

УДК 539.9

## ИССЛЕДОВАНИЕ СВОЙСТВ КОМПЛЕКСНОЙ ПЛАЗМЫ ВЫСОКОЧАС- ТОТНОГО РАЗРЯДА С АЛЬТЕРНАТИВНОЙ ФАЗОЙ

Н.Х. Бастыкова<sup>1,\*</sup>, С.К. Коданова<sup>1</sup>, Т.С. Рамазанов<sup>1</sup>, Ж.А. Молдабеков<sup>1</sup>, З. Донко<sup>2</sup>

<sup>1</sup>НИИЭТФ, КазНУ им. Аль-Фараби, Алматы, Казахстан

<sup>2</sup> Институт физики твердого тела и оптики НИЦ физики им. Вигнера,  
Будапешт, Венгрия

\*e-mail: bastykova\_nuriya@physics.kz

В данной работе представлены результаты исследования свойств комплексной плазмы высокочастотного разряда с альтернативной фазой. Были проведены компьютерное моделирование свойств комплексной плазмы высокочастотного разряда с альтернативной фазой на основе методов частиц в ячейках и Монте-Карло. Получены пространственно-временные распределения характеристик плазмы высокочастотного разряда с альтернативной фазой. Показана, что применение сигнала ВЧ возбуждения с альтернативной фазой приведет к существенным повышением характеристик плазмы высокочастотного разряда. В случае напряжения альтернативного фазового возбуждения, динамика электронов существенно изменяется. Сильный нагрев электронов следует к быстрому расширению слоев и, следовательно, плотность электронов и ионов, а также температура электронов повышаются до более высоких значений по сравнению со случаем гармонического ВЧ возбуждения.

**Ключевые слова:** Комплексная плазма, Высокочастотный разряд, Метод частиц в ячейках, Метод Монте-Карло.

### Введение

Комплексная (пылевая) плазма активно исследуется во всем мире как для фундаментального понимания динамики сильно связанных открытых систем [1-4], так и в практических целях [5-7]. В лабораторных условиях пылевая плазма исследуется в различных видах газового разряда [8]. В данное время начинается развитие новых технологий на основе комбинированных разрядов [9], в связи с чем, становятся актуальными исследования, посвященные поведению комплексной плазмы в таких системах. Наиболее важные области применения включают в себя процессы травления и осаждения в кристалле, в производстве солнечных батарей и создание биосовместимых поверхностей. Также большой интерес представляет плазма в высокочастотном (ВЧ) разряде при атмосферном давлении для медицинских применений [10-14]. Эти приложения весьма требовательны и нуждаются в исследованиях характеристик разряда для оптимизации

процессов взаимодействия плазмы с поверхностью. Контроль ионных свойств плазмы является ключевым вопросом, поскольку большинство процессов обусловлены ионами. Необходимость управления потоками ионов и энергии на поверхность пластины мотивирована развитием разных видов источников плазмы и схем возбуждения: емкостный разряд, работающий при разных частотах, а также гибридные (DC-ВЧ, и емкостные индуктивные) источники [15-19]. Помимо интереса их применения в этих областях, разряд с высокочастотным напряжением проявляет сложную физику, которая привлекает большое внимание. Кинетика и режим нагрева электронов являются ключевыми свойствами ВЧ разряда, так как они являются основой для размножения зарядов, чтобы сбалансировать потери в устойчивом состоянии. На сегодняшний день развитие диагностики плазмы и методов моделирования позволяет осуществить и исследовать данные разряды.

### Компьютерное моделирование свойств комплексной плазмы высокочастотного разряда с альтернативной фазой

В данной работе исследованы свойства комплексной плазмы высокочастотного разряда с альтернативной фазой на основе методов частиц в ячейках и Монте-Карло (PIC/MCC) [20]. Модель является одномерной (пространственной) задачей и рассматривает  $2 \cdot 10^5$  суперчастиц, представляющих собой электроны и ионы аргона. В данной модели учитываются взаимодействия заряженных частиц с поверхностью электродов при таких процессах как вторично-электронная эмиссия и отражение электронов от поверхности.

Модель описывает плазму в высокочастотном разряде, который зажигается на горизонтально расположенных, двух плоских алюминиевых электродах диаметром  $D = 170$  мм и расстоянием между ними  $L = 55$  мм, расположенных внутри стеклянного цилиндра. Рассматривается аргоновая плазма при давлении  $p = 1,8$  Па, частоте  $f = 13,56$  МГц и температуре газа  $T_g = 350$  К. Граничные условия приводятся для электродов, на один из которых подается потенциал  $\varphi(t)$ , а другой заземлен.

Рассмотрим следующие типы сигналов напряжения на электрод с питанием (смотрите рисунок 1), с амплитудой  $\varphi_0 = 100$  В:

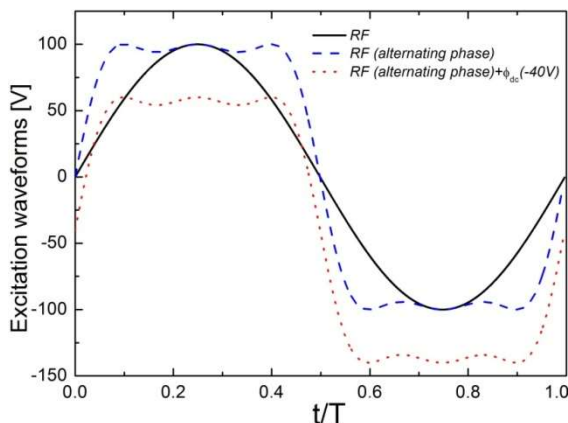


Рисунок 1 - Типы сигналов возбуждения плазмы

- 1) возбуждение разряда с гармоническим ВЧ напряжением:  $\varphi(t) = \varphi_0 \sin(2\pi f_{RF}t)$ ;
- 2) возбуждение разряда с альтернативным напряжением и с дополнительным напряжением постоянного тока,  $\varphi(t) = \varphi_0 \sin[2\pi f_{RF}t + \sin[2\pi (2f_{RF})t]] + \varphi_{dc}$ .

### Результаты компьютерного моделирования основных свойств комплексной плазмы высокочастотного разряда

На рисунке 2 показаны распределения плотностей электронов и ионов для трех типов сигнала возбуждения. В случае напряжения с переменным фазовым сдвигом, сильный нагрев электронов следует к быстрому расширению слоев, что приводит к увеличению плотностей электронов и ионов в плазме на коэффициент  $\sim 2.7$ , по сравнению с гармоническим ВЧ возбуждением. Дополнительное смещение постоянного тока приводит к уменьшению максимальной плотности электронов и ионов и сдвигает положение максимума распределения плотности в направлении заземленного электрода.

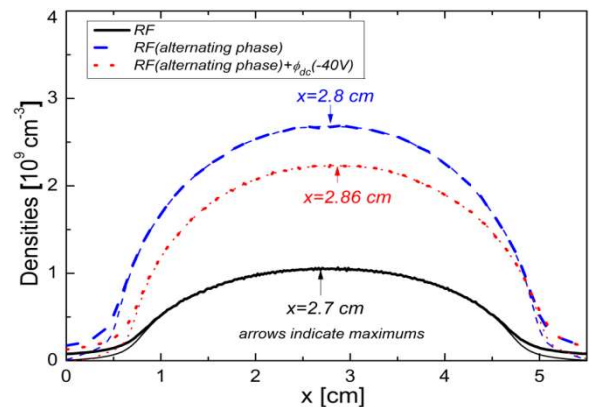
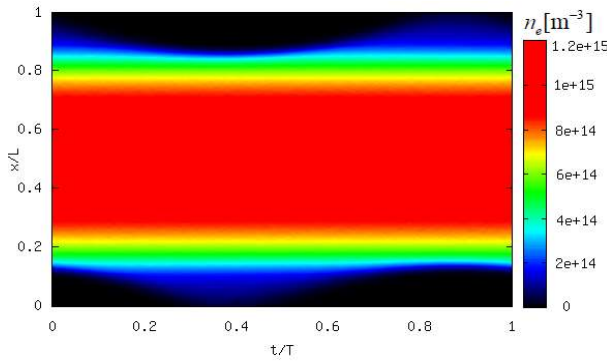


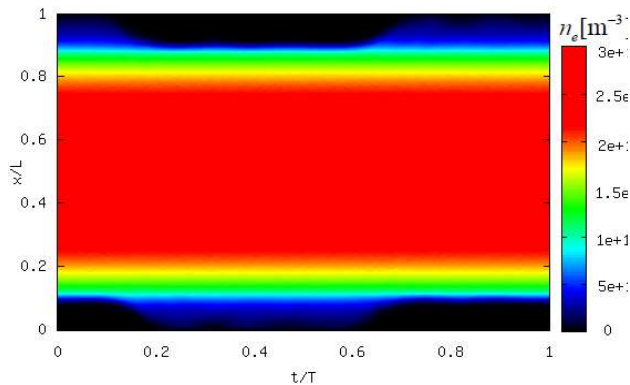
Рисунок 2 - Пространственное распределение плотности электронов и ионов

На рисунках 3(а)-4(а) показаны пространственно-временные распределения характеристик плазмы высокочастотного разряда, где по вертикали показано расстояние между электродами ( $x/L$ ), а по горизонтали – шаг по времени ( $t/T$ ). Результаты разряда с гармоническим ВЧ напряжением более подробно описаны в [20].

На рисунках 3(б)-4(б) приведены пространственно-временные распределения характеристик плазмы высокочастотного разряда с альтернативной фазой, такие как плотность и температура электронов.



(а)



(б)

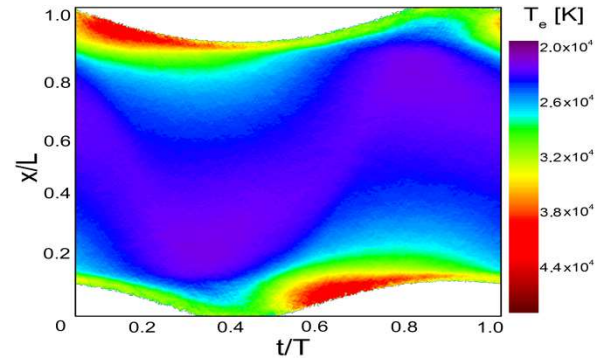
Рисунок 3 - Пространственно-временное распределение плотности электронов в ВЧ разряде (а) и ВЧ разряде с альтернативной фазой (б) для  $L = 55$  мм,  $V_{pp} = 200$  В при давлении  $p = 1,8$  Па

На рисунках 4 (а) и 4 (б) показаны пространственно-временные распределения (эффективной) температуры электронов, полученный от средней энергии электронов, измеренных в моделировании, для случая гармонического ВЧ возбуждения 4 (а) и для случая альтернативной фазы возбуждения 4 (б), соответственно.

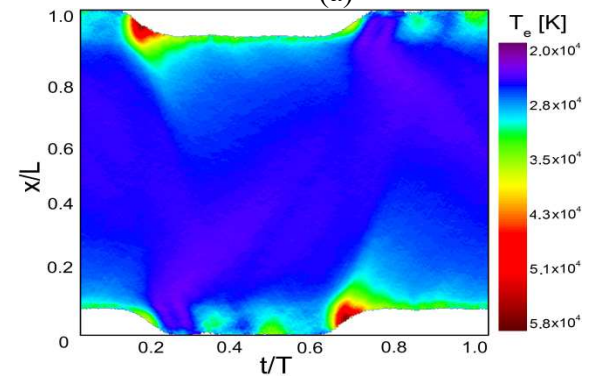
Сравнивая рисунки 4 (а) и 4 (б) можно увидеть, что самые высокие значения эффективной температуры электронов находятся вблизи краев расширяющихся приэлектродных слоев.

В случае гармонического ВЧ возбуждения, наибольшие значения

температуры в порядке  $\sim 4$  эВ, в то время как в плазменном объеме мы находим  $\sim 2$  эВ. В случае напряжения альтернативного фазового возбуждения, динамика электронов существенно изменяется.



(а)



(б)

Рисунок 4 - Пространственно-временное распределение температуры электронов в ВЧ разряде (а) и ВЧ разряде с альтернативной фазой (б) для  $L = 55$  мм,  $V_{pp} = 200$  В при давлении  $p = 1,8$  Па

Расширение слоев становится гораздо быстрее и, следовательно, температура электронов повышается до более высоких значений по сравнению со случаем гармонического ВЧ возбуждения.

Здесь температура электронов достигает значений, превышающих 5 эВ, в то время как в объеме мы наблюдаем аналогичные значения, как на рисунке 4 (а).

Таким образом, было обнаружено, что применение сигнала ВЧ возбуждения с альтернативной фазой приведет к существенным повышениям характеристик плазмы высокочастотного разряда.

Список литературы

- 1 Thomas H., Morfill G.E., Demmel V., Goree J., Feuerbacher B., Möhlmann D. // Phys. Rev. Lett. –1994. – Vol. 73. – P. 652.
- 2 Melzer A., Trottenberg T., Piel A. // Phys. Rev. Lett. A. –1994. – Vol. 191. – P. 301.
- 3 Alexandrov A. L., Schweigert I. V. et al. // New J. Phys. –2008. – Vol. 10. – P. 093025.
- 4 Morfill G.E., Ivlev A.V. // Rev. Mod. Phys. –2009. – Vol. 81. – P. 1353.
- 5 Lieberman M.A. and Lichtenberg A.J. Principles of Plasma Discharges and Materials Processing 2nd edn. – New York: Wiley-Interscience, 2005. – P. 46.
- 6 Makabe T. and Petrović Z.Lj. Plasma Electronics: Applications in Micro-electronic Device Fabrication. – London: Taylor and Francis, 2006. – P. 124.
- 7 Bonitz M., Henning C. and Block D. // Rep. Prog. Phys. –2010. – Vol. 73. – P. 066501.
- 8 Fortov V. E., Ivlev A. V., Khrapak S. A., Khrapak A. G., and Morfill G. E. Complex (dusty) plasmas: Current status, open issues, perspectives // Phys. Rep. – 2005. – Vol. 421. – P. 1-103.
- 9 Thomas H., Morfill G.E., Demmel V., Goree J., Feuerbacher B., Möhlmann D. // Phys. Rev. Lett. – 1994. – Vol. 73. – P. 652.
- 10 Iwashita et al. // J. Phys. D: Appl. Phys. – 2013. – Vol. 46. – P. 245202.
- 11 Park G.Y., Park S.J., Choi I.G., Koo I.G., Byun J.H., Hong J.W., Sim J.Y., Collins G.J. and Lee J.K. // Plasma Sources Sci. Technol. –2012. – Vol. 21. – P. 043001.
- 12 Benedikt J., Hofmann S., Knake N., Bottner H., Reuter R., von Keudell A. and Schulz-von der Gathen V. Phase resolved optical emission spectroscopy of coaxial microplasma jet operated with He and Ar // Euro. Phys. J. D. –2010. – Vol. 60. – P. 539-546.
- 13 Knake N., Reuter S., Niemi K., Schulz-von der Gathen V. and Winter J. Absolute atomic oxygen density distributions in the effluent of a microscale atmospheric pressure plasma jet // J. Phys. D: Appl. Phys. –2008. – Vol. 41. – P. 194006.
- 14 Hemke T., Wollny A., Gebhardt M., Brinkmann R.P. and Mussenbrock T. Spatially resolved simulation of a radio-frequency driven micro-atmospheric pressure plasma jet and its effluent// J. Phys. D: Appl. Phys. –2011. – Vol. 44. – P. 285206.
- 15 Kawamura E., Lichtenberg A.J. and Lieberman M.A. // Plasma Sources Sci. Technol. –2008. – Vol. 17. – P. 045002.
- 16 Wang S-B and Wendt A.E. Control of ion energy distribution at substrates during plasma processing // J. Appl. Phys. – 2000. – Vol. 88. – P. 643.
- 17 Rauf S. and Kushner M.J. Operation of a Coplanar-Electrode Plasma Display Panel Cell// IEEE Trans. Plasma Sci. –1999. – Vol. 27. – P. 1329.
- 18 Dudin S.V., Zykov A.V., Polozhii K.I. and Farenik V.I. Ion energy cost in a combined inductive-capacitive rf discharge // Tech. Phys. Lett. –1998. – Vol. 24. – P. 881-883.
- 19 Klindworth M., Melzer A., Piel A., Schweigert V.A. Laser-excited intershell rotation of finite Coulomb dusts in a dusty plasma // Phys. Rev. B. –2000. – Vol. 61. – P. 8404-8410.
- 20 Бастыкова Н.Х., Коданова С.К., Рамазанов Т.С., Донко З. Моделирование основных свойств комплексной плазмы высокочастотного разряда. // Журнал проблем эволюции открытых систем. - 2016. - №2 (18) - С.13-21.

*Принято к печати 30.05.17*

## **ИССЛЕДОВАНИЕ СВОЙСТВ КОМПЛЕКСНОЙ ПЛАЗМЫ ВЫСОКОЧАСТОТНОГО РАЗРЯДА С АЛЬТЕРНАТИВНОЙ ФАЗОЙ**

**Н.Х. Бастыкова<sup>1,\*</sup>, С.К. Коданова<sup>1</sup>, Т.С. Рамазанов<sup>1</sup>, Ж.А. Молдабеков<sup>1</sup>, З. Донко<sup>2</sup>**

<sup>1</sup>НИИЭТФ, КазНУ им. Аль-Фараби, Алматы, Казахстан

<sup>2</sup> Институт физики твердого тела и оптики НИЦ физики им. Вигнера,

Будапешт, Венгрия

\*e-mail: bastykova\_nuriya@physics.kz

В данной работе представлены результаты исследования свойств комплексной плазмы высокочастотного разряда с альтернативной фазой. Были проведены компьютерное моделирование свойств комплексной плазмы высокочастотного разряда с альтернативной фазой на основе методов частиц в ячейках и Монте-Карло. Получены пространственно-временные распределения характеристик плазмы высокочастотного разряда с альтернативной фазой. Показана, что применение сигнала ВЧ возбуждения с альтернативной фазой приведет к существенным повышениям характеристик плазмы высокочастотного разряда. В случае напряжения альтернативного фазового возбуждения, динамика электронов существенно изменяется. Сильный нагрев электронов следует к быстрому расширению слоев и, следовательно, плотность электронов и ионов, а также температура электронов повышаются до более высоких значений по сравнению со случаем гармонического ВЧ возбуждения.

**Ключевые слова:** Комплексная плазма, Высокочастотный разряд, Метод частиц в ячейках, Метод Монте-Карло.

**Н.Х. Бастыкова<sup>1,\*</sup>, С.К. Коданова<sup>1</sup>, Т.С. Рамазанов<sup>1</sup>, Ж.А. Молдабеков<sup>1</sup>, З. Донко<sup>2</sup>**

**Альтернативті фазалы жоғары жиілікті разрядта комплексті плазманың негізгі қасиеттерін зерттеу**

<sup>1</sup>НИИЭТФ, КазНУ им. Аль-Фараби, Алматы, Казахстан

<sup>2</sup> Институт физики твердого тела и оптики НИЦ физики им. Вигнера,

Будапешт, Венгрия

\*e-mail: bastykova\_nuriya@physics.kz

Бұл жұмыста баламалы циклы бар жоғары жиілікті разрядта кешенді плазманың қасиеттерін зерттеу нәтижелері ұсынылған. Баламалы циклы бар жоғары жиілікті разрядта ұяшықтағы бөлшектер және Монте-Карло әдістерімен кешенді плазманың қасиеттерін компьютерлік моделдеу жүргізілді. Баламалы циклы бар жоғары жиілікті разрядта плазма сипаттамаларының кеңістік-уақыттық таралулары алынды. Жоғары жиілікті разрядқа баламалы циклы бар сигнал қосу плазманың сипаттамаларын айтарлықтай өсуіне әкелетіні көрсетілді. Баламалы циклы бар кернеу жағдайында, электрондардың динамикасы айтарлықтай өзгереді. Электрондардың күшті қызуы электрод маңындағы қабаттардың тез кеңейуіне әкеледі, демек ол гармоникалық қоздырылған жоғары жиілік жағдайымен салыстырғанда иондар мен электрондардың тығыздығының және электронның температурасының жоғары көтерілуіне алып келді.

**Түйін сөздер:** Комплексті плазма, Жоғарғы жиілікті разряд, Ұяшықтардағы бөлшектер әдісі, Монте-Карло әдісі.

**N.Kh. Bastykova, S.K. Kodanova, T.S. Ramazanov, Zh.A. Moldabekov, Z. Donko**

**Investigation of complex plasma properties in RF discharge with an alternative phase**

In this paper the results of investigation of the complex plasma properties of a high-frequency discharge with an alternative phase are we presented. Computer simulation of the complex plasma properties of

a high-frequency discharge with an alternative phase was carried out based on the particle-in-cell and Monte Carlo methods. Spatio-temporal distributions of plasma characteristics of a high-frequency discharge with an alternative phase are obtained. It is shown that the application of the RF excitation signal to the alternative phase will lead to significant enhancements in the characteristics of the high-frequency discharge plasma. In the case of a voltage of alternative phase excitation, the dynamics of the electrons changes significantly. The strong heating of the electrons follows a rapid expansion of the sheath layers and, consequently, the density of electrons and ions, as well as the electron temperature, increase to higher values in comparison with the case of harmonic RF excitation.

**Key words:** Complex plasma, Radiofrequency discharge, Particle in cell method, Monte-Carlo method.