

(НИИЭТФ, Казахский национальный университет им. аль-Фараби, г. Алматы)

## **ДИАГНОСТИКА ПЫЛЕВОЙ ПЛАЗМЫ НА ОСНОВЕ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ МИКРОСКОПИЧЕСКИХ СВОЙСТВ**

### **Аннотация**

Ввиду широкого применения плазменных технологий в современной микроэлектронике и материало-ведении развитие методов диагностики плазмы является важной научной задачей. В настоящий момент особенно перспективным является экспериментальное и теоретическое исследование свойств пылевой плазмы с целью разработок перспективных технологий по ее использованию в микро и нанoeлектронике, в установках термоядерного синтеза и др. отраслях. В данной работе предложен метод диагностики параметров буферной плазмы на основе экспериментальных данных пылевой структуры, в частности парных корреляционных функций (радиальные функции распределения), концентрации и заряда пылевых частиц. Парную корреляционную функцию пылевой структуры получают из реальных экспериментов с помощью исследования статистической информации о микросостояниях плазменно-пылевых структур. В рамках настоящей статьи на основе сравнения результатов теоретических оценок, значений параметров буферной плазмы с данными, полученными на основе экспериментальных парных функций распределения частиц пылевой плазмы, показана возможность применения правила сумм для диагностики буферной плазмы.

**Ключевые слова:** буферная плазма, пылевая плазма, плазменно-пылевая структура, радиальная функция распределения.

**Кілт сөздер:** буферлі плазма, тозаңды плазма, плазмалы-тозаңды құрылым, радиалды таралу функциясы.

**Keywords:** buffer plasma, dusty plasma, plasma-dust structure, radial distribution function.

Для исследования параметров буферной плазмы численно решалась система уравнений (1), описывающая «правило сумм» для РФР и условие квазинейтральности многокомпонентной плазмы [1].

«Правила сумм» для РФР пылевой компоненты имеет следующий вид:

$$n_d \left[ A g^{de}(r) + g^{di}(r) - B g^{dd}(r) \right] / V = 1$$

$$n_i = n_e + Z_d n_d \quad (1)$$

коэффициенты  $A$  и  $B$  определяются по формуле:

$$A = \frac{n_e}{n_e + n_d}, \quad B = \frac{n_d}{n_e + n_d}$$

где  $n_i, n_e, n_d$  – концентрации ионов, электронов и пылевых частиц, соответственно;  $Z_d$  – зарядовое число пылевых частиц;  $g^{\alpha\beta}(r)$  – РФР частиц сорта  $\alpha$  и  $\beta$ . Для проверки адекватности предложенного метода в начале РФР определялись следующим выражением:

$$g^{\alpha\beta}(r) = \exp(-\Phi_{\alpha\beta}(r) / kT_i). \quad (2)$$

В качестве потенциала взаимодействия использовался потенциал Дебая-Хюккеля:

$$\Phi_{\alpha\beta}(r) = \frac{Z_\alpha Z_\beta e^2}{r} e^{-\frac{r}{r_{Di}}}. \quad (3)$$

где  $r_{Di}$  – Дебаевский радиус ионов.

Система уравнений (1) была нормализована на концентрацию ионов, ее запись в безразмерном виде приведена в формуле (4):

$$n_d^* \left[ \frac{n_e^*}{n_e^* + n_d^*} g^{de}(R) + g^{di}(R) - \frac{n_e^*}{n_e^* + n_d^*} g^{dd}(R) \right] R^2 dR = 1$$

$$1 = n_e^* + Z_d n_d^* \quad (4)$$

где  $n_e^* = \frac{n_e}{n_i}, \quad n_d^* = \frac{n_d}{n_i}$  – безразмерные концентрации электронов и ионов,

соответственно;  $R = \frac{r}{r_{0i}}$  –

безразмерное расстояние в единицах  $r_{0i}; \quad r_{0i} = \frac{1}{3} \frac{1}{4\pi n_i} \frac{1}{\epsilon}$  – среднее расстояние между ионами.

Из уравнения (1) были найдены концентрации электронов и ионов как функции от концентрации и заряда пылевых частиц. Результаты численных вычислений представлены в логарифмическом масштабе на рисунке 1.

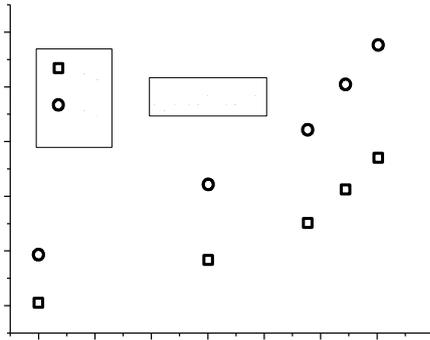


Рисунок 1 – Зависимость концентрации электронов  $n_e$  и  $n_i$  ионов от заряда пылевых частиц  $Z_d$

Следующим шагом является замена в системе уравнении (1) радиальной функции распределения пылевых частиц  $g^{dd}$  функцией, полученной из экспериментальных данных пылевой структуры. На рисунке 2 и 3 приведены радиальные функции распределения пылевых частиц, полученные в экспериментальной работе [2].

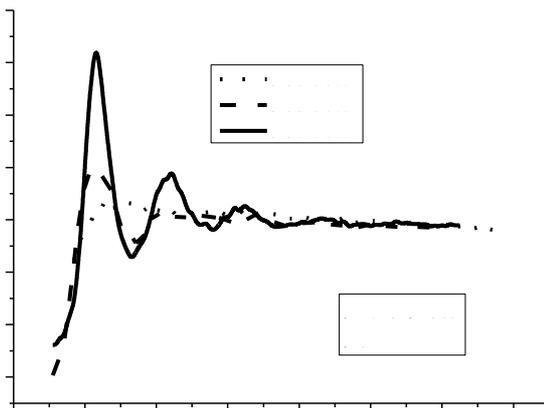


Рисунок 2 – РФР пылевых частиц, полученные из эксперимента

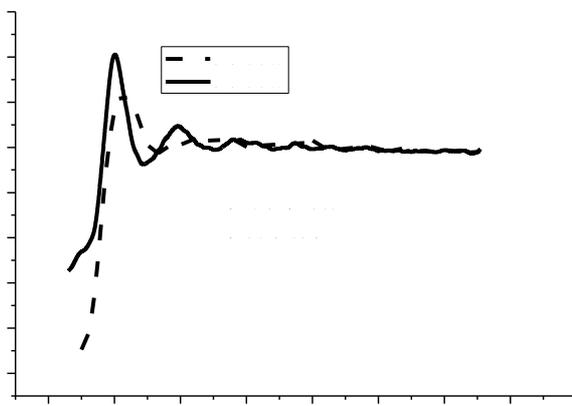


Рисунок 3 – РФР пылевых частиц, полученные из эксперимента

Результаты вычислений и сравнение с экспериментальными данными представлены в логарифмическом масштабе на рисунках 4 и 5.

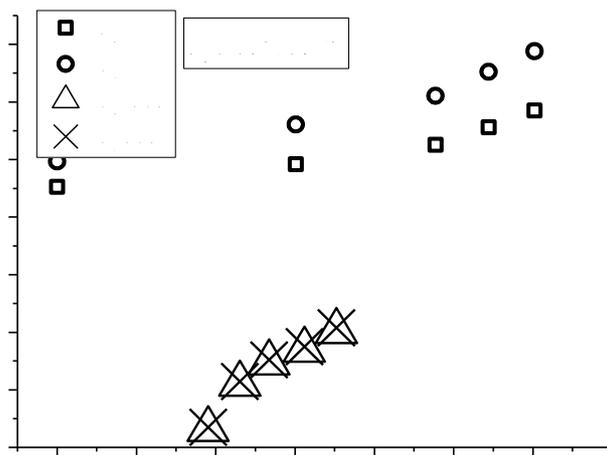


Рисунок 4 – Зависимость концентрации электронов  $n_e$  и  $n_i$  ионов от заряда пылевых частиц  $Z_d$

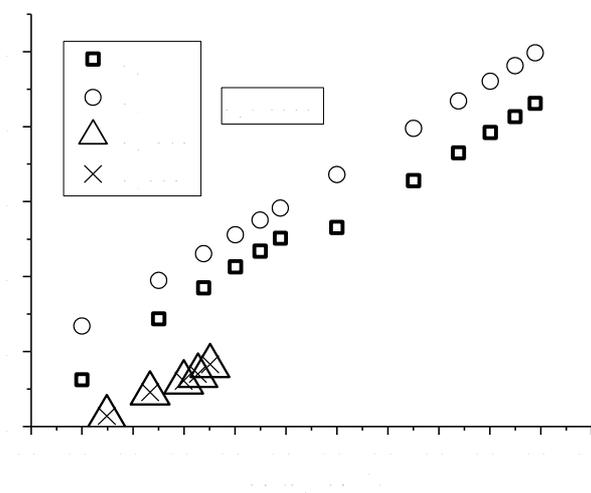


Рисунок 5 – Зависимость концентрации электронов  $n_e$  и  $n_i$  ионов от концентрации пылевых частиц  $n_d$

Здесь круги и квадраты представляют концентрации электронов и ионов, полученные с помощью уравнений (2) и (3), а крестики и треугольники – данные, полученные с помощью экспериментальной РФР.

**Заключение.** Как видно из рисунка, результаты теоретических вычислений и экспериментальные данные являются одного порядка величины. Тем самым показана принципиальная возможность диагностики буферной плазмы в плазменно-пылевых структурах на основе экспериментальных данных парной корреляционной функции.

## ЛИТЕРАТУРА

- 1 Baus M., Hansen J-P. Statistical Mechanics of simple Coulomb systems // Physics Reports. – 1980. – N 1. – P. 1-94.
- 2 Ramazanov T.S., Dzhumagulova K.N., Dosbolayev M.K., Jumabekov A.N. // Phys. Plasmas. – 2008. – Vol. 15. – P. 053704-053709.

## REFERENCES

- 1 Baus M., Hansen J-P., *Physics Reports*, N 1, p.1-94, (1980).
- 2 Ramazanov T.S., Dzhumagulova K.N., Dosbolayev M.K., Jumabekov A.N., *Phys. Plasmas*, 2008, Vol.15, P. 053704-053709.

### Резюме

*М. М. Мұратов, Т. С. Рамазанов, Қ. Н. Жұмағұлова*

(ЭТФҒЗИ, әл-Фараби атындағы Қазақ ұлттық университеті, Алматы қ.)

## ЭКСПЕРИМЕНТАЛДЫ МИКРОСКОПИЯЛЫҚ ҚАСИЕТТЕР НЕГІЗІНДЕГІ ТОЗАҢДЫ ПЛАЗМА ДИАГНОСТИКАСЫ

Қазіргі заманғы микроэлектроникада және материалтануда плазмалық технологиялардың кең қолданыс табуына байланысты, плазма диагностикасының әдістерін дамыту – маңызды ғылыми мәселе болып табылады. Келешегі мол технологияларды жасаудағы тозаңды плазма қасиетін эксперименттік және теориялық түрде зерттеу, оның микро және наноэлектроника, термоядролық синтез қондырғыларында және басқа да салаларда қолданылуы қазіргі таңда аса маңызды болып табылады. Бұл жұмыста плазмалық құрылымның эксперименттік мағлұматтары негізінде, атап айтқанда, тозаңды бөлшектердің қос корреляциялық функция-сы (радиалды таралу функциясы), концентрациясы және заряды, буферлі плазма параметрлерін диагностикалау әдісі ұсынылған. Тозаңды құрылымының қос корреляциялық функциясын, нақты эксперименттерден плазмалы-тозаңды құрылымның микрокүйлері жайлы статистикалық мәліметтерді зерттеу көмегімен алады. Осы мақала көлемінде буферлі плазма параметрлерінің теориялық нәтижесінің мәндерін, эксперимент негізінде алынған тозаңды плазма бөлшектерінің қос таралу функциясы мәліметімен салыстыру негізінде, қосындылар ережесін буферлі плазманың диагностикасына қолдану мүмкіндігі көрсетілген.

**Кілт сөздер:** буферлі плазма, тозаңды плазма, плазмалы-тозаңды құрылым, радиалды таралу функциясы.

### Summary

*M. M. Muratov, T. S. Ramazanov, K. N. Dzhumagulova*

(IETP, al-Farabi Kazakh National University, Almaty)

THE DIAGNOSTICS OF DUSTY PLASMA  
ON THE BASIS OF EXPERIMENTAL MICROSCOPIC PROPERTIES

Due to the wide application of plasma technologies in modern microelectronics and material sciences development of plasma diagnostics methods is an important scientific task. An experimental and theoretical study of dusty plasma properties to develop of perspective technologies for its use in micro-and nanoelectronics, in thermonuclear fusion facilities and other industries currently is particularly promising. In this paper, is introduced a method of diagnostics of buffer plasma parameters based on experimental data of dusty structures, in particular the pair correlation function (radial distribution function), number density and charge of dust particles. The pair correlation function of the dust structure is obtained in real experiments by investigating statistical information on microstates of plasma-dust structures. Within present article based on a comparison of the values of theoretical estimations of buffer plasma parameters with the data obtained from the experimental pair distribution functions of particles of dusty plasma the application possibility of the sum rules for the diagnostics of buffer plasma is shown.

**Keywords:** buffer plasma, dusty plasma, plasma-dust structure, radial distribution function.

*Поступила 27.03.2013г*