительный объектив O_1 , который располагался на двойном фокусном расстоянии от разрядного промежутка и строил его изображение в масштабе 1:1. Затем объектив O_2 переносил это изображение с увеличением масштаба 10:1 на фотокатод электронно-оптического регистратора.

На базе описанного стенда реализована методика теневого фотографирования. Экспозиция каждого кадра определялась длительностью импульса лазера. Временная привязка кадров осуществлялась относительно момента пробоя, а характеризующее их время соответствует началу кадра.

В экспериментах по фотографированию собственного свечения разряда лазер не использовался. Экспозиция кадра электронно-оптического регистратора составляла 40 нс. При фотографировании ранних стадий разряда (на временах менее 40 нс) часть времени экспозиции опережала начало формирования разряда. Привязка кадра собственного свечения разряда определялась моментом закрытия затвора электронно-оптического регистратора.

Система регистрации работала в однокадровом режиме — один кадр за импульс. Сдвигом момента запуска лазера и электронно-оптического регистратора относительно момента пробоя обеспечивалась визуализация различных стадий разрядного процесса. Разрешающая способность оптической системы составляла 5 μm на три пикселя.

2. Экспериментальные результаты и их обсуждение

По результатам проведенных ранее исследований [19–21,24] разряда в воздухе атмосферного давления отметим основные его характеристики. После пробоя промежутка в разрядной цепи возникал колебательный процесс с экспоненциальным затуханием тока и напряжения. Период колебаний составлял 0.6 μs , амплитуда тока и время его затухания соответственно 1 кА и 1.2 μs . При этом на осциллограммах выделялись два характерных момента времени: появление напряжения на разрядном промежутке t_U и пробой. За момент

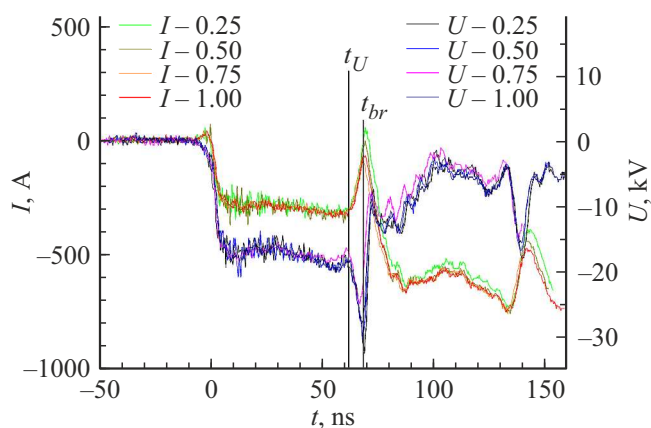


Рис. 2. Начальные фрагменты осциллограмм напряжения U и тока I при различных давлениях азота (t_U — момент появления напряжения на разрядном промежутке; t_{br} — момент пробоя; давление указано на вставках в atm).

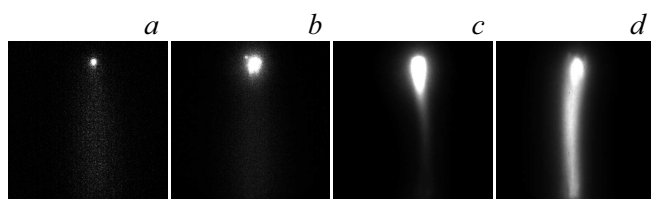


Рис. 3. Фотографии свечения разряда в азоте при давлении 1 atm в разные моменты времени: a — 1, b — 4, c — 13, d — 23 ns.

пробоя t_{br} был принят момент начала роста тока и соответственно спада напряжения.

В предшествующих работах [19–21,24] была зарегистрирована следующая динамика пространственной структуры начальной фазы разряда в воздухе. В предпробойной стадии возникает слабо светящийся диффузный канал и катодные пятна, затем в интервале от 5 до 15 ns происходит распространение светящихся образований от катода и замыкание промежутка однородным ярко светящимся каналом. Тенеграммы показывают, что канал представляет собой множество микроканалов, которые на фотографиях свечения разряда неразрешимы. Микроструктура регистрируется на тенеграммах с первых наносекунд после пробоя.

На рис. 2 представлены начальные фрагменты осциллограмм напряжения U и тока I при различных давлениях в азоте. В промежутке времени от 0 до 60 ns происходит распространение электрических сигналов по кабельной линии. Рост напряжения и спад тока в интервале между t_U и t_{br} соответствует отражению волны напряжения от изначально разомкнутого конца кабельной линии. Видно, что осциллограммы начальной фазы разряда при разных давлениях не содержат существенных отличий. Аналогичная ситуация наблюдалась и для осциллограмм при разряде в аргоне.

На рис. 3 представлены кадры свечения разряда в азоте при давлении 1 atm, а на рис. 4 — при давлении 0.25 atm в различные моменты времени. В начальной фазе возникают катодные пятна и слабо светящийся диффузный канал, затем происходит распространение светящихся образований от катода и замыкание промежутка однородным ярко светящимся каналом. Сравнение полученных данных свидетельствует о запаздывании эволюции структуры свечения разряда относительно начала пробоя с понижением давления, однако морфология структуры сохраняет подобие при различных давлениях. Сравнение фотографий свечения разряда в азоте и воздухе [18,20] при атмосферном давлении показывает схожесть динамики структуры свечения в этих газах.

На рис. 5 приведены тенеграммы разряда в азоте при давлении 1 atm в различные моменты времени. Видно, что канал разряда обладает микроструктурой, которая регистрируется с первых наносекунд после пробоя. В этот период диаметр микроканалов составляет около $10\ \mu\text{m}$. К двадцатой наносекунде канал разряда приобретает четкую внешнюю границу и далее про-

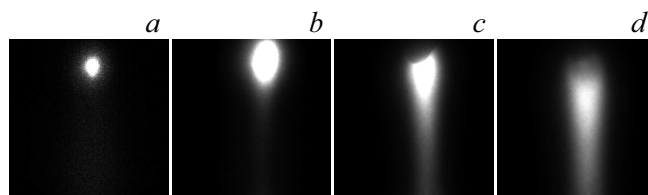


Рис. 4. Фотографии свечения разряда в азоте при давлении 0.25 atm в разные моменты времени: a — 5, b — 25, c — 38, d — 60 ns.

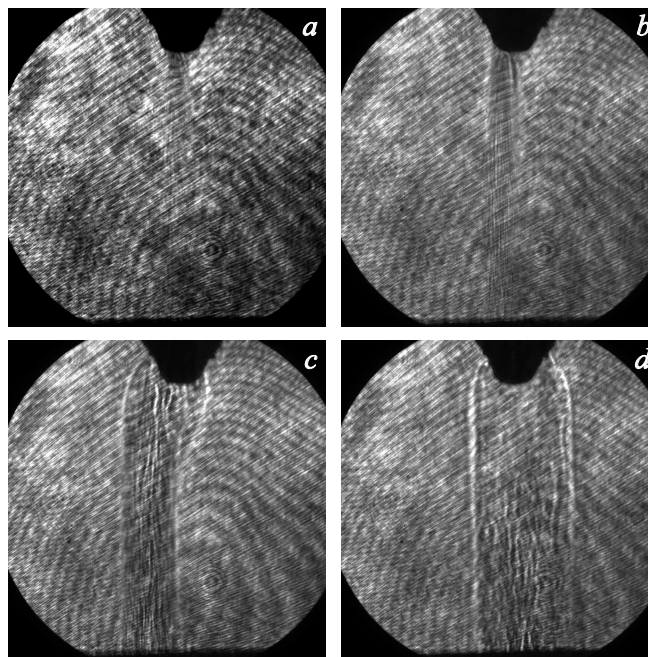


Рис. 5. Тенеграммы разряда в азоте при давлении 1 atm в разные моменты времени (a — 4, b — 7, c — 27, d — 60 ns).

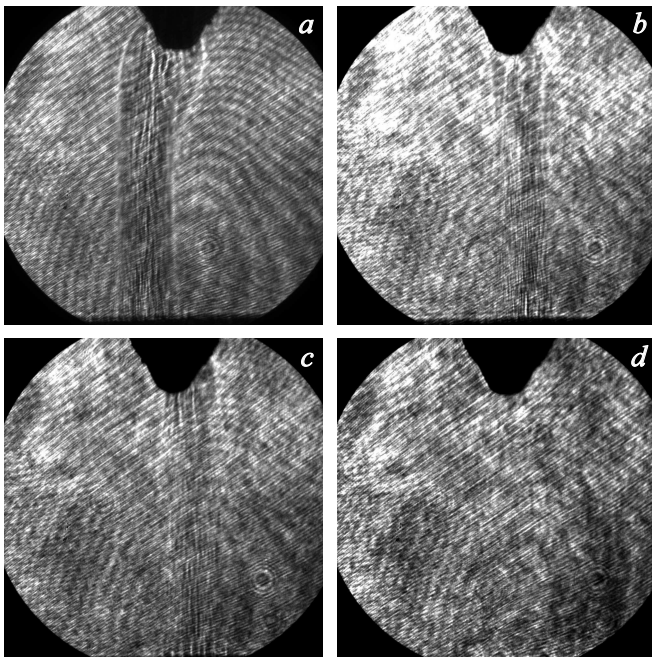


Рис. 6. Тенеграммы разряда в азоте при разных давлениях: *a* — 1 atm и 27 ns, *b* — 0.75 atm и 22 ns, *c* — 0.5 atm и 19 ns и *d* — 0.25 atm и 51 ns.

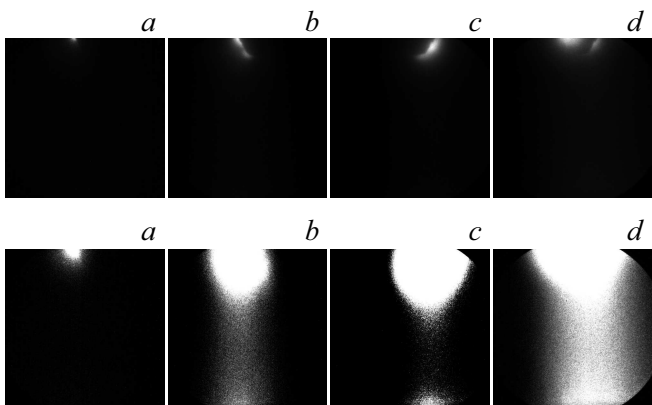


Рис. 7. Фотографии свечения разряда в аргоне при давлении 0.5 atm в разные моменты времени: *a* — 10, *b* — 27, *c* — 52, *d* — 78.

исходит его радиальное расширение. Схожая картина наблюдалась и при разряде в воздухе [20].

На рис. 6 представлены тенеграммы разряда при различных давлениях в интервале от 0.25 до 1 atm. На всех тенеграммах наблюдается микроканальная структура. Вместе с тем при давлении 0.25 atm микроканалы слабо различимы. Причиной этому может быть недостаточная чувствительность используемой методики теневого фотографирования в условиях уменьшения плотности газа и ее градиентов при понижении давления.

На рис. 7 и 8 представлены кадры свечения разряда в аргоне соответственно при давлении 0.5 и 2 atm в различные моменты времени. Изображения нижнего

ряда на каждом из рис. 7 и 8 — это подвергнутые компьютерной обработке (с повышением яркости) изображения верхнего ряда. Такая процедура позволяет визуализировать структуру свечения областей разряда с относительно слабой интенсивностью. Видно, что свечение в начальной стадии разряда проявляется в виде катодных пятен и слабого диффузного свечения по всей длине промежутка, после чего формируется относительно ярко светящаяся прианодная область. При этом основная область разряда имеет относительно низкую интенсивность свечения. Так же как и для азота, прослеживается подобие морфологии структуры свечения при разных давлениях. Следует, однако, отметить, что в отличие от азота и воздуха [18,20] разряд в аргоне имеет

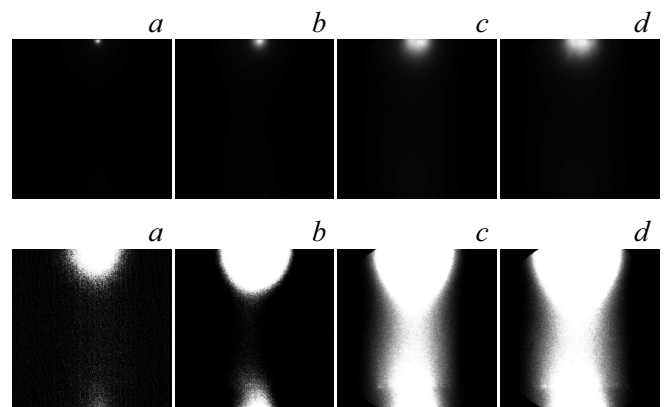


Рис. 8. Фотографии свечения разряда в аргоне при давлении 2 atm в разные моменты времени: *a* — 1, *b* — 23, *c* — 68, *d* — 78.

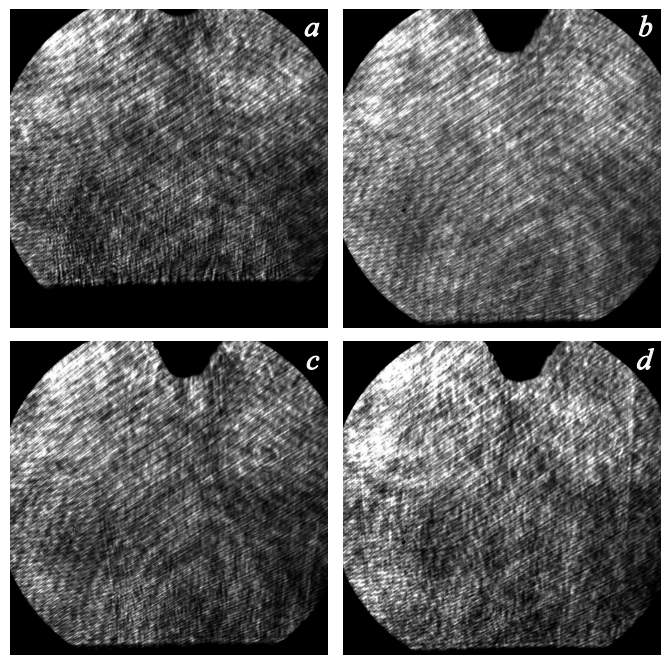


Рис. 9. Тенеграммы разряда в аргоне при разных давлениях: *a* — 2 atm и 92 ns; *b* — 1 atm и 49 ns; *c* — 0.8 atm и 99 ns; *d* — 0.5 atm и 169 ns.

диффузный характер. Об этом свидетельствуют и тенеграммы разряда в аргоне (рис. 9), на которых разрядная область с четко выраженной границей становится отчетливо различной лишь на поздних стадиях. Поскольку осциллограммы дают близкие значения разрядного тока в воздухе, азоте и аргоне, можно сделать вывод о более однородном его распределении в разрядном промежутке в последнем случае.

При всех используемых здесь давлениях на тенеграммах разряда в аргоне (рис. 9) регистрируется микроструктура: разряд в аргоне представляет собой плотное множество каналов микронного диаметра. Например, при давлении аргона 2 atm в момент времени 27 ns диаметр микроканалов не превышает 8 μm . При этом, как и для азота, в аргоне при понижении давления микроструктура становится слабовыраженной, что также можно объяснить снижением чувствительности методики теневого фотографирования. Отметим также, что, как и в случае азота и воздуха, микроканальная структура на фотографиях свечения разряда в аргоне неразличима.

Таким образом, в качестве основного результата проведенных исследований следует указать наличие микроструктуры разряда в азоте и аргоне как при повышенных, так и при пониженных давлениях. Ранее была обнаружена и исследована микроструктура в различных типах разрядов в воздухе [11–25], который в отличие от использованных здесь газов является электроотрицательным. Полученные в настоящей работе данные, в частности, показывают, что электроотрицательность газа не является необходимым условием формирования микроструктуры. В целом представленные экспериментальные данные могут свидетельствовать о широкой распространенности явления микроструктурирования, что, по всей видимости, является следствием проявления универсальных закономерностей в процессах развития разрядов.

Полученные в настоящей и в ряде других работах результаты обуславливают необходимость учета наличия микроструктуры в газовых разрядах. Это важно как в фундаментальном плане, связанном построением соответствующих расчетно-теоретических моделей процессов в газовых разрядах, так и при разработке и применении газоразрядных технологий.

Заключение

С применением скоростной съемки и метода теневого фотографирования исследована структура свечения и микроструктура импульсного разряда в промежутке „острие (катод)–плоскость“ длиной 1.5 mm в азоте в диапазоне давлений от 0.25 до 1 atm и аргоне в диапазоне давлений от 0.5 до 2 atm.

Получено, что в азоте реализуется искровая форма разряда. Динамика структуры свечения включает последовательные фазы: возникновение катодных пятен и слабо светящегося диффузного канала, распространение

светящихся образований от катода и замыкание промежутка однородным относительно тонким ярко светящимся каналом.

Показано, что с понижением давления эволюция структуры свечения разряда в азоте запаздывает относительно начала пробоя, однако морфология структуры сохраняет подобие при различных давлениях.

Обнаружено наличие микроканальной структуры разряда в азоте в исследованном диапазоне давления — с первых наносекунд разряд представляет собой множество каналов микронного диаметра.

Выявлено, что динамика структуры свечения и микроструктуры разряда в азоте аналогична разряду в воздухе.

Зарегистрирована динамика свечения разряда в аргоне, включающая появление катодных пятен и слабого диффузного свечения по всей длине промежутка, затем формирование прианодной области свечения. Разряд в аргоне имеет диффузный характер с относительно низкой интенсивностью свечения и слабо выраженной границей канала, а эволюция структуры свечения разряда проявляет подобие при разных давлениях.

Установлено наличие микроструктуры разряда в аргоне в исследованном диапазоне давления — разряд представляет собой плотное множество микроканалов.

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] Г.А. Месяц, В.В. Осипов, В.Ф. Тарасенко. *Импульсные газовые лазеры* (Наука, М., 1991)
- [8] А.И. Павловский, В.Ф. Басманов, В.С. Босамькин, В.В. Горохов, В.И. Карелин, П.Б. Репин. *Квант. электрон.*, **14** (2), 428 (1987).
- [9] В.Ф. Тарасенко. *Импульсные лазеры на переходах атомов и молекул* (SST, Томск, 2014)
- [10] M. Erofeev, V. Ripenko, M. Shulepov, V. Tarasenko. *Eur. Phys. J. D*, **71**, 117 (2017). DOI: 10.1140/epjd/e2017-70636-6
- [11] С.Н. Буранов, В.В. Горохов, В.И. Карелин, А.И. Павловский, П.Б. Репин. *Квант. электрон.*, **18** (7), 891 (1991).

- [12] А.В. Перминов, А.А. Тренькин. *ЖТФ*, **75** (9), 52 (2005). [A.V. Perminov, A.A. Trenkin. *Tech. Phys.*, **50** (9), 1158 (2005).]
- [13] В.И. Карелин, А.А. Тренькин. *ЖТФ*, **78** (3), 29 (2008). [A.A. Trenkin, V.I. Karelin. *Tech. Phys.*, **53** (3), 314 (2008). DOI: 10.1134/S1063784208030055]
- [14] П.Б. Репин, А.Г. Репьев. В сб.: *Исследования по физике газового разряда*, под ред. В.Д. Селемира и А.Е. Дубинова (Саров, 2003), с. 143.
- [15] А.Г. Репьев, П.Б. Репин, В.С. Покровский. *ЖТФ*, **77** (1), 56 (2007). [A.G. Rep'ev, P.B. Repin, V.S. Pokrovski'. *Tech. Phys.*, **52** (1), 52 (2007).]
- [16] С.Н. Буранов, В.В. Горохов, В.И. Карелин, П.Б. Репин. *ЖТФ*, **74** (10), 40 (2004).
- [17] А.А. Тренькин, В.И. Карелин, Ю.М. Шибитов, О.М. Блинова. *ЖТФ*, **88** (10), 1520 (2018). DOI: 10.21883/JTF.2018.10.46495.2413 [A.A. Tren'kin, V.I. Karelin, Yu.M. Shibitov, O.M. Blinova. *Tech. Phys.*, **63** (10), 1473 (2018). DOI: 10.1134/S1063784218100237]
- [18] K.I. Almazova, A.N. Belonogov, D.V. Beloplotov, V.V. Borovkov, A.A. Tren'kin, M.V. Erofeev, V.S. Ripenko, M.A. Shulepov, V.F. Tarasenko. *J. Nanosci., Nanomedic. Nanobiol.*, **4** (1), 1 (2021).
- [19] А.А. Тренькин, К.И. Алмазова, А.Н. Белоногов, В.В. Боровков, Е.В. Горелов, И.В. Морозов, С.Ю. Харитонов. *ЖТФ*, **88** (6), 827 (2018). DOI: 10.21883/JTF.2018.06.46011.2511 [A.A. Trenkin, K.I. Almazova, A.N. Belonogov, V.V. Borovkov, E.V. Gorelov, I.V. Morozov, S.Yu. Kharitonov. *Tech. Phys.*, **63** (6), 801 (2018). DOI: 10.1134/S1063784218060026]
- [20] 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 [A.A. Trenkin, K.I. Almazova, A.N. Belonogov, V.V. Borovkov, E.V. Gorelov, I.V. Morozov, S.Yu. Kharitonov. *Tech. Phys.*, **65** (12), 1948 (2020). DOI: 10.1134/S1063784220120270]
- [21] А.А. Тренькин, К.И. Алмазова, А.Н. Белоногов, В.В. Боровков, Е.В. Горелов, И.В. Морозов. *ЖТФ*, **91** (2), 255 (2021). DOI: 10.21883/JTF.2021.02.50359.217-20 [A.A. Trenkin, K.I. Almazova, A.N. Belonogov, V.V. Borovkov, E.V. Gorelov, I.V. Morozov, S.Yu. Kharitonov. *Tech. Phys.*, **66** (2), 243 (2021). DOI: 10.1134/S1063784221020225]
- [22] 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
- [23] E.V. Parkevich, M.A. Medvedev, G.V. Ivanenkov, A.I. Khirianova, A.S. Selyukov, A.V. Agafonov, Ph.A. Kornecov, S.Y. Gus'kov, A.R. Mingaleev. *Plasma Sources Sci. Technol.*, **28**, 095003 (2019). DOI: 10.1088/1361-6595/ab3768
- [24] А.А. Тренькин, К.И. Алмазова, А.Н. Белоногов, В.В. Боровков, Е.В. Горелов, И.В. Морозов, С.Ю. Харитонов. *ЖТФ*, **92** (3), 348 (2022). DOI: 10.21883/JTF.2022.03.52130.235-21
- [25] K.I. Almazova, A.N. Belonogov, V.V. Borovkov, V.S. Kurbanismailov, Z.R. Khalikova, P.Kh. Omarova, G.B. Ragimkhanov, D.V. Tereshonok, A.A. Trenkin. *Phys. Plasmas*, **27**, 123507 (2020). DOI: 10.1063/5.0026192
- [26] V.I. Karelin, A.A. Trenkin, I.G. Fedoseev. *Phys. Atom. Nucl.*, **78** (12), 1440 (2015). DOI: 10.1134/S1063778815120133
- [27] А.А. Тренькин, В.Д. Бейбалаев, Г.Б. Рагимханов. *Нелинейный мир*, **17** (5), 47 (2019).
- [28] V.I. Karelin, A.A. Trenkin. *High Voltage Engineer.*, **41** (2), 1 (2015).