

*А. Н. ДЖУМАБЕКОВ, Т. Т. ДАНИЯРОВ, М. К. ДОСБОЛАЕВ,
Е. Б. ЖАНКАРАШЕВ, С. К. КОДАНОВА, С. А. ОРАЗБАЕВ, Т. С. РАМАЗАНОВ*

ИССЛЕДОВАНИЕ ДИНАМИЧЕСКИХ СВОЙСТВ ПЛАЗМЕННО-ПЫЛЕВЫХ ФОРМИРОВАНИЙ В ВЫСОКОЧАСТОТНОМ РАЗРЯДЕ

Приведены результаты экспериментального исследования динамических свойств пылевой компоненты в комплексной плазме высокочастотного емкостного разряда. На основе анализа распределения скоростей пылевых частиц показано линейное возрастание их кинетической температуры при увеличении мощности разряда. Результаты данной работы служат основой для изучения других динамических свойств пылевой системы, таких как автокорреляционная функция скоростей и транспортные коэффициенты.

Введение. Комплексная (пылевая) плазма – это ионизованный газ, содержащий частицы твердого вещества микронного размера. Изучение физических свойств пылевой плазмы вызывает большой интерес, так как она находит практическое приложение при создании композиционных наноматериалов, в микроэлектронике, в космических технологиях, при термоядерном синтезе [1–5].

Пылевые макрочастицы, внесенные в плазменную среду или появившиеся самостоятельно за счет эрозии электродов или стеночного материала плазменного реактора, заряжаются электрически. Зарядка пылевых частиц осуществляется за счет поглощения электронных и ионных потоков. Ввиду высокой подвижности электронов пылевые частицы, как правило, приобретают отрицательный заряд (порядка 10^4 элементарных зарядов). Наличие большого заряда у пылевых частиц, которое определяет сильное взаимодействие между ними, приводит в лабораторных условиях к формированию упорядоченных структур – т.н. плазменных кристаллов [1–8].

Исследование динамических свойств пылевой плазмы позволяет получить обширную информацию о свойствах системы пылинок. В данной статье динамические свойства пылевой плазмы, созданной в емкостном высокочастотном (ВЧ) разряде, исследуются на основе анализа последовательных конфигураций плазменно-пылевых структур. Особенность данного метода заключается в том, что он позволяет получать информацию без внесения возмущений. Полученная информация используется для расчета распре-

делений пылевых частиц по компонентам и абсолютной величине скоростей. Форма этих распределений позволяет оценить динамические свойства пылевой системы, такие как температура и кинетическая энергия [9, 10].

Эксперимент. Для исследования динамических свойств пылевой плазмы была использована экспериментальная установка на основе емкостного высокочастотного разряда [10–12]. Плоскопараллельные электроды располагаются в ВЧ камере. На нижний электрод подается ВЧ напряжение с частотой 13,56 МГц, а верхний остается заземленным. Диаметр электродов составляет 19 см. Расстояние между электродами 3 см и энерговыход при рабочих мощностях составляет порядка $0,01 \text{ Вт}\cdot\text{см}^3$. В эксперименте используется газ аргон, и давление рабочей среды составляет величину 0,05–2 Торр. В качестве пылинок используются полидисперсные пылевые частицы Al_2O_3 средним радиусом 4 мкм.

Наблюдение пылевой структуры ведется в горизонтальной плоскости в рамках одного слоя с помощью подсветки лазером мощностью $\sim 250 \text{ мВт}$, а также высокоскоростной цифровой видеокамеры. Видеоизображения, полученные с помощью видеокамеры, сохраняются в памяти компьютера для последующей обработки с помощью специальных пакетов программного обеспечения.

Результаты. Типичные изображения плазменно-пылевых структур, наблюдаемых в ВЧ разряде, представлены на рис. 1. Все пылевые структуры на рис. 1 были сформированы при давлении газа $p=0,125 \text{ Торр}$.

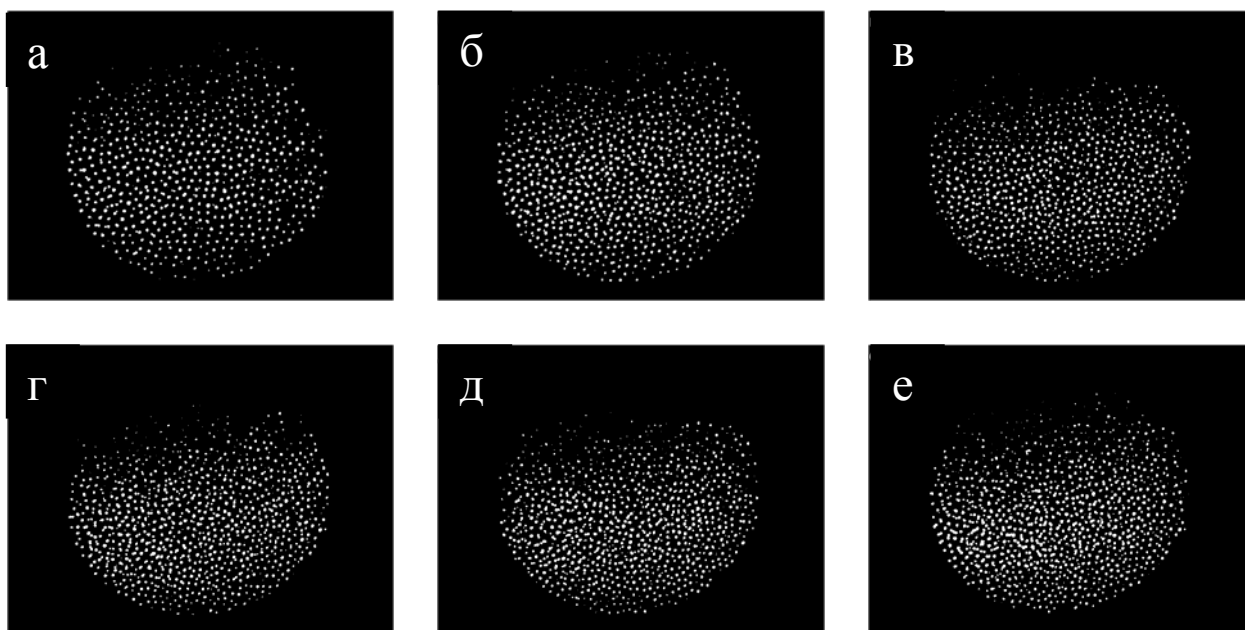


Рис. 1. Изображения плазменно-пылевых структур, сформированных в плазме ВЧ разряда при давлении рабочего газа $p=0,125$ Торр: а – мощность разряда $P=6,25$ Вт; б – мощность разряда $P=8,75$ Вт; в – мощность разряда $P=11,25$ Вт; г – мощность разряда $P=13,75$ Вт; д – мощность разряда $P=16,25$ Вт; е – мощность разряда $P=18,75$ Вт

Как видно из рис. 1, во всех случаях в горизонтальном слое плазменно-пылевой структуры наблюдается формирование плотной конденсированной системы. Можно качественно отметить, что с увеличением мощности ВЧ разряда расстояние между пылевыми частицами уменьшается. Одно из возможных объяснений этого эффекта заключается в том, что при увеличении мощности разряда кинетическая энергия частиц в слое увеличивается, и они за счет сильных колебаний вокруг точки равновесия попадают в тот горизонтальный слой, за которым ведется наблюдение, что создает эффект уплотнения. Также это может быть связано с тем, что при возрастании мощности изменяется глубина электростатического потенциала ловушки, в которой находится пылевая структура. Такое изменение может вызывать уплотнение пылевой структуры. Более глубокое исследование данного вопроса выходит за рамки данной работы и будет проведено в дальнейшем.

Для характеристики динамических свойств пылевой компоненты были рассчитаны распределения пылевых частиц по скоростям:

$$v_x = \frac{\Delta x}{\Delta t},$$

$$v_y = \frac{\Delta y}{\Delta t},$$

$$v = \sqrt{v_x^2 + v_y^2},$$

где v_x и v_y – компоненты скорости по оси x и y ; Δx и Δy – смещения по осям x и y в плоскости наблюдения; Δt – промежуток времени между последовательными кадрами; v – абсолютная величина скорости.

Распределения пылевых частиц по осям x и y , соответствующие рис. 1а–1е, показаны на рис. 2а и 2б, а распределение по абсолютным скоростям – на рис. 3.

Анализируя рис. 2 и 3, можно отметить, что распределение пылевых частиц по скоростям соответствует максвелловскому распределению [8, 9]. С увеличением мощности разряда изменение формы функций распределения соответствует увеличению температуры. Такое поведение связано с тем, что в этом случае происходит разогрев частиц, который является следствием увеличения температуры буферного газа. Это приводит к тому, что число частиц с большей кинетической энергией в системе становится больше.

На основе полученных функций распределения абсолютных скоростей была проведена оценка

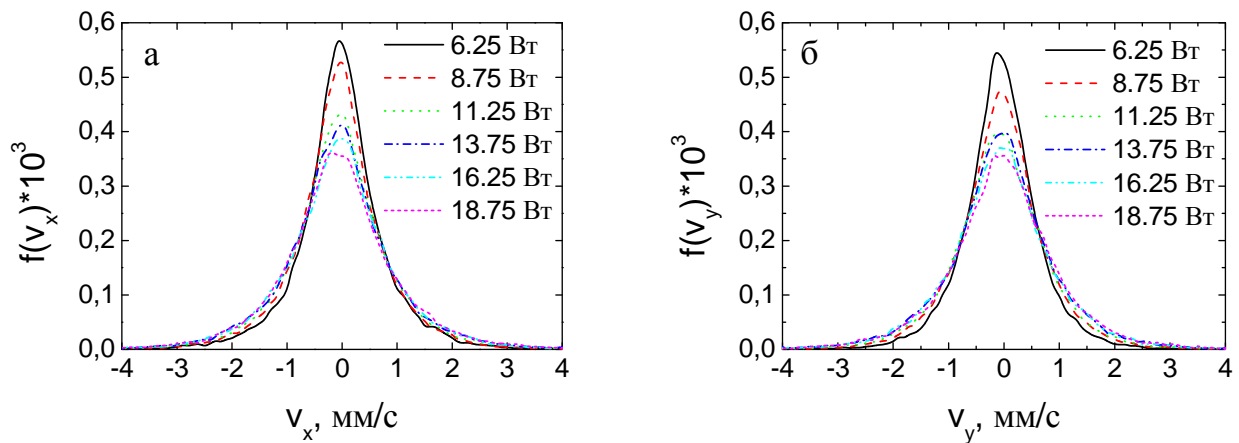


Рис. 2. Распределения скоростей пылевых частиц в плазме высокочастотного разряда: а – распределение скорости пылевых частиц по оси x ; б – распределение скорости пылевых частиц по оси y

температуры пылевых частиц. Температура системы пылевых частиц была определена из наиболее вероятной скорости $v_g = \sqrt{2k_B T_d / m_d}$ [9]. Здесь T_d – температура пылевых частиц; k_B – постоянная Больцмана; m_d – масса пылевой частицы. На рис. 4 представлена зависимость температуры пылевых частиц от мощности ВЧ разряда.

Анализируя рис. 4, можно отметить, что при увеличении мощности разряда температура пылевых частиц возрастает линейно. Значение температуры пылинок в плазме варьируется в пределах 0,05–0,2 эВ, что хорошо согласуется с данными других авторов [8].

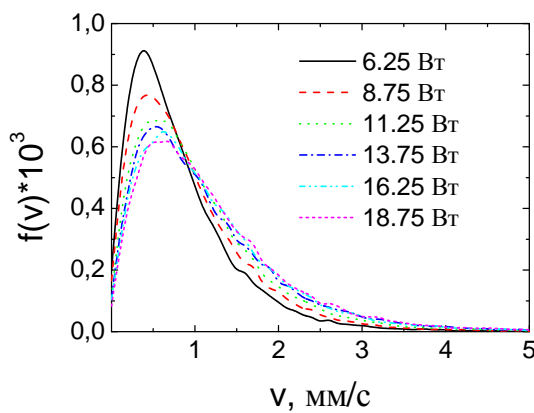


Рис. 3. Распределения скоростей пылевых частиц по абсолютным величинам

Наблюдение плазменно-пылевых формирований в ВЧ разряде позволяет изучить динамические свойства пылевой плазмы. К таким свойствам относятся скорость пылевых частиц и их кинетическая температура. Как показывают результаты данной работы, основанные на анализе функций распределения пылевых частиц по скоростям, температура пылевой компоненты возрастает пропорционально мощности ВЧ разряда.

В дальнейшем представляет интерес исследование других динамических свойств пылевых частиц, таких как автокорреляционная функция скоростей, коэффициенты вязкости и диффузии, а также эффекты самоорганизации.

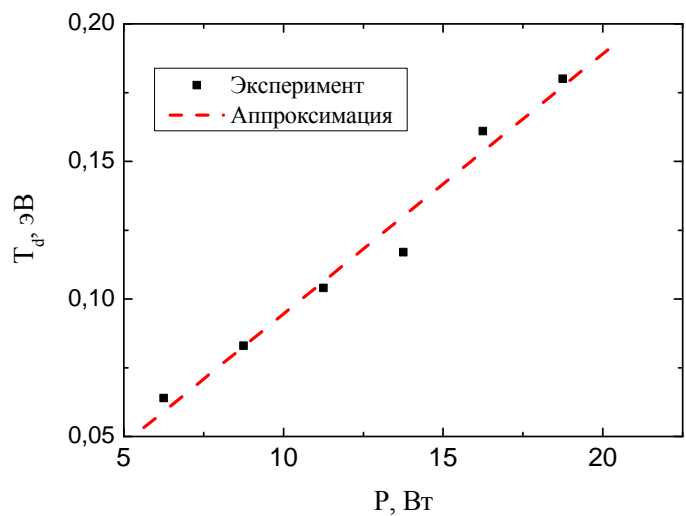


Рис. 4. Зависимость температуры пылевых частиц от мощности ВЧ разряда. Экспериментальные значения отмечены квадратными точками, а пунктирная линия соответствует линейной аппроксимации

Заключение. В данной работе проведены эксперименты по исследованию динамических свойств плазменно-пылевых образований в плазме высокочастотного разряда. На основе изучения конфигураций пылевых структур получены функции распределения скоростей пылевых частиц по компонентам и абсолютной величине скоростей. Определена зависимость температуры пылевых частиц от мощности ВЧ разряда. Результаты данной работы служат основой для дальнейшего изучения динамических свойств пылевой плазмы с целью определения автокорреляционных функций пылевых частиц и транспортных коэффициентов пылевой компоненты комплексной плазмы.

Данная работа выполнена за счет средств грантов МОН РК ОС-1.1 и МП-1/2008.

ЛИТЕРАТУРА

1. Thomas H., Morfill G., Demmel V., Goree J., Feuerbacher B., Mohlmann D. // Phys. Rev. Lett. 73, 652 (1994).
2. Chu J.H., Lin I. // Physica A 205, 183 (1994).
3. Цытович В.Н. // УФН. 1997. Т. 197. С. 57.
4. Форттов В.Е., Храпак А.Г., Храпак С.А., Молотков В.И., Петров О.Ф. // УФН. 2004. Т. 174, №5. С. 495-543.
5. Thoma M.H., Kretschmer M., Rothermel H., Thomas H.M., Morfill G.E. // Am. J. Phys. 73, 420 (2005).
6. Quinn R.A., Cui C., Goree J., Piper J.B., Thomas H., Morfill G.E. // Phys. Rev. E 53, R2049 (1996).
7. Kersten H., Thieme G., Frohlich M., Bojic D., Tung D.H., Quaas M., Wulff H., Hippler R. // Pure Appl. Chem. 2005. V. 77, N 2. P. 415-428.
8. Hayashi Y., Tachibana K. // Jpn. J. Appl. Phys. Part 1 33, 804 (1994).
9. Ваулина О.С., Петров О.Ф., Форттов В.Е., Чернышев А.В., Гавриков А.В., Шахова И.А., Семенов Ю.П. // Физика Плазмы. 2003. Т. 29, №8. С. 698-713.
10. Melzer A., Homann A., Piel A. // Physical Review E, 53, N 3. 2757 (1996).
11. Ramazanov T.S., Dzhumagulova K.N., Jumabekov A.N., Dosbolayev M.K. // Phys. Plasmas 15, 053704 (2008).
12. Maiorov S.A., Ramazanov T.S., Dzhumagulova K.N., Jumabekov A.N., Dosbolayev M.K. // Phys. Plasmas 15, 093701 (2008).

Резюме

Жоғары жиілікті көлемдік разрядтағы комплекстік плазмадағы тозанды құраушысының динамикалық қасиеттерін тәжірибелік зерттеу жұмыстарының нәтиже-лері келтірілген. Тозанды бөлшектердің жылдамдықтары бойынша таралуын талдау негізінде, қуатты өсіргенде олардың (тозанды бөлшектердің) температураларының сызықты түрде өсетіндігі көрсетілген. Берілген жұмыстың нәтижелері жылдамдықтардың автокорреляциялық функциясы және тасымалдау коэффициенттері сияқты тозанды жүйенің басқа да динамикалық қасиеттерін зерттеуге негіз бола алады.

Summary

In present paper dynamical properties of dust component in complex plasma in radio frequency glow discharge were studied. The linear increase of dust temperature with increasing of discharge power was shown on the basis of analysis of dust particles' velocity distribution. Results of present work can be basis in the investigations of other dynamical properties of dust system like velocity autocorrelation function and transport coefficients.

КазНТУ им. аль-Фараби,
г. Алматы

Поступила 15.04.09г.