

УДК 537.521

DOI: 10.21779/2542-0321-2020-35-4-51–62

**В.С. Курбанисмаилов¹, С.А. Майоров², О.А. Омаров¹, Г.Б. Рагимханов¹,
З.Р. Халикова¹**

**Кинетические и оптические характеристики импульсного разряда в гелии
в режиме распыления материала катода**

¹ Дагестанский государственный университет; Россия, 367000, г. Махачкала, ул. М. Гаджиева, 43а; gb-r@mail.ru;

² Институт общей физики им. А.М. Прохорова Российской академии наук; Россия, 119991, Москва, ул. Вавилова, 38; maiorov_sa@mail.ru

В статье экспериментально исследованы динамика формирования и режимы горения импульсного разряда в гелии атмосферного давления. Установлено, что в разряде формируются токовые каналы, привязанные к катодным и анодным пятнам. Спектры приэлектродной плазмы характеризуются линиями излучения атомов и ионов материала вещества электродов (Fe). Методом Монте-Карло выполнено моделирование ионизационно-дрейфовых характеристик электронов и ионов в гелии в однородном электрическом поле $E/N = 1\text{--}1000$ Td. Установлено влияние малых примесей паров железа в гелии на характеристики ионизации и убегания электронов.

Ключевые слова: дрейф ионов, электрическое поле, гелий, скорость дрейфа, коэффициенты диффузии, анизотропная диффузия, эффективная температура ионов.

Введение

Массовое применение и широкий спектр физических процессов, происходящих в высоковольтных импульсных газовых разрядах, определяют актуальность их изучения [1–7].

Исследования в этих областях велись давно [8–9], однако, несмотря на огромное количество работ, посвященных этой теме, множество явлений все еще недостаточно изучено [1–14].

Практический интерес представляют исследования самоорганизованной пространственной структуры разряда, поскольку она определяет характер и степень воздействия на газ [5, 9]. Одна из них связана с наличием микроканальной структуры тока разряда и его участием в газоразрядных процессах в плотных газах. Микроструктурированные разряды были получены как в теоретических [15–21], так и в экспериментальных исследованиях в области взаимодействия каналов с электродами [20–30].

Здесь очень важен вопрос влияния разряда на электроды, поскольку он определяет природу и степень эрозии электродов [25–30]. В частности, формирование эмиссионных центров на поверхности катода вследствие взрыва микроострий или при пробое диэлектрических включений на катоде приводит к переходу разряда от объемной формы горения в искровой канал [31, 32]. При этом в исходный газ попадает некоторое количество атомов материала, из которого изготовлены электроды [33, 34]. Известно [35, 36], что добавление в инертный газ с большим потенциалом ионизации даже небольшого количества легкоионизируемого газа может радикально менять кинетические характеристики разряда.

В связи с этим несомненный интерес представляют экспериментальные и теоретические исследования динамики формирования импульсного разряда в газах при атмосферном давлении, а также анализ процессов распыления материала вещества электродов и влияние их на характеристики разряда.

В настоящей работе представлены результаты экспериментальных исследований пространственной структуры формирования разряда и спектров оптического излучения приэлектродной плазмы импульсного разряда в гелии атмосферного давления. Методом Монте-Карло выполнено моделирование ионизационно-дрейфовых характеристик электронов и ионов в гелии в однородном электрическом поле $E/N = 1\text{--}1000$ Td. Изучено влияние малых примесей паров железа в гелии на характеристики ионизации и убегания электронов, исследованы функции распределения электронов и ионов по энергиям.

Экспериментальная установка и методики исследования

Экспериментальная установка аналогична описанной ранее в работах [38, 39].

Высоковольтные импульсы напряжения амплитудой до 30 кВ и длительностью фронта нарастания 10 нс подавались на промежуток, образованный двумя плоскими электродами диаметром 4 см, удаленными друг от друга на 1 см. Электроды изготовлены из железа, сплошного катода, сетчатого анода, а в некоторых экспериментах использовались сплошные электроды. УФ излучение вспомогательного разряда создавало в He начальную концентрацию электронов $n_0 \approx 10^8 \text{ см}^{-3}$ [40].

Покадровые картины формирования разряда регистрировались с помощью электронно-оптического преобразователя (ФЭР-2), а интегральные картины свечения промежутка – с помощью цифрового аппарата с высоким пространственным разрешением.

Спектр излучения разряда регистрировался монохроматором с дифракционной решеткой (МДПС-3) с дисперсией 0.2–0.3 нм/мм. Панорамный спектр разряда исследовался с помощью автоматизированного комплекса – монохроматора-спектрографа MS-3504i.

Результаты экспериментальных исследований пространственно-временных картин формирования и спектра оптического излучения разряда в гелии

Как видно из картин формирования разряда (рис. 1), снятых с применением электронно-оптического преобразователя ФЭР-2, после приложения высоковольтного импульса напряжения на предварительно ионизированный промежуток с начальной концентрацией электронов $n_0 \approx 10^8 \text{ см}^{-3}$ первое регистрируемое свечение возникает на аноде, которое в дальнейшем в виде диффузного свечения распространяется к катоду с характерной скоростью $\approx 10^7 \text{ см/с}$.

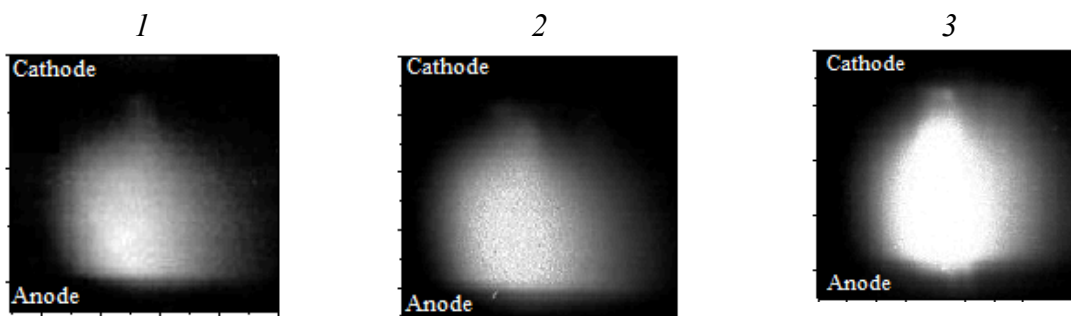


Рис. 1. Покадровые картины формирования объемного разряда в He ($d = 1$ см, $p = 1$ атм.) для $U_0 = 12$ кВ. Электроды плоские, верхний электрод – катод, нижний – анод

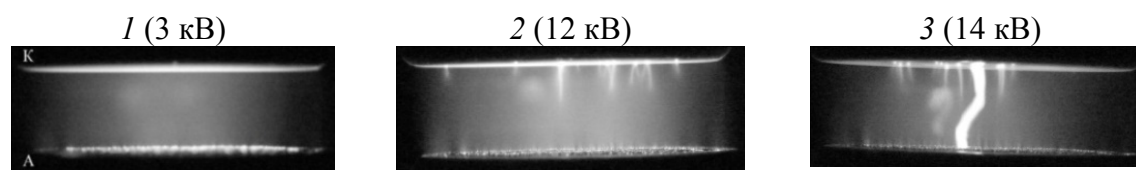


Рис. 2. Интегральные картины пробоя в гелии: $d = 1$ см, $p = 760$ Тор

С приходом фронта свечения на катод формируется плазменный столб объемного разряда. Концентрация электронов в плазменном столбе, оцененная по плотности тока разряда, достигает значений $\approx 10^{13} - 10^{14}$ см $^{-3}$. Как видно из рис. 1 (фото 3) и рис. 2 (фото 2 и 3), в разряде формируются токовые каналы, привязанные к катодным и анодным пятнам. Наличие прикатодных и прианодных пятен на ЭОПограммах и на интегральных картинах указывает на распыление вещества электродов, следовательно, спектр приэлектродной плазмы характеризуется линиями излучения атомов и ионов металла. Экспериментально такой спектр формируется. Об этом свидетельствует панорамный спектр разряда, регистрируемый с помощью автоматизированного комплекса монохроматор-спектрограф MS-3504i.

В таблице 1 приведены экспериментальные результаты наиболее интенсивных спектральных линий, возбуждаемых в разряде в области длин волн 370–730 нм для двух значений прикладываемого к промежутку напряжения ($U_0 = 7$ кВ, $U_0 = 12$ кВ).

Спектр разряда характеризуется интенсивными линиями как исследуемого газа, так и материала электродов (*Fe*). С ростом энерговклада в разряд растет интенсивность излучения спектральных линий и возбуждаются новые спектральные линии.

Таблица 1

$U_0 = 7$ kV	<i>He, nm</i>	381.96	388.86	471.3	587.56
		640.64	656.02	667.82	706.52
		728.14	781.62		
	<i>Fe, nm</i>	337.08	341.3	344	358.95
		364.5	364.7	375, 82	428.54
		633.68	673.31	714.53	778.06
$U_0 = 12$ kV	<i>He, nm</i>	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		
	<i>Fe, nm</i>	337.08	341.3	344	354.01
		358.95	364.5	364.7	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	

На рис. 3а, б приведены характерные временные зависимости спектральных линий железа с длиной 364.7 нм и 341, 3 нм из приэлектродных областей разряда при прикладываемых полях 5, 10 и 12 кВ.

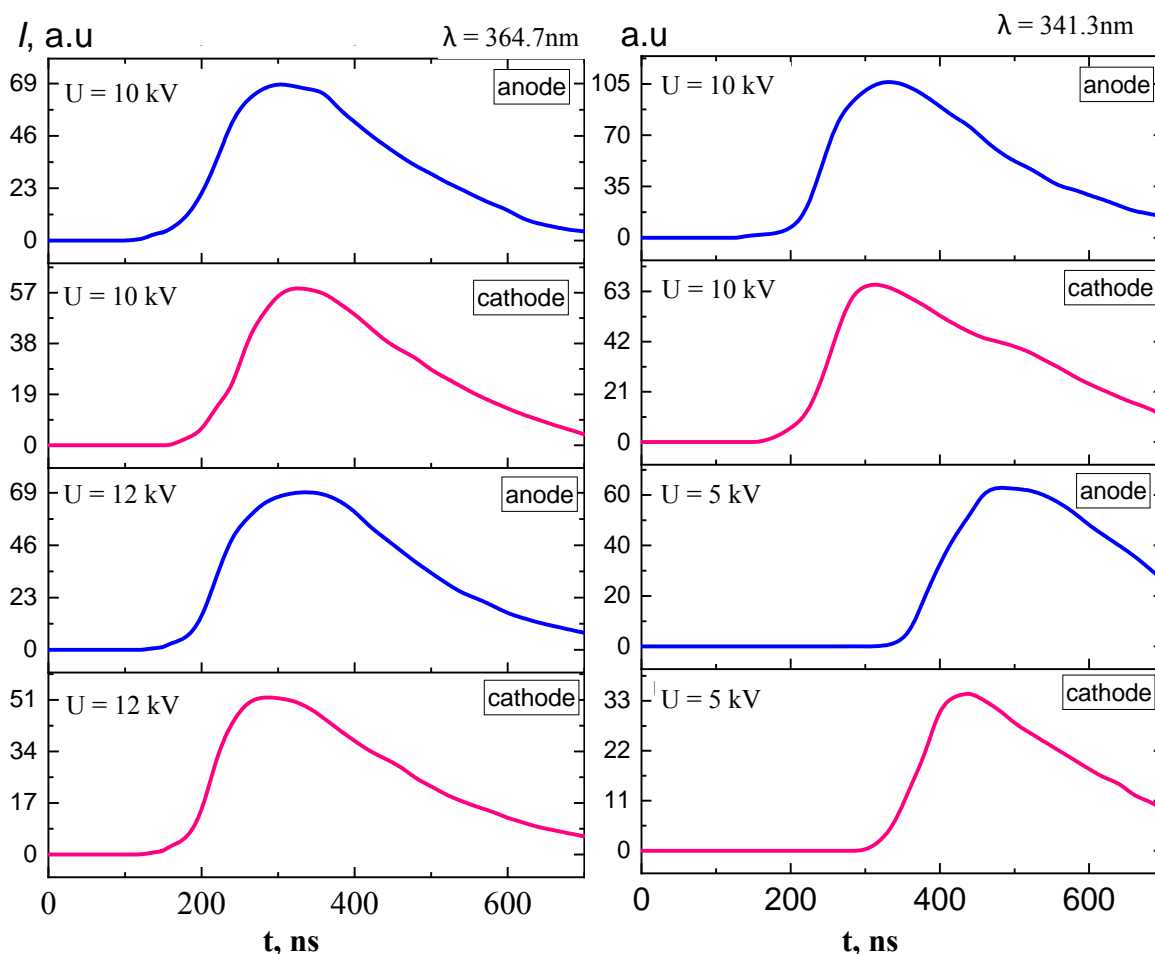


Рис. 3. Характерные временные зависимости интенсивностей излучения спектральных линий Fe (в отн. ед.) с прикатодной и прианодной областей разряда при прикладываемых к промежутку полях 5, 10 и 12 кВ

Как мы видим, линии излучения паров железа присутствуют как в прикатодной, так и в прианодной плазме, причем интенсивность излучения линий железа с прианодной зоны слабо зависит от амплитуды прикладываемого поля.

Как показывает анализ выполненных исследований спектра оптического излучения разряда, спектральные линии паров металла возбуждаются в разрядном промежутке и при малых полях, когда в разряде мы не наблюдаем на электродах катодных пятен и привязанных к ним токовых нитей. Последнее обстоятельство позволяет предположить то, что линии паров материала электродов формируются не только при взрывных процессах на катоде, но и при эмиссии или эрозии электродов. Следовательно, возникает вопрос о влиянии примесей железа на кинетику процессов в разряде.

Функции распределения электронов в гелии с примесями паров железа

Задача диффузии и дрейфа электронов в смесях газов имеет интересные особенности, которые могут быть использованы в многочисленных приложениях газоразрядной плазмы. Функция распределения электронов по энергии определяет многие свойства дрейфа электронов и является важнейшей характеристикой газового разряда.

Рассмотрим влияние малых примесей железа в гелии на функцию распределения электронов по энергиям.

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 Монте-Карло. Реализация электрон-атомных столкновений методом Монте-Карло позволяет учитывать энергобаланс электронов на основе элементарных актов, в т. ч. и при неупругих столкновениях. Методика расчета подробно описана в работе [34].

На рис. 4а приведены характерные зависимости для функции распределения электронов по энергиям в чистом гелии и гелии с 0,1, 1, 2 и 10% содержанием атомов железа. Функция распределения электронов (рис. 4б) не может быть описана известными аналитическими зависимостями.

Детальный анализ функций распределения показывает, что они никоим образом не могут быть описаны какой-либо однопараметрической функцией с эффективной температурой, определяемой соотношением $1.5T_{eff} = \langle \varepsilon \rangle$.

У рассчитанных в вычислительном эксперименте ФРЭЭ можно выделить несколько характерных энергетических диапазонов, распределение в которых определяется доминированием или конкуренцией различных процессов:

1) область субтепловых энергий $\varepsilon < T_{eff}$ – распределение в этом диапазоне во многом определяется актами возбуждения и ионизации, после которых электроны оказываются в области малых энергий;

2) область тепловых энергий $\varepsilon < E_1, I$ – распределение в этом диапазоне определяется дрейфом в энергетическом пространстве с коэффициентом диффузии, определяемым сечением упругих столкновений;

3) область энергий $E_1 < \varepsilon < I$ – распределение в этом диапазоне определяется дрейфом в энергетическом пространстве и наклоном прямой в линейной аппроксимации сечения возбуждения;

4) область энергий $I < \varepsilon < I + 3T_{eff}$ – распределение в этом диапазоне определяется дрейфом в энергетическом пространстве и наклоном прямой в линейной аппроксимации сечения ионизации;

5) область энергий $\varepsilon \gg I + 3T_{eff}$ – распределение в этом диапазоне определяется эффектом убегающих электронов. Это деление характерных областей энергии электронов весьма условно.

Полученные результаты также свидетельствуют о резком изменении характеристик ионизации и убегания электронов (рис. 5а, б) при добавлении в гелий паров железа. Как видно, 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, зависимость числа убегающих электронов от концентрации паров железа носит сложный, немонотонный характер.

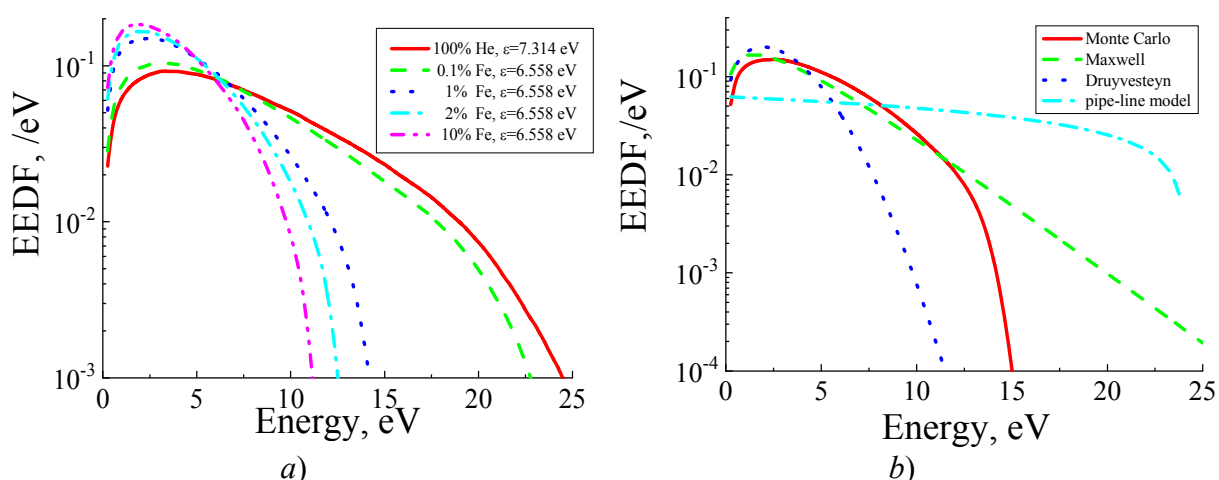


Рис. 4. Характерные зависимости функции распределения электронов по энергиям в гелии с примесями железа при $E/N = 15$ Td

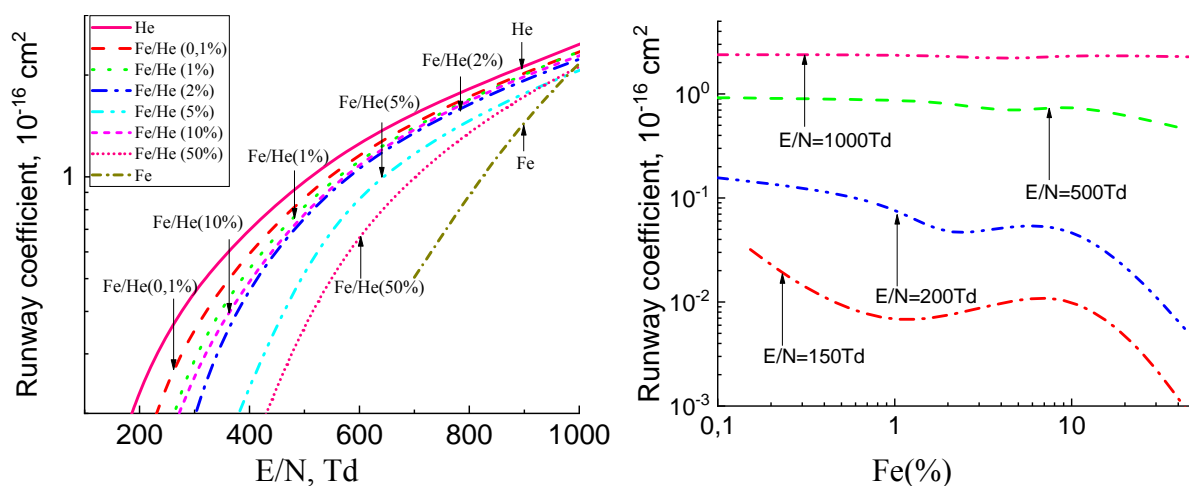


Рис. 5. Зависимости коэффициента убегания электронов в гелии от E/N

Результаты расчетов достаточно полно раскрывают механизм 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 процентов) добавке паров железа. Кроме того, следует отметить, что в этом случае преимущественно будут ионизоваться атомы железа, соответственно в разряде будут в основном представлены ионы железа. В связи с этим нужно изучить характеристики дрейфа ионов железа в гелии.

Функция распределения ионов железа в гелии

Из приведенных выше результатов исследований следует, что прикатодная плазма представлена не только ионами гелия, но и ионами железа. Поэтому необходимы прежде всего [40] исследования функции распределения и дрейфовых характеристик ионов железа в гелии. Функция распределения ионов (ФРИ) по скоростям важна для изучения плазмохимических реакций, происходящих с участием ионов; определения подвижности ионов в плазменном объекте, процессов нагрева нейтрального компонента плазмы и ряда других. Несмотря на то, что особенности дрейфа ионов теоретически изучались в работах [41–46], все же можно с уверенностью утверждать, что задача нахождения ФРИ в плазме газового разряда далека от своего решения.

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 описан в работе [46].

В низкотемпературной плазме дрейф ионов определяет многие ее свойства. В последние годы большое внимание уделяется влиянию температуры атомов на характеристики газового разряда.

На рис. 6а, б представлены характерные распределения продольной и поперечной составляющих функции распределения для различных значений полей и температур. Для сравнения нанесено также распределение Максвелла для атомов при температуре $T_a = 300$ К:

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

Скорость ионов (ось абсцисс) нормирована на характерную тепловую скорость атомов $V_T = (T_a / m)^{1/2}$.

Отметим следующие особенности дрейфа ионов железа в гелии при уменьшении температуры атомов:

- 1) в распределении ионов по скоростям в направлении вдоль поля появляется сильное отклонение от сдвинутого максвелловского распределения;
- 2) в распределении ионов по скоростям в направлении поперек поля появляется сильное отклонение от максвелловского распределения.

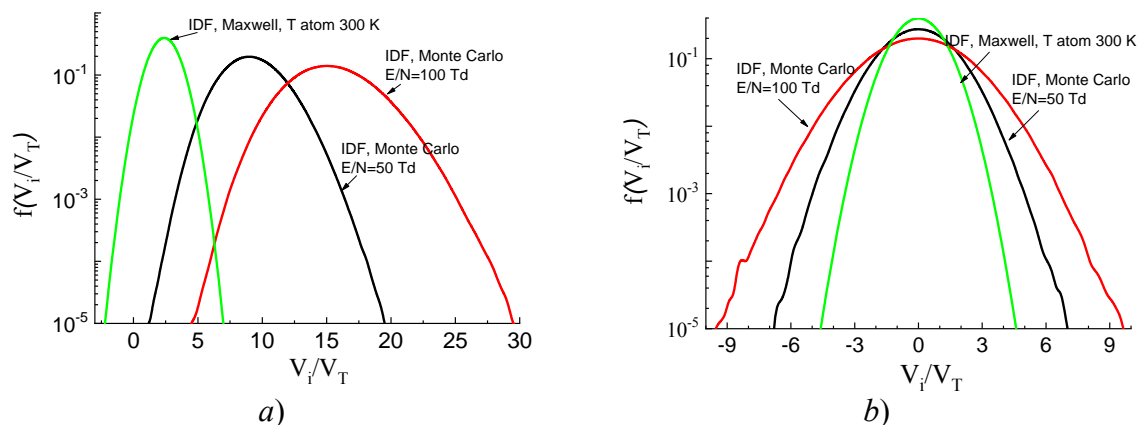


Рис. 6. Результаты расчета функции распределения ионов железа в гелии $f(v_i/v_T)$ по относительной скорости v_i/v_T при температуре атомов $T_a = 300$ К вдоль (а) и поперек (б) направления поля

При увеличении напряженности поля наблюдаются следующие изменения:

- 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 появляется сильное отклонение от сдвинутого максвелловского распределения;
- 3) в распределении ионов по скоростям в направлении поперек поля также проявляется сильное отклонение от максвелловского распределения.

Следует отметить, что угловое и энергетическое распределение ионов, бомбардирующих поверхность, является определяющим фактором для многих технологических

характеристик: скорости травления, распыления электродов, профиля вытравливаемой канавки в целевой изоляции КМОП-транзисторов и т. д.

На рис. 7(a, b) представлены результаты расчета функции распределения косинусов углов между направлением полета иона железа в гелии и направлением электрического поля в полулогарифмическом масштабе для полей 1, 10 и 50 Тд и температуры газа 300 К (рис. 7a), а также результаты расчета функции распределения для $E/N = 10$ Тд при температурах 300 и 600 К.

Из рисунка видно, что и для углового распределения при $E/N = 10$ Тд двухчленное приближение также сильно нарушается. Причем это отклонение явно выражено для ионов железа и уменьшается с ростом температуры газа.

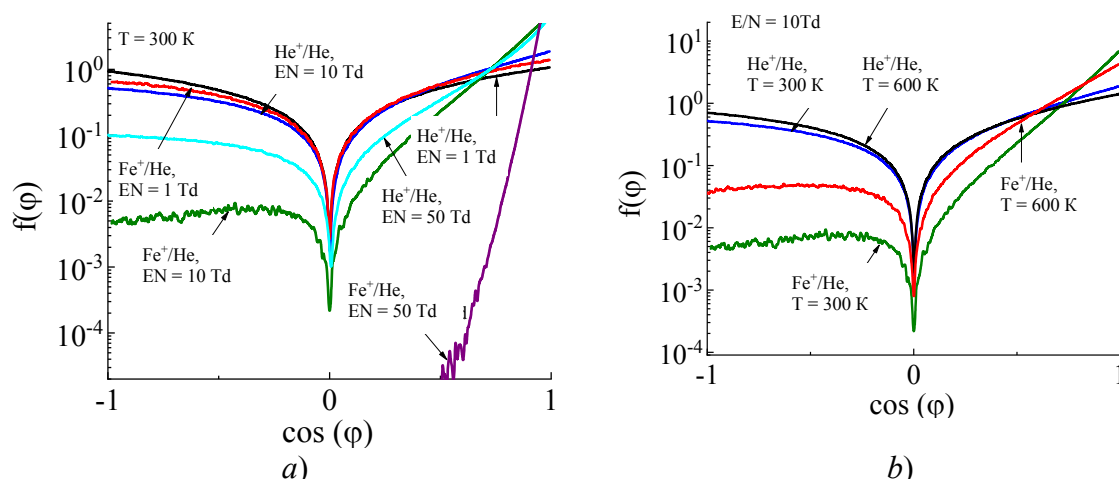


Рис. 7. Результаты расчета функции распределения ионов в гелии по косинусу угла между направлением полета иона и направлением электрического поля для различных значений E/N (a) и температур газа T_g (b)

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

Заключение

Таким образом, в зависимости от E/N возможны различные режимы горения разряда: однородный объемный разряд, однородный объемный разряд с незавершенными аноднаправленными каналами, привязанными к катодным пятнам с высокой проводимостью, и перекрытие разрядного промежутка плазменным каналом. Спектр разряда характеризуется интенсивными линиями атомов железа, что говорит о распылении материала вещества электродов. Малые примеси металла существенно меняют кинетику разряда.

Следует отметить, что распыление катода имеет место практически при любых экспериментах с разрядами, и приведенные расчеты показывают, что изменение характеристик разряда при малых добавках легко ионизируемой примеси может быть использовано при поиске новых активных сред для различных плазменных технологий в микроэлектронике, обработке материалов, нанесении тонких пленок, создании источников света, плазменных панелях, медицине. Таким образом, разряд в гелии с парами железа обладает особенностями, которые могут быть полезны при поиске новых и более эф-

фективных источников излучения, а возможность значительно влиять на параметры разряда с помощью выбора состава смеси и ее процентного соотношения представляется чрезвычайно интересной.

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

Литература

1. Beilin L., Shlapakovski A., Donskoy M., Queller T., Krasik Ya.E. Plasma density temporal evolution in a high-power microwave pulse compressor switch // EPL. – 2015. – № 109. – P. 25001.
2. Milosavljević V. and Cullen P.J. Spatial phase-resolved optical emission spectroscopy for understanding plasma etching uniformity // EPL. – 2015. – Vol. 110. – P. 43001.
3. Yang D., Wang W., Zhang S., Liu Z., Jia L. and Dai L. Atmospheric air homogeneous DBD plasma excited by bipolar nanosecond pulse used for improving the hydrophilic property of polypropylene // EPL. – 2013. – Vol. 102. – P. 65001.
4. Starikovskaia S.M. Plasma-assisted ignition and combustion: nanosecond discharges and development of kinetic mechanisms // J. Phys. D: Appl. Phys. – 2014. – № 47:35 – P. 353001.
5. Komuro A. et al. Visualization of density variations produced by alternating-current dielectric-barrier-discharge plasma actuators using the background-oriented schlieren method // Plasma Sources Sci. Technol. – 2019. – Vol. 28, № 5. – P. 055002.
6. Fridman G., Gutsol A., Shekhter A.B., Vasilets V.N., Fridman A. Applied Plasma Medicine // Plasma Processes and Polymers. – 2008. – № 5. – P. 503.
7. Kurbanismaiлов V.S., Omarov O.A., Ragimkhanov G.B., Tereshonok D.V. Development of ionization waves in argon at atmospheric pressure with inhomogeneous preliminary ionization // EPL. – 2018. – Vol. 4, № 123. – P. 45001.
8. Abramson I.S., Gegechkori N.M., Drabkina S.I., Mandel'shtam S.L. On the channel of a spark discharge // Journal of Experimental and Theoretical Physics. – 1947. – Vol. 17. – P. 862–867.
9. Drabkina S.I. Theory of the development of a spark discharge channel // Journal of Experimental and Theoretical Physics. – 1951. – Vol. 21, № 9. – P. 473–493.
10. Baksht E.Kh., Blinova O.M., Erofeev M.V., Karelin V.I., Ripenko V.S., Tarasenko V.F., Trenkin A.A., Shibitov Yu.M., Shulepov M.A. Dynamics of the spatial structure of pulsed discharges in dense gases in point cathode–plane anode gaps and their erosion effect on the plane electrode surface // Plasma Physics Reports. – 2016. – Vol. 42, № 9. – P. 876.
11. Janda M., Hoder T., Sarani A., Brandenburg R. and Machala Z. Cross-correlation spectroscopy study of the Transient Spark discharge in atmospheric pressure air // Plasma Sources Sci. Technol. – 2017. – Vol. 26. – P. 055010.
12. Parkevich E.V., Khiryanova A.I., Agafonov A.V., Tkachenko S.I., Mingaleev A.R., Shelkovenko T.A., Oginov A.V., Pikuz S.A. Anode Plasma Formation at the Initial Stage of a Nanosecond Air Discharge // Journal of Experimental and Theoretical Physics. – 2018. – Vol. 153. – P. 504–513.
13. Huang J., Yang L., Zhang H., Chen L., Wu X. Temporal and spatial evolution of air-spark switch plasma investigated by the Mach–Zehnder interferometer // Chin. Phys. B. – 2019. – Vol. 28, № 5. – P. 055202.
14. Ding Ch., Khomenko A.Yu., Shcherbanev S.A. and Starikovskaia S.M. Filamentary nanosecond surface dielectric barrier discharge. Experimental comparison of the streamer-to-

filament transition for positive and negative polarities // *Plasma Sources Sci. Technol.* – 2019. – Vol. 28, № 8. – P. 085005.

15. *Lozansky E.D., Firsov O.B.* Spark theory. – М.: Atomizdat, 1975. – 272 p.

16. Sinkevich O.A. Anode streamer branching // *High Temperature.* – 2003. – Vol. 41, № 5. – P. 695–705.

17. *Arrayas M., Fontelos M., Trueba J.* Mechanism of Branching in Negative Ionization Fronts // *Phys. Rev. Lett.* – 2005. – Vol. 95. – P. 165001.

18. *Rocco A., Ebert U., Hundsdorfer W.* Branching of negative streamers in free flight // *Phys. Rev. E.* – 2002. – Vol. 66. – P.035102(R).

19. *Luque A., Brau F., Ebert U.* Saffman-Taylor streamers: Mutual finger interaction in spark formation // *Physical Review E – Statistical, Nonlinear and Soft Matter Physics.* – 2008. – Vol. 78, № 1. – P. 016206-1/6.

20. Карелин В.И., Тренькин А.А. Самоподобная пространственная структура бесстримерного разряда наносекундного диапазона // *Журнал технической физики.* – 2008. – Вып. 3, № 78. – С. 29–35.

21. *Babaeva Yu., Tereshonok D.V., Naidis G.V. and Smirnov B.M.* Streamer branching on clusters of solid particles in air and air bubbles in liquids // *Journal of Physics: Conference Series.* – 2016. – Vol. 774. – P. 012151.

22. *Buranov S.N., Gorokhov V.V., Karelin V.I., Pavlovsky A.I., Repin P.B.* Wide-aperture source of x-ray radiation for preionization of the large-volume electric-discharge lasers // *Quantum Electronics.* – 1991. – Vol. 7, № 18. – P. 891.

23. Буранов С.Н., Горохов В.В. и др. Микроструктура токовых каналов и убежание электронов в высоковольтных диффузных разрядах атмосферного давления // *Исследования по физике плазмы: сб. науч. тр. / под ред. В.Д. Селемира, А.Е. Дубинова.* – Саратов, 1998. – С. 39–67.

24. Репин П.Б., Репьев А.Г. Исследование пространственной структуры токовых каналов высоковольтного диффузного разряда в промежутке проволока-плоскость // *сборник научных трудов / под общ. ред. В.Д. Селемира, А.Е. Дубинова.* – Саратов: ФГУП РФЯЦ-ВНИИЭФ, 2003. – С. 143–172.

25. Лай Гуйю. Системы импульсного электропитания и возбуждение на их основе диффузного разряда: автореф. дис. ... к. физ.-мат. наук. – М.: МИФИ, 2004.

26. Перминов А.В., Тренькин А.А. Микроструктура токовых каналов наносекундного искрового разряда в воздухе атмосферного давления в однородном и резко неоднородном электрических полях // *ЖТФ.* – 2005. – Т. 75, вып. 9. – С. 52–55.

27. Репьев А.Г., Репин П.Б., Покровский В.С. Микроструктура токового канала диффузного разряда в электродной системе стержень-плоскость в воздухе атмосферного давления // *ЖТФ.* – 2007. – Т. 77, вып. 1 – С. 56–62.

28. *Baldanov B.B.* Features of the spark discharge formation at a limiting ballast resistor // *Applied Physics.* – 2012. – № 1. – P. 64–67.

29. *Baksht E.Kh., Blinova O.M., Erofeev M.V. et al.* Dynamics of the spatial structure of pulsed discharges in dense gases in point cathodeplane anode gaps and their erosion effect on the plane electrode surface // *Plasma physics.* – 2016. – Vol. 42, № 9. – P. 859–870.

30. Тренькин А.А., Карелин В.И., Шибитов Ю.М., Блинова О.М., Ясников И.С. Микроструктура областей воздействия искрового разряда на поверхность плоского медного электрода в воздухе в промежутке «острие-плоскость» // *ЖТФ.* – 2017. – Т. 87, вып. 9. – С. 1411–1415.

31. Месяц Г.А., Осипов В.В., Тарасенко В.Ф. Импульсные газовые лазеры. – Washington: SPIE Press, 1995. – P. 374.

32. Королев Ю.Д., Месяц Г.А. Физика импульсного пробоя газов. – М.: Наука, 1991. – С. 224.
33. Курбанисмаилов В.С., Омаров О.А., Рагимханов Г.Б., Арсланбеков М.А., Абакарова Х.М., Али Рафид А.А. Импульсный объемный разряд в гелии при высоких пере-напряжениях // Успехи прикладной физики. – 2014. – Т. 2, № 3. – С. 234–242.
34. Ломаев М.И., Белоплотов Д.В., Сорокин Д.А., Тарасенко В.Ф. Спектральные и амплитудно-временные характеристики излучения плазмы импульсно-периодического разряда, инициируемого убегающими электронами // Оптика и спектроскопия. – 2016. – Т. 120, № 2. – С. 179–183.
35. Maiorov S.A., Ramazanov T.S., Dzhumagulova K.N., Jumabekov A.N. and Dosbo-
laev A.N. Investigation of plasma-dust structures in He-Ar gas mixture // Physics of Plasmas. – 2008. – Vol. 15. – P. 093701.
36. Бохан П.А., Закревский Д.Э. Исследование продольного импульсно-периодического разряда в парогазовых смесях высокого давления // Журнал техниче-ской физики. – 1997. – Т. 67, № 4. – С. 25–31.
37. Antipov S.N., Vasil'ev M.M., Maiorov S.A., Petrov O.F., Fortov V.E. Dusty plasma structures in He-Kr DC glow discharge // Journal of Experimental and Theoretical Physics. – 2011. – Vol. 112, № 3. – P. 482–493.
38. Kurbanismaiлов V.S., Omarov O.A., Ragimkhanov G.B. et al. Formation of shock waves in a discharge plasma in the presence of a magnetic field // Plasma Physics Reports. – 2016. – Vol. 42, № 7. – С. 687–698.
39. Курбанисмаилов В.С., Омаров О.А. К вопросу о характере контракции объем-ного разряда в гелии атмосферного давления // ТВТ. – 1995. – Т. 3, № 3. – С. 365–369.
40. Курбанисмаилов В.С., Омаров О.А., Хачалов М.Б. Измерение слабых разряд-ных токов // Измерительная техника. – 1989. – № 3. – С. 30–34.
41. Иванов Ю.А., Полак Л.С. Химия плазмы / под ред. Б.М. Смирнова. – М.: Ато-миздат, 1975. – Вып. 2. – С. 161–198.
42. Эндер А.Я., Эндер И.А. Кинетика ионов в нейтральном газе при резком вклю-чении электрического поля. Ч. II. Различные модели взаимодействия // ЖТФ. – 2010. – Т. 80, Вып. 2. – С. 18–28.
43. Else D., Kompaneets R., Vladimirov S.V. On the reliability of the Bhatnagar–Gross–Krook collision model in weakly ionized plasmas. // Phys K.S. of Plasmas. – 2009. – Vol. 16. – P. 62106– 62118.
44. Larry A.Viehland, Mason E.A. Gaseous ion mobility in electric fields of arbitrary strength // Annal. Phys. – 1975. – Vol. 91. – P. 499–533.
45. White R.D., Robson R.E., Dujko S., Nicoletopoulos P., Li B. Recent advances in the application of Boltzmann equation and fluid equation methods to charged particle transport in non-equilibrium plasmas // J. Phys. D: Appl. Phys. – 2009. – Vol. 42. – P. 1–19.
46. Майоров С.А. О дрейфе ионов в газе во внешнем электрическом поле // Физи-ка плазмы. – 2009. – Т. 35, № 9. – С. 869–880.

Поступила в редакцию 29 марта 2020 г.

UDC 537.521

DOI: 10.21779/2542-0321-2020-35-4-51–62

Kinetic and Optical Characteristics of a Pulsed Discharge in Helium in the Mode of Sputtering the Cathode Material

***V.S. Kurbanismayilov¹, S.A. Mayorov², O.A. Omarov¹, G.B. Ragimkhanov¹,
Z.R. Khalikova¹***

¹ *Dagestan State University; Russia, 367000, Makhachkala, M. Gadzhiev st., 43a; gb-r@mail.ru;*

² *Institute General Physics. A.M. Prokhorov RAS; Russia, 119991, Moscow, Vavilov st., 38; maiorov_sa@mail.ru*

The dynamics of formation and combustion regimes of a pulsed discharge in helium at atmospheric pressure were experimentally investigated. It is established that current channels are formed in the discharge, which are bound to the cathode and anode spots. The spectra of near-electrode plasma are characterized by lines of radiation of atoms and ions of the material substance of the electrodes (Fe). The Monte-Carlo method is used to simulate the ionization-drift characteristics of electrons and ions in helium in a uniform electric field $E/N = 1\text{--}1000$ Td. The influence of small admixtures of iron vapors in helium on the characteristics of ionization and electron escape is established.

Keywords: *ion drift, electric field, helium, drift rate, diffusion coefficients, anisotropic diffusion, effective ion temperature.*

Received 29 March 2020