

УДК 533.9

¹М.М. Муратов*, ¹Т.С. Рамазанов, ¹К.Н. Джумагулова, ²Дж.А. Гори¹ НИИ экспериментальной и теоретической физики,
Казахский национальный университет им. аль-Фараби, Республика Казахстан, г. Алматы² Университет Айовы, США, штат Айова, г. Айова

*E-mail: mukhit.muratov@gmail.com

О новом методе диагностики газоразрядной плазмы

В настоящей работе рассматривается плазма с частицами пыли, предложен новый метод диагностики, который дает возможность рассчитать и оценить параметры газоразрядной плазмы с помощью данных, полученных из эксперимента по пылевой плазме в высокочастотном разряде. В качестве данных используются парные корреляционные функции, заряд и концентрация пылевых частиц. Метод основан на использовании правил сумм для пылевой компоненты парной корреляционной функции. Парную корреляционную функцию пылевой плазмы получают непосредственно из экспериментов с помощью по кадровой обработки видео изображения плазменно-пылевой структуры и аналитическим методом с помощью парного потенциала взаимодействия пылевых частиц. На основе парного потенциала взаимодействия и парных корреляционных функции были рассчитаны концентрации электронов и ионов в газоразрядной плазме. Результаты теоретических оценок были сравнены с результатами экспериментальных данных. Оба результата, полученные разными методами, имеют хорошее согласие. Тем самым показана возможность использования данного метода для диагностики плазмы в высокочастотном разряде.

Ключевые слова: газоразрядная плазма, пылевая плазма, парная корреляционная функция, концентрация.

M.M. Muratov, T.S. Ramazanov, K.N. Dzhumagulova, Jh.A. Goree

On new diagnostic method of gas discharge plasma

Plasma with dust particles is considered. In present work a new diagnostic method is proposed. This method allows to calculate and estimate gas discharge plasma parameters on the basis of data obtained from dusty plasma experiments in RF discharge. Pair correlation functions, charge and number density of dust particles are used as data. Method is based on the implementation of sum rules for pair correlation function of dust component. Pair correlation function of dusty plasma is obtained directly from the experiments using video images processing of plasma-dust structure and the analytical method using the pair interaction potential of dust particles. Number densities of electrons and ions in gas discharge plasma were calculated on the basis of pair interaction potential and pair correlation functions. Theoretical calculation results and results based on the experimental data were compared. Both results obtained through different methods are in good agreement. Thus, the possibility of using of this method for the diagnostic of plasma in rf discharge is shown.

Key words: gas discharge plasma, dusty plasma, pair correlation function, number density.

М.М. Муратов, Т.С. Рамазанов, Қ.Н. Жұмағұлова, Дж.А. Гори

Газ разрядты плазма диагностикасының жаңа әдісі туралы

Тозаң бөлшектері бар плазма қарастырылады. Осы жұмыста, разрядтағы тозаңды плазманың эксперименттерінен алынған мәліметтер негізінде газ разрядты плазманың параметрлерін есептеуге және бағалауға мүмкіндік беретін, жаңа диагностика әдісі ұсынылған. Тозаңды бөлшектердің қос корреляциялық функциясы, заряды және концентрациясы мәліметтер ретінде қолданылған. Әдіс тозаңды құраушының қос корреляциялық функциясына арналған қосындылар ережесін қол-

дануына негізделген. Тозаңды бөлшектердің қос корреляциялық функциясын плазмалық-тозаңды құрылымның бейне суретін жеке-жеке өңдеу арқылы тікелей эксперименттерден және тозаңды бөлшектердің әсерлесу потенциалының көмегімен аналитикалық әдіспен алады. Газ разрядты плазмадағы электрондар және иондар концентрациясы қос әсерлесу потенциалы және қос корреляциялық функциясы негізінде есептелінді. Теоритикалық есептеулер нәтижелері эксперименттік мәліметтер нәтижесімен салыстырылды. Әр түрлі әдіспен алынған екі нәтиже жақсы үйлеседі. Осының негізінде ЖЖ разрядтағы плазманың диагностикасында осы әдісі пайдаланудың мүмкіндігі көрсетелген.

Түйін сөздер: газ разрядты плазма, тозаңды плазма, қос корреляциялық функциясы, концентрация.

Введение

С момента открытия пылевого кристалла [1] изучение физики пылевой плазмы вызывает большой интерес, что привело к созданию целого направления в науке о плазме. Пылевая плазма (dustplasma), или, как еще называют, плазма сложного состава (complexplasma), – это плазма, содержащая заряженные твердые или жидкие частицы (пыли). Таким образом, в большинстве случаев плазма как бы сосуществует с такими частицами пыли. Эти частицы могут достигать микронных размеров. Присутствие массивных заряженных частиц в плазме сложного состава является существенным для коллективных процессов. Пыль представляет собой исключительно важный интерес в промышленных применениях плазмы, связанных с использованием в микроэлектронике технологии плазменного напыления и травления, а также с производством тонких пленок и наночастиц [2]. Для управления этими процессами важно знать такие физические характеристики и механизмы, как, например, энергия парного взаимодействия пылевых частиц, характер влияния пыли на параметры газоразрядной плазмы.

Потенциал взаимодействия

В пылевой плазме необходимо учитывать коллективные явления, приводящие к эффектам экранировки поля заряда в плазме. В связи с этим при изучении свойств газоразрядной плазмы широко используется метод эффективного потенциала или псевдопотенциала взаимодействия. В данной работе использовался потенциал Дебая-Хюккеля, описывающий эффекты экранировки на больших расстояниях.

$$\Phi_{DH}(r) = \frac{Z_\alpha Z_\beta e^2}{r} e^{-\frac{r}{r_D}} \quad (1)$$

где r – расстояние между частицами, Z_α и Z_β – зарядовые числа частиц сортов α и β ,

$$r_D = \left(\frac{k_B T}{4\pi e^2 \sum_{e,i} n Z^2} \right)^{1/2} - \text{Дебаевский радиус}$$

экранирования.

Потенциал взаимодействия Дебая-Хюккеля иногда называют потенциалом Юкава, в безразмерной форме он записывается в следующем виде:

$$\Phi(R) = \frac{\Gamma}{R} e^{-\kappa R}, \quad (2)$$

где $\Gamma = (Z_d e)^2 / (a k_B T_d)$ – параметр связи,

$R = \frac{r}{a}$ – безразмерное расстояние в единицах

среднего расстояния между пылевыми части-

цами (a), $\kappa = \frac{a}{r_D}$ – параметр экранировки.

Основные уравнения

При расчетах параметров буферной плазмы были использованы правило сумм для парной корреляционной функции пылевой компоненты (3) и условие квазинейтральности плазмы сложного состава (4).

Уравнение правил сумм для парной корреляционной функции с учетом пылевой компоненты записывается следующим выражением [3]:

$$n_d = \int [-A g^{de}(r) + g^{di}(r) - B g^{dd}(r)] dV = 1, \quad (3)$$

а уравнение квазинейтральности имеет вид:

$$n_i = n_e + Z_d n_d, \quad (4)$$

где $A = \frac{n_e}{n_e + n_d}$, $B = \frac{n_d}{n_e + n_d}$, n_i , n_e , n_d – концентрации ионов, электронов и пылевых частиц, Z_d – зарядовое число пылевых частиц, $g^{\alpha\beta}(r)$ – парная корреляционная функция частиц сорта α и β . Парные корреляционные функция определялись в экспоненциальном приближении для оценки получаемых расчетов данным методом:

$$g^{\alpha\beta}(r) = \exp(-\Phi_{\alpha\beta}(r) / k_B T_i), \quad (5)$$

где $\Phi_{\alpha\beta}(r)$ – парный потенциал взаимодействия частиц сортов α и β .

Расчеты

Уравнения (3) и (4) решались совместно, численным методом. Концентрации электронов и ионов выражались через концентрацию и заряд пылевых частиц. На рисунке 1 приведены расчеты в логарифмическом масштабе, полученные на основе численных вычислений.

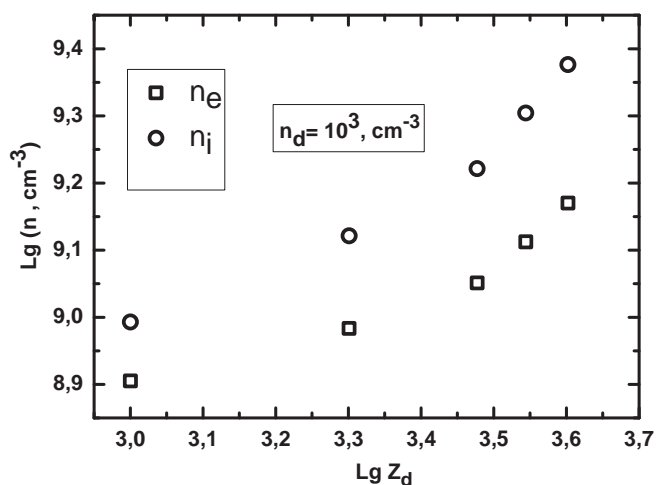


Рисунок 1 – Зависимость концентрации электронов n_e и ионов n_i от заряда пылевых частиц Z_d

На рисунке 2 показаны парные корреляционные функции пылевых частиц, полученные с помощью

обработки видеоизображений плазменно-пылевых структур в экспериментальной работе [4].

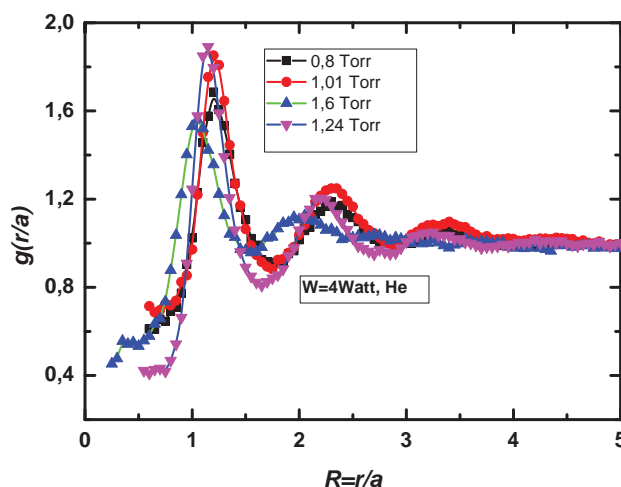


Рисунок 2 – Парные корреляционные функции пылевых частиц, полученные из эксперимента

На рисунке 3 в логарифмическом масштабе представлены результаты вычислений, на основе парной корреляционной функции g^{dd} , полученной из экспериментальных данных пылевой структуры и сравнение с параметрами плазмы,

полученные из экспериментальных данных. Круги и квадраты представляют концентрации электронов и ионов, полученные с помощью экспериментальной парной корреляционной функции, а треугольники – данные, полученные из работ [5].

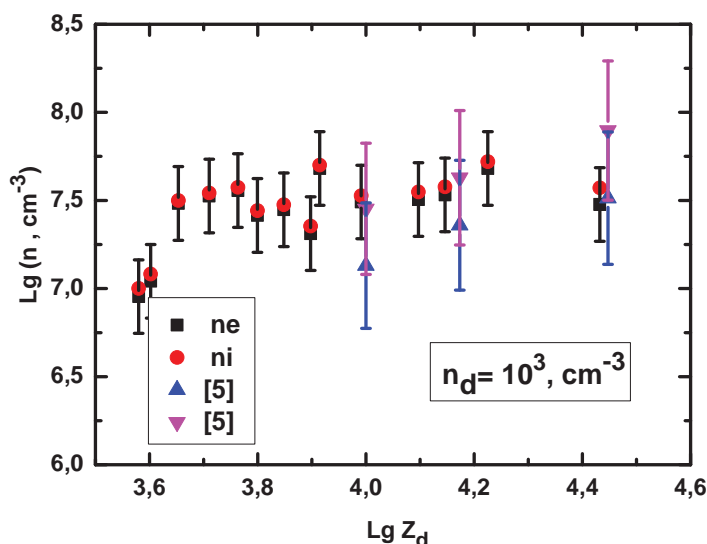


Рисунок 3 – Зависимость концентрации электронов n_e и ионов n_i от заряда пылевых частиц Z_d

Заключение

Были рассчитаны концентрации электронов и ионов в буферной плазме на основе парного потенциала взаимодействия и парных корреляционных функций. Результаты, полученные разными методами: с помощью экспериментальной парной корреляционной функции – бы-

ли сравнены с параметрами буферной плазмы, полученные методом зондовой диагностики и имеют хорошее согласие. Тем самым показана возможность использования данного метода для диагностики параметров буферной плазмы в высокочастотном разряде на основе экспериментальных парной корреляционной функции.

References

- 1 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.
- 2 Kersten, H., Deutsch, H., Stoffels, E., Stoffels, W. W., Kroesen, G. M. W., and Hippler, R. Micro-disperse particles in plasmas: From disturbing side effects to new applications // Contrib. Plasma Phys.– 2001. – Vol. 41. – P.598-609.
- 3 M. Baus and J-P. Hansen Statistical mechanics of simple Coulomb systems// Physics Reports– 1980. – Vol.59, No.1. – P. 1-94.
- 4 Ramazanov T.S., Dzhumagulova K.N., Dosbolayev M.K., Jumabekov A.N. Structural properties of dusty plasma in direct current and radio frequency gas discharges// Phys. Plasmas– 2008. – Vol. 15. – P. 053704-053709.
- 5 Y.A. Ussenov, T.S. Ramazanov, K.N. Dzhumagulova and M.K. Dosbolayev Application of dust grains and Langmuir probe for plasma diagnostics // EPL – 2014. – Vol. 105. – P. 15002.