

УДК 533.9.1

DOI: 10.21779/2542-0321-2021-36-4-20–20–27

Н.А. Ашурбеков, И.Г. Рамазанов, К.М. Рабаданов

**Формирование функции распределения электронов по энергии в плазме
ВЧ разряда в присутствии микрочастиц**

*Дагестанский государственный университет; Россия, Республика Дагестан,
367000, г. Махачкала, ул. М. Гаджиева, 43а; nashurb@mail.ru*

Выполнены численные исследования формирования функции распределения электронов по энергиям (ФРЭЭ) в ВЧ разряде в аргоне в присутствии микрочастиц. Приведена численная модель, описывающая формирование ФРЭЭ в плазме в присутствии микрочастиц. Представлены результаты исследования влияния плотности и размеров микрочастиц на формирование ФРЭЭ и на другие параметры плазмы в ВЧ разряде. Показано, что число высокоэнергичных электронов уменьшается с увеличением плотности и радиуса пыли.

Ключевые слова: *ВЧ разряд, кинетика электронов, функция распределения электронов по энергиям.*

Введение

Плазма с частицами нано-микрометрового размера (пылевая плазма) широко изучалась в последние три десятилетия. Эти сложные ионизированные газовые системы представляют большой интерес в различных областях, включая образование космических облаков, образование кулоновских кристаллов, вихрей и пустот в плазме низкого давления, а также в областях термоядерного синтеза и обработки плазмы [1–4].

Из-за фундаментального и технологического интереса свойства пылевой плазмы изучались многими авторами (например, [1–3]). Изучены баланс электронов и ионов, зарядка пылевых частиц, формирование структуры, распространение волн и скачков в плазме, перенос электронов, ионов и пылевых частиц, а также силы, действующие на пылевые частицы [1–8].

В теоретическом описании этих сложных систем обычно используются гидродинамические модели для электронов и ионов, предполагая, что они находятся в максвелловском равновесии [1–3]. Однако для большинства промышленных и лабораторных плазм, например, плазмы с индуктивной и емкостной связью, функция распределения электронов по энергиям (ФРЭЭ) часто отклоняется от максвелловской из-за множества различных процессов столкновения электронов. Профиль функции распределения электронов по энергиям влияет на различные параметры плазмы, такие, как эффективная температура электронов, плотности электронов и ионов и коэффициенты скорости реакции, а также на заряд пыли и потоки ионов и электронов на обрабатываемой поверхности [1, 9]. Кроме того, коллективное движение пылевой плазмы, например, распространение вертикально поляризованных пылевых акустических волн, также зависит от профиля ФРЭЭ [10]. Таким образом, определение профиля ФРЭЭ очень важно при изучении различных свойств плазмы.

В работе [11] представлена глобальная, или усредненная, модель сложной плазмы разряда аргона низкого давления, содержащей частицы пыли. Модель состоит из уравнений баланса частиц и мощности с учетом потерь мощности на пылинках и стенке разряда. Распределение электронов по энергиям определяется уравнением Больцмана. Было исследовано влияние пыли и внешних условий (подводимая мощность и давление нейтрального газа) на распределение электронов по энергиям, температуру электронов, плотности электронов и ионов и заряд пыли. Было обнаружено, что пылевые частицы могут сильно влиять на стационарное состояние разряда, динамически изменяя распределение электронов по энергиям, температуру электронов, образование и потерю частиц плазмы, а также выделение энергии. В частности, потери мощности в пылинках могут составлять значительную часть входной мощности, часто даже превышая потери в стене.

В [12] аналитические выражения, описывающие функцию распределения электронов по энергиям (ФРЭЭ) в пылевой плазме, получены из однородного уравнения Больцмана для электронов. Были получены выражения без учета электрон-электронных столкновений, а также преобразования электронов высоких энергий в электроны низких энергий при неупругих столкновениях электронов с атомами. При больших энергиях электронов применяется квазиклассический подход для расчета ФРЭЭ. Для умеренных энергий учитывались неупругие столкновения электронов с атомами в обычной плазме и неупругие столкновения электронов с атомами с микрочастицами в случае пылевой плазмы. Используя эти аналитические выражения и уравнение баланса для зарядки пыли, получают функцию распределения электронов по энергиям, эффективную температуру электронов, заряд пыли и потенциал поверхности пыли для различных радиусов и плотностей пыли, а также для различных плотностей электронов и радиоизлучения, амплитуды и частоты частотного поля. Параметры пылевой плазмы сравнивались с рассчитанными численно методом конечных разностей с учетом электрон-электронных столкновений и трансформации высокоэнергетических электронов при неупругих электрон-нейтральных столкновениях [12]. Было показано, что аналитические выражения могут быть использованы для расчета параметров ФРЭЭ и пылевой плазмы в типичных условиях эксперимента, в частности в положительном столбе тлеющего разряда постоянного тока и в случае высокочастотной плазмы, поддерживаемой электрическим полем с частотой $f = 13,56$ МГц.

Настоящая работа посвящена исследованию влияния размеров частиц и их плотности на формирование ФРЭЭ в пылевой плазме в аргоне в ВЧ поле.

Описание модели расчета ФРЭЭ

В данной работе рассматривается влияние плотности и радиуса микрочастиц на формирование функции распределения электронов по энергиям в ВЧ разряде. Рассмотрим плазму, поддерживаемую электрическим полем $E(t)$. В случае ВЧ разряда $E(t) = E_p \cos(\omega t)$, где $\omega = 2\pi f_E$, а f_E – частота поля. Для разряда постоянного тока $E(t) = E_p = \text{const}$. Предполагается, что плазма состоит из электронов с плотностью n_e , однозарядных положительных ионов (Ar^+) с плотностью n_i и отрицательно заряженных пылевых частиц субмикронного размера с плотностью n_d и радиусом r_d .

Расстояние между частицами пыли больше дебаевской длины. Мы рассматриваем пылевые частицы малого радиуса, поэтому линейный потенциал Дебая–Хюккеля можно принять как экранирующий потенциал пылинки [1],

$$\varphi(r) = \varphi_s \frac{a_d}{r} \exp[-(r - a_d) / \lambda_D], \quad (1)$$

где r – расстояние от центра пылевой частицы, φ_s – потенциал поверхности пыли, $\lambda_D \approx 1 / \sqrt{4\pi e (n_e / T_{eff} + n_i / T_i)}$ – длина Дебая.

Для вычисления функции распределения электронов по энергиям используется двухчленное приближение, а распределение по энергиям считается почти изотропным.

Функция распределения электронов по энергиям $f_0(w)$ удовлетворяет следующему однородному уравнению Больцмана [13]:

$$\frac{d}{dw} \left(W f_0 - D \frac{df_0}{dw} - \gamma x_d \frac{m_e}{m_d} \sigma_{ed}^e(w) w^2 f_0(w) \right) = St(f_0), \quad (2)$$

где W – потеря энергии при упругих столкновениях, D – коэффициент диффузии по энергии, которые задаются следующим образом [14]:

$$W = -\gamma \frac{2m_e}{M} w^2 x_k \sigma_{el}, \quad (3)$$

$$D = \frac{\gamma}{3} \left(\frac{E}{N_n} \right)^2 \left(\frac{w}{\tilde{\sigma}_m} \right) + \frac{\gamma k_b T_g}{N_n} w^2 \sigma_{el}, \quad (4)$$

$$\tilde{\sigma}_m = \left(\sigma_m + \frac{\lambda}{\varepsilon^{1/2}} \right)^2 + \left[\left(\frac{\omega}{N_n \gamma \varepsilon^{1/2}} \right)^2 / \left(\sigma_m + \frac{\lambda}{\varepsilon^{1/2}} \right) \right], \quad (5)$$

где $\gamma = (2e / m_e)^{1/2}$, $\sigma_m = \sum_{k=all} x_k \sigma_k$ – полное импульсное сечение столкновения.

Исходный член $St(f_0)$ представляет собой сумму интегралов столкновений для различных неупругих процессов (возбуждения, ионизации и т. д.) и интеграл столкновений электронов с пылевыми частицами:

$$St(f_0) = \gamma x_k \left[\sum_k \left[\sigma_{ea}^k(w + w_1) f_0(w + w_1) - w \sigma_{ea}^k(w) f_0(w) \right] \right] - \gamma x_d \sigma_{ed}^c(w) w f_0(w), \quad (6)$$

Необходимо отметить, что в данном случае локальная ФРЭ $f_0(w)$ нормирована на единицу

$$\int_0^\infty f_0(w) \sqrt{w} dw = 1, \quad (7)$$

Сечение передачи импульса между электроном и микрочастицами равно [12]

$$\sigma_{ed}^e(w) \approx \pi r_d^2 \left(\frac{e\varphi_d}{w} \right)^2 e^{2r_d/\lambda_D} \ln(\chi), \quad (8)$$

где $\chi \approx \lambda_d T_e / e\varphi_d r_d$.

В приближении орбитального ограниченного движения (ООД) предполагается, что ионы и электроны уходят на поверхность микрочастиц, и сечение захвата этих частиц в общем виде выглядит следующим образом [13]:

$$\sigma_{ed}^c(w) = \begin{cases} \pi r_d^2 (1 - e\varphi_d / w) & \text{if } w \geq e\varphi_d \\ 0 & \text{if } w < e\varphi_d \end{cases}, \quad (9)$$

Предполагается, что электронный (I_e) и ионный (I_i) токи к поверхности микрочастиц уравновешены:

$$I_e + I_i = 0, \quad (10)$$

Электронный ток на микрочастицу составляет:

$$I_e = \sqrt{\frac{2e}{m_e}} \pi n_e r_d^2 \int_{e\varphi_d}^{\infty} F_0(w) (w - e\varphi_d) dw. \quad (11)$$

для потока ионов на частицу, в предположении того, что ионы имеют максвелловское распределение по энергии:

$$I_i = 2\sqrt{\pi} r_d^2 n_i \sqrt{\frac{2T_i e}{m_i}} \left(1 + \frac{e\varphi_d}{T_i} \right) \quad (12)$$

Кроме того, предполагается, что плазма квазинейтральна:

$$n_i = n_e + Z_d N_d. \quad (13)$$

Результаты и их обсуждение

Расчеты в данной работе проводились при следующих параметрах ВЧ разряда: $n_e = 1 \times 10^{10} \text{ см}^{-3}$, $f = 13,56 \text{ МГц}$, $p = 0.5 \text{ Тор}$, $T_g = 300 \text{ К}$ и $E = 4 \text{ В/см}$. На рис. 1 показана ФРЭЭ в случае, когда частицы пыли в ВЧ разряде отсутствуют ($n_d = 0$), и при $n_d = 10^7 \text{ см}^{-3}$, $r_d = 0.5 \text{ мкм}$. Из рис. 1 видно, что при том же внешнем электрическом поле, поддерживающем плазму, количество электронов с энергией больше 10 эВ в пылевой плазме меньше, чем в плазме при отсутствии микрочастиц.

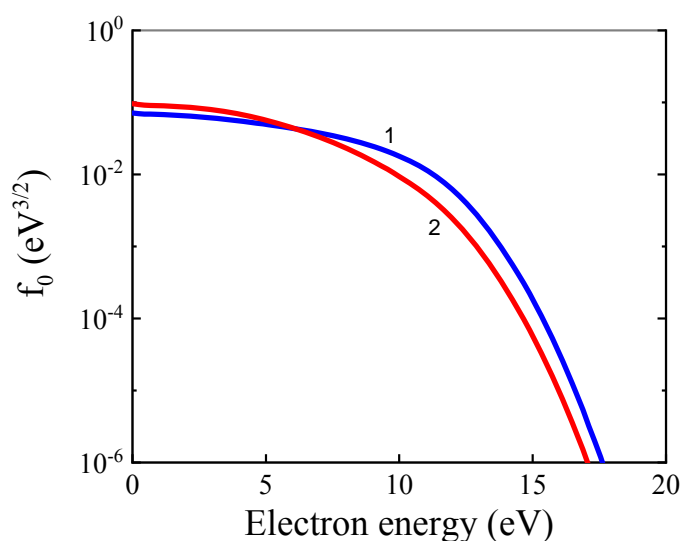


Рис.1. ФРЭЭ в обычной (1) и пылевой (2) при $n_d = 10^7 \text{ cm}^{-3}$ плазме, при $E = 4 \text{ V/cm}$ и $r_d = 0.5 \mu\text{m}$

На рис. 2 приведена ФРЭЭ при различных значениях плотности микрочастиц в плазме, при которой радиус микрочастиц постоянен и равен $r_d = 1 \mu\text{m}$. Из рисунка видно, что число быстрых электронов уменьшается с увеличением плотности пылевых частиц. Уменьшение связано с увеличением общей поверхности пылевых частиц, поглощающих электроны с энергией w , превышающей потенциал поверхности пыли φ_s . Уменьшение числа энергичных электронов сопровождается увеличением числа электронов в диапазоне средних и низких энергий ($< 7 \text{ эВ}$).

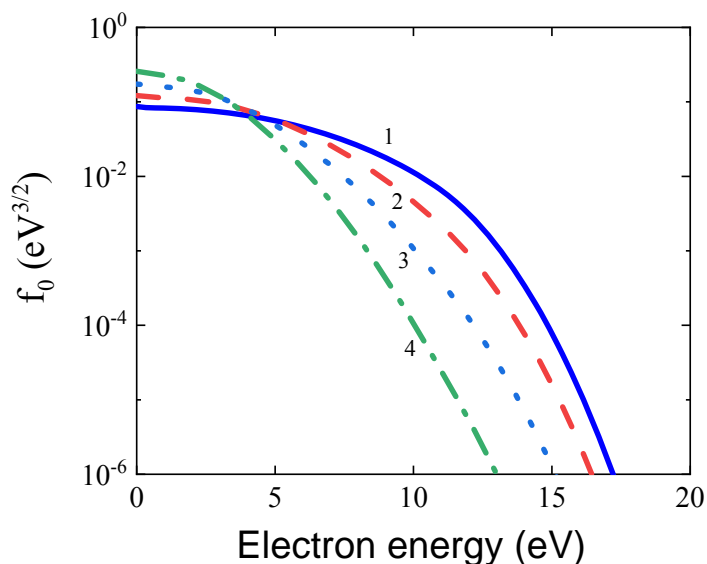


Рис. 2. ФРЭЭ при $E = 4 \text{ V/cm}$, $r_d = 1 \mu\text{m}$ и при различных значениях плотности микрочастиц: 1 – $n_{d1} = 2 \times 10^6 \text{ cm}^{-3}$, 2 – $n_{d2} = 5 \times 10^6 \text{ cm}^{-3}$, 3 – $n_{d3} = 1 \times 10^7 \text{ cm}^{-3}$, 4 – $n_{d4} = 2 \times 10^7 \text{ cm}^{-3}$.

На рис. 3 приведена ФРЭЭ при различных значениях радиуса микрочастиц в плазме, при котором плотность микрочастиц постоянна и равна $n_d = 1 \times 10^7 \text{ cm}^{-3}$. Из рис. 3 видно, что при увеличении радиуса пылевых частиц r_d , в то время как другие параметры плазмы остаются фиксированными, количество энергичных электронов в ФРЭЭ уменьшается, а количество электронов в низкоэнергетическом диапазоне увеличивается.

В таблице I приведены параметры плазмы при различных значениях параметров пылевых частиц. Из таблицы видно, что средняя энергия (температура) электронов становится меньше, когда значения плотности пыли или радиуса пылевых частиц становятся больше. Также видно, что заряд пылевых частиц Z_d при увеличении радиуса пылевых частиц увеличивается, а при увеличении плотности пылевых частиц уменьшается.

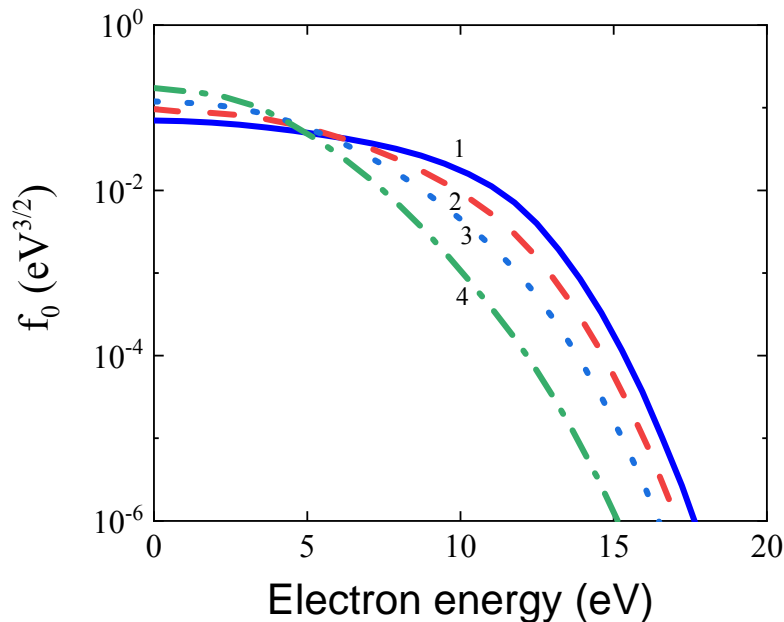


Рис. 3. ФРЭЭ при $E = 4 \text{ V/cm}$, $n_d = 1 \times 10^7 \text{ cm}^{-3}$ и при различных значениях радиуса микрочастиц: 1 – $r_{d1} = 0.1 \text{ мкм}$, 2 – $r_{d2} = 0.5 \text{ мкм}$, 3 – $r_{d3} = 0.7 \text{ мкм}$, 4 – $r_{d4} = 1 \text{ мкм}$.

Между тем мы наблюдаем, что температура электронов в пылевой плазме при малых n_d может стать больше, чем в обычной плазме (случай $n_d = 1 \times 10^7 \text{ cm}^{-3}$, $r_{d1} = 0.1 \text{ мкм}$ и $n_d = 0$). Такое увеличение T_e в пылевой плазме связано с увеличением количества электронов в среднем диапазоне энергий с уменьшением количества электронов в хвосте ФРЭЭ по сравнению с обычной плазмой. Из таблицы I также видно, что с увеличением плотности и радиуса пылевых частиц потенциал поверхности пылевых частиц уменьшается.

Таблица I. Сравнение параметров плазмы для различных плотностей и размеров пылевых частиц

$n_d (10^6 \text{ cm}^{-3})$	$r_d (\mu\text{m})$	Z_d	$T_e (\text{eV})$	$\varphi_s (\text{V})$
0	0	0	3.8	5.47
10	0.1	343	3.78	4.93
10	0.5	1215	3.2	3.53
10	0.7	1460	2.73	3
10	1	1680	2.19	2.42
2	1	2917	3.35	4.2
5	1	2220	2.74	3.2
20	1	1240	1.72	1.78

Закключение

Таким образом, нами проведено исследование по формированию ФРЭЭ в аргонной пылевой плазме в ВЧ поле. Исследовано влияние размеров микрочастиц и их плотности на параметры плазмы. Показано, что увеличение плотности микрочастиц в плазме приводит к уменьшению средней энергии электронов и потенциала поверхности микрочастиц. Однако увеличение плотности микрочастиц в плазме приводит к увеличению заряда пылевых частиц. Показано, что размеры микрочастиц также влияют на формирование ФРЭЭ в плазме. Установлено, что число энергичных электронов уменьшается с увеличением радиуса пылевых частиц, что связано с увеличением общей поверхности пылевых частиц, поглощающих электроны с энергией w , превышающей потенциал поверхности пыли φ_s .

Полученные результаты могут быть использованы при разработке технологических процессов в газовых разрядах в присутствии микро и наночастиц.

Литература

1. *Vladimirov S.V. and Ostrikov K.* Dynamic self-organization phenomena in complex ionized gas systems: new paradigms and technological aspects // *Physics Reports.* – 2004. – Vol. 393. – P. 175–380.
2. *Fortova V.E., Ivlev A.V., Khrapak S.A., Khrapaka A.G., Morfill G.E.* Complex (dusty) plasmas: Current status, open issues, perspectives // *Physics Reports.* -2005. – Vol. 421. – P. 1–103.
3. *Shukla P.K. and Eliasson B.* Complex (dusty) plasmas: Colloquium: Fundamentals of dust-plasma interactions // *Rev. Mod. Phys.* – 2009. – Vol. 81. – P. 25–44.
4. *Ашурбеков Н.А., Иминов К.О., Шахсинов Г.Ш., Закарьяева М.З.* Исследование динамики формирования пространственного распределения основных параметров плазменного источника на основе наносекундного разряда с протяженным полым катодом в аргоне // *Вестник Дагестанского государственного университета. Серия 1. Естественные науки.* 2020. Том 35. Вып. 3. – С. 81–91.
5. *Maxime Mikikian and Laïfa Boufendi.* Experimental investigations of void dynamics in a dusty discharge // *Physics of Plasmas.* – 2004. – Vol. 11. – P. 3733.
6. *Kovačević E., Stefanović I., Berndt J., Pendleton Y.J., and Winter J.* A Candidate Analog for Carbonaceous Interstellar Dust: Formation by Reactive Plasma Polymerization // *The Astrophysical Journal.* – 2005. – Vol. 623, № 1. – P. 242–251.

7. Bronold F.X., Fehske H., Kersten H., and Deutsch H. A Candidate Surface States and the Charge of a Dust Particle in a Plasma. // *Phys. Rev. Lett.* – 2008. – Vol. 101. – P. 175002.
8. Bronold F.X., Fehske H., Kersten H., and Deutsch H. Towards a Microscopic Theory of Particle Charging. // *Contrib. Plasma Phys.* – 2009. – Vol. 49. – P. 303–315.
9. Sang Ki Nam and John P. Verboncoeur. Global model for high power microwave breakdown at high pressure in air // *Comput. Phys. Commun.* – 2009. – Vol. 180. – P. 628–635.
10. Tatsuya Misawa, Shota Nunomura, Noriyasu Ohno and Shuichi Takamura. Observation of Transverse Dust Lattice Wave Excited by Unstable Vertical Oscillations of Dust Particles in an Ion Sheath with Low Gas Pressure // *Japanese Journal of Applied Physics.* – 2000. – Vol. 39. – P. 551–553.
11. Denysenko I. and Yu M.Y. Spatially averaged model of complex-plasma discharge with self-consistent electron energy distribution // *PHYS. REV. E.* – 2004. – Vol. 70. – P. 046403.
12. Denysenko I. B., Kersten H., and Azarenkov N.A. Electron energy distribution in a dusty plasma: Analytical approach // *Phys. Rev. E.* – 2015. – Vol. 92. – P. 033102.
13. Shubo Li, Rabadanov K.M., Bogdanov E.A., Kudryavtsev A.A., Ashurbekov N.A., Chengxun Yuan and Zhongxiang Zhou. Features of the EEDF formation in the dusty plasma of the positive column of a glow discharge // *Plasma Sources Science and Technology.* – 2021. – Vol. 30, № 4. – P. 047001.
14. Plasma Module User's Guide. marks. Version: COMSOL 5.5, www.comsol.com.

Поступила в редакцию 2 октября 2021 г.

UDC 533.9.1

DOI: 10.21779/2542-0321-2021-36-4-20–27

Formation of the Electron Energy Distribution Function in the Plasma of a High-Frequency Discharge in the Presence of Microparticles

N.A. Ashurbekov, I.G. Ramazanov, K.M. Rabadanov

*Dagestan State University; Russia, 367000, Makhachkala, M. Gadzhiev st., 43a;
nashurb@mail.ru*

Numerical studies of the formation of the electron energy distribution function (EEDF) in a high-frequency discharge in argon in the presence of microparticles has been studied. A numerical model is presented that describes the formation of the EEDF in plasma in the presence of microparticles. The results of a study of the influence of the density and size of microparticles on the formation of the EEDF and on other parameters of the plasma in a high-frequency discharge are presented. It is shown that the number of high-energy electrons decreases with increasing dust density and radius of the dust particles.

Keywords: *RF discharge, electron kinetics, electron energy distribution function.*

Received 2 October 2021