

Физика плазмы и плазменные методы

УДК 533.9

О свойствах плазменно-пылевых структур в He–Ar высокочастотном разряде

С. А. Майоров, Р. И. Голятина, С. К. Коданова, Т. С. Рамазанов, Н. Х. Бастыкова

Разряд в смеси газов обладает рядом особенностей, которые могут проявляться в экспериментах с пылевой плазмой. Например, при большом отличии атомных весов ионов и атомов, имеет место сильная анизотропия функции распределения ионов по скоростям, что, в свою очередь, может вызывать значительное изменение свойств пылевых структур. В работе выполнен анализ экспериментов по исследованию пылевых образований в газовом разряде смеси легкого и тяжелого газов — гелия и аргона.

PACS: 51.50.+v, 51.10.+y, 52.80.Dy, 52.25.Fi

Ключевые слова: пылевая плазма, гелий, аргон, смесь газов, ВЧ-разряд, дрейф электронов, дрейф ионов.

Введение

Дрейф в сильном поле может сопровождаться значительным разогревом ионов, и при большом отличии атомных весов ионов и атомов возможна сильная анизотропия функции распределения ионов. Поскольку анизотропия функции распределения ионов, в свою очередь, может вызывать значительное изменение свойств пылевых структур в плазме, в работе [1] была предложена идея экспериментов с пылевой плазмой при разряде в смеси легкого и тяжелого газов — гелия и ксенона. Результаты расчетов для смеси тяжелого, легко ионизируемого газа (а может быть и паров тяжелых металлов — ртути, цезия и т. д., более подробный

анализ см. в [2]) позволяют прогнозировать сильное влияние состава газа на характеристики плазменно-пылевых структур в разрядах. А именно, для разряда в смеси с небольшой концентрацией легкоионизируемого тяжелого газа получать те особенности, которые обусловлены сверхзвуковым характером течения — конус Маха, анизотропию взаимодействия пылинок и т. д.

Первые эксперименты по изучению свойств пылевых структур в смеси легкого и тяжелого газов, стимулированные работами [1, 2], уже выполнены тремя экспериментальными группами. В работах [3, 4] представлены результаты исследования пылевых структур в смеси гелия и аргона при низкой концентрации последнего, в работе [5] — в смеси гелия и криптона, а в работе [6] рассмотрен ВЧ-разряд в гелий-ксеноновой смеси с продольным магнитным полем. При изучении пылевых образований в водородно-аргоновой смеси [7] получены необычные для пылевой плазмы характеристики, которые могут быть связаны именно с этими обстоятельствами.

Разряд в смесях атомов с сильно различающимися атомными весами открывает новые возможности формирования пылевых структур в газовом разряде. При уменьшении концентрации атомов собственного газа сильно уменьшается частота ион-атомных столкновений с резонансной перезарядкой и, как следствие, увеличивается длина свободного пробега ионов. Также изменится и параметры разряда — из-за увеличения скорости

Майоров Сергей Алексеевич, ведущий научный сотрудник¹.

Голятина Русудан Игоревна, научный сотрудник².

Коданова Сандугаш Кулмагамбетовна, ведущий научный сотрудник³.

Рамазанов Тлеккабул Сабитович, главный научный сотрудник³.

Бастыкова Нурия Хамитбековна, научный сотрудник³.

¹Объединенный институт высоких температур РАН (ОИВТ РАН). Россия, 125412, Москва, ул. Ижорская, 13, стр. 2.

²Институт общей физики им. А. М. Прохорова РАН. Россия, 119991, Москва, ул. Вавилова, 38.

Тел. 8 (499) 135-02-47. E-mail: mayorov_sa@mail.ru

³Институт экспериментальной и теоретической физики.

Казахстан, 050040, Алматы, пр. ал-Фараби, 71.

Тел. 8 (727) 3-77-02. E-mail: kodanova@mail.ru

Статья поступила в редакцию 29 декабря 2014 г.

© Майоров С. А., Голятина Р. И., Коданова С. К., Рамазанов Т. С., Бастыкова Н. Х., 2015

дрейфа ионов и коэффициента диффузии уменьшится их плотность.

Целью данной работы является проведение экспериментов по исследованию пылевых образований в газовом разряде смеси легкого и тяжелого газов — гелия и аргона — и их анализ для уточнения механизмов протекающих процессов.

Результаты экспериментов

1. Экспериментальная установка. Для получения данных о свойствах пылевых структур в ВЧ-разряде в смеси газов использовалась стандартная экспериментальная установка для изучения пылевой плазмы [8]. В ходе эксперимента исследовались пылевые структуры. Пылевая система подсвечивалась лазерным ножом толщиной 0,4 мм, что позволяло получать различные сечения плазменно-пылевых образований. Рассеянный частицами свет регистрировался видеокамерой.

2. Результаты экспериментальных исследований. При разряде в чистых газах и в смеси He/Ar формировались пылевые структуры, удерживаемые в ловушке нижнего приэлектродного слоя. Было проведено исследование зависимости средних межчастичных расстояний и парных корреляционных функций от давления газа и состава газов: выполнены эксперименты в чистых газах — гелии и аргоне и в смеси при содержании аргона 3 %.

На рис. 1 представлены результаты обработки экспериментальных данных о положении пылевых частиц при виде сверху. Приведены парные корреляционные функции $g(r/a)$ пылевых частиц при различных давлениях, здесь a — радиус Вигнера-Зайтца. Как видно из их сравнения, добавление тяжелого газа к легкому приводит к очень существенному изменению свойств пылевых структур.

На рис. 2 представлены данные о зависимости среднего расстояния между частицами от давления газа. Расстояние между ближайшими частицами определялась путем анализа парной корреляционной функции. Причем отдельно рассматривались изображения пылинок в горизонтальной и вертикальной плоскостях. В обоих случаях пылевая система подсвечивалась лазерным ножом толщиной 0,4 мм. Анализ этих зависимостей показывает, что

1) для горизонтального среза зависимость среднего расстояния между пылинками от давления слабое, и практически совпадает для чистого газа гелия и смеси He+Ar;

2) в чистом гелии расстояния между пылинками вдоль цепочек (что показывает вертикальный срез) с увеличением давления резко уменьшается;

3) в смеси газов расстояние между пылинками в цепочке значительно меньше, чем в чистом

газе, кроме того оно с увеличением давления сильно уменьшается.

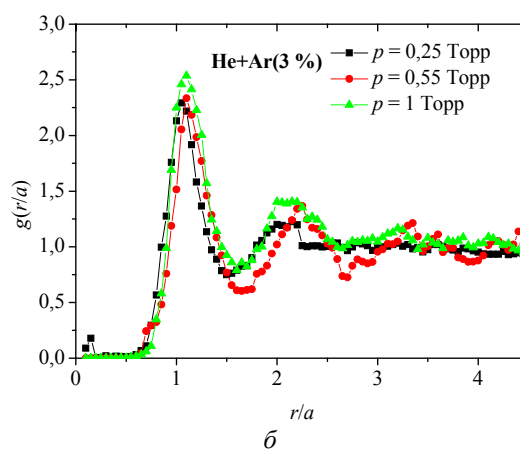
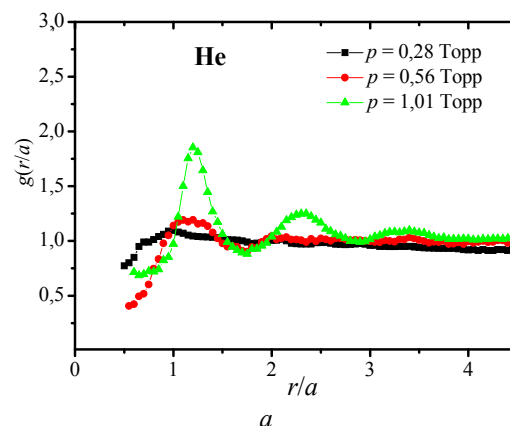


Рис. 1. Парные корреляционные функции пылевых частиц при различных давлениях: а — в чистом гелии; б — в смеси гелия (97 %) и аргона (3 %)

Приведенные закономерности означают, что анизотропия взаимодействия сильнее проявляется в вертикальном направлении, что согласуется с теоретическим и численным анализом задачи [9—11].

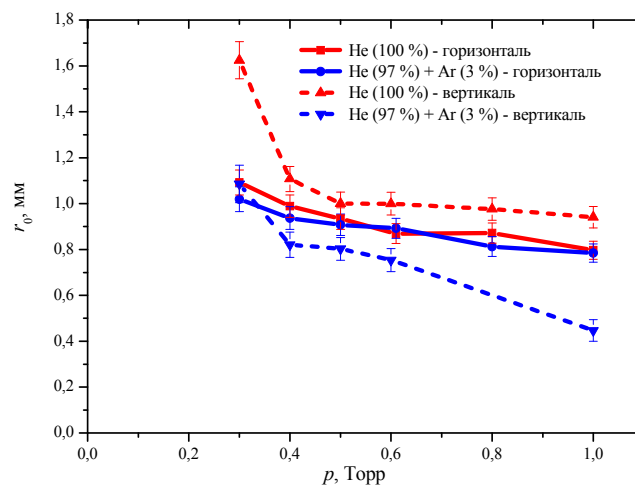


Рис. 2. Зависимости среднего расстояния между ближайшими частицами в горизонтальном и вертикальном сечениях в чистом гелии и гелий-аргоновой смеси от давления

Анализ характеристик разряда в смеси газов

1. Дрейф электронов. При дрейфе в электрическом поле электроны приобретают энергию от электрического поля — за счет джоулева нагрева за единицу времени электрон приобретает в среднем энергию $Q_{EW} = eEW$, здесь e — заряд электрона, E — напряженность электрического поля, W — скорость дрейфа. Энергия, получаемая электроном, теряется в упругих столкновениях с атомами, затрачивается на возбуждение атомных уровней и ионизацию, кроме того, электроны уносят или приобретают энергию при рекомбинации: $Q_{EW} = Q_{ea} + Q_{ex} + Q_{ion} + Q_{rec}$. Здесь в правой части представлены соответствующие средние энергопотери одного электрона за единицу времени (при рекомбинации электрон может и приобретать энергию, например, при тройной рекомбинации) [12—17].

Функция распределения электронов по энергиям (ФРЭЭ) в переменном электрическом поле с амплитудой E_a примерно соответствует функции распределения в постоянном поле $E = E_a/\sqrt{2}$ [16]. Поэтому проанализируем ФРЭЭ при дрейфе в однородном постоянном поле.

В табл. 1 приведены кинетические характеристики дрейфа электронов в чистом гелии (расчет 1), гелий аргоновой смеси (расчеты 2—5) и чистом аргоне (расчет 6). Приведены скорости дрейфа, средняя энергия и характеристики энергобаланса, т. е. затраты приобретаемой энергии на возбуждение, ионизацию различных компонентов газа. Расчеты показывают, что энергозатраты на ионизацию гелия и аргона сравниваются уже при 0,2%-концентрации аргона, а при 1%-концентрации затраты на ионизацию аргона уже в 6 раз выше, чем на ионизацию гелия. Малая концентрация аргона не сильно влияет на среднюю энергию электронов, но в энергобалансе велики энергозатраты на возбуждение атомов гелия.

На рис. 3 приведены функции распределения электронов по энергии при различной процентной доле атомов аргона в гелий — аргоновой смеси: сплошная кривая соответствует дрейфу в чистом гелии, сплошная кривая с жирными точками — в чистом аргоне, штрихованная кривая с кружочками — в гелии с 0,1 % содержанием аргона, штрих пунктирные линии — 1, 3, 10 и 100 % содержанием аргона. Для всех расчетов $E/N = 20$ Тд. На вкладке указано значение средней кинетической энергии электронов $K = \langle \epsilon \rangle$.

Таблица 1

Результаты расчетов характеристик дрейфа электронов при $E/N = 20$ Тд

№ расчета	1	2	3	4	5	6
Доля He, %	100	99,9	99	97	90	0
Доля Ar, %	0	0,1	1	3	10	100
Скорость дрейфа, км/с	44,0	44,0	42,8	40,5	35,5	18,7
Средняя энергия, эВ	7,80	7,77	7,5	7,1	6,5	5,7
Доля в ионизацию He, %	2,8	2,6	1,7	0,9	0,07	0
Доля в ионизацию Ar, %	0	1,3	10,4	21,8	27,2	1,36
Доля на возбуждение He, %	76,2	73,8	56,5	31,6	6,02	0
Доля на возбуждение Ar, %	0	1,06	8,93	2,19	43,0	90,0

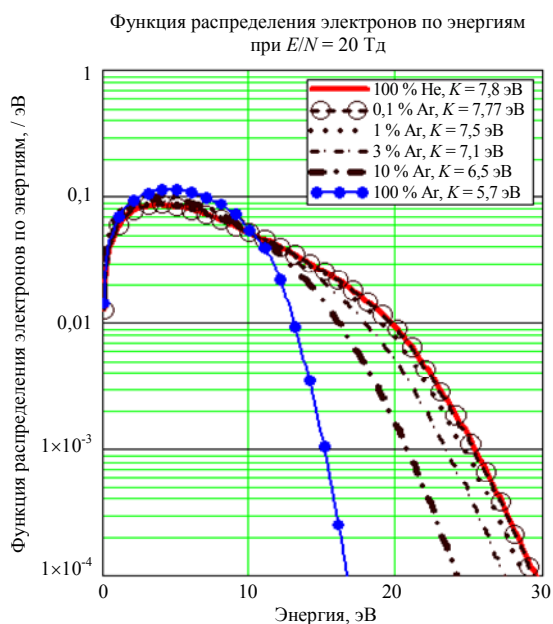


Рис. 3. Функции распределения электронов по энергии при различных долях аргона в гелий — аргоновой смеси при дрейфе в однородном постоянном поле $E/N = 20$ Тд

Наиболее интересным и важным, с практической точки зрения, фактом является сильное увеличение частоты ионизации при незначительной (порядка долей процента) добавке аргона. В этом случае в основном ионизоваться будут атомы аргона, соответственно, в разряде будут в основном представлены ионы аргона.

2. Дрейф ионов. По аналогии с гидродинамическим приближением часто полагается, что дрейф ионов описывается сдвинутой функцией распределения Максвелла:

$$f_0(\vec{v}) = \left(\frac{m}{2\pi T_i}\right)^{3/2} \exp\left[-\frac{m[(u-W)^2 + v^2 + w^2]}{2T_i}\right]. \quad (1)$$

Это распределение имеет два параметра — среднюю скорость ионов W (скорость дрейфа) и температуру ионов T_i , которая определяет тепловой разброс скоростей ионов $V_T = (T_i/m)^{1/2}$. Здесь направление поля и дрейфа совпадает с осью x .

Другой важной характеристикой ионного потока является средняя кинетическая энергия ионов, которая связана с эффективной температурой ионов соотношением:

$$\langle \varepsilon \rangle = \frac{1}{2} m \langle v^2 \rangle = \frac{3}{2} T_{eff}. \quad (2)$$

Именно эффективная температура ионов должна учитываться при определении макроскопических характеристик плазмы, например, радиуса Дебая. Также имеет смысл введение двух различных температур ионов — вдоль поля $T_{||}$ и поперек поля T_{\perp} . В этом случае средняя энергия иона равна:

$$\langle \varepsilon \rangle = \frac{1}{2} m W^2 + \frac{3}{2} T_i = \frac{1}{2} m W^2 + \frac{1}{2} T_{||} + T_{\perp}. \quad (3)$$

Число Маха, определяемое в газовой динамике через отношение скорости газа к скорости

звука в виде $M = u/c_s$, является важнейшей характеристикой течения. Введем в качестве характеристики ионного потока также и эффективное число Маха $M_{eff}^2 = mW^2 / T_i$, где для определения температуры ионов используется соотношение $\frac{3}{2} T_i = \langle \varepsilon \rangle - \frac{1}{2} m \langle u \rangle^2$.

В сильном поле скорость дрейфа превышает тепловую скорость атомов, а температуры ионов и атомов сильно различаются. В этом случае использование тепловой скорости атомов при вычислении чисел Маха ионного потока приводит к принципиально неверному выводу о характере течения. В частности, в большинстве работ по пылевой плазме говорится о сверхзвуковом потоке ионов, в то время как их разогрев приводит к тому, что поток ионов в собственном газе при учете влияния столкновений с перезарядкой является дозвуковым. Эффективное число Маха при дрейфе ионов в собственном газе оказывается ограниченным сверху, поскольку с увеличением скорости дрейфа пропорционально увеличивается и скорость хаотического движения. Как показывают оценки и расчеты [5, 19] (см. также приведенные ниже результаты расчетов), из-за разогрева ионов при дрейфе в собственном газе значения чисел Маха не могут быть больше двух.

В табл. 2 приведены результаты расчетов кинетических характеристик дрейфа ионов. Получено, что в типичных условиях, при которых проводятся эксперименты с пылевыми структурами, переход к смеси легкого и тяжелого газа позволяет подавить разогрев ионов в электрическом поле и получить сверхзвуковой поток с большими числами Маха. Отметим, что при этом имеется большая разница между температурами ионов в распределении вдоль и поперек поля. Средняя кинетическая энергия ионов оказывается максимальной при 3%-концентрации аргона.

Таблица 2

Результаты расчетов характеристик дрейфа ионов: гелия — (расчет No 0) и аргона (расчеты 1—6) при $E/N = 20$ Тд

Но расчета — сорт иона	0 — He ⁺	1 — Ar ⁺	2 — Ar ⁺	3 — Ar ⁺	4 — Ar ⁺	5 — Ar ⁺	6 — Ar ⁺
Доля Ar, %	0 (чистый He)	0,1	1	3	10	100	
Скорость дрейфа, km/s	0,94	1,39	1,37	1,24	1,04	0,70	0,16
Температура $T_{ }$, К	529	609	700	959	1115	972	363
Температура T_{\perp} , К	345	470	472	479	478	441	314
Температура T_{eff} , К	549	3635	3577	3121	2436	1407	371
Число Маха M	1,21	5,65	5,57	5,04	4,23	2,84	0,64
Число Маха M_{eff}	1,03	4,26	4,07	3,41	2,75	1,96	0,61

Выполненные расчеты позволяют сделать следующие выводы о характере изменений ионного потока при разбавлении аргона гелием:

1) скорость дрейфа ионов аргона при разбавлении гелием увеличивается в 8,7 раз;

2) максимальная значения T_{\parallel} достигается примерно 97 % концентраций гелий;

3) энергия ионов аргона при разбавлении аргона гелием увеличивается в 10 раз (с учетом направленного движения ионов);

4) эффективное число Маха для потока ионов аргона при разбавлении аргона гелием увеличивается в 7 раз;

5) влияние собственного газа наблюдается вплоть до концентраций 0,1 %.

Особенности распределения ионов по скоростям продемонстрированы также и на рис. 4. На нем представлены функции распределения ионов аргона по проекциям скоростей вдоль поля при различных процентных долях атомов гелия в гелий-аргоновой смеси.

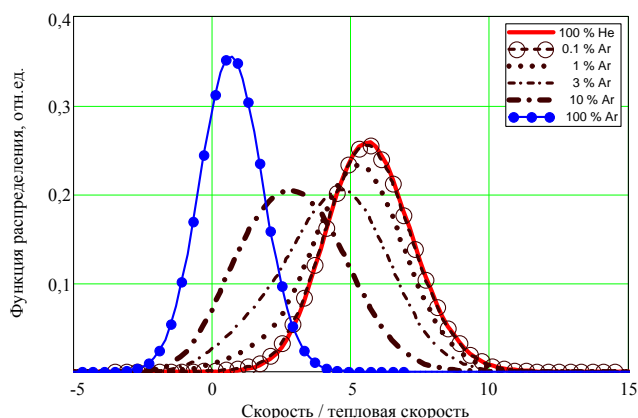


Рис. 4. Результаты расчета функции распределения поля аргона по скоростям при $E/N = 20$ Тд для направлений вдоль электрического поля при различных долях аргона в гелий — аргоновой смеси

Заключение

В работе проведен анализ экспериментальных исследований пылевых структур в плазме ВЧ-разряда в смеси газов двух типов: «легкого» He и «тяжелого» Ar. При низкой концентрации аргона увеличивается анизотропия взаимодействия пылинок, что наиболее сильно проявляется в большой разнице расстояний между пылинками в цепочке и между цепочками при 1%-концентрации аргона и низком давлении. Этот факт естественным образом ассоциируется с гиперзвуковым характером ионного потока в несобственном газе.

Приведенные результаты численного моделирования и анализа характеристик дрейфа ионов

(см. также [20—23]) и электронов (см. также [24]) в газовых смесях позволяют сделать вывод о том, что использование разряда в смесях различных газов открывает новые перспективы в исследованиях пылевой плазмы [25].

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда (проект номер 14-50-00124).

ЛИТЕРАТУРА

1. Майоров С. А. // Краткие сообщения по физике ФИАН. 2007. № 7. С. 44.
2. Майоров С. А. // Физика плазмы. 2009. Т. 35. № 9. С. 869.
3. Maiorov S. A., Ramazanov T. S., Dzhumagulova K. N., et al. // Phys. Plasm. 2008. V. 15. P. 093701.
4. Ramazanov T. S., Daniyarov T. T., Maiorov S. A., et al. // Contrib. Plasma Phys. 2010. V. 50. P. 42.
5. Антупов С. Н., Васильев М. М., Майоров С. А. и др. // ЖЭТФ, 2011. Т. 139. № 3. С. 554.
6. Дзлиева Е. С., Ермоленко М. А., Карасев В. Ю. и др. // Письма в ЖЭТФ, 2014. Т. 100. С. 801.
7. Дзлиева Е. С., Карасев В. Ю., Эйхвальд А. И. // Оптика и спектроскопия. 2004. Т. 97. № 1. С. 107.
8. Dosbolaev A. N., Utegenov A. U., Ramazanov T. S., et al. // Contrib. Plasma Phys. 2013. V. 53. P. 426.
9. Vladimirov S.V., Nambu M. // Phys. Rev. E. 1995. V. 52. P. 2172.
10. Maiorov S. A., Vladimirov S. V., Cramer N. F. // Phys. Rev. E. 2001. V. 63. P. 017401.
11. Vladimirov S. V., Maiorov S. A., Ishihara O. // Phys. Plasm. 2003. V. 10. P. 3867.
12. Хаксли Л., Кромптон Р. Диффузия и дрейф электронов в газах. — М.: Мир, 1977.
13. Биберман Л. М., Воробьев В. С., Якубов И. Т. Кинетика неравновесной плазмы. — М.: Наука, 1982.
14. Смирнов Б. М. Физика слабоионизованного газа в задачах с решениями. — М.: Наука, 1985.
15. Мак-Даниэль И. Процессы столкновений в ионизованных газах. — М.: Мир, 1967.
16. Райзер Ю. П. Физика газового разряда. — М.: Наука, 1992.
17. Майоров С. А. // Краткие сообщения по физике ФИАН. 2009. № 10. P. 37.
18. Майоров С. А., Владимиров С. В., Крамер Н. Ф. // Физика плазмы. 2002. Т. 28. № 11. С. 1025.
19. Майоров С. А. // Физика плазмы. 2006. Т. 32. № 9. С. 802.
20. Голятина Р. И., Майоров С. А. // Успехи прикладной физики. 2013. Т. 1. № 1. С. 10.
21. Голятина Р. И., Майоров С. А. // Успехи прикладной физики. 2013. Т. 1. № 2. С. 135.
22. Голятина Р. И., Майоров С. А. // Успехи прикладной физики. 2013. Т. 1. № 3. С. 253.
23. Голятина Р. И., Майоров С. А. // Успехи прикладной физики. 2013. Т. 1. № 6. С. 656.
24. Голятина Р. И., Майоров С. А. // Прикладная физика. 2014. № 4. С. 5.
25. Фортвов В. Е., Храпак А. Г., Храпак С. А. и др. // УФН. Т. 174. С. 495.

Properties of plasma–dust structures in the He–Ar RF discharge

S. A. Maiorov¹, R. I. Golyatina², S. K. Kodanova³, T. S. Ramazanov³,
and N. Kh. Bastykova³

¹Joint Institute for Temperatures of the Russian Academy of Sciences
13, Bd. 2 Izhorskaya str., Moscow, 125412, Russia

²Prokhorov General Physics Institute, Russian Academy of Sciences
38 Vavilov str., Moscow, 119991, Russia
E-mail: maiorov_sa@mail.ru

³Institute of Experimental and Theoretical Physics
71 al-Farabi av., Almaty, 050040, Kazakhstan
E-mail: kodanova@mail.ru

Received December 29, 2014

The gas mixture discharge has a number of features which can appear in experiments with dusty plasma. For example, in the case of a significant difference in atomic masses of ions and atoms, strong anisotropy of the distribution function over ion velocities takes place, which in turn can cause a significant change in properties of dust structures. In this work, experiments on the study of the dust structures in the gas discharge of a mixture of light and heavy gases, i.e., helium and argon, are analyzed. The results of numerical simulation of ion and electron drift in the mixture of these gases and dust particle charging processes are presented.

PACS: 51.50.+v, 51.10.+y, 52.80.Dy, 52.25.Fi

Keywords: dusty plasma, helium, argon, gas mixture, RF discharge, electron drift, ion drift.

REFERENCES

1. S. A. Maiorov, Bull. Lebedev Phys. Inst., No. 7, 44 (2007).
2. S. A. Maiorov, Plasma Phys. Rep. **35**, 869 (2009).
3. S. A. Maiorov, T. S. Ramazanov, K. N. Dzhumagulova, et al., Phys. Plasm. **15**, 093701 (2008).
4. T. S. Ramazanov, T. T. Daniyarov, S. A. Maiorov, et al., Contrib. Plasma Phys. **50**, 42 (2010).
5. S. N. Antipov, M. M. Vasil'ev, S. A. Maiorov, et al., Phys. Usp. **139**, 554 (2011).
6. E. S. Dzlieva, M. A. Ermolenko, V. Yu. Karasev, et al., JETP Lett. **100**, 801 (2014).
7. E. S. Dzlieva, V. Yu. Karasev, and A. I. Eikhvald, Opt. Spectrosc. **97**, 107 (2004).
8. A. N. Dosbolaev, A. U. Utegenov, T. S. Ramazanov, et al., Contrib. Plasma Phys. **53**, 426 (2013).
9. S. V. Vladimirov and M. Nambu, Phys. Rev. E. **52**, 2172 (1995).
10. S. A. Maiorov, S. V. Vladimirov, and N. F. Cramer, Phys. Rev. E. **63**, 017401 (2001).
11. S. V. Vladimirov, S. A. Maiorov, and O. Ishihara, Phys. Plasm. **10**, 3867 (2003).
12. G. H. Huxley and R. W. Crompton, *The Diffusion and Drift of Electrons in Gases* (New York, N. Y., 1974; Mir. Moscow, 1977).
13. L. M. Biberman, V. S. Vorob'ev, and I. T. Yakubov, *Kinetics of Nonequilibrium Plasma* (Nauka, Moscow, 1982) [in Russian].
14. B. M. Smirnov, *Physics of Weakly Ionized Gas in Problems* (Nauka, Moscow, 1985) [in Russian].
15. E. McDaniel, *Collision Phenomena in Ionized Gases* (New York, Wiley, 1964; Mir, Moscow, 1967).
16. Yu. P. Raizer, *Physics of Gas Discharge* (Nauka, Moscow, 1992) [in Russian].
17. S. A. Maiorov, Bull. Lebedev Phys. Inst., No. 10, 37 (2009).
18. S. A. Maiorov, S. V. Vladimirov, and N. F. Cramer, Plasma Phys. Rep. **28**, 1025 (2002).
19. S. A. Maiorov, Plasma Phys. Rep. **32**, 802 (2006).
20. R. I. Golyatina and S. A. Maiorov, Uspekhu Prikladnoi Fiziki **1**, 10 (2013).
21. R. I. Golyatina and S. A. Maiorov, Uspekhu Prikladnoi Fiziki **1**, 135 (2013).
22. R. I. Golyatina and S. A. Maiorov, Uspekhu Prikladnoi Fiziki **1**, 253 (2013).
23. R. I. Golyatina and S. A. Maiorov, Uspekhu Prikladnoi Fiziki **1**, 656 (2013).
24. R. I. Golyatina and S. A. Maiorov, Prikladnaya Fizika, No. 4, 5 (2014).
25. V. E. Fortov, A. G. Khrapak, S. A. Khrapak, et al., Phys. Usp. **174**, 495.