

ИССЛЕДОВАНИЕ СТРУКТУРНЫХ СВОЙСТВ ПЛАЗМЕННО–ПЫЛЕВЫХ ОБРАЗОВАНИЙ В ЕМКОСТНОМ ВЫСОКОЧАСТОТНОМ РАЗРЯДЕ

А.Н. Джумабеков

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

В работе приведены результаты экспериментального исследования структурных свойств пылевой компоненты в комплексной плазме высокочастотного емкостного разряда. Показана возможность исследования фазового перехода «кристалл-жидкость» пылевой структуры на примере анализа парных корреляционных функций распределения и спектров пространственной плотности пылевых частиц.

Введение

Комплексная плазма, также называемая пылевой плазмой, состоит из помещенных в плазменную среду макроскопических частиц размером до 200 микрон и является уникальным физическим объектом для изучения многих явлений в физике сильновзаимодействующих систем [1-3]. Рост интереса к пылевой плазме, который наблюдается в последние годы, также обусловлен появлением практических приложений пылевой плазмы в таких областях, как создание композиционных наноматериалов, микроэлектроника, управляемый термоядерный синтез, космические технологии [4].

Пылевые макрочастицы, внесенные в плазменную среду или появившиеся самостоятельно за счет эрозии электродов или стеночного материала плазменного реактора, заряжаются электрически. Данный процесс может протекать за счет электронных и ионных потоков на поверхность частиц, фото- и термоэмиссии, а также радиоактивного облучения пылинок. Как правило, в лабораторных экспериментах ввиду высокой подвижности электронов пылевые частицы заряжаются отрицательно до величины порядка 10^4 элементарных зарядов. Наличие большого заряда у пылевых частиц и, как следствие, сильное взаимодействие между ними приводят при определенных условиях к формированию упорядоченных структур – т.н. плазменных кристаллов [5].

Исследование структурных свойств пылевой плазмы является важной научной задачей, так как позволяет достичь углубленного понимания физических процессов в системе. В данной статье структурные свойства пылевой плазмы, созданной в емкостном высокочастотном разряде, исследуются на основе анализа последовательных конфигураций плазменно-пылевых структур. Преимущество данного метода заключается в том, что он позволяет получать информацию о системе без внесения возмущений, т.е. является бесконтактным. Полученная информация используется для расчета парной корреляционной функции (ПКФ) пылевых частиц, которая служит характеристикой структурных свойств пылевой системы [6, 7].

Эксперимент

Для исследования структурных и динамических свойств пылевой плазмы была использована экспериментальная установка на основе емкостного высокочастотного разряда [5], принципиальная схема которой представлена на рис. 1.

Основными элементами экспериментальной установки являются вакуумная камера и ВЧ-генератор (частота: 13,56 МГц; мощность: 0-50Вт). После откачивания воздуха из камеры до давления 10^{-4} Торр, в нее впускается рабочий газ (аргон) так, что давление рабочей среды составляет величину 0,05 – 2 Торр. После этого, на параллельные планарные электроды, находящиеся в камере, подается переменное напряжение, в результате чего зажигается газовый разряд. Затем при помощи автоматизированного контейнера в объем разряда вбрасываются полидисперсные пылевые частицы Al_2O_3 средним диаметром 4 мкм. Попадая в объем плазмы, пылевые частицы образуют слоистую структуру. В одном и том же

слое размеры пылинок являются одинаковыми, т.е. в рамках слоя пылинки образуют однородную по своим физическим свойствам систему.

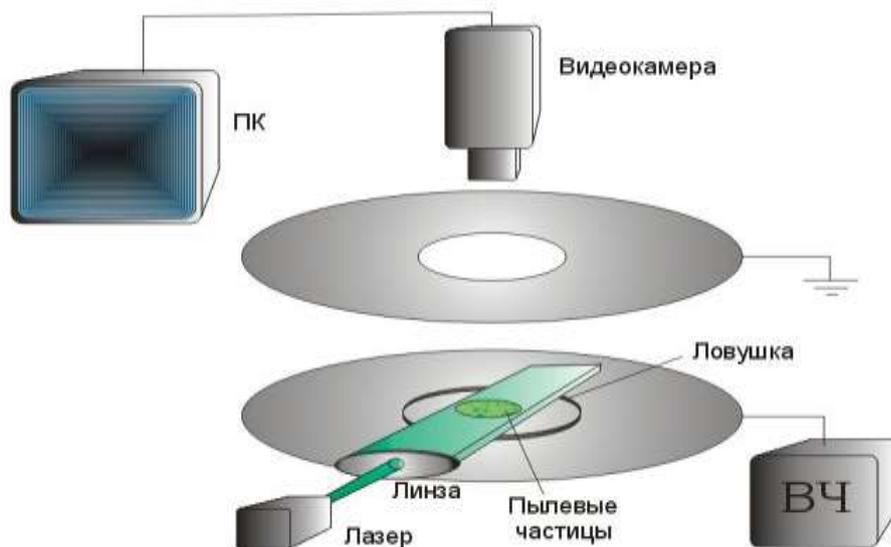


Рис.1. Принципиальная схема экспериментальной ВЧ-установки для исследования свойств плазменно-пылевых структур

Наблюдение пылевой структуры ведется в горизонтальной плоскости в рамках одного слоя с помощью подсветки лазером мощностью ~ 250 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

Характерные изображения плазменно-пылевых структур, наблюдаемых в ВЧ-разряде, представлены на рис. 2а и 2б. Обе пылевые структуры были сформированы при давлении газа $p=0,1$ Торр. Рисунок 2а соответствует мощности разряда $P = 2,5$ Вт, а рисунок 2б - мощность разряда $P = 13,7$ Вт.

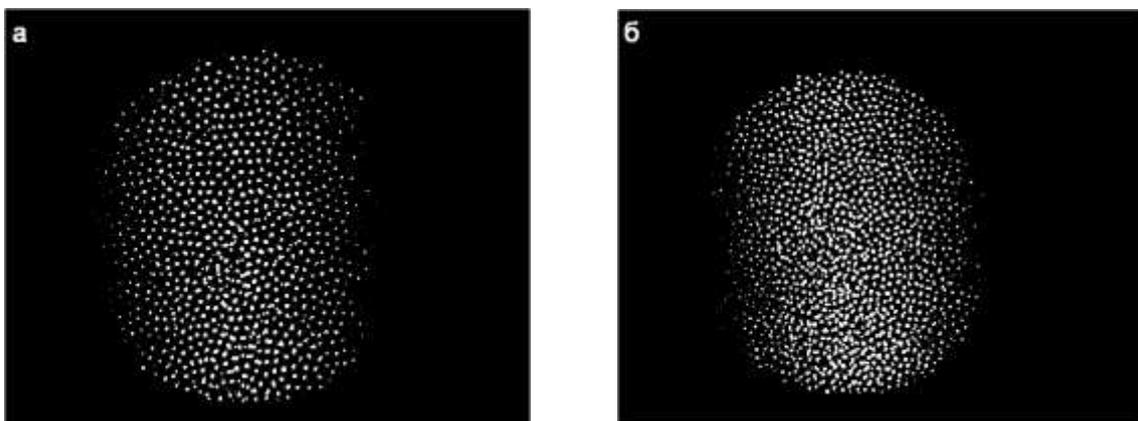


Рис.2. Фотоизображения плазменно-пылевых структур, сформированных в плазме радиочастотного разряда. а) давление газа $p=0,1$ Торр, мощность разряда $P=2,5$ Вт б) давление газа $p=0,1$ Торр, мощность разряда $P=13,7$ Вт.

В обоих случаях в горизонтальном слое плазменно-пылевой структуры наблюдается формирование плотной конденсированной системы с высокой степенью пространственной корреляции. При этом можно качественно отметить, что при увеличении мощности ВЧ-разряда расстояние между пылевыми частицами уменьшается. Одно из возможных объяснений этого эффекта заключается в том, что при возрастании мощности изменяется глубина электростатического потенциала ловушки, в которой находится пылевая структура. Такое изменение может вызывать уплотнение пылевой структуры.

Для характеристики структурных свойств пылевого формирования были рассчитаны ПКФ, которые определяют относительную вероятность нахождения пылевой частицы относительно тестовой частицы согласно выражению:

$$g(r) = \frac{1}{n_d} \cdot \frac{\Delta \bar{N}(r)}{\pi dr(2R - dr)}, \quad (1)$$

где n_d - поверхностная концентрация пылинок на горизонтальном (вертикальном сечении), $\Delta \bar{N}$ - усредненное число частиц в круговом слое.

Нормировка ПКФ выбирается таким образом, что при $r \rightarrow \infty$, $g(r) \rightarrow 1$. ПКФ, рассчитанные для условий разряда, соответствующих рисункам 2а и 2б, показаны на рис.3. Для упрощения сравнения приведена зависимость обеих функций от относительного расстояния $r^* = r/a$, где a – среднее межчастичное расстояние.

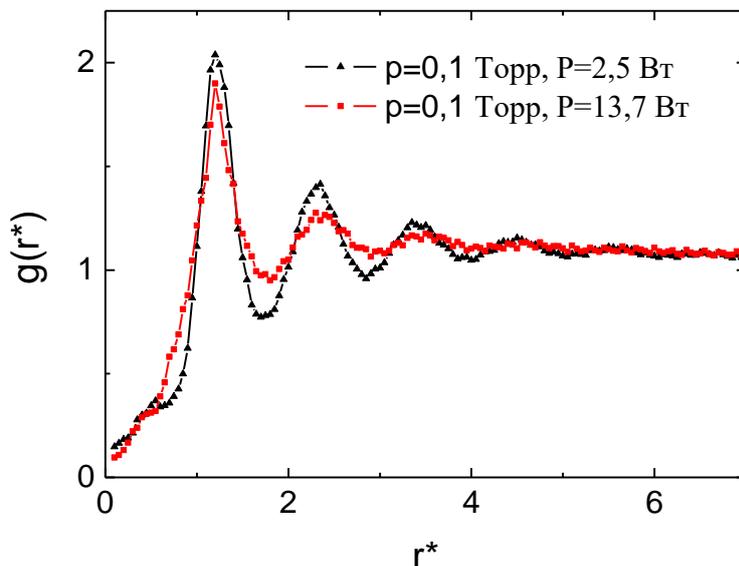


Рис.3. Парные корреляционные функции распределения пылевых частиц в плазме высокочастотного разряда

Анализируя рис.3, можно отметить, что отношение высоты первого максимума к высоте первого минимума ПКФ для $P=13,7$ Вт, $g_{\max} / g_{\min} = 2,67$, что соответствует кристаллическому состоянию пылевой структуры [8]. Для $P=2,5$ Вт, это отношение составляет $g_{\max} / g_{\min} = 1,97$, т.е. система находится в жидком состоянии. Переход из кристаллического состояния в жидкое при увеличении мощности ВЧ разряда связано с

увеличением температуры буферного газа. Разогрев буферного газа приводит к наблюдаемому плавлению плазменно-пылевой структуры.

Для исследования изменения симметрии пылевого формирования был изучен спектр пространственной плотности отдельных конфигураций системы, которые получаются на основе двумерного преобразования Фурье [9]. Получаемые распределения квадрата модуля пространственной плотности соответствуют дифракционной картине Фраунгофера и приведены на рис.4а и 4б для вышеприведенных состояний плазменно-пылевых структур.

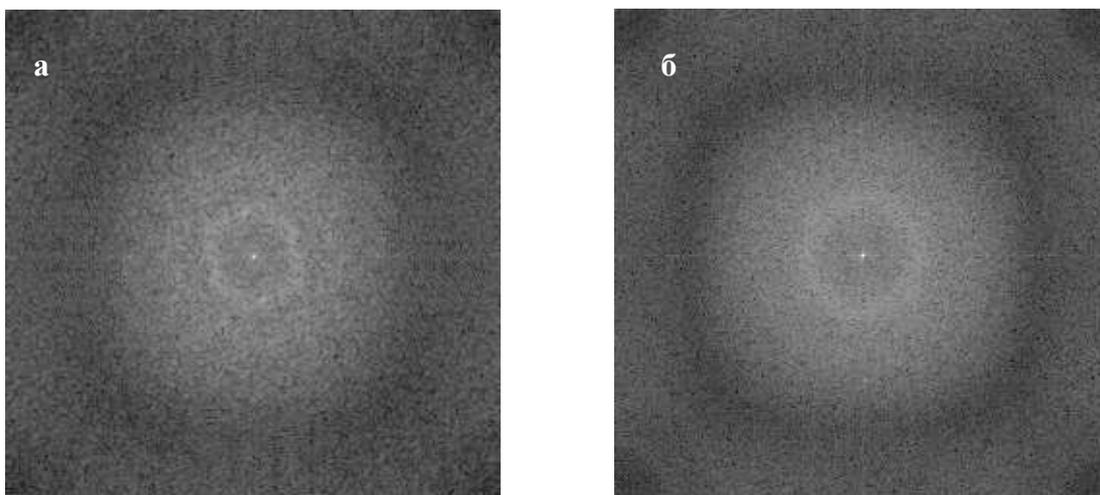


Рис.4. Фурье преобразование плазменно-пылевых образований полученных в плазме высокочастотного разряда. а) давление газа $p=0,1$ Торр, мощность разряда $P=2,5$ Вт б) давление газа $p=0,1$ Торр, мощность разряда $P=13,7$ Вт.

Для $P=2,5$ Вт симметричное распределение пространственной плотности, наблюдаемое на рис.4а в виде шестигранника, свидетельствует о наличии в системе плотноупакованной поликристаллической структуры. Данный вывод подтверждается вышеприведенным анализом ПКФ. Для случая $P=13,7$ Вт (рис.4б) который соответствует жидкому состоянию плазменно-пылевого формирования, симметрия в распределении пространственной плотности отсутствует.

Как показывает результаты данной работы, наблюдение плазменно-пылевых формирований в емкостном ВЧ разряде позволяет изучить динамику фазовых переходов «кристалл-жидкость». Для иллюстрации этого были проведены исследования структурных свойств методами ПКФ и двумерного преобразования Фурье, которые подтвердили наличие фазового перехода при увеличении мощности ВЧ разряда с 2,5 до 14 Вт.

В дальнейшем представляет интерес более подробное исследование структурных свойств пылевых формирований, построение фазовой диаграммы в доступном диапазоне рабочих параметров экспериментальной установки. Также будет проведено изучение динамических свойств: автокорреляционной функции скоростей, транспортных коэффициентов и эффектов самоорганизации.

Заключение

В данной работе проведены эксперименты по исследованию структурных свойств плазменно-пылевых образований в плазме высокочастотного разряда. На основе изучения конфигураций пылевых структур получены парные корреляционные функции распределения пылевых частиц и спектры пространственной плотности пылевых образований. Полученные

результаты подтверждают наличие фазового перехода «кристалл-жидкость» в пылевой структуре при увеличении мощности ВЧ разряда. В дальнейшем планируется провести более углубленное изучение структурных свойств пылевой плазмы для построения фазовой диаграммы, а также исследование динамических свойств пылевой компоненты.

Благодарность

Я хотел бы выразить благодарность проф. Рамазанову Т.С., Досболаеву М.К. и Даниярову Т.Т за помощь, оказанную при выполнении данной работы и обсуждении полученных результатов.

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., and Mohlmann D., Phys. Rev. Lett. 73, 652 (1994).
2. Chu J.H., and Lin I., Physica A 205, 183 (1994).
3. Цытович В.Н. // УФН. 1997. Т.197. С.57.
4. Kersten H., Thieme G., Fröhlich M., Bojic D., Tung D.H., Quaas M., Wulff H., and Hippler R. Pure Appl. Chem., Vol. 77, No. 2, pp. 415–428, 2005.
5. T.S. Ramazanov, K.N. Dzhumagulova, A.N. Jumabekov, and M.K. Dosbolayev, Phys. Plasmas 15, No.5, 053704 (2008).
6. F.V.Baimbetov, T.S.Ramazanov, K.N.Dzhumagulova, E.R.Kadysizov, O.F.Petrov and A.V. Gavrikov. // J.Phys.A: Math. And Gen. 2006, 39, 4521–4525.
7. Фортов В.Е., Храпак А.Г., Храпак С.А., Молотков В.И., Петров О.Ф. // УФН. 2004. Т.174. №5. С.495-543.
8. Ваулина О.С., Петров О.Ф., Фортов В.Е., Чернышев А.В., Гавриков А.В., Шахова И.А., Семенов Ю.П. // Физика Плазмы. 2003. Т.29. №8. С.698-713.
9. Бульба А.В., Луизова Л.А., Пискунов А.А., Соловьев А.В. // ФНТП-2007. 2007. Т.2. С.214.

ЖОҒАРЫ ЖИЛІКТІ СИЫМДЫЛЫҚТЫҚ РАЗРЯДТАҒЫ ТОЗАҢДЫ-ПЛАЗМАЛЫҚ ҚҰРАМАЛАРДЫҢ ҚҰРЫЛЫМДЫҚ ҚАСИЕТТЕРІН ЗЕРТТЕУ

А.Н. Жұмабеков

Жұмыста жоғары жиілікті сиымдылықтық разрядтағы комплекстік плазмадағы тозаңды құрамалардың құрылымдық қасиеттерін тәжірибелік зерттеу жұмыстарының нәтижелері келтірілген. Тозаңды бөлшектердің тәжірибелік қос корреляциялық таралу функцияларын және кеңістіктік тығыздық спектрлерін зерттеу мысалында тозаңды құрамалардың «кристалл-сұйықтық» фазалық ауысуын зерттеу мүмкіндігі көрсетілген.

INVESTIGATION OF STRUCTURAL PROPERTIES OF PLASMA-DUST FORMATIONS IN CAPACITIVE RADIO FREQUENCY DISCHARGE

A.N. Jumabekov

In present paper structural properties of dust component in complex plasma in radio frequency glow discharge were studied. The possibility of investigation of «crystal-liquid» phase transition in dust structure on the basis of analysis of pair correlation distribution functions and spectra of spatial density of dust particles is shown.