

УДК 539.9.082.5

О. Ф. Петров

(Москва)

**ДИАГНОСТИКА ЖИДКОСТНЫХ И КРИСТАЛЛИЧЕСКИХ
СТРУКТУР В СИЛЬНОНЕИДЕАЛЬНОЙ ПЫЛЕВОЙ ПЛАЗМЕ**

Представлены методы и результаты применения методов оптической диагностики для изучения пылевой плазмы различного типа (термическая плазма атмосферного давления, тлеющий разряд постоянного тока, плазма, образованная при воздействии ультрафиолетового излучения) при формировании пространственно упорядоченных структур в расположении макрочастиц.

Введение. Для пылевой плазмы, или плазмы с макроскопическими частицами, характерно то, что частицы в такой плазме могут заряжаться потоками электронов и ионов, а также путем фото-, термо- или вторичной эмиссии электронов с их поверхности [1, 2]. Эмиссия электронов может приводить к положительному электрическому заряду частицы, при этом концентрация электронов в газе возрастает. Если же частицы захватывают электроны, то их заряд отрицателен и возникает противоположный эффект – снижение электронной концентрации.

Благодаря относительно большим размерам пылевых частиц (от сотых долей до нескольких десятков микрон), их заряд Z_d может иметь чрезвычайно большую величину – порядка $10^2 - 10^5$ элементарных зарядов. В результате средняя кулоновская энергия взаимодействия частиц, которая зависит от Z_d^2 , может намного превосходить их среднюю тепловую энергию, что означает возникновение сильнонеидеальной плазмы [3]. Теоретические расчеты равновесных свойств такой плазмы показывают, что при определенных условиях сильное электростатическое взаимодействие частиц и малая энергия их теплового движения приводят к фазовым переходам типа газ – жидкость – твердое тело и возникновению пространственно упорядоченных структур в расположении частиц, аналогичных структурам в жидкости или твердом теле. Электроны и ионы при этом остаются идеальным газом, как и в дебаевской плазме. В отличие от обычной атомарной жидкости или твердого тела макрочастицы являются достаточно большими для эффективного рассеяния света и могут фиксироваться по отдельности видеокамерой и даже наблюдаться невооруженным глазом. Такие кристаллические структуры, сформированные заряженными макрочастицами в плазме, получили название кулоновского, или плазменного кристалла [4].

В ранних экспериментах кристаллические структуры наблюдались в системе заряженных частиц железа и алюминия микронных размеров, удерживаемых переменным и статическим электрическими полями. В более поздних работах (см., например, [5, 6]) описывались наблюдения кулоновской кристаллизации макрочастиц в слабоионизованной плазме высокочас-

тотного (ВЧ) разряда при низком давлении. Энергия электронов в такой плазме составляет несколько электронвольт, а энергия ионов близка к тепловой энергии атомов ($\approx 0,03$ эВ) [7]. В отсутствие эмиссионных процессов заряд пылевой частицы оказывается отрицательным. Это связано с тем, что на нейтральную пылевую частицу направлены потоки плазменных электронов и ионов. Принято считать, что попавшие на поверхность частицы электроны поглощаются, а подлетевшие к поверхности ионы вырывают электроны и рекомбинируют. Вследствие более высокой подвижности электронов их поток значительно превышает поток ионов и частица начинает заряжаться отрицательно. Появляющийся у частицы отрицательный заряд приводит к отталкиванию электронов и притяжению ионов. Заряд частицы меняется до тех пор, пока не сравняются потоки электронов и ионов на ее поверхности.

Таким образом, в экспериментах с ВЧ-разрядом заряд пылевых частиц отрицательный и довольно большой (порядка $10^4 - 10^5$ элементарных зарядов). Облако частиц зависает вблизи твердой поверхности (электрода) с отрицательным потенциалом, где устанавливается равновесие между гравитационными и электростатическими силами. При диаметре облака в несколько сантиметров в вертикальном направлении число слоев частиц составляет несколько десятков, а расстояние между частицами – несколько сотен микрон.

Позже предпринимались попытки получения протяженных трехмерных упорядоченных структур в объеме квазинейтральной плазмы (а не в приэлектродной области), а также при различных механизмах формирования заряда пылевых частиц, в частности при термо- и фотоэмиссии. Так, в условиях квазинейтральности жидкостные структуры наблюдались в термической плазме при атмосферном давлении и температуре около 1700 К. Трехмерные кристаллические структуры были получены и в положительном столбе тлеющего разряда постоянного тока. Упорядоченные структуры также изучались в плазме, сформированной из заряженных макрочастиц при воздействии ультрафиолетового излучения. Исследования последней проводились в условиях микрогравитации на борту космической станции «Мир».

Таким образом, при изучении пылевой плазмы вместе с исследованием газовой фазы необходима диагностика параметров макрочастиц, которые, наряду с параметрами плазмы (концентрация и температура электронов, ионов и нейтралов), определяют ее основные свойства (электрофизические, оптические, термодинамические). Если параметры газовой фазы могут быть найдены методами, ранее уже успешно использованными при изучении газовой плазмы (при этом следует учесть возможное возмущающее влияние макрочастиц на результаты измерений), то диагностика макрочастиц требует разработки и применения своих, специфичных методов для определения таких параметров, как размеры, концентрация, показатель преломления, температура поверхности и кинетическая температура (средняя кинетическая энергия), а также заряд и пространственные структуры частиц. Рядом преимуществ обладают оптические методы диагностики. Это высокая точность, отсутствие воздействия на измеряемый объект, быстрое действие, возможность применения автоматической обработки данных и получения их в реальном времени.

В данной работе представлены методы и результаты применения диагностики для изучения пылевой плазмы различного типа (термическая плазма атмосферного давления, тлеющий разряд постоянного тока, плазма, образованная при воздействии ультрафиолетового излучения) при формировании пространственно упорядоченных структур в расположении макрочастиц.

Пространственно упорядоченные структуры в термической плазме. Термическая плазма представляет собой низкотемпературную плазму, в которой температуры электронов, ионов и нейтралов равны. В потоке плазмы взвешены частицы двуокиси церия (CeO_2). Температура плазмы 1700–2200 К, давление плазмы атмосферное [8, 9]. Особенностью самого материала двуокиси церия является низкая работа выхода термоэлектронов ($\sim 2,75$ эВ) с ее поверхности. Как результат пылевые частицы заряжаются потоками электронов и ионов из плазмы, а также путем термоэлектронной эмиссии, которая может приводить к положительному заряду частиц. Концентрация электронов 10^9 – 10^{11} см⁻³.

Диагностика плазмы проводилась как зондовыми, так и оптическими методами. Концентрация n , положительных ионов щелочных металлов измерялась методом электрического зонда [10, 11]. Среднеквадратичная погрешность определения концентрации составляла 20 %. Для нахождения локальной концентрации электронов n_e использовался метод, основанный на измерении тока I и продольной напряженности электрического поля E в плазме [12]. Погрешность измерения n_e не превышала 30 %.

Температура газа и концентрация атомов щелочных металлов измерялись традиционными способами: обобщенным методом обращения и методом полного поглощения [8] (среднеквадратичные погрешности не превышали соответственно 1 и 30 %).

Для определения среднего (заутеровского) диаметра D_p и концентрации макрочастиц n_p в струе плазмы применялся оригинальный лазерный метод [13]. Метод основан на измерениях экстинкции (ослабления излучения) в дисперсной среде при малых углах рассеяния и предназначен для нахождения характеристик частиц в диапазоне размеров 0,5–15 мкм. Схема измерений экстинкции оптического излучения включает вращающийся диск с апертурными диафрагмами различного диаметра, расположенными перед фотоприемником (рис. 1). В качестве источника излучения используется He–Ne-лазер ($\lambda = 0,633$ мкм). При ошибке измерений экстинкции около 2 % погрешность восстановления размеров частиц составляет около 3 %, концентрации – 10 %.

Анализ упорядоченных структур проводился с помощью бинарной корреляционной функции [5], для получения которой применялся лазерный времяпролетный счетчик (см. рис. 1). Измерительный объем формировался путем фокусировки пучка Ar^+ -лазера ($\lambda = 0,488$ мкм) в приосевую область плазменной струи. Излучение, рассеянное отдельными частицами под углом 90° при пересечении ими лазерной перетяжки, собиралось объективом и направлялось на входную щель монохроматора шириной 15 мкм. Диаметр измерительного объема не превышал 10 мкм. Полученные импульсные сигналы затем обрабатывались для расчета бинарной корреляционной функции $g(r)$, которая характеризует вероятность нахождения частицы на расстоянии $r = V_p t$ от данной. Здесь t – время; V_p – средняя скорость частиц ($V_p \approx V_g$ для частиц микронных размеров [14]). Анализ $g(r)$ позволяет описать пространственную структуру и межчастичную корреляцию частиц.

С помощью диагностических измерений получены данные о таких параметрах плазмы, как концентрация положительных ионов и электронов, температура, а также средний диаметр и концентрация макрочастиц. Пространственные структуры макрочастиц анализировались с помощью бинарной корреляционной функции $g(r)$, которая характеризует вероятность находде-

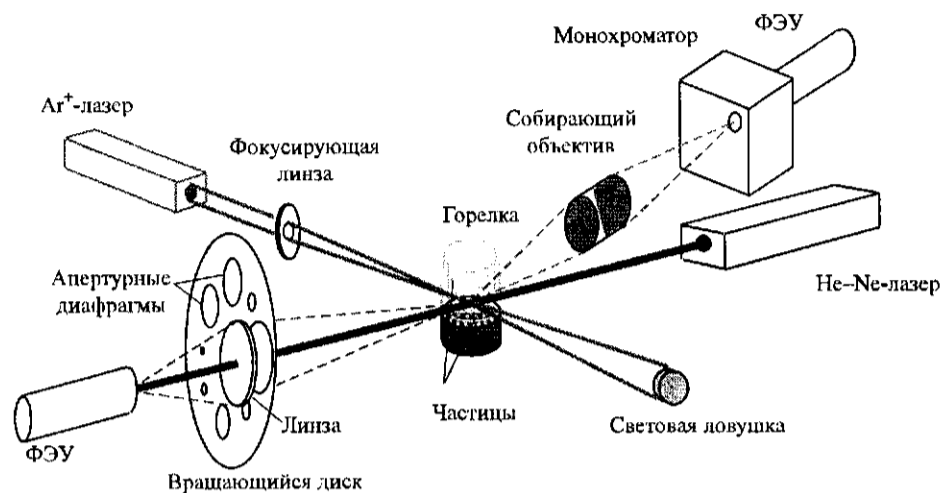


Рис. 1. Схема оптических измерений размеров, концентрации и пространственных структур макрочастиц

ния частицы на расстоянии r от данной и тем самым пространственное расположение частиц – хаотическое или упорядоченное (жидкостные и кристаллические структуры). Для получения корреляционной функции в плазменных потоках применялся лазерный времяпролетный счетчик, действие которого основано на рассеянии света отдельными частицами, движущимися через измерительный объем, сформированный сфокусированным пучком лазера в исследуемой области плазменного потока. Излучение, рассеянное отдельными частицами при пересечении зондирующего поля, собиралось объективом и направлялось на фотоприемник. Полученные импульсные сигналы затем обрабатывались для расчета бинарной корреляционной функции.

Измерения пространственных структур макрочастиц сравнивались с результатами, полученными в аэрозольной струе с частицами CeO_2 при комнатной температуре. Такая система моделирует плазму со случайным (хаотическим) пространственным расположением макрочастиц («газообразная» плазма).

Типичные бинарные корреляционные функции $g(r)$ для частиц CeO_2 в аэрозольной струе при комнатной температуре и в плазме показаны на рис. 2. Хорошо видно, что корреляционные функции для аэрозольной струи (рис. 2, *a*) и плазмы при температуре $T_p = 2170 \text{ K}$ и концентрации макрочастиц $n_d = 2,0 \cdot 10^6 \text{ см}^{-3}$ (рис. 2, *b*) практически не отличаются. Следовательно, частицы в плазме являются слабо взаимодействующими и образование упорядоченных структур оказывается невозможным.

При более низкой температуре плазмы ($T_p = 1700 \text{ K}$) и более высокой концентрации частиц ($n_d = 5,0 \cdot 10^7 \text{ см}^{-3}$) корреляционная функция, как показано на рис. 2, *c*, принимает вид, характерный для жидкости. В этих условиях концентрация ионов ($n_i \sim 10^9 \text{ см}^{-3}$) примерно на порядок ниже концентрации электронов ($n_e \sim 5 \cdot 10^{10} \text{ см}^{-3}$). Заряд частиц, полученный из условия квазинейтральности, положительный и составляет величину около 1000 эл. Относительно слабая упорядоченность структуры в эксперименте (см. рис. 2, *c*) может быть объяснена конечным временем существования плазмы (около

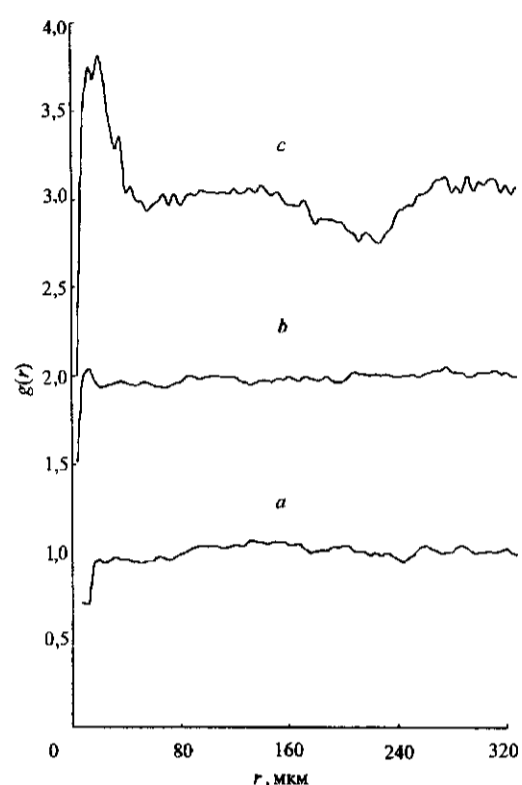


Рис. 2. Бинарная корреляционная функция $g(r)$ для частиц CeO_2 в воздушной струе при комнатной температуре $T_g \approx 300\text{K}$ (a) и в плазме ($Z_p = 500$) при температуре $T_g = 2170\text{K}$ (b) и 1700K (c)

20 мс), так что процесс формирования структуры не успевает полностью завершиться.

Трехмерные кристаллические структуры макрочастиц в тлеющем разряде постоянного тока. В противоположность термической плазме тлеющий разряд является неизотермической газовой плазмой при комнатной температуре и низком давлении. Эксперименты проводились с тлеющим разрядом постоянного тока в неоне, при давлении газа от долей до нескольких торр и в разрядных токах от долей до нескольких миллиампер.

Наблюдения структур пылевых частиц выполнялись в положительном столбе тлеющего разряда со стоячими стратами – неподвижными зонами неравномерной светимости, регулярно чередующимися с темными промежутками, с характерным масштабом порядка нескольких сантиметров [10]. Концентрация электронов, их распределение по энергии, а также электрическое поле сильно неоднородны по длине страты. Электрическое поле относительно велико в голове (светящейся части) страты и мало вне этой области. Стенки разрядной трубки также имеют высокий плавающий потенциал. Таким образом, в голове каждой страты формируется электростатическая ловушка, которая при вертикальном положении разрядной трубки способна удерживать мелкодисперсные частицы в области положительного столба разряда, а сильное радиальное поле препятствует их выпадению на стенки разрядной трубки.

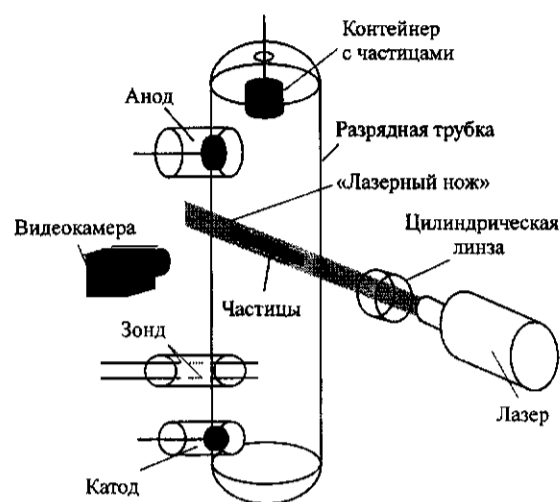


Рис. 3. Схема экспериментальной установки для изучения упорядоченных структур в газоразрядной плазме

Схема установки приведена на рис. 3. Визуализация частиц осуществлялась с помощью их подсветки в горизонтальной или вертикальной плоскости зондирующим лучом аргонового лазера. Излучение, рассеянное частицами, наблюдалось с помощью видеокамеры (в случае горизонтального пучка — под углом 45° , а в случае вертикального пучка — под углом 90°). Отдельные частицы также можно было видеть невооруженным глазом. Сигнал с видеокамеры записывался на видеоманитон.

Процесс формирования структуры выглядит следующим образом: после введения микронных частиц из контейнера в область локализации разряда в стеклянной трубке частицы, заряжающиеся в плазме, проскакивают положение равновесия, а затем в течение нескольких секунд «всплывают» и выстраиваются в структуру, сохраняющуюся сколь угодно долго при неизменных параметрах разряда [11]. В положительный столб разряда вводились частицы нескольких типов: это и полые микросферы из боросиликатного стекла диаметром $50\text{--}60\text{ мкм}$, и полидисперсные частицы Al_2O_3 размерами $3\text{--}5\text{ мкм}$, и монодисперсные частицы меламинформальдегида диаметром $1,87\text{ мкм}$.

Частицы выглядят как облако в центре страты. Обычно наблюдается одновременно несколько таких облаков в соседних стратах. Диаметр облака составлял $5\text{--}10\text{ мм}$ для стеклянных микросфер и увеличивался до 20 мм для частиц Al_2O_3 . Частицы располагались в $10\text{--}20$ (для стеклянных микросфер) и более (для частиц Al_2O_3) плоских слоев. В вертикальной плоскости частицы формировали цепочки. Типичные изображения пространственного скопления частиц Al_2O_3 в вертикальной и горизонтальной плоскостях представлены на рис. 4. Расстояния между слоями лежат в диапазоне $250\text{--}400\text{ мкм}$, расстояния между частицами в горизонтальной плоскости — $350\text{--}600\text{ мкм}$, что соответствует концентрациям частиц $n_d \sim 10^3\text{--}10^4\text{ см}^{-3}$. Видно, что наблюдаемая структура частиц является трехмерной и кристаллической [12].

Варьированием параметров разряда (давления и тока) можно изменять форму облака из частиц. Так, уменьшение разрядного тока и давления, как видно из рис. 5, *a–c*, ведет к слиянию двух ближайших эллиптических облаков в цилиндрическую структуру, размеры которой по вертикали составляют

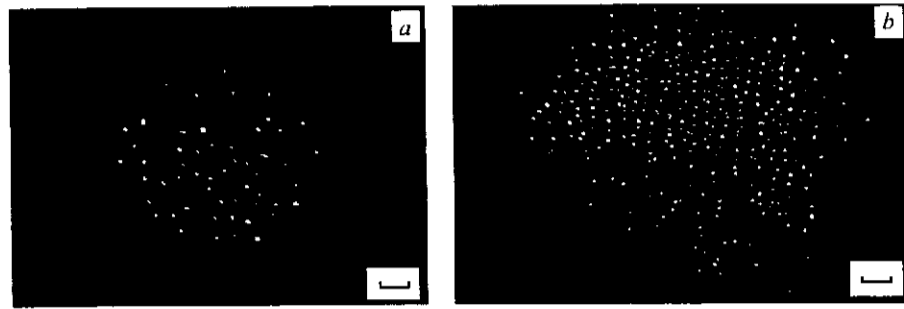


Рис. 4. Видеоизображения частиц Al_2O_3 в горизонтальной (a) и вертикальной (b) плоскостях при разрядном токе 1,2 мА и давлении 0,2 Торр. Масштаб соответствует 1 мм

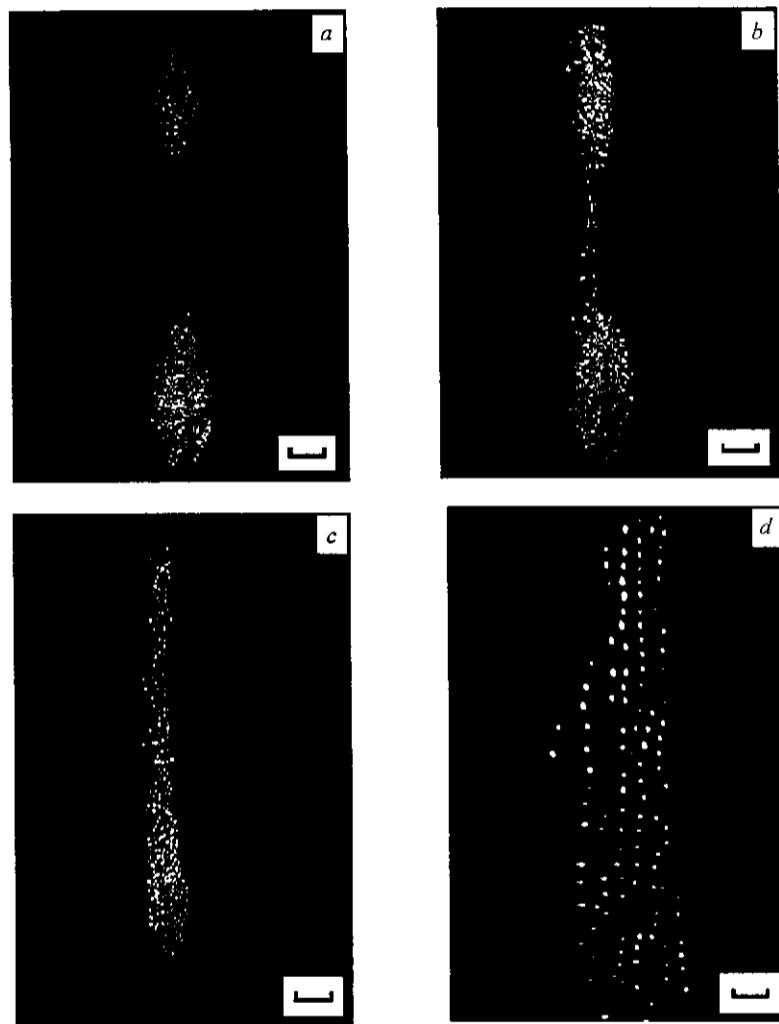


Рис. 5. Видеоизображения стеклянных микросфер в вертикальной плоскости при различном разрядном токе и давлении: a—0,5 мА и 0,47 Торр; b—0,5 мА и 0,44 Торр; c—0,4 мА и 0,37 Торр; d—увеличенный фрагмент цилиндрической структуры на рис. c. Масштаб на рис. a—c соответствует 3 мм, на рис. d—1 мм

несколько десятков сантиметров. На рис. 5, *d* показан увеличенный фрагмент такой цилиндрической структуры.

При изменении тока может наблюдаться переход из кристаллического состояния в жидкость и затем в газ (происходит «плавление» кристалла). Так, для частиц Al_2O_3 при давлении 0,3 Торр и токе 0,4 мА (рис. 6, *a*) корреляционная функция обнаруживает дальний порядок с четырьмя хорошо выраженными максимумами, что соответствует «кристаллической» структуре. При увеличении тока почти на порядок до 3,9 мА (рис. 6, *c*) происходит «плавление» плазменного кристалла и обнаруживается лишь ближний порядок – жидкостная структура. Следует заметить, что при этом фазовом переходе расстояние между частицами, равное 250 мкм, остается практически неизменным [13].

В случае малых частиц увеличение их числа при определенных параметрах разряда приводит к формированию структур, где сосуществуют различные области: сильного упорядочивания (плазменные кристаллы), с конвективным и колебательным движением частиц (плазменно-пылевая жидкость) [14]. При этом, как правило, в нижней части структуры наблюдаются колебательные движения частиц в вертикальном направлении (волны плотности частиц) с частотой 25–30 Гц и длиной волны около 1 мм при среднем расстоянии между частицами 200 мкм. Самовозбуждаемые колебания такого рода могут соответствовать неустойчивости пылезвуковых колебаний [15].

Плазма, образованная при воздействии ультрафиолетового излучения, в условиях микрогравитации. Плазма с положительно заряженными частицами может образовываться и при облучении частиц в буферном газе потоком фотонов с энергией, превосходящей работу выхода фотоэлектрона с их поверхности. При определенных условиях в такой системе могут возникать кристаллические структуры. Характерная величина работы выхода фотоэлектрона для большинства веществ не превышает 6 эВ, поэтому фотоны с энергией <12 эВ могут зарядить частицы, не ионизируя при этом буферный газ, такой как гелий или аргон.

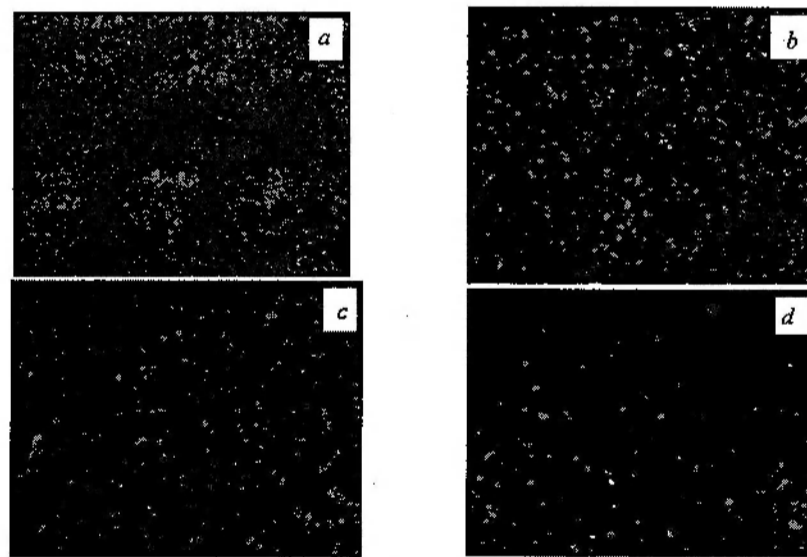


Рис. 6. Последовательные состояния системы частиц Al_2O_3 в ампуле давлением 40 Торр после динамического воздействия на систему: *a*– 2, *b*– 20, *c*– 50, *d*– 110 с

Пылевые структуры при зарядке частиц солнечным излучением исследовались в экспериментах, выполненных в условиях микрогравитации на орбитальном комплексе «Мир» [16]. Изучение процессов формирования упорядоченных структур макрочастиц в таких условиях дает информацию, получить которую невозможно в лабораторных условиях на Земле. Следует также отметить, что интенсивные потоки ультрафиолетового излучения в космическом пространстве могут заряжать пылевые частицы за счет фотоэмиссии, причем макрочастицы размерами в несколько микрон приобретают положительный заряд порядка 10^2 – 10^4 зарядов электрона.

Космический эксперимент проводился со стеклянными ампулами, заполненными неоном, в которых находились сферические частицы бронзы с цезиевым покрытием при различных давлениях – 0,01 и 40 Торр. Перед проведением эксперимента ампула устанавливалась возле иллюминатора станции «Мир». Частицы освещались плоским лазерным пучком – «лазерным ножом» – шириной не более 200 мкм и регистрировались видеокамерой.

Так как частицы осаждаются на стенки ампулы, то эксперимент проводился следующим образом: вначале динамическое воздействие (толчок) на систему и затем релаксация частиц в исходное состояние – их уход на стенки. Наблюдения за частицами показали, что скорости частиц вначале хаотические, а в дальнейшем обычно появляется направленное движение, причем в колбе с высоким давлением движение по определенным траекториям проявляется больше. В некоторых экспериментах наблюдалось колебание частиц на фоне общего поступательного движения, при обработке траекторий частиц периодические изменения величины скорости частицы были обнаружены во всех экспериментах. Такие изменения скорости частиц могут быть связаны с флуктуациями заряда частиц или с динамическим воздействием микроускорений на борту космической станции.

Еще один интересный факт – образование агломератов, количество частиц в которых варьируется от 3–4 до нескольких сотен. При слабом динамическом воздействии агломераты могут слетать со стенок колбы. Основная часть агломератов образуется в объеме колбы в течение нескольких секунд после динамического воздействия, под действием излучения Солнца агломераты распадаются. Агломерация частиц в объеме колбы может быть связана с тем, что в начальные моменты освещения частицы приобретают разноименные заряды: положительные за счет эмиссии фотоэлектронов, отрицательные за счет плазменных электронов, эмитированных с других частиц.

Анализируя динамическое поведение макрочастиц, можно оценить величину их заряда, которая составляет несколько единиц на 10^4 элементарных зарядов. Несмотря на такие высокие заряды, сильную пространственную упорядоченность тем не менее обнаружить не удалось: частицы образовывали только жидкостную структуру.

Заключение. В результате выполненных исследований возникает ряд интересных приложений кристаллических структур. Структуры макрочастиц в плазме могут быть мощным инструментом как для фундаментальных, так и для прикладных задач. Среди фундаментальных следует отметить вклад в изучение многокомпонентной и сильнонеидеальной плазмы (физика плазмы), теоретические подходы к моделированию которой могут быть стимулированы экспериментами с кристаллическими структурами, и найти в них подтверждение. Важными задачами являются анализ дислокаций дефектов решетки, термодинамика решетки с дефектами и при их отсутствии, взаимодействие с лазерным излучением, колебания и волны в упорядочен-

ных структурах, резонансные явления. Результаты таких исследований могут быть использованы для моделирования атомарных или молекулярных кристаллов (физика твердого тела). Изучение фазовых переходов в системах макрочастиц может внести вклад в понимание процесса конденсации (критические явления). Возможность создания малых систем с несколькими макрочастицами, их реакция на внешние поля, анализ их хаотического движения позволят изучить динамические процессы в таких системах.

Среди прикладных укажем на ряд приложений, связанных с микроэлектроникой, в частности, с удалением частиц при производстве микросхем, с моделированием малого кристалла (нанокристалла) при плазменном напылении. Коммерческие применения также могут включать контролируемое с помощью ультрафиолетового излучения осаждение взвешенных в плазме частиц на подложку и тем самым создание покрытий с целью получения материалов с особыми свойствами, в том числе пористых и композитных; формирование частиц с многослойным покрытием из материалов с различными свойствами; создание электрических батарей и лазеров, рабочим телом в которых является аэрозоль частиц из радиоактивного вещества, и т. д.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Sodha M. S., Guha S. Physics of colloidal plasmas // Adv. Plasma Phys. 1971. 4. P. 219.
2. Фортвов В. Е., Якубов И. Т. Неидеальная плазма. М.: Энергоатомиздат, 1994. С. 282.
3. Ichimaru S. Strongly coupled plasmas high-density classical plasmas and degenerate electron liquids // Rev. Mod. Phys. 1982. 54. P. 1017.
4. Ikezi H. Coulomb solid of small particles in plasmas // Phys. Fluids. 1986. 29, N 6. P. 1764.
5. Chu J. H., Lin I. Direct observation of Coulomb crystals and liquids in strongly coupled rf dusty plasmas // Phys. Rev. Lett. 1994. 72, N 25. P. 4009.
6. Thomas H., Morfill G. E., Demmel V. et al. Plasma crystal: Coulomb crystallization in a dusty plasma // Phys. Rev. Lett. 1994. 73, N 5. P. 652.
7. Райзер Ю. П., Шнейдер М. Н., Яценко Н. А. Высокочастотный емкостный разряд. М.: МФТИ и Наука, 1995.
8. Fortov V. E., Nefedov A. P., Petrov O. F. et al. Experimental observation of Coulomb ordered structure in spray of thermal dusty plasmas // Письма в ЖЭТФ. 1996. 63, вып. 3. С. 176.
9. Fortov V. E., Nefedov A. P., Petrov O. F. et al. Particle ordered structures in a strongly coupled classical thermal plasma // Phys. Rev. E. 1996. 54. P. R2236.
10. Райзер Ю. П. Физика газового разряда. М.: Наука, 1987.
11. Фортвов В. Е., Нефедов А. П., Торчинский В. М. и др. Кристаллизация пылевой плазмы в положительном столбе тлеющего разряда // Письма в ЖЭТФ. 1996. 64, вып. 2. С. 86.
12. Fortov V. E., Nefedov A. P., Torchinsky V. M. et al. Crystalline structures of strongly coupled dusty plasmas in dc glow discharge strata // Phys. Lett. A. 1997. 229. P. 317.
13. Нефедов А. П., Петров О. Ф., Фортвов В. Е. Кристаллические структуры в плазме с сильным взаимодействием макрочастиц // УФН. 1997. 167, № 11. С. 1215.
14. Fortov V. E., Molotkov V. I., Nefedov A. P., Petrov O. F. Liquid- and crystalline structures in strongly coupled dusty plasmas // Physics of Plasmas. 1999. 6, N 5. P. 1759.
15. Молотков В. И., Нефедов А. П., Торчинский В. М. и др. Пылезвуковые волны в плазме тлеющего разряда постоянного тока // ЖЭТФ. 1999. 116, вып. 3(9). С. 902.
16. Фортвов В. Е., Нефедов А. П., Ваулина О. С. и др. Пылевая плазма, индуцированная солнечным излучением, в условиях микрогравитации: эксперимент на борту орбитальной станции «Мир» // ЖЭТФ. 1998. 114, вып. 6(12). С. 2004.

*Институт теплофизики
экстремальных состояний РАН,
E-mail: ipdustpl@redline.ru*

*Поступила в редакцию
22 марта 2000 г.*