

## О влиянии распыления электродов на характеристики импульсного разряда в гелии при атмосферном давлении

В. С. Курбанисмаилов, Р. И. Голятина, С. А. Майоров, Г. Б. Рагимханов,  
З. Р. Халикова, И. Г. Рамазанов

*В работе представлены результаты экспериментального и численного исследования импульсного разряда в гелии атмосферного давления. Из данных покадровых картин формирования разряда и спектрального состава излучения установлено, что развитие разряда сопровождается распылением материала электрода. Методом Монте-Карло выполнены расчеты ионизационно-дрейфовых характеристик электронов и ионов в гелии с парами железа и показано, что даже очень малые примеси атомов железа в гелии существенно меняют функцию распределения электронов по энергиям и зарядовый состав плазмы. Рассчитаны и протабулированы диффузионно-дрейфовые характеристики ионов железа в гелии в зависимости от приведенной напряженности электрического поля – средняя энергия ионов, их продольная и поперечная температуры, коэффициенты диффузии вдоль и поперек направления поля. Исследована функция распределения ионов по скоростям и угловая зависимость ионов, бомбардирующих поверхность.*

*Ключевые слова:* объемный разряд, контракция, катодные пятна, диффузный канал, дрейф ионов, скорость дрейфа, коэффициенты диффузии, функция распределения.

**Ссылка:** Курбанисмаилов В. С., Голятина Р. И., Майоров С. А., Рагимханов Г. Б., Халикова З. Р., Рамазанов И. Г. // Прикладная физика. 2020. № 4. С. 24.

**Reference:** V. S. Kurbanismailov, R. I. Golyatina, S. A. Maiorov, G. B. Ragimkhanov, Z. R. Khalikova, and I. G. Ramazanov, Prikl. Fiz., No. 4, 24 (2020).

### Введение

Актуальность изучения высоковольтных импульсных газовых разрядов обусловлена их

широким практическим применением: плазменно-стимулированное горение [1–3], плазменная аэродинамика [4–6], плазменная медицина [7, 8], обработка поверхности [9]. В то же время большое разнообразие физических процессов в импульсных газовых разрядах обуславливает и сложность интерпретации наблюдаемых явлений.

В зависимости от условий формирования разряда возможны различные механизмы формирования и режимы его горения [10–13]. С точки зрения практики представляется очень важным изучение влияния разряда на эрозию электродов.

Как известно, переходу от объемной формы горения к искровому каналу, предшествует либо взрыв микроострий катодной поверхности, либо происходит инициирование эмиссионного центра при пробое диэлектрических включений [14, 15]. Следовательно, в рабочий газ может попадать некоторое коли-

---

**Курбанисмаилов Вали Сулейманович**<sup>1</sup>, д.ф.-м.н., профессор.

**Голятина Русудан Игоревна**<sup>2</sup>, н.с.

**Майоров Сергей Алексеевич**<sup>2</sup>, в.н.с., д.ф.-м.н.

**Рагимханов Гаджимирза Балагланович**<sup>1</sup>, к.ф.-м.н., доцент.

**Халикова Заира Расуловна**<sup>1</sup>, аспирант.

**Рамазанов Имам Гамзатович**<sup>1</sup>, аспирант.

<sup>1</sup> Дагестанский государственный университет.

Россия, 367025, г. Махачкала, ул. М. Гаджиева, 43<sup>а</sup>.

E-mail: gb-r@mail.ru

<sup>2</sup> Институт общей физики им. А. М. Прохорова, РАН.

Россия, 119991, Москва, ул. Вавилова, 38.

Статья поступила в редакцию 09 июня 2020 г.

---

© Курбанисмаилов В. С., Голятина Р. И., Майоров С. А., Рагимханов Г. Б., Халикова З. Р., Рамазанов И. Г., 2020

чество атомов материала электродов [16, 17]. Хорошо известно [18, 19], что добавление в инертный газ с большим потенциалом ионизации даже небольшого количества легкоионизируемого газа (например, аргон в гелий [18], или криптон в гелий [20]) может радикально менять кинетические характеристики разряда.

В связи с этим, несомненный интерес представляют экспериментальные и теоретические исследования как динамики формирования импульсного разряда, так и влияние распыления электродов на характеристики разряда. В настоящей работе мы ограничимся рассмотрением наиболее частым случаем: рабочий газ – гелий и электроды из железа.

### Экспериментальная установка

Экспериментальная установка достаточно подробно описана в работах [21–23]. Разряд создавался между электродами из нержавеющей стали диаметром 4 см, удаленными друг от друга на расстояние  $d = 1$  см. На разрядный промежуток с начальной концентрацией электронов  $n_0 \sim 10^8 \text{ см}^{-3}$  (создавалась

посредством облучения через сетчатый анод ультрафиолетом от стороннего искрового разряда) подавались импульсы напряжения с регулируемой амплитудой до 30 кВ и фронтом нарастания  $\sim 10$  нс.

Динамика формирования разряда с пространственным и временным разрешением в наносекундном диапазоне времени исследовалась с применением фотоэлектронного регистратора (ФЭР2-1). Спектр излучения прикатодной плазмы регистрировался монохроматором с дифракционной решеткой (МДПС-3) с дисперсией 0,2–0,3 нм/мм. Для выявления наиболее ярких спектральных линий, возбуждаемых в разряде, регистрировался панорамный спектр с помощью автоматизированного комплекса монохроматор-спектрограф MS-3504i.

### Результаты экспериментов и обсуждение

Картины формирования разряда приведены на рис. 1. На них видно, как первое свечение возникает на аноде после приложения внешнего поля и оно в дальнейшем, в виде диффузного свечения, распространяется к катоду с характерной скоростью  $\sim 10^7 \text{ см/с}$ .

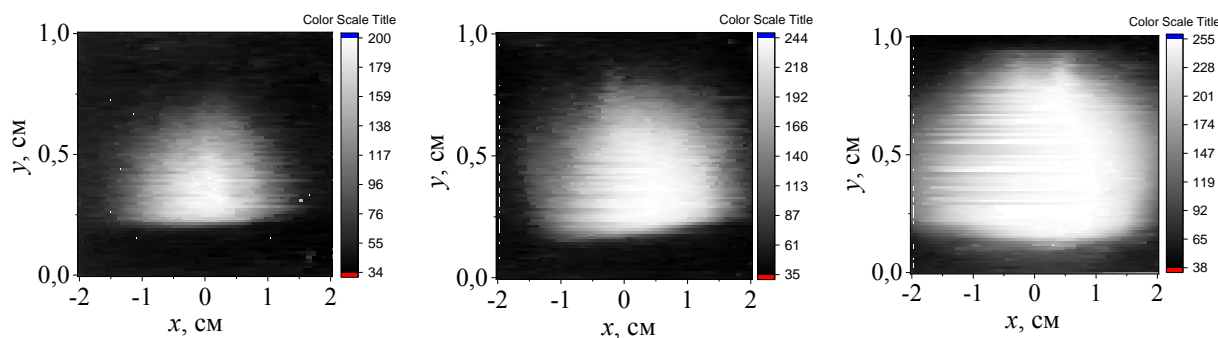


Рис. 1. Покадровые картины формирования разряда в He ( $d = 1$  см,  $p = 1$  атм.) для  $U_0 = 12$  кВ. Электроды плоские, верхний электрод – катод, нижний – анод.

После прихода фронта свечения на катод, разряд переходит в следующую фазу – фазу объемного горения. По мере продвижения фронта свечения к катоду электронная концентрация в нем возрастает и достигает значений  $\approx 10^{13} - 10^{14} \text{ см}^{-3}$ .

При атмосферном давлении и малых внешних полях ( $E_0 < E_{кр} = 6 \text{ кВ/см}$ ) формируется однородный разряд, а развитие незавершенных анодонаправленных каналов, привязанных к катодным пятнам с высокой

проводимостью плазменных каналов, началось при плотности тока  $\sim 40 \text{ А/см}^2$ .

В межэлектродном пространстве сохранялась хорошая однородность плазмы разряда. Увеличение плотности тока до  $60 \text{ А/см}^2$  ведет к дальнейшему продвижению незавершенных анодонаправленных каналов. При плотности тока более  $100 \text{ А/см}^2$  происходит перекрытие разрядного промежутка плазменным каналом. Результаты экспериментальных исследований формирования импульсного

разряда показывают, что однородность и устойчивость плазменного столба определяется условиями формирования разряда.

Как известно, формирование катодных и анодных пятен сопровождается выбросом материала вещества электродов в виде паров, капелек металла, а также заряженных частиц плазмы. Следовательно, в спектре разряда должны присутствовать линии излучения атомов и ионов материала электродов. В таблице 1 представлены наиболее интенсивные спектральные линии, возбуждаемые в разряде.

Отметим, что в спектре разряда, наряду с линиями рабочего газа (He), возбуждаются линии материала электродов (Fe). На рис. 2 приведен панорамный спектр разряда в области длин волн 370–730 нм при напряжении 12 кВ, который показывает наличие в спектре линий атомов железа.

С увеличением энергозатрат в разряд растет как относительная интенсивность спектральных линий, так и возбуждаются в разряде новые спектральные линии исследуемого газа (He) и материала вещества электродов (Fe).

Таблица 1

$U_0 = 3$ кВ	He, нм	381,96	388,86	471,3	587,56	640,64	667,81	706,52	728,14
		781,62							
$U_0 = 6$ кВ	He, нм	381,96	388,86	471,3	587,56	640,64	656,02	667,82	706,52
		728,14	781,62						
$U_0 = 12$ кВ	He, нм	381,96	388,86	403,23	447,15	471,41	492,19	501,56	587,56
		640,64	656,02	667,82	706,52	728,14	781,62		
$U_0 = 12$ кВ	Fe, нм	337,08	354,01	358,95	375,82	391,36	394,81	396,61	399,74
		404,58	419,56	428,54	487,21	633,68	673,32	714,53	750,73
		778,06	843,96	862,61	868,86	871,03	894,52	925,83	

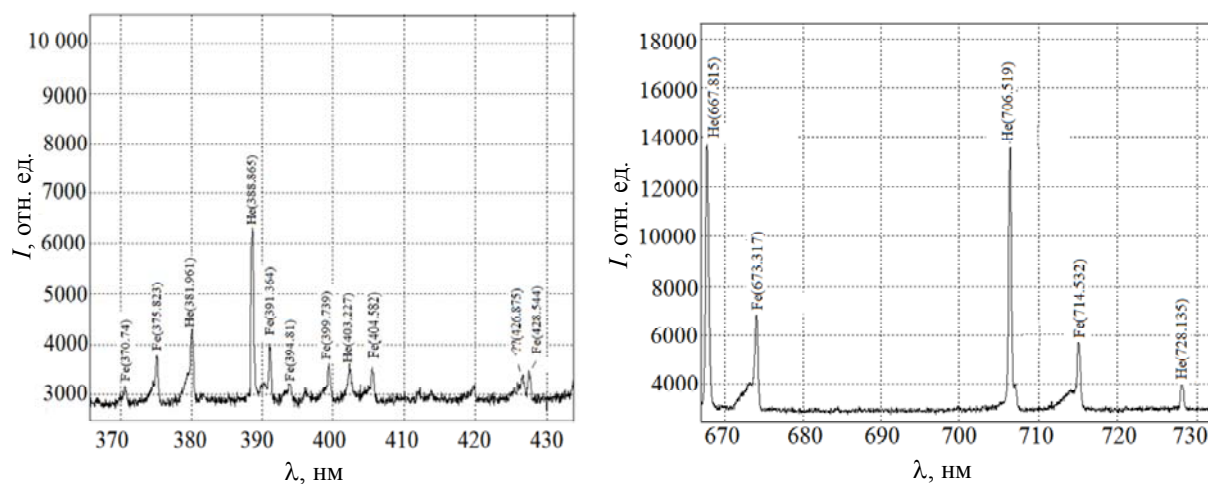


Рис. 2. Панорамные спектры излучения в плазме импульсного объемного разряда в He:  $U_0 = 12$  кВ,  $d = 1$  см,  $p = 1$  атм.

### Ионизационно-дрейфовые характеристики электронов в гелии с примесью паров железа

Отметим, что пары металла имеют значительно более низкий потенциал ионизации по сравнению с атомами благородных газов. Поэтому наличие даже малой доли атомов ме-

талла в благородном газе существенно влияет на кинетику процессов в разряде – повышается частота ионизации, уменьшается температура электронов, в разряде появляется значительное число ионов металла [24–27]. Рассмотрим вопрос о влиянии концентрации (доли) железа на коэффициенты переноса электронов при их дрейфе в гелии.

Вычислительный эксперимент основан на рассмотрении ансамбля невзаимодействующих между собой электронов, движение которых определяется заданными полями и мгновенными столкновениями с атомами. Модель столкновений основана на процедуре генерации случайных чисел – методе типа Монте-Карло. Реализация электрон-атомных

столкновений методом Монте-Карло позволяет учитывать энергобаланс электронов на основе элементарных актов, в том числе и при неупругих столкновениях [24–27]. В таблице 2 представлены рассчитанные значения скорости дрейфа  $V_{dr}$  км/с, средней энергии электронов  $\langle \varepsilon \rangle$  эВ, и приведенного ионизационного коэффициента Таунсенда  $\alpha/N_a \cdot 10^{-16}$  см<sup>2</sup>.

Таблица 2

$E/N$ , Тд	Дрейф в чистом He			Дрейф в He с 0,1 % Fe			Дрейф в He с 1 % Fe		
	$V_{dr}$	$\langle \varepsilon \rangle$	$\alpha/N_a$	$V_{dr}$	$\langle \varepsilon \rangle$	$\alpha/N_a$	$V_{dr}$	$\langle \varepsilon \rangle$	$\alpha/N_a$
1	4,725	0,56	0	4,75	0,568	0	4,89	0,564	0
2	7,125	1,05	0	7,22	1,084	0	6,82	1,07	0
5	11,3	2,91	0	11,5	2,739	0,001	11,52	2,602	0,020
10	20,3	5,83	0,0002	21,13	5,085	0,015	22,35	3,655	0,026
20	45,76	7,99	0,004	44,71	7,409	0,020	41,89	4,968	0,069
50	126,8	10,92	0,03	118,6	10,12	0,031	110,4	8,377	0,093
100	291,4	15,81	0,065	278,1	14,56	0,061	245,9	12,61	0,099
200	614,7	22,64	0,07	605,9	22,03	0,072	557,5	21,19	0,107
500	1204	30,74	0,06	1200	30,26	0,062	1129	29,91	0,083
1000	1698	35,65	0,055	1694	35,3	0,055	1604	35,22	0,072

Из приведенных данных видно, что даже 0,1 % атомов железа уже влияет характеристики дрейфа электрона, т. е. уменьшается скорость дрейфа и средняя энергия электрона. Полученные результаты также свидетельствуют о резком изменении характеристик ионизации при добавлении в гелий паров железа. Начиная с долей процента, из-за сильной ионизации атомов железа, происходит резкое изменение функции распределения электронов, что приводит к значительному увеличению частоты ионизации и появлению значительного числа ионов примеси.

### Характеристики дрейфа ионов железа в гелии

Дрейф ионов применительно к задачам газоразрядной плазмы уже изучался в ряде работ [28–39]. Плазмохимические реакции, идущие с участием ионов в различных видах газового разряда; процессы, протекающие в ионосфере под влиянием солнечного ветра, процессы взаимодействия потоков ионов с поверхностями твердых и жидких веществ во многом определяются функцией распределения ионов по скоростям.

Для моделирования ион-атомных столкновений при движении иона в однородном электрическом поле проводилось интегрирование уравнений движения ионов по схеме Рунге-Кутты второго порядка точности. На каждом шаге по времени разыгрывалось столкновение иона с атомом. Алгоритм моделирования ион-атомного столкновения подробно описан в работе [24, 25, 31, 38].

В таблице 3 приведены результаты расчета скорости дрейфа  $V_{dr}$ , эффективной температуры  $T_{eff}$ , продольной  $T_{||}$  и поперечной температур  $T_{\perp}$ , коэффициентов диффузии  $D_x/D_y$  ионов железа в гелии. В импульсном разряде при повышенном давлении газа его температура может меняться. Для демонстрации влияния температуры атомов на характер зависимости коэффициентов продольной и поперечной диффузии от напряженности электрического поля выполнены расчеты не только при комнатной температуре, но и при температуре газа 500 К. Из приведенных в таблице данных степень анизотропии коэффициентов продольной и поперечной диффузии можно оценивать по их отношению:  $D_{||}/D_{\perp}$ . Видно, что с ростом температуры газа степень анизотропии уменьшается. Следует отметить, что для сколь угодно слабой напря-

женности электрического поля существует такая температура атомов, что это поле может считаться сильным. Сильным в том смысле, что эффект разогрева ионов приводит к силь-

ной анизотропии функции распределения ионов по скоростям и большому отличию коэффициентов продольной и поперечной диффузии [39].

Таблица 3

$E/N$ , Тд	$T_{\text{газ}} = 300 \text{ К}$					$T_{\text{газ}} = 500 \text{ К}$				
	$T_{\text{eff}}$ , кК	$T_{\parallel}$ , кК	$T_{\perp}$ , кК	$D_x/D_y$	$V_{dr}$ , км/с	$T_{\text{eff}}$ , кК	$T_{\parallel}$ , кК	$T_{\perp}$ , кК	$D_x/D_y$	$V_{dr}$ , км/с
1	0,31	0,31	0,30	1,3	0,04	0,51	0,51	0,50	1,02	0,04
10	0,74	1,6	0,32	1,13	0,43	0,9	1,66	0,51	1,09	0,41
50	9,34	26,74	0,64	1,61	1,95	8,71	24,51	0,82	1,36	1,86
100	25,29	73,43	1,22	1,35	3,25	24,01	69,30	1,37	1,24	3,15
300	92,3	269,7	3,56	1,06	6,26	90,68	264,56	3,74	1,06	6,19
500	159,51	466,6	5,96	1,02	8,23	157,77	461,12	6,1	1,05	8,18
1000	327,27	958,2	11,8	1,01	11,8	325,45	952,42	11,96	1,01	11,8

На рис. 3 представлены распределения продольной и поперечной составляющей функции распределения ионов по проекциям скоростей при значении приведенной напряженности электрического поля  $E/N = 100 \text{ Тд}$  и  $T_a = 300 \text{ К}$ .

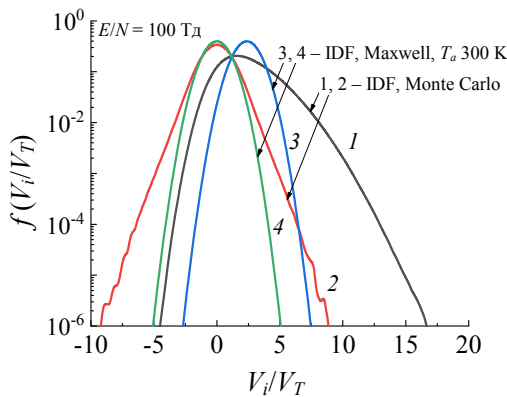


Рис. 3. Функции распределения ионов железа при дрейфе в гелии по проекциям скоростей вдоль (1) и поперек (2) направления поля при  $E/N = 100 \text{ Тд}$ ,  $T_a = 300 \text{ К}$  и соответствующие максвелловские функции распределения.

Для сравнения нанесены также распределение Максвелла для атомов при температуре  $T_a = 300 \text{ К}$ :

$$f(u) = \left( \frac{m}{4\pi T_a} \right)^{1/2} \exp\left( -\frac{mu^2}{2T_a} \right),$$

и для продольной функции распределения нанесено сдвинутое на величину скорости

дрейфа максвелловское распределение. Скорость ионов (ось абсцисс) нормирована на характерную тепловую скорость атомов железа  $V_T = (T_a/m)^{1/2}$ . Отметим следующие особенности дрейфа ионов железа в гелии при увеличении напряженности поля:

- 1) увеличивается скорость дрейфа и появляется анизотропия распределения ионов по направлениям, увеличивается дисперсия функции распределения (температура);
- 2) в распределении ионов по скоростям в направлении вдоль поля и поперек поля появляется сильное отклонение от сдвинутого максвелловского распределения.

Рассмотрим результаты расчетов, позволяющих на качественном уровне продемонстрировать влияние средней напряженности электрического поля и температуры газа на характеристики потока бомбардирующей поверхность катода ионов железа.

На рис. 4 представлены результаты расчета функции распределения углов между направлением полета иона и направлением электрического поля в полулогарифмическом масштабах для различных значений  $E/N$  и температур газа.

Приведенные результаты расчетов угловых характеристик ионного потока при дрейфе в газе могут использоваться для оценок характеристик газоразрядной плазмы при рассмотрении магнетронного и барьерного разрядов, зондовых характеристик и т. п.

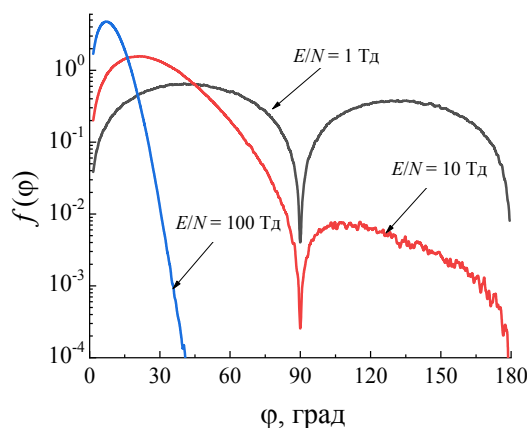


Рис. 4. Результаты расчета функции распределения углов  $\phi$  между направлением поля иона и направлением электрического поля для различных значений  $E/N$ .

### Заключение

В экспериментальной части показано, что в зависимости от приведенной напряженности электрического поля возможны различные режимы горения разряда: однородный объемный разряд, однородный объемный разряд с незавершенными аноднаправленными каналами, привязанных к катодным пятнам с высокой проводимостью (начиная с плотности тока  $\sim 40 \text{ A/cm}^2$ ). При плотности тока более  $100 \text{ A/cm}^2$  происходит перекрытие разрядного промежутка плазменным каналом. Спектр разряда характеризуется интенсивными линиями атомов железа, что говорит о распылении материала вещества электродов.

Результаты расчетов дают достаточно полную картину о механизме влияния малых добавок паров железа на характеристики газового разряда в гелии. Наиболее интересным и важным, с практической точки зрения, фактом является сильное увеличение частоты ионизации при незначительной (порядка долей процента) добавке паров железа.

Кроме того, при наличии атомов железа преимущественно будут ионизоваться именно они, что в свою очередь приводит к понижению температуры и уменьшению доли ионов гелия. Соответственно, как показывают расчеты, начиная с долей процента, в разряде будут в основном представлены ионы железа. Другим важным фактором, оказывающим большее влияние на характеристики разряда является то, что ионы железа при малой концентрации атомов железа будут редко испытывать столкновения с резонансной передачей

заряда. Именно поэтому малые примеси металла существенно меняют кинетику разряда, приводят к более значительной анизотропии диффузии, распределение ионов становится более остро направленным, т. е. можно говорить о сверхзвуковом ионном потоке [24–28, 30, 31, 38, 39].

Работа выполнена при финансовой поддержке грантов РФФИ № 19-08-00333 и № 19-08-00611.

### ЛИТЕРАТУРА

1. Starikovskaia S. // J. Phys. D: Appl. Phys. 2014. Vol. 47. P. 353001.
2. Popov N. A. // Plasma Sources Sci. Technol. 2011. Vol. 20. P. 045002.
3. Aleksandrov N. L., Kindysheva S. V., Kosarev I. N., Starikovskaia S. M., Starikovskii A. Y. // Proc. Combust. Inst. 2009. Vol. 32. P. 205.
4. Yang Liu et al. // Plasma Sources Sci. Technol. 2019. Vol. 28. P. 014001.
5. Starikovskii A. Yu. et al. // Plasma Sources Sci. Technol. 2009. Vol. 18. P. 034015.
6. Atsushi Komuro et al. // Plasma Sources Sci. Technol. 2018. Vol. 27. P. 104005.
7. Fridman G., Friedman G., Gutsol A., Shekhter A. B., Vasilets V. N., Fridman A. // Plasma Processes and Polymers. 2008. Vol. 5. № 6. P. 503.
8. Lee H. J., Shon C. H., Kim Y. S., Kim S., Kim G. C., Kong M. G. // New J. Phys. 2009. Vol. 11. P. 115026.
9. Erofeev M., Ripenko V., Shulepov M., Tarasenko V. // Eur. Phys. J. D. 2017. Vol. 71. P. 117.
10. Курбанисмаилов В. С., Омаров О. А., Рагимханов Г. Б., Абакарова Х. М., Али Рафид А. А. // Прикладная физика. 2015. № 2. С. 63.
11. Баурханова М. Г., Гаджиев М. Х., Курбанисмаилов В. С., Омаров О. А. // Прикладная физика. 2009. № 5. С. 62.
12. Курбанисмаилов В. С., Омаров О. А., Рагимханов Г. Б., Гаджиев М. Х., Баурханова М. Г., Катаа А. Дж. // Прикладная физика. 2010. № 4. С. 56.
13. Курбанисмаилов В. С., Омаров О. А., Арсланбеков М. А., Рагимханов Г. Б., Курбанисмаилов М. В., Али Рафид А. А. // Прикладная физика. 2013. № 5. С. 47.
14. Mesyats G. A., Osipov V. V., Tarasenko V. F. Pulsed Gas Lasers. – Washington: SPIE Press, 1995.
15. Королев Ю. Д., Месяц Г. А. Физика импульсного пробоя газов. – М.: Наука, 1991.
16. Курбанисмаилов В. С., Омаров О. А., Рагимханов Г. Б., Арсланбеков М. А., Абакарова Х. М., Али Рафид А. А. // Успехи прикладной физики. 2014. Т. 2. № 3. С. 234.
17. Ломаев М. И., Белоплотов Д. В., Сорокин Д. А., Тарасенко В. Ф. // Оптика и спектроскопия. 2016. Т. 120. № 2. С. 179.
18. Maiorov S. A., Ramazanov T. S., Dzhumagulova K. N., Jumabekov A. N., Dosbolaev A. N. // Physics of Plasmas. 2008. Vol. 15. P. 093701.

19. Бохан П. А., Закревский Д. Э. // Журнал технической физики. 1997. Т. 67. № 4. С. 25.
20. Antipov S. N., Vasil'ev M. M., Maiorov S. A., Petrov O. F., Fortov V. E. // Journal of Experimental and Theoretical Physics. 2011. Vol. 112. № 3. P. 482.
21. Kurbanismailov V. S., Omarov O. A., Ragimkhanov G. B. et al. // Plasma Physics Reports. 2016. Vol. 42. № 7. P. 687.
22. Курбанисмаилов В. С., Омаров О. А. // ТВТ. 1995. Т. 3. № 3. С. 365.
23. Курбанисмаилов В. С., Омаров О. А., Хачалов М. Б. // Измерительная техника. 1989. № 3. С. 30.
24. Майоров С. А. // Краткие сообщения по физике ФИАН. 2007. № 7. С. 44.
25. Майоров С. А. // Краткие сообщения по физике ФИАН. 2009. № 5. С. 15.
26. Maiorov S. A., Ramazanov T. S., Dzhumagulova K. N., Jumabekov A. N. and Dosbolaev A. N. // Phys. Plasm. 2008. Vol. 15. P. 093701.
27. Ramazanov T. S., Daniyarov T. T., Maiorov S. A., Kodanova S. K., Dosbolaev A. N., Zhankarashev E. B. // Contrib. Plasma Phys. 2010. Vol. 50. P. 42.
28. Антипов С. Н., Васильев М. М., Майоров С. А., Петров О. Ф., Фортвов В. Е. // ЖЭТФ. 2011. Т. 139. Вып. 2. С. 554.
29. Дзлиева Е. С., Ермоленко М. А., Карасев В. Ю., Павлов С. И., Новиков Л. А., Майоров С. А. // Письма в ЖЭТФ. 2014. Т. 100. Вып. 11. С. 801.
30. Антипов С. Н., Асиновский Э. И., Кириллин А. В., Майоров С. А., Марковец В. В., Петров О. Ф., Фортвов В. Е. // ЖЭТФ. 2008. Т. 133. Вып. 4. С. 948.
31. Майоров С. А. // Краткие сообщения по физике ФИАН. 2014. № 3. С. 46.
32. Голант В. Е., Жилинский А. П., Сахаров С. А. Основы физики плазмы. – М.: Атомиздат, 1977.
33. Эндер А. Я., Эндер И. А. // ЖТФ. 2010. Т. 80. Вып. 2. С. 8.
34. Эндер А. Я., Эндер И. А. // ЖТФ. 2010. Т. 80. Вып. 2. С. 18.
35. Else D., Kompaneets R., Vladimirov S. V. // Phys. Plasm. 2009. Vol. 16. P. 062106.
36. Viehland L. A., Mason E. A. // Annal. Phys. 1975. Vol. 91. P. 499.
37. White R. D., Robson R. E., Dujko S., Nicoletopoulos P., Li B. // J. Phys. D: Appl. Phys. 2009. Vol. 42. P. 194001.
38. Майоров С. А. // Физика плазмы. 2009. Т. 35. № 9. С. 869.
39. Майоров С. А. // Краткие сообщения по физике ФИАН. 2018. № 12. С. 55.

PACS: 52, 51.70.+f

## On the effect of electrode sputtering on the characteristics of a pulsed discharge in helium at atmospheric pressure

V. S. Kurbanismailov<sup>1</sup>, R. I. Golyatina<sup>2</sup>, S. A. Maiorov<sup>2</sup>, G. B. Ragimkhanov<sup>1</sup>,  
Z. R. Khalikova<sup>1</sup>, and I. G. Ramazanov<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Dagestan State University, Makhachkala, Russia  
43<sup>a</sup> M. Gadzhiev st., Makhachkala, 367000, Russia

<sup>2</sup>Prokhorov General Physics Institute of Russian Academy of Sciences  
38 Vavilov st., Moscow, 119991, Russia

Received June 09, 2020

*The paper presents the results of experimental and numerical studies of a pulsed discharge in atmospheric pressure helium. From the data of frame-by-frame pictures of the formation of the discharge and the spectral composition of the radiation, it was established that the development of the discharge is accompanied by the spray of the material of the electrode substance. The Monte Carlo method calculated the ionization-drift characteristics of electrons and ions in helium and showed that small impurities of iron significantly change the electron energy distribution function. The diffusion-drift characteristics of iron ions in helium were studied and the anisotropy of diffusion of iron ions in helium was found.*

**Keywords:** volume discharge, contraction, cathode spots, diffuse channel, ion drift, drift velocity, diffusion coefficients, distribution function.

## REFERENCES

1. S. Starikovskaia, *J. Phys. D: Appl. Phys.* **47**, 353001 (2014).
2. N. A. Popov, *Plasma Sources Sci. Technol.* **20**, 045002 (2011).
3. N. L. Aleksandrov, S. V. Kindysheva, I. N. Kosarev, S. M. Starikovskaia, and A. Y. Starikovskii, *Proc. Combust. Inst.* **32**, 205 (2009).
4. Liu Yang et al., *Plasma Sources Sci. Technol.* **28**, 014001 (2019).
5. A. Yu. Starikovskii et al., *Plasma Sources Sci. Technol.* **18**, 034015 (2009).
6. Atsushi Komuro et al., *Plasma Sources Sci. Technol.* **27**, 104005 (2018).
7. G. Fridman, G. Friedman, A. Gutsol, A. B. Shekhter, V. N. Vasilets, and A. Fridman, *Plasma Processes and Polymers* **5** (6), 503 (2008).
8. H. J. Lee, C. H. Shon, Y. S. Kim, S. Kim, G. C. Kim, and M. G. Kong, *New J. Phys.* **11**, 115026 (2009).
9. M. Erofeev, V. Ripenko, M. Shulepov, and V. Tarasenko, *Eur. Phys. J. D* **71**, 117 (2017).
10. V. S. Kurbanismailov, O. A. Omarov, G. B. Ragimkhanov, H. M. Abakarova, and A. A. Rafid Ali, *Applied physics*, No. 2, 63 (2015).
11. M. G. Bairkhanova, M. Kh. Gadzhiev, V. S. Kurbanismailov, and O. A. Omarov, *Applied physics*, No. 5, 62 (2009).
12. V. S. Kurbanismailov, O. A. Omarov, G. B. Ragimkhanov, M. Kh. Gadzhiev, M. G. Bairkhanova, and A. J. Katana, *Applied physics*, No. 4, 56 (2010).
13. V. S. Kurbanismailov, O. A. Omarov, M. A. Arslanbekov, G. B. Ragimkhanov, M. V. Kurbanismailov, and A. A. Ali Rafid, *Applied physics*, No. 5, 47 (2013).
14. G. A. Mesyats, V. V. Osipov, and V. F. Tarasenko, *Pulsed Gas Lasers* (Washington: SPIE Press, 1995) [in Russian].
15. Yu. D. Korolev and G. A. Mesyats, *Physics of pulsed breakdown of gases* (Moscow: Nauka, 1991) [in Russian].
16. V. S. Kurbanismailov, O. A. Omarov, G. B. Ragimkhanov, M. A. Arslanbekov, H. M. Abakarova, and A. A. Ali Rafid, *Advances in applied physics*. **2** (3), 234 (2014).
17. M. I. Lomaev, D. V. Beloplotov, D. A. Sorokin, and V. F. Tarasenko, *Optics and spectroscopy* **120** (2), 179 (2016).
18. S. A. Maiorov, T. S. Ramazanov, K. N. Dzhumagulova, A. N. Jumabekov, and A. N. Dosbolaev, *Physics of Plasmas*. **15**, 093701 (2008).
19. P. A. Bokhan and D. É. Zakrevskii, *Technical Physics*. **42**, 346 (1997).
20. S. N. Antipov, M. M. Vasil'ev, S. A. Maiorov, O. F. Petrov, and V. E. Fortov, *Journal of Experimental and Theoretical Physics*. **112** (3), 482 (2011).
21. V. S. Kurbanismailov, O. A. Omarov, G. B. Ragimkhanov et al., *Plasma Physics Reports*. **42** (7), 687 (2016).
22. V. S. Kurbanismailov and O. A. Omarov, *High Temperature*. **33** (3), 346 (1995).
23. V. S. Kurbanismailov, O. A. Omarov, and M. B. Khachalov, *Measuring equipment*, No. 3, 30 (1989).
24. S. A. Maiorov, *Bulletin of the Lebedev Physics Institute* **34**, 214 (2007).
25. S. A. Maiorov, *Bulletin of the Lebedev Physics Institute* **36**, 135 (2009).
26. S. A. Maiorov, T. S. Ramazanov, K. N. Dzhumagulova, A. N. Jumabekov, and A. N. Dosbolaev, *Phys. Plasm.* **15**, 093701 (2008).
27. T. S. Ramazanov, T. T. Daniyarov, S. A. Maiorov, S. K. Kodanova, A. N. Dosbolaev, and E. B. Zhankarashev, *Contrib. Plasma Phys.* **50**, 42 (2010).
28. S. N. Antipov, M. M. Vasil'ev, S. A. Maiorov, O. F. Petrov, and V. E. Fortov, *Journal of Experimental and Theoretical Physics*. **112**, 482 (2011).
29. E. S. Dzlieva, M. A. Ermolenko, V. Yu. Karasev, S. I. Pavlov, L. A. Novikov, and S. A. Maiorov, *JETP Letters*. **100** (11), 801 (2014).
30. S. N. Antipov, É. I. Asinovskii, A. V. Kirillin, S. A. Maiorov, V. V. Markovets, O. F. Petrov, and V. E. Fortov, *Journal of Experimental and Theoretical Physics*. **106**, 830 (2008).
31. S. A. Maiorov, *Bulletin of the Lebedev Physics Institute* **41**, 81 (2014).
32. V. E. Golant, A. P. Zhilinsky, and S. A. Sakharov, *Fundamentals of plasma physics* (Moscow: Atomizdat, 1977) [in Russian].
33. A. Ya. Ender and I. A. Ender, *Technical Physics*. **55**, 166 (2010).
34. A. Ya. Ender and I. A. Ender, *Technical Physics*. **55**, 176 (2010).
35. D. Else, R. Kompaneets, and S. V. Vladimirov, *Phys. Plasm.* **16**, 062106 (2009).
36. L. A. Viehland and E. A. Mason, *Annal. Phys.* **91**, 499 (1975).
37. R. D. White, R. E. Robson, S. Dujko, P. Nicoletopoulos, and B. Li, *J. Phys. D: Appl. Phys.* **42**, 194001 (2009).
38. S. A. Maiorov, *Plasma Physics Reports*. **35**, 802 (2009).
39. S. A. Maiorov, *Bulletin of the Lebedev Physics Institute*. **46**, 9 (2019).