УДК 537.525

DOI: 10.21779/2542-0321- 2016-31-3-11-18

В.В. Шумова, Д.Н. Поляков, Л.М. Василяк

Влияние полых пылевых структур на электрофизические параметры тлеющего разряда постоянного тока в неоне

Объединённый институт высоких температур РАН; Россия, 125412, г. Москва, ул. Ижорская 13, стр. 2; shumova@ihed.ras.ru

В статье представлены результаты численных исследований характеристик плазмы тлеющего разряда постоянного тока в неоне с полыми пылевыми структурами. Расчёты по диффузионно-дрейфовой модели проведены при экспериментально полученных параметрах разряда, соответствующих трансформации однородных пылевых структур к полым пылевым структурам. Анализируется изменение распределения электрического поля в разряде с поллой пылевой структурой. Напряжённость продольного электрического поля в разряде с пылевыми структурами выше, чем в чистом неоне, и увеличивается с уменьшением размера полости в результате дополнительных потерь плазмы на пылевых частицах. В отличие от сплошных пылевых структур, снижающих напряжённость радиального электрического поля по сравнению с разрядом без пылевых частиц, полые пылевые структуры повышают её значение как внутри полости, так и в области, занятой пылевыми частицами. Результаты расчётов актуальны для совершенствования плазменных технологий и развития представлений о фундаментальных силах, действующих на заряженные микрочастицы в плазме.

Ключевые слова: *тлеющий разряд постоянного тока, диффузионно-дрейфовая модель, пылевая плазма, пылевой войд, полая пылевая структура.*

Введение

Пылевая (комплексная) плазма является одним из современных направлений фундаментальных исследований в области физики низкотемпературной плазмы [1], которое получило широкое применение в фундаментальных исследованиях и плазменных технологиях [2, 3].

Поступающие в плазму различных типов газовых разрядов либо образующиеся в ней микро- и наночастицы заряжаются и, взаимодействуя между собой и окружающей плазмой, формируют пылевые структуры [1, 3], оказывающие существенное влияние на параметры плазмы внутри образующихся структур и на окружающую плазму, изменяя электрофизические параметры газоразрядных устройств, в частности напряжение разряда и электрические поля [4–12].

Актуальность изучения электрофизических характеристик плазмы разряда диктуется тем, что изменение этих характеристик может приводить к изменению как состава плазмы, так и её параметров, а также заряда пылевых частиц и условий удержания пылевых структур и отдельных пылевых частиц. В технологических приложениях изменение параметров и однородности реакционного объёма вызовет изменения направлений плазмохимических реакций, условий образования пылевых частиц и энергообмена плазмы с пылевой компонентой, что может повлиять на свойства и качество модифицируемой поверхности или свойства образующейся фазы. Изучение электрофизических характеристик плазмы разряда также необходимо для анализа адекватности теоретических моделей при сравнении с результатами расчётов параметров плазмы.

Как правило, заряженные пылевые частицы образуют в плазме сплошные (гомогенные) пылевые структуры либо структуры с полостями, то есть с областями, свободными от пылевых частиц – кольцевые пылевые структуры, или пылевые структуры с войдом. Полые пылевые структуры наблюдались и исследовались при самых разнообразных условиях в плазме тлеющих разрядов постоянного тока в лабораторных экспериментах в различных газах [13–16].

Полые пылевые структуры ещё в большей степени, чем сплошные, создают неоднородность концентрации частиц в реакционном объёме, изменяют параметры плазмы и соответственно могут влиять на качество и свойства продуктов плазмохимического процесса.

Аналитические модели, описывающие образование полых пылевых структур, были разработаны в [14–22]. Большая часть теоретических исследований пылевых войдов посвящена анализу основных сил, ответственных за их формирование. Основным вопросом в прогнозе возможности формирования полых пылевых структур является точное знание характеристик плазмы на их границе. В данной работе мы моделируем параметры плазмы вблизи области перехода от условий, при которых происходит формирование гомогенных пылевых структур, к условиям, при которых формируются полые пылевые структуры в тлеющем разряде в неоне, исследованные в [16], т. е. происходит изменение размера полости в пылевой структуре.

Численная модель

Численное исследование влияния поллой пылевой структуры на параметры плазмы тлеющего разряда в неоне проведено на основе диффузионно-дрейфовой модели однородного положительного столба тлеющего разряда с пылевыми частицами [12]. Плазма неона моделировалась с учётом процессов ступенчатой ионизации и химионизации. В модели учтены образование, дрейф, диффузия и гибель электронов, ионов и метастабильных атомов неона на пылевых частицах, в объёме плазмы и на стенках разрядной трубки [23]. Средняя энергия электронов и транспортные коэффициенты плазмы рассчитаны с помощью пакета BOLSIG+ [24]. Распределение пылевых частиц в разряде задавалось ступенчатой функцией с полостью внутри, соответствующей радиусу полости R_v , и концентрацией пылевых частиц n_d , наблюдаемой в экспериментах [16]. Заряд пылевых частиц рассчитан с учётом ион-атомных столкновений в приближении CEC (collision enhanced collection) [25], а потоки метастабильных атомов на пылевые частицы – в газокинетическом приближении.

Результаты расчёта

Результаты расчётов демонстрируют взаимное влияние плазмы разряда и пылевых структур различной формы и размера. Введение пылевых частиц в разряд приводит к существенному увеличению продольного электрического поля и росту тепловыделения [26].

Возникающие дополнительные температурный и концентрационный градиенты приводят к возрастанию результирующей силы, действующей на пылевые частицы, и, как следствие, к образованию в пылевой структуре полости, что наблюдалось экспериментально при увеличении тока разряда [13–16]. В данной работе расчёты проведены для экспериментально полученных значений тока разряда $I = 2–3$ мА, при которых наблюдалось образование полости и увеличение её радиуса в разряде диаметром 16,5 мм при давлении неона 120 Па для пылевых частиц диаметром 2,55 мкм с концентрацией $n_d = 10^5$ см⁻³ [16].

Рассчитано изменение электрического поля в плазме разряда при изменении радиуса полости в пылевом облаке. В общем случае продольная компонента E_1 и профиль

радиальной компоненты $E_r(r)$ электрического поля в разряде зависят от концентрации пылевых частиц и их распределения в разряде, где r – радиальная координата. В нашем случае при фиксированной концентрации пылевых частиц мы анализируем зависимость компонент электрического поля от размера полости и сравниваем их со значением в разряде без пылевых частиц.

На рисунке 1 (кривые 1 и 2) представлена зависимость нормированной напряжённости продольного электрического поля $E_l^* = E_l(R_v)/E_{l0}$ в разряде с пылевыми частицами от размера полости для двух значений тока разряда, где E_{l0} – значение напряжённости продольного электрического поля в разряде без пылевых частиц. Можно видеть, что значение напряжённости поля в разряде с полыми пылевыми структурами может в несколько раз превышать соответствующее значение в разряде без пылевых частиц. Значение поля в разряде, полностью заполненном пылевыми частицами $E_l(0)$, почти в 2 раза выше, чем значение поля в разряде без частиц E_{l0} в силу потерь плазмы на пылевых частицах.

Чем больше размер полости, тем меньше потери плазмы на пылевых частицах и ниже величина $E_l(R_v)$.

Рис. 1. Нормированные значения напряжённости продольного электрического поля E_l^* (линии 1, 2) и радиального электрического поля на границе полости $E_r^*(R_v)$ (линии 3, 4) в разряде с полостью пылевой структурой с радиусом полости R_v при токе I , мА: 2 (линии 1, 4) и 3 (линии 2, 3)

В рассматриваемом диапазоне значений тока разряда наблюдается незначительная зависимость величины $E_l(R_v)$ от тока, показывающая расхождения результатов расчёта с теорией Шоттки, которая не учитывает сложные взаимодействия заряженных частиц плазмы пылевых частиц и метастабильных атомов. Эти отличия наблюдались также в поведении вольт-амперных характеристик положительного столба разряда [12].

На рисунке 1 представлена также зависимость нормированной напряжённости радиального электрического поля $E_r^*(R_v)$ на границе полости (при $r = R_v$) в разряде с пылевыми частицами. Здесь $E_r^*(R_v) = E_r(R_v, r)/E_{r0}(r)$, где $E_r(R_v, r)$ – значение напряжённости радиального электрического поля на границе полости радиусом R_v , а $E_{r0}(r)$ – значение в той же точке в разряде без пылевых частиц. Можно видеть, что $E_r(R_v, r)$ в разряде с полыми структурами может в несколько раз превышать соответствующее значение в свободном разряде. Аналогично продольной компоненте зависимость $E_r^*(R_v)$ от тока разряда в данном диапазоне незначительна.

На рисунке 2 приведены профили напряжённости радиального электрического поля E_r в разряде без пылевых частиц и в разряде с пылевыми структурами при различных значениях радиуса полости R_v . При увеличении размера полости градиент напря-

жённости радиального электрического поля уменьшается внутри пылевой структуры, тем не менее значение напряжённости радиального поля остается выше, чем в разряде без частиц, причём даже внутри зоны, свободной от пылевых частиц, при всех значениях размера полости. Этот результат показывает, что полая пылевая структура вызывает возрастание радиальных градиентов концентраций частиц плазмы, в то время как однородные пылевые структуры, расположенные в центре разряда, приводят к их снижению и уменьшению величины напряжённости радиального поля [11, 12, 26, 27].

При малых размерах полости (кривые 2–4 рис. 2) наблюдается образование локального максимума радиального электрического поля на наружной границе полости. Как нами было установлено ранее расчётным путём, в однородных пылевых структурах происходит изменение параметров плазмы, зависящее от размера и концентрации пылевых частиц, вплоть до возникновения эффекта инверсии радиального поля. Этот эффект возникает, в частности, при увеличении плотности пылевых частиц в пылевом облаке и обнаружен в плазме различных газов [11, 12].

Рис. 2. Профили напряжённости радиального электрического поля E_r при различных значениях радиуса полости R_v , мм: 0 (1), 0,5 (2), 1 (3), 2,7 (4) и в разряде без пылевых частиц (5) при токе 3 мА

Изменение электрического поля внутри пылевого облака должно приводить к изменению потоков плазменных частиц, вызванных амбиполярной диффузией, и к вытеснению пылевых частиц в направлении границы пылевого облака, приводя к её уплотнению.

Эффекты уплотнения границы в однородных пылевых структурах и инверсия радиального электрического поля получены также в расчётах других авторов [27]. Экспериментально увеличение концентрации пылевых частиц на границе полости наблюдалось в высокочастотном разряде [28, 29]. В разряде постоянного тока в гелии экспериментально и численно получено, что образование пылевой полости связано с увеличением тока разряда, и при определённом его значении численно получен локальный максимум радиального электрического поля [15].

На рисунке 3 приведены профили концентрации электронов $n_e(r)$ в разряде с пылевыми структурами с полостями различного размера. Пылевая структура с полостью вызывает возрастание радиальных градиентов концентрации свободных электронов как внутри полости, так и на её границе. Полая пылевая структура вызывает дополнительные потери плазменных частиц на пылевых частицах в области, прилегающей к стенкам разрядной трубки, в то время как однородные пылевые структуры, расположенные

в центре разряда, снижают диффузионные потоки частиц плазмы на стенки, вызывая дополнительные потери плазмы в центре разряда.

Рис. 3. Радиальные профили концентрации электронов $n_e(r)$ при различных значениях радиуса полости R_v мм: 0 (1), 1 (2), 4 (3), 6 (4) и в разряде без пылевых частиц (5) при токе 2 мА

На рисунке 3 можно проследить трансформацию $n_e(r)$ от профиля в разряде без пылевых частиц (линия 5) к профилю в разряде, полностью заполненном пылевыми частицами (линия 1), что соответствует последовательному уменьшению размера полости от R до 0. Видно, что с уменьшением размера полости происходит снижение концентрации электронов внутри пылевой структуры вследствие увеличения их потерь на пылевых частицах. Это должно быть компенсировано повышением продольного поля для увеличения ионизации в разряде и поддержания полного тока разряда. При сравнительно большом размере полости, превышающем диффузионную длину для электронов (линии 4 и 3), увеличение $E_{||}$ приводит к тому, что ионизация внутри полости превышает потери на пылевой структуре, хотя последние также возрастают. При дальнейшем уменьшении размера полости повышение ионизации не может компенсировать возрастание потерь на границе пылевой структуры, и концентрация электронов снижается по сравнению с разрядом без пылевых частиц как внутри полости, так и внутри самой пылевой структуры (линия 2). При этом профиль $n_e(r)$ приближается к профилю в разряде, полностью заполненном пылевыми частицами (линия 1).

Рис. 4. Радиальные профили концентрации ионов $n_i(r)$ при различных значениях радиуса полости R_v мм: 0 (1), 1 (2), 4 (3), 6 (4) и в разряде без пылевых частиц (5) при токе 3 мА

На рисунке 4 приведены профили концентрации ионов $n_i(r)$ в разряде с пылевыми структурами с полостями различного размера. Наблюдается увеличение концентрации ионов в области, занятой пылевыми частицами (вблизи стенки разряда), и их распределение становится отличным от распределения Бесселя (кривая 5), характерного для разряда без пылевых частиц. Видно, что зависимость концентрации ионов на оси разряда при малых значениях радиуса войда аналогична зависимости концентрации электронов. В границах пылевой структуры $n_i(r)$ увеличивается, поскольку пылевая структура работает как ловушка для ионов, где $n_i(r)$ и $n_e(r)$ связаны произведением заряда пылевых частиц и концентрации через соотношение электронейтральности. Такой же эффект электростатической ловушки для ионов был нами получен ранее для сплошной структуры пылевых частиц цилиндрической геометрии, расположенной на оси разряда [11].

Заключение

Конфигурация электрического поля в разряде с полый пылевой структурой существенно отличается от конфигураций электрического поля в разряде без пылевых частиц и в разряде со сплошной пылевой структурой.

Как и в разряде со сплошной пылевой структурой, в разряде с полый структурой напряжённость продольного электрического поля выше, чем в разряде без пылевых частиц, и её величина возрастает с уменьшением размера полости вследствие увеличения потерь плазмы на пылевых частицах.

Напряжённость радиального электрического поля внутри полости выше, чем в разряде без частиц. Внутри полый пылевой структуры градиент радиального электрического поля уменьшается так же, как и в сплошной пылевой структуре, однако величина радиального поля остаётся выше, чем в сплошной пылевой структуре или в разряде без пылевых частиц. Концентрация электронов внутри полости может быть выше или значительно ниже, чем в разряде без пылевых частиц. Немонотонная зависимость концентрации электронов внутри полости при её различных размерах отражает конкуренцию ионизации и потерь в плазме с полыми пылевыми структурами.

Полая пылевая структура в области, занятой пылевыми частицами, является ловушкой для ионов, в которой их концентрация немонотонно связана с размером полости.

Результаты расчётов качественно совпадают с результатами наших экспериментов, а также с расчётами других авторов, проведёнными в кинетическом приближении для полых пылевых структур в разрядах других газов и для другой конфигурации разряда. Полученные результаты расчётов могут быть использованы для развития представлений о фундаментальных силах, действующих на микрочастицы в плазме.

Работа выполнена при финансовой поддержке Программы фундаментальных научных исследований президиума РАН «Теплофизика высоких плотностей энергии».

Литература

1. Morfill G.E. and Ivlev A.V. Complex plasmas: An interdisciplinary research field // Rev. Mod. Phys. – 2009. – Vol. 81. – P. 1353–1404.
2. Ostrikov K., Cvelbar U and Murphy A.B. Plasma nanoscience: setting directions, tackling grand challenges // J. Phys. D: Appl. Phys. – 2011. – Vol. 44. – 174001.
3. Boufendi L., Jouanny M.Ch., Kovacevic E., Berndt J. and Mikikian M. Dusty Plasma for Nanotechnology // J. Phys. D: Appl. Phys. – 2011. – Vol. 44. – 174035.

4. *Wattieaux G. and Boufendi L.* Discharge impedance evolution, stray capacitance effect, and correlation with the particles size in a dusty plasma // *Phys. Plasmas.* – 2012. – Vol. 19. – 033701.
5. *Michau A., Lombardi G., Colina Delacqua L., Redolfi M., Arnas C., Jestin P., Bonnin X., Hassouni K.* Field Reversal and Particle Growth in DC Discharge // *Plasma Chem. Plasma Process.* – 2012. – Vol. 32. – P. 451–470.
6. *Sukhinin G.I., Fedoseev A.V., Antipov S. N., Petrov O.F., Fortov V.E.* Dust particle radial confinement in a dc glow discharge // *Phys. Rev. E.* – 2013. – Vol. 87. – 013101.
7. *Kumar K., Couëdel L., Arnas C.* Nanoparticles in direct-current discharges: Growth and electrostatic coupling // *Journal of Plasma Physics.* – 2014. – Vol. 80, № 6. – P. 849–854.
8. *Arnas C., Michau A., Lombardi G., Couëdel L., and Kumar K.K.* Effects of the growth and the charge of carbon nanoparticles on direct current Discharges // *Phys. Plasmas.* – 2013. – Vol. 20. – 013705.
9. *Kumar K.K., Couëdel L., and Arnas C.* Growth of tungsten nanoparticles in direct-current argon glow discharges // *Phys. Plasmas.* – 2013. – Vol. 20. – 043707.
10. *Abbas Q.A.* Perturbation of the cathode Sheath Characteristics by ALO Dust Particles in magnetized Plasma // *International Journal of Application or Innovation in Engineering & Management.* – 2013. – Vol. 2, Issue 12. – P. 470–478.
11. *Vasilyak L.M., Polyakov D.N., Fortov V.E. and Shumova V.V.* Parameters of the Positive Column of Glow Discharge with Dust Particles // *High Temp.* – 2011. – Vol. 49. – P. 623–628.
12. *Vasilyak L., Polyakov D., Shumova V.* Glow Discharge Positive Column with Dust Particles in Neon // *Contrib. Plasma Phys.* – 2013. – Vol. 53, № 4–5. – P. 432–435.
13. *Vasilyak L. M., Vetchinin S. P., Polyakov D. N., and Fortov V.E.* Formation of Complex Structures in Dusty Plasmas under Temperature Gradients // *J. Exp. Theor. Phys.* – 2005. – Vol. 100, № 5. – P. 1029–1034.
14. *Balabanov V.V., Vasilyak L.M., Vetchinin S.P., Nefedov A.P., Polyakov D.N., and Fortov V.E.* // *J. Exp. Theor. Phys.* – 2001. – Vol. 92, № 1. – P. 86–92.
15. *Fedoseev A.V., Sukhinin G.I., Dosbolayev M.K., and Ramazanov T.S.* Dust-void formation in a dc glow discharge // *Phys. Rev. E.* – 2015. – Vol. 92. – 023106.
16. *Шумова В.В., Поляков Д.Н., Василяк Л.М.* Трансформация пылевых структур в разряде постоянного тока в неоне // *Прикладная физика.* – 2015. – № 4. – С. 27–32.
17. *Tsytoich V.N., Vladimirov S.V., and Morfill G.E.* Theory of dust and dust-void structures in the presence of the ion diffusion // *Phys. Rev. E.* – 2004. – Vol. 70. – 066408.
18. *Gozadinos G., Ivlev A.V. and Boeuf J.P.* A fluid model for colloidal plasmas under microgravity conditions // *New Journal of Physics.* – 2003. – Vol. 5. – С. 32.
19. *Tsytoich V.N.* Development of physical concepts on the interaction of plasma flows and electrostatic fields in a dust plasma // *Physics-USpekhi.* – 2007. – Vol. 50, № 4. – P. 409–452.
20. *Goedheer W.J. and Land V.* Simulation of dust voids in complex plasmas // *Plasma Phys. Control. Fusion.* – 2008. – Vol. 50. – 124022.
21. *Totsuji H.* Distribution of electrons, ions, and fine (dust) particles in cylindrical fine particle (dusty) plasmas: drift-diffusion analysis // *Plasma Phys. Control. Fusion.* – 2016. – Vol. 58. – 045010.
22. *Totsuji H.* Simple model for fine particle (dust) clouds in plasmas // *Phys. Lett. A.* – 2016. – Vol. 380. – P. 1442–1445.
23. *Shumova V.V., Polyakov D.N., Vasilyak L.M.* Effect of metastable neon atoms in positive column of glow discharge with dust particles // *Plasma Sources Sci. Technol.* – 2014. – Vol. 23, № 6. – 065008.

24. Hagelaar G.J.M., Pitchford L.C. Solving the Boltzmann equation to obtain electron transport coefficients and rate coefficients for fluid models // *Plasma Sources Sci. Technol.* – 2005. – Vol. 14. – P. 722–733.

25. D'yachkov L.G., Khrapak A.G., Khrapak S.A., Morfill G.E. Model of grain charging in collisional plasmas accounting for collisionless layer // *Phys. Plasmas.* – 2007. – Vol. 14. – 042102.

26. Polyakov D.N., Shumova V.V., Vasilyak L.M. On the mechanism of radial sustenance of dense dusty plasmas // *Dig. J. Nanomater. Bios.* – 2014. – V. 9, № 3. – P. 1249–1254.

27. Sukhinin G.I. and Fedoseev A.V. Radial Distributions of Dusty Plasma Parameters in a DC Glow Discharge // *Contrib. Plasma Phys.* – 2012. – Vol. 52, № 9. – P. 756–760.

28. Lipaev A.M., Khrapak S.A., Molotkov V.I., Morfill G.E., Fortov V.E., Ivlev A.V., Thomas H.M., Khrapak A.G., Naumkin V.N., Ivanov A.I., Tretschke S.E., Padalka G.I. Void Closure in Complex Plasmas under Microgravity Conditions // *Phys. Rev. Lett.* – 2007. – Vol. 98. – 265006.

29. Harris B.J., Matthews L.S. and Hyde T.W. Dusty plasma cavities: Probe-induced and natural // *Phys. Rev. E.* – 2015. – Vol. 91. – 063105.

Поступила в редакцию 22 сентября 2016 г.

UDC 537.525

DOI: 10.21779/2542-0321-2016-31-3-11-18

Hollow dusty structure effect on electro-physical characteristics of DC glow discharge in neon

V.V. Shumova, D.N. Polyakov and L.M. Vasilyak

Joint Institute for High Temperatures RAS; Russia, 125412, Moscow, Izhorskaya 13, Bld. 2; shumova@ihed.ras.ru

The article presents the results of numerical studies of the plasma properties of a glow DC discharge in neon with dust hollow structures. Calculations based on diffusion-drift model were performed using the experimentally obtained discharge parameters corresponding to transformation of homogeneous dust structures to hollow dust structures. The change in the electric field distribution in the discharge with a hollow dust structure was studied. The longitudinal electric field in the discharge with dust structures was higher than in pure neon, and increased with decreasing cavity size as a result of additional plasma losses on dust particles. In contrast to homogeneous dust structures, which reduce the radial electric field compared with the discharge without dust particles, the hollow dust structure increased its value, both inside the cavity and in the area occupied by dust particles. The results may be used to improve plasma technologies and understanding of fundamental forces acting on charged microparticles in the plasma.

Keywords: *glow dc discharge, diffusion-drift model, dusty plasma, dust void, dust cavity.*

Received 22 September, 2016