

УДК 533.9

НИКОЛАЙ ЕВГЕНЬЕВИЧ ЖАРИКОВ

инженер НОЦ «Плазма», Петрозаводский государственный университет

nikolay.zharikov@mail.ru

АНДРЕЙ АНАТОЛЬЕВИЧ ПИСКУНОВ

аспирант кафедры информационно-измерительных систем и физической электроники физико-технического факультета, НОЦ «Плазма», Петрозаводский государственный университет

piskunov@plasma.karelia.ru

СЕРГЕЙ ФЕДОРОВИЧ ПОДРЯДЧИКОВ

кандидат физико-математических наук, доцент кафедры информационно-измерительных систем и физической электроники физико-технического факультета, НОЦ «Плазма», Петрозаводский государственный университет

psf@ptz.ru

АЛЕКСАНДР ВЛАДИМИРОВИЧ СЕМЕНОВ

инженер НОЦ «Плазма», Петрозаводский государственный университет

alexsem26@yandex.ru

АНАТОЛИЙ ДИАМИДОВИЧ ХАХАЕВ

доктор физико-математических наук, профессор, директор НОЦ «Плазма», Петрозаводский государственный университет

alim@karelia.ru

АЛЕКСАНДР ИВАНОВИЧ ЩЕРБИНА

ведущий инженер, Петрозаводский государственный университет

dusty@plasma.karelia.ru

МОДИФИКАЦИЯ СВОЙСТВ ПЛАЗМЕННО-ПЫЛЕВЫХ СТРУКТУР И МИКРОЧАСТИЦ В КОМПЛЕКСНОЙ ПЛАЗМЕ

В статье рассматриваются вопросы модификации плазменно-пылевых структур в тлеющем разряде низкого давления. Показаны изменения параметров структур в процессе их выращивания, варьирования величины разрядного тока. Рассмотрены возможности применения метода оптической диагностики высокого разрешения и системы машинного зрения для исследования характеристик движения отдельных частиц в структуре. С использованием методов атомно-силовой микроскопии установлена модификация поверхности полимерных частиц МФ в плазме разряда.

Ключевые слова: комплексная плазма, тлеющий разряд, упорядоченные плазменно-пылевые структуры, диагностика, плазма, микрочастицы, модификация поверхности

Пылевая плазма [2], [3] представляет собой ионизированный газ, включающий частицы конденсированного вещества. Конденсированная фаза образуется в результате взаимодействия заряженных потоков плазменных частиц с поверхностью твердых тел или специально вводится в плазму извне. Теоретические расчеты равновесных свойств такой плазмы показывают, что при определенных условиях сильное межчастичное взаимодействие приводит к возникновению упорядоченной структуры [4], [5] в расположении макроскопических частиц, аналогичной структурам в жидкости или твердом теле. Взаимодействуя с плазменной средой, частицы конденсированной дисперсной фазы приоб-

ретают значительный электрический заряд [1] и уже в свою очередь влияют на свойства плазмы в области своей локализации. Степень упорядоченности пылевых плазменных структур в большей степени определяется плазменными условиями, а внутренние характеристики пылевого образования, такие как межчастичные расстояния, объем пылевого облака и, соответственно, количество частиц, вовлеченных в структуру, зависят от материала частиц и их размеров, сорта газа и разрядных условий.

Возникновение упорядоченной пылевой структуры в плазме газового разряда существенно усложняет физику процессов ввиду возникновения большого количества взаимодействий

пылевой компоненты с плазмой как электрической, так и неэлектрической природы. Поэтому проведение многофакторных экспериментов, включающих в себя одновременную регистрацию характеристик комплексной плазмы и пылевого образования, позволит развить представления о физике данного явления. Для диагностики объектов плазмы в лаборатории используется комплексный подход, связанный с применением широкого набора диагностических методов, таких как оптические, спектральные, машинное зрение, масс-спектрометрия, рентгеноструктурный анализ, атомная микроскопия, электронная микроскопия, корреляционный анализ, томография, параметрические воздействия, которые позволяют получать большой объем независимой информации об исследуемом объекте. В настоящей работе представлены исследования, связанные с:

- установлением закономерностей влияния атомно-молекулярного состава среды и, соответственно, плазменных условий, материала макрочастицы на характеристики упорядоченной пылевой структуры;
- изучением механизмов самоорганизации и формирования плазменно-пылевых структур и их характеристик;
- проведением анализа кинетики пылевых плазменных частиц в плазме газовых разрядов;
- изучением влияния взаимодействия плазмы с поверхностью полимерных макрочастиц.

1. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ УСТАНОВКА

Для проведения экспериментальных исследований была создана экспериментальная установка, конфигурация которой схематично представлена на рис. 1.

Установка состоит из следующих основных блоков:

1. Вакуумной системы и газоразрядной трубки, обеспечивающих необходимые вакуумные условия в исследовательском объеме, напуск плазмообразующего газа и возможность образования объекта исследования;
2. Системы питания газоразрядной трубки и элементов, формирующих сигналы о параметрах газового разряда;
3. Системы визуализации частиц и регистрации статических и динамических изображений пылевой структуры;
4. Системы спектральной диагностики;
5. Системы сбора данных и управления экспериментом.

Газоразрядная трубка, применявшаяся в экспериментальных исследованиях, представляет собой стеклянную цилиндрическую трубку (рис. 2) с впаянными в нее никелевыми (Ni) электродами, имеющими форму пустотелого цилиндра высотой и диаметром 25 мм. Внутри трубки установлены два контейнера с макрочастицами (1) (на рисунке показан только один) и фторопла-

стовым сужением (2), предназначенным для создания неоднородности (стратификации) положительного столба.

Система визуализации частиц (3) (рис. 1) предназначена для регистрации сформировавшихся после инжекции частиц в плазму газового разряда структуры. Данная система состоит из блока подсветки пылевого облака и блока регистрации его изображения.

Условия проведения экспериментов

Макрочастицы:

- полидисперсный порошок частиц Al_2O_3 (фракция от 1 до 60 мкм);
- полидисперсный порошок частиц Zn;
- монодисперсный меламинаформальдегид $D = (4.86 \pm 0.07)$ мкм.

Рабочие газы:

- спектрально чистый неон (99.99 %);
- спектрально чистый аргон (99.98 %).

Газовый разряд – стратифицированный тлеющий разряд постоянного тока.

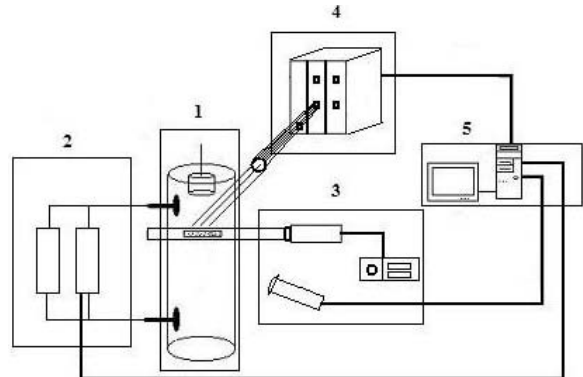


Рис. 1. Схема экспериментальной установки

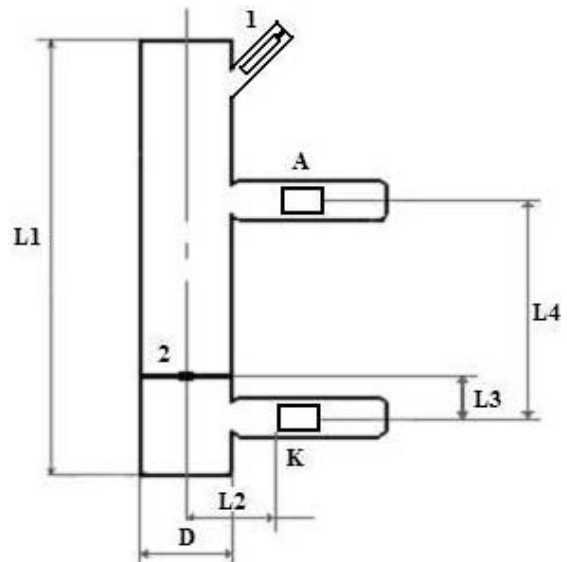


Рис. 2. Схема разрядной трубки:

$D = 28$ мм – внутренний диаметр трубки; $L1 = 500$ мм – длина разрядной трубки; межэлектродное расстояние $(L) = L4 + 2 \cdot L2 = 320 + 2 \cdot 60 = 440$ мм; $L3 = 20$ мм; К – катод, А – анод

2. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ

2.1. Исследование зависимости объема структуры от числа инъекций порошка макрочастиц в плазму разряда

Проведены исследования зависимости объема упорядоченных структур от количества инъекций порошка Al_2O_3 в аргоне и ксеноне при давлении $p = 100$ Па и разрядном токе $I = 1$ мА. Начиная с момента зажигания разряда с периодичностью в 1 минуту проводилась инъекция частиц в плазму (5-кратное встряхивание контейнера с макрочастицами). На рис. 3, 4 приведены изображения структур соответственно в аргоне и ксеноне после 1-й, 2-й и 20-й инъекций.

Во всех экспериментах количество воздействий на контейнер с макрочастицами всегда было постоянным и с равным усилием, поэтому предполагается относительное постоянство количества вбрасываемых частиц. Механизм образования и роста структуры во всех случаях был следующим: после первой инъекции формировалась небольшая структура, являющаяся центром кристаллизации (рис. 3а, 4а) для последующей доставки частиц. В большинстве случаев во время первой инъекции подавляющее число инжектируемых макрочастиц не удерживаются в наблюдаемой страте и падают на дно разрядной трубки. Лишь небольшое количество частиц организуются, формируя небольшую структуру. Эта структура образует ядро, вокруг которого при последующих инъекциях порошка достраиваются новые макрочастицы (рис. 3б, 4б). Было замечено, что независимо от начального количества инжектируемого порошка в плазму размер начальной структуры (ядра) всегда стабилен и имеет в каждом независимом эксперименте при одинаковых газоразрядных условиях (токе, давлении плазмообразующего газа) один и тот же объем (в пределах повторяемости начальных вакуумных условий). По мере роста пылевого образования число частиц, пролетающих мимо структуры и падающих на дно разрядной камеры, сокращается, при этом структура растет обычно как в аксиальном, так и в радиальном направлениях. Частицы, которые при данной конфигурации поля упорядоченной структуры и напряженности внешних полей пылевое образование не способно удержать, сбрасываются вниз.

Объем структуры в аргоне существенно превосходит объем пылевого образования в ксеноне. С ростом объемов структур в аргоне наблюдается постепенное объединение структур в разных стратах путем образования канала из макрочастиц (рис. 3с), который с увеличением количества инъекций растет вместе с объемами структур в радиальном направлении и объединяет две структуры в одну.

Дальнейшее продолжение инъекций частиц цинкового порошка позволило получить в аргоне при давлении газа $P = 80$ Па и токе $I = 0.6$ мА

структуры (рис. 5), которые обладали следующими свойствами:

- упорядоченная структура имеет форму конуса и занимает в пространстве объем до $V \sim 4500$ мм³;
- пылевое образование состоит из нитевидных структур;
- в основании структура практически полностью занимает все сечение токоведущего канала;
- в каждой страте газового разряда растет своя структура. Эти структуры по мере увеличения количества инъекций соединяются друг с другом образуя канал из частиц инжектируемого порошка, зависающих в промежутке между стратами. По этим каналам структуры обмениваются частицами, так что в центре канала макрочастицы движутся вверх, а по краям спускаются вниз.

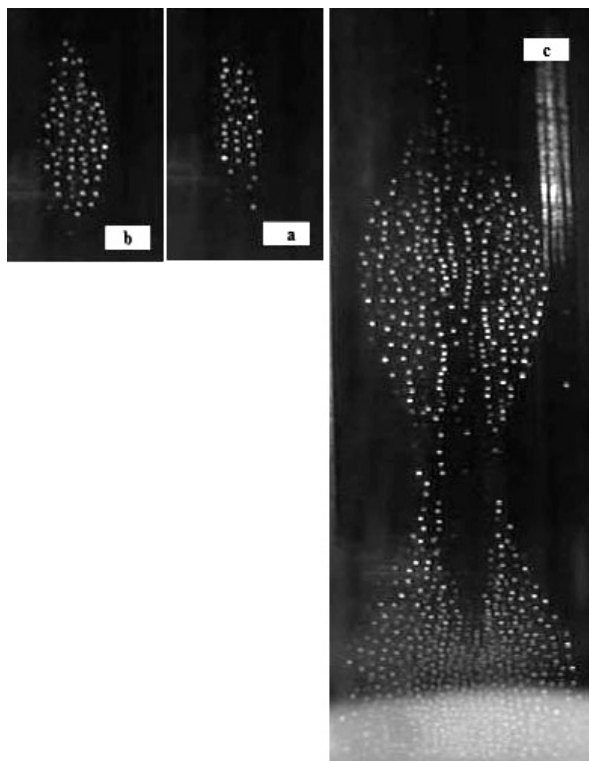


Рис. 3. Изображения пылевых образований в Ag после 1-й (а), 2-й (б) и 20-й (с) инъекций

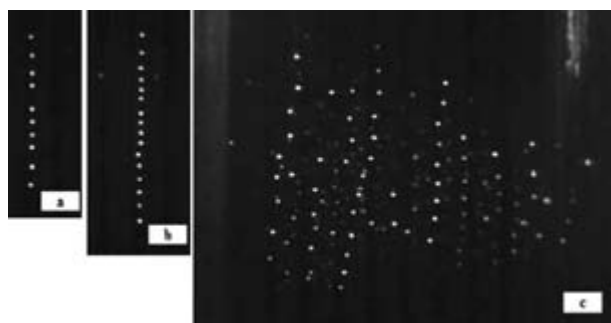


Рис. 4. Изображения пылевых образований в Xe после 1-й (а), 2-й (б) и 20-й (с) инъекций

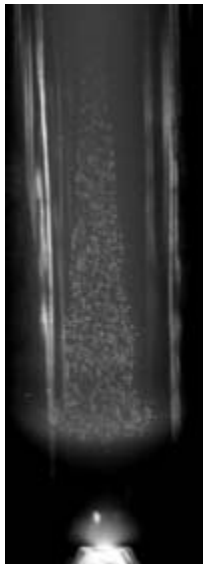


Рис. 5. Изображение пылевой структуры в аргоне

Таблица 1

Зависимость объемов структур от количества инъекций для систем Ne, Ar – Al₂O₃, Zn

Газ	Ne		Ar	
	Al ₂ O ₃	Zn	Al ₂ O ₃	Zn
Макрочастицы				
Объем структуры после 1-й инъекции (мм ³)	90	50	10	50
Объем структуры после 95-й инъекции (мм ³)	550*	220	55	450
Объем структуры после 1-й инъекции (мм ³)	–	–	10	50
Объем структуры после 95-й инъекции (мм ³)	–	–	450	370
Объем структуры после 1-й инъекции (мм ³)	30	20	–	–
Объем структуры после 95-й инъекции (мм ³)	900	550	–	–

Таблица 2

Зависимость величины среднего межчастичного расстояния по сечению структуры от рода газа и газоразрядных условий (частицы Al₂O₃)

Газ	Межчастичное расстояние, мкм					
	Ar				Ne	He
Давление, Па	P=80					
Ток, мА	I=0.3	I=0.5	I=1.0	I=2.0	I=2.0	I=2.0
Среднее знач., мкм	170	180	210	330	140	70
±, мкм	10	10	20	20	20	20

Рассчитанные значения объемов структур после 1-й и 95-й инъекций порошка для конкретных систем макрочастица – газ приведены в табл. 1.

Для газов (Ne, Ar) скорость изменения объема пылевой структуры при малых токах (I = 0.3, 0.5 мА) значительно превышает изменение этого параметра при более высоком значении величины разрядного тока (I = 2.0 мА). Однако при данных газоразрядных условиях в процессе роста структуры разряд нестабилен и по мере ее увеличения, особенно в моменты инъекции час-

тиц в плазму, обычно гаснет еще на начальных этапах выращивания структуры.

2.2. Значения межчастичных расстояний

Определение значений межчастичных расстояний осуществлялось программно путем анализа сечений структуры, полученных с помощью системы «лазерного ножа». Видеокамера на основе ПЗС-структур фиксировала изображения частиц в сечении структуры после каждой 5-кратной инъекции макрочастиц в плазму. В программе настраивался фильтр яркости, позволяющий установить порог яркости рассеянного поверхностью частицы света и исключить слабо подсвеченные макрочастицы, которые попадают в зону свечения лазерного ножа вследствие их флуктуационных колебаний внутри структуры. Далее межчастичные расстояния усреднялись по всему ансамблю частиц в пределах сечения структуры. С ростом тока (I = 0.3, 0.5, 1.0, 2.0 мА) происходит увеличение подводимой к структуре теплоты, что ведет к ее разупорядочиванию и увеличению межчастичного расстояния (табл. 2).

2.3. Изучение пылевых структур с использованием оптики высокого разрешения

При использовании полидисперсных порошков макрочастиц, фракционный состав которых составляет от единиц до сотни микрон, для формирования упорядоченных пылевых структур возникает вопрос о конкретном размере частиц, из которых образована пылевая структура. В связи с этим требуют решения важные задачи определения размера макрочастиц в структуре пылевого образования, характеристик движения, например скорости вращения вокруг собственной оси, скорости движения и межчастичного расстояния, наличия коагуляции частиц.

Для решения поставленной задачи наблюдения с высоким оптическим разрешением отдельных макрочастиц, формирующих упорядоченное образование в плазме газового разряда, была собрана регистрирующая система, представленная на рис. 6.

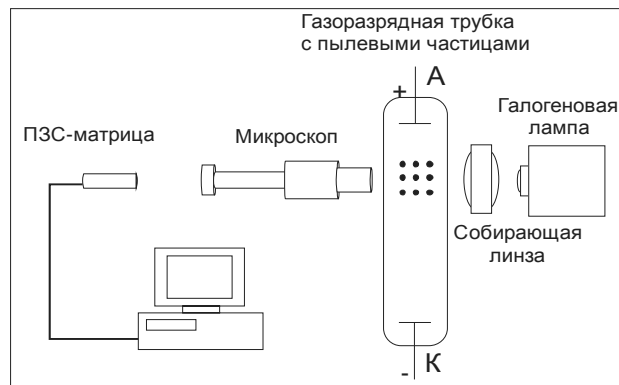


Рис. 6. Оптическая схема системы

Свет от галогеновой лампы, проходя сквозь трубку с пылевыми частицами, попадает в объектив микроскопа, который формирует изображение этих частиц на ПЗС (матрица) фотоприемнике. Собирающая линза перед кварцевой лампой фокусирует световое пятно непосредственно на плазменном кристалле, что улучшает уровень освещенности. Микроскоп, используемый в установке, был специально подобран для наблюдения за частицами внутри газоразрядной трубки. Рабочее расстояние используемого объектива микроскопа равно 18 мм, диаметр трубки $D = 37$ мм, ППО образуются в центре трубки. Видимое увеличение объектива – 15× (объектив ОМ 15/0.3 92 004), окуляра – 15×, длина тубуса – 160 мм. Микроскоп используется как проекционная система. Изображение объекта рисуется в плоскости за окуляром, где на различных расстояниях относительно окуляра можно наблюдать действительное изображение объекта.

На рис. 7 приведено изображение частицы оксида алюминия, захваченной в нижней части сформированного упорядоченного пылевого образования. Ее форма вытянута и загнута, а размер составляет порядка 12 мкм × 20 мкм.

На рис. 8 приведено изображение частиц MF.

Анализ полученных изображений отдельных частиц в плазме позволил установить размеры макрочастиц КДФ, формирующих пылевое образование в конкретных плазменных условиях. Результаты исследования приведены в табл. 3.

Применение разработанного метода диагностики позволило увидеть в упорядоченной пылевой структуре отдельные макрочастицы, оценить размеры и форму частиц из полидисперсной фракции, удерживаемых в образовании КДФ, оценить межчастичные расстояния и область колебания около положения равновесия. Кроме того, данный метод позволяет обнаружить наличие коагуляции частиц, что существенно изменяет размеры, форму, величину заряда составной макрочастицы по сравнению с предполагаемыми условиями в отсутствие коагуляции.

Отдельное направление применения данного метода может заключаться в анализе собственной частоты вращения частиц, однако для проведения такого рода исследований требуется использование высокоскоростных регистрирующих устройств.

2.4. Исследование закономерностей движения макрочастиц в плазме газового разряда

Очень часто необходимо уметь создавать стабильные пылевые структуры, которые существуют, например, в стратах тлеющего разряда постоянного тока, и удерживать в них макрочастицы достаточно длительное время (несколько часов), чтобы выполнять определенные технологические операции, например напыление.

Изменяя характеристики разряда, можно управлять плотностью макрочастиц в пылевой структуре и ее размером. Уменьшая кинетиче-

скую энергию движения макрочастиц, можно стабилизировать и изменять размеры области локализации движения отдельных макрочастиц. Область существования устойчивых структур в наших условиях ограничивалась разрядными токами $I = 0.1–4.0$ мА и давлениями плазмообразующего газа $p = 30–120$ Па.

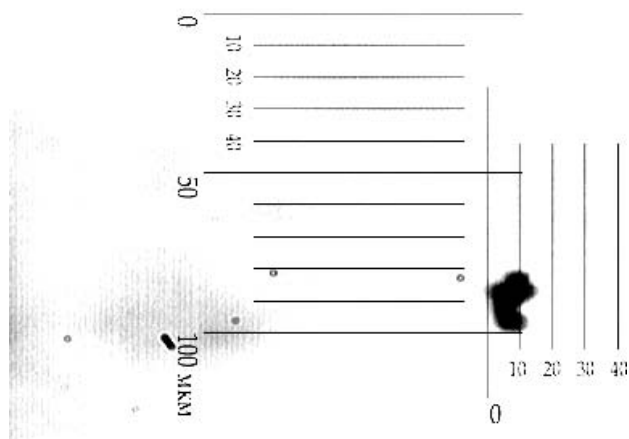


Рис. 7. Изображение отдельной частицы Al_2O_3 в структуре пылевого образования

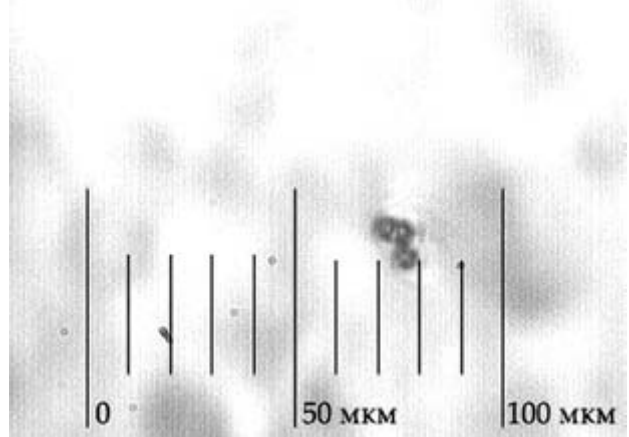


Рис. 8. Изображение трех коагулировавших частиц MF в структуре пылевого образования: $I = 0.85$ мА, $U = 590$ В, $P = 45$ Па

Таблица 3

Характеристики объекта наблюдения

№	Критерий	MF (4.86 ± 0.07 мкм)	Al_2O_3
1	Размер	4.61 ± 0.44 мкм	$(7.5 \div 12.5) \pm 0.3$ мкм
2	Форма	Сферическая; коагулировавшие частицы	Асферическая, вытянута и загнута
3	Межчастичное расстояние	320–460 мкм	410–530 мкм
4	Область колебаний	30–40 мкм	100–120 мкм

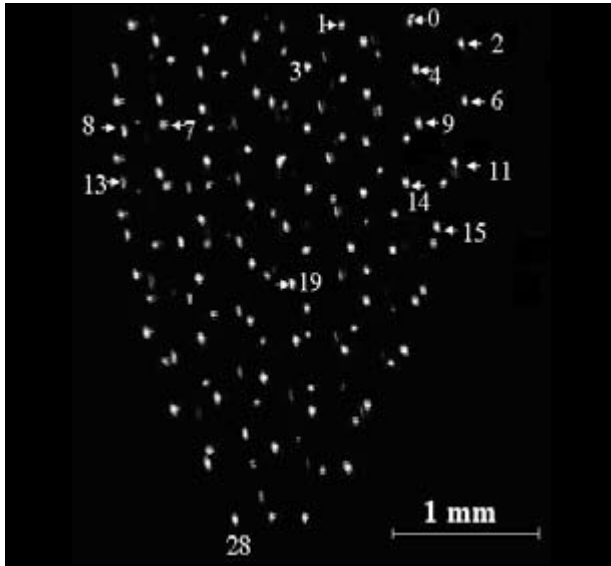
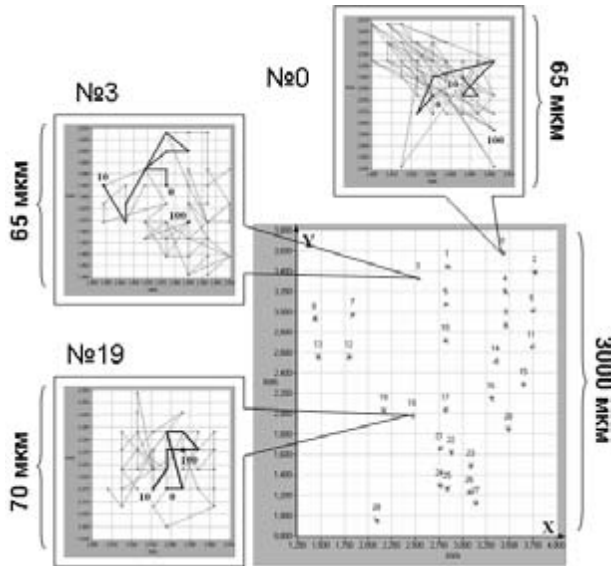


Рис. 9. Изображение структуры

Рис. 10. Восстановленные траектории макрочастиц:
($I = 0.6$ мА, $p = 0.3$ Торр)

Контроль за состоянием структуры проводился с помощью системы машинного зрения (СМЗ), построенной на основе технологии IMAQ Vision. Функция СМЗ заключается в том, чтобы фиксировать видеоизображение и определять положение (координаты) отдельных объектов (макрочастиц).

В данном эксперименте исследовалось результирующее влияние условий на поведение коллектива макрочастиц в упорядоченных плазменно-пылевых структурах в отсутствие специфических внешних воздействий.

Регистрация макрочастиц в сечении плазменно-пылевого образования осуществляется ПЗС-камерой стандарта PAL, платой видеозахвата IMAQ-1411, которая оцифровывает изображение, формирует последовательность кадров

(цифровых изображений) и в реальном режиме времени обрабатывается с помощью компьютера: реализует алгоритм распознавания макрочастиц на изображениях (рис. 9).

На рис. 9 приведено изображение пылевой плазменной структуры, полученной в эксперименте. Система захвата изображения анализирует объект, фильтрует изображение и присваивает уникальный номер каждой частице в пределах выделенной зоны наблюдения. В связи с этим существуют следующие основные факторы, которые ограничивают применимость системы:

- частота следования видеок кадров должна быть как минимум в два раза больше частоты, с которой макрочастица изменяет траекторию своего движения (временное разрешение);
- расстояния между макрочастицами должны превышать амплитуды их тепловых флуктуаций (пространственное разрешение);
- чувствительность и динамический диапазон приемника видеокамеры (ПЗС-матрицы): засветка/недостаток рассеянного частицей света;
- вычисления останавливаются, если изменяется исходное количество частиц в наблюдаемой системе.

Результаты программного восстановления структуры и траектории движения отдельных частиц приведены на рис. 10. Участок, обозначенный черным цветом, – это последовательные смещения макрочастицы за 0.4 с, красным – за 4 с. Числа на самой траектории обозначают номер кадра (или момент времени), когда было зафиксировано положение макрочастицы от начала наблюдения. Хорошо видно, что траектории локализованы в некоторой ограниченной области пространства (для данных условий она составляет 60 мкм по горизонтали и 70 мкм по вертикали); при этом соседние не пересекаются друг с другом.

Повторяемость получения одних и тех же пылевых структур в разных экспериментах может быть гарантирована идентичностью числа встряхиваний за один эксперимент. Проводились три серии встряхиваний по три в каждой, что нивелирует разброс в количестве макрочастиц, выпадающих каждый раз из контейнера. Таким образом, можно считать, что каждый раз получается одно и то же пылевое образование.

Макрочастицы, находящиеся в плазме, совершают непрерывное механическое движение. Траектория движения каждой такой макрочастицы в течение времени наблюдения в пространстве в общем случае обусловлена результирующим действием сил, которые определяют динамику, а также кинетические характеристики ее движения.

Траектория частицы за время наблюдения $\Delta t = t_k - t_n$ представляет собой ломаную линию (рис. 11). Ломаная траектория получается путем соединения точек местоположения макрочастицы в последовательные моменты времени отрезками прямыми. Ось Y направлена вдоль оси трубки от катода к аноду, ось X – в радиальном на-

правлении от оси трубки к ее стенке. Положения частицы фиксируются последовательно через равные промежутки времени dt , соответствующие частоте кадров видеокамеры (25 кадров/с). Таким образом, зная смещение ds частицы из каждого $t(i)$ положения, можно определять средние скорости, с которыми происходит это смещение. За время наблюдения получится набор скоростей частицы в процессе ее движения, который можно представить в виде гистограммы распределения скоростей.

Гистограмма скоростей каждой частицы по времени имеет вид, подобный приведенному на рис. 12, где каждой возможной скорости частицы v_i в течение времени наблюдения Δt можно поставить в соответствие величину, показывающую значение скорости смещения макрочастицы N_i относительно N_{\max} .

Величина среднего значения скорости определится как

$$V_{cp} = \left(\sum_i (v_i \cdot N_i) \right) \cdot N_{\max}^{-1};$$

S_{vcp}^2 – дисперсия средней скорости частицы.

Таким образом, для каждой точки (p, I) можно составить таблицу параметров нормально распределенных величин $[V_{cp}, S_{vcp}^2]$, причем размер всех выборок одинаков, то есть за каждой частицей наблюдение велось одинаковое время.

Экспериментально установлено наличие зависимости скорости движения макрочастиц от давления плазмообразующего газа и разрядного тока при прочих равных условиях. Уменьшение скорости с увеличением давления обусловлено тем, что плотность частиц газа возрастает (температура газа остается неизменной); следовательно, частота столкновений макрочастицы с частицами газа также возрастает (рис. 13).

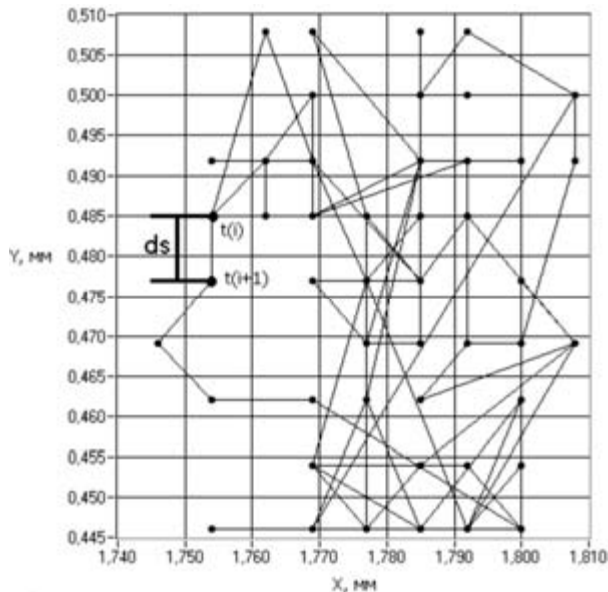


Рис. 11. Траектория отдельной макрочастицы

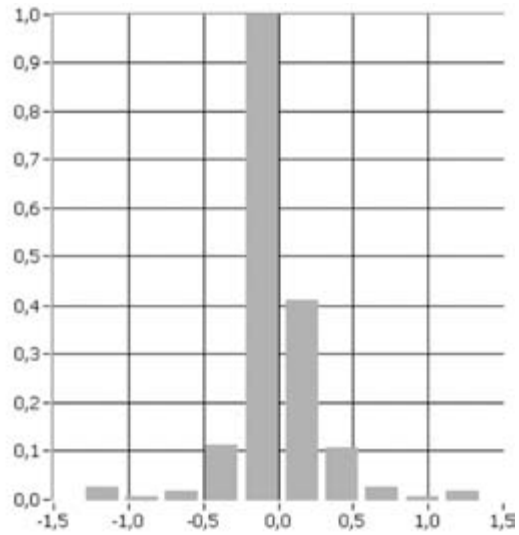
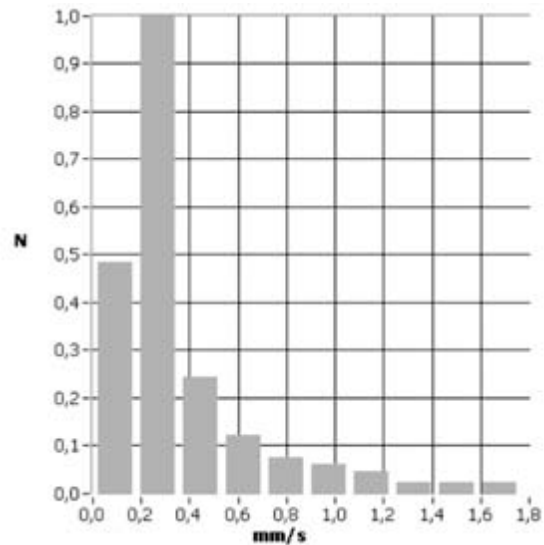
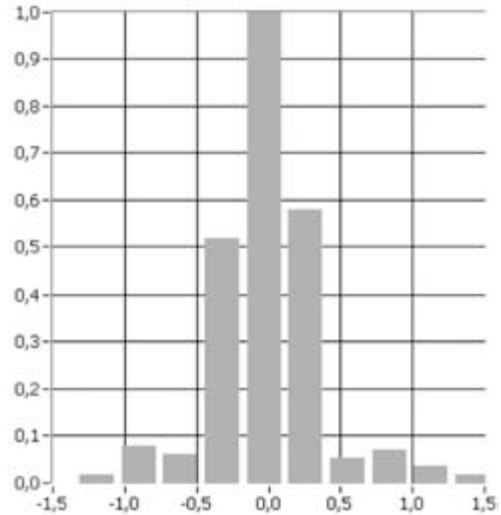


Рис. 12. Гистограмма функции распределения по скоростям движения одной макрочастицы (в течение $\Delta t = 4$ с)

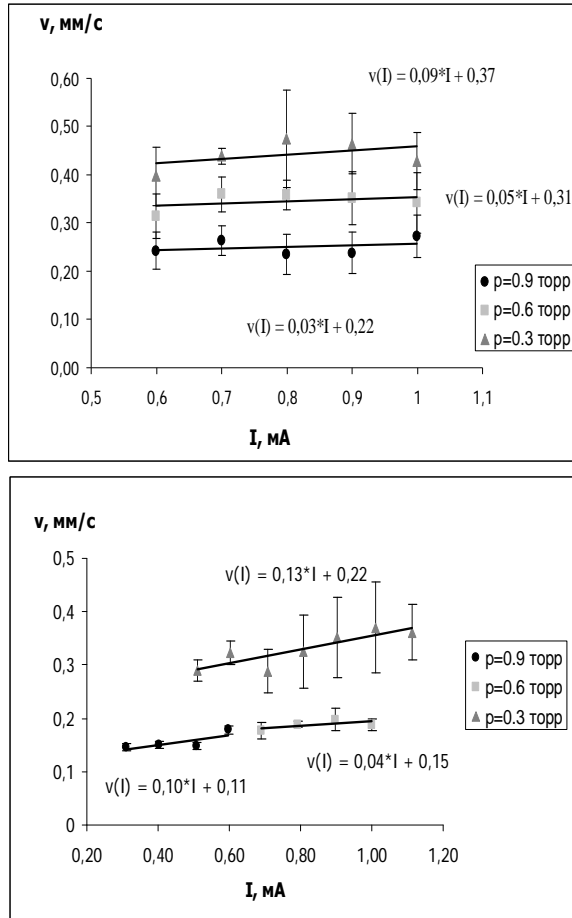


Рис. 13. Зависимость средней скорости движения макрочастиц от тока разряда в Ne (верхний) и Ag (нижний)

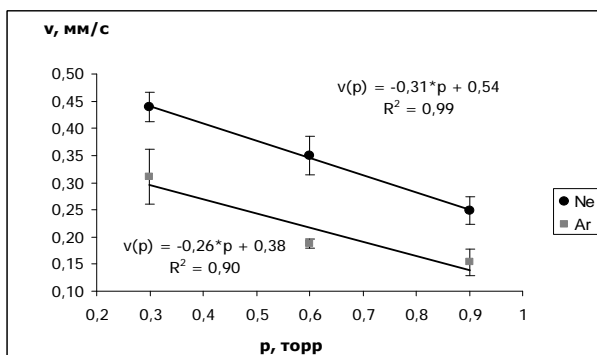


Рис. 14. Зависимость средней скорости движения макрочастиц от давления плазмообразующего инертного газа

Таким образом, рассеяние энергии макрочастицы на плазменных частицах увеличивается. Это можно эффективно использовать для «охлаждения» макрочастиц в структуре и их стабилизации.

Управление структурой с помощью изменения давления плазмообразующего газа гораздо

эффективнее, но практически для замкнутых объемов оно реализуется плохо. В этом случае можно использовать зависимость скорости движения от разрядного тока (рис. 14).

2.5. Взаимодействие компонентов плазмы с материалом макро-частиц

Основная трудность изучения воздействия компонентов плазмы на поверхность частиц, составляющих упорядоченную плазменно-пылевую структуру, заключается в отсутствии возможности анализа данного воздействия непосредственно в плазме. Известные оптические методы сегодня не способны решить эту задачу. В данном исследовании предложена методика, призванная получить новые достоверные и объективные данные о формах возможного существования частиц КДФ в комплексной плазме и их модификации при взаимодействии с компонентами этой плазмы, включая взаимодействие между собой.

Методика экспериментального исследования заключалась в следующем:

1. Создавался устойчивый «плазменный кристалл»;
2. В период его существования за ним велось видеонаблюдение;
3. Производилось извлечение частиц, «проэкспонированных» в плазме;
4. Производилось электронно-микроскопическое исследование формы частиц до и после пребывания в плазме с помощью микроскопа СМ 20.2 и детальное исследование изменений структуры приповерхностного слоя с помощью атомно-силового микроскопа СММ-2000.

В ходе экспериментов внутри газоразрядной трубки поддерживался стационарный тлеющий разряд в неоне (спектрально чистый неон) при давлении 65 Па и токе 1 мА. Для формирования упорядоченных структур использовались монодисперсные полимерные сферические частицы меламинформальдегида (MF-R) с аттестованными размерами 4.86 ± 0.07 мкм.

В настоящий момент не представляется возможным извлечь частицы из плазменного кристалла в момент горения разряда, поэтому исследованию подвергались те частицы, которые удалось захватить после выключения разряда с помощью специальной улавливающей системы. Были проведены три серии экспериментов с различным временем экспозиции (10, 20, 40 мин) частиц в плазме тлеющего разряда. Далее поверхностный слой частиц, захваченных описанным выше способом, подвергался анализу, который проводился на растровом электронном микроскопе СМ 20.2 и атомно-силового микроскопе СММ-2000. Изображения поверхности макрочастиц после различной временной экспозиции в плазме приведены на рис. 15, 16, 17, 18.

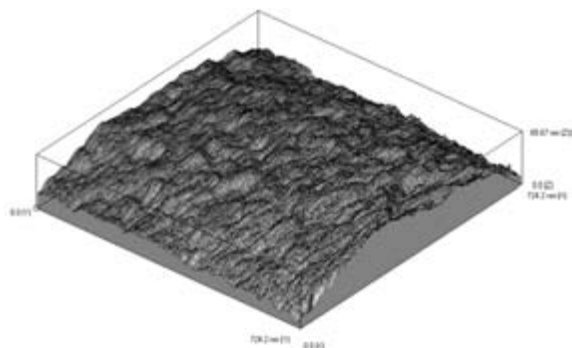


Рис. 15. Изображение поверхности макрочастицы (724 × 724 нм) до помещения в плазму

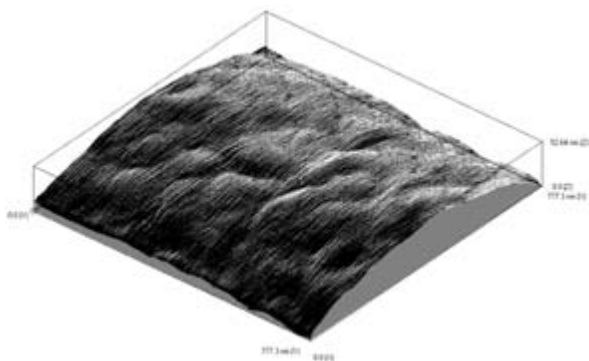


Рис. 16. Изображение поверхности макрочастицы (777 × 777 нм) после 10 мин в плазме

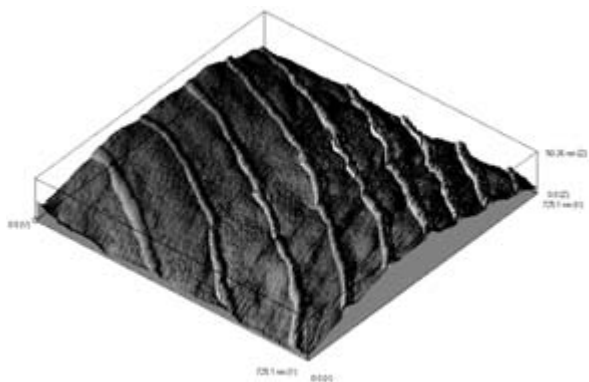


Рис. 17. Изображение поверхности макрочастицы (725 × 725 нм) после 20 мин в плазме

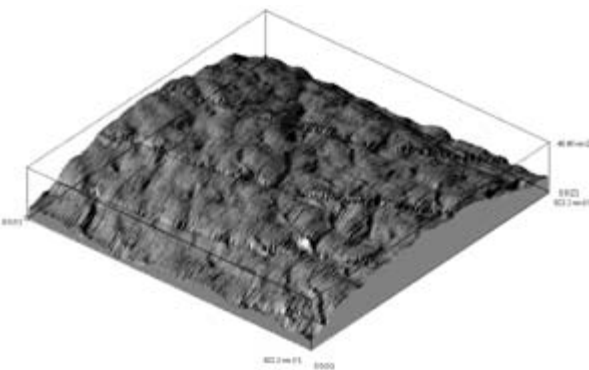
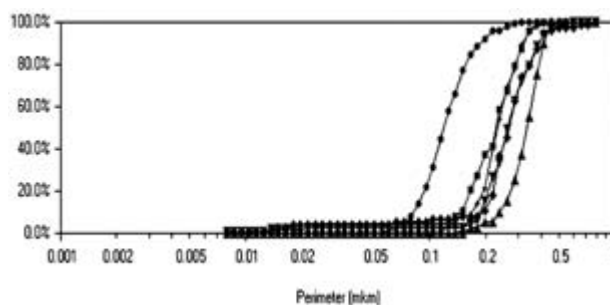


Рис. 18. Изображение поверхности макрочастицы (822 × 822 нм) после 40 мин в плазме



Name	
■	Частица (1,417 × 1,417 мкм) после 10м
●	Частица (1,403×1,403 мк) до плазмы
▲	Частица (1,844 × 1,844 мкм) после 20м
▼	Частица (1,555 × 1,555 мкм) после 40м
◆	Частица (1,800 × 1,800 мкм) после 40м
+	Частица (1,861 × 1,861 мкм) после 40м

Рис. 19. Интегральная кривая гранулометрического состава

В результате данных исследований были выявлены следующие различия в характере поверхности частиц до помещения в плазму и после извлечения из нее:

1. С увеличением времени экспозиции частиц в плазме увеличился размер микронеровностей поверхности, обусловленных глобулярным строением «тела» макрочастицы;
2. На образцах частиц с временами экспозиции 20 и 40 мин на поверхности отчетливо видно наличие возрастающих углублений (каверн), связанных с ее деструкцией под действием компонентов плазмы;
3. Обнаружены особенности структуры поверхности макрочастиц в виде эквидистантных регулярных полос, проходящих через всю поверхность частицы, которые становятся более заметными при увеличении времени экспонирования частицы в разряде. Их наличие связано, очевидно, с технологией производства частиц.

При помощи программных средств обработки полученных изображений был произведен морфологический анализ поверхности частиц, извлеченных из плазмы. За измеряемую величину бралось значение периметра поверхностных глобул частицы. Также морфологический анализ поверхностных глобул проводился у частиц, не находившихся в плазме. В результате по средним значениям распределения периметра поверхностных глобул для набора частиц, не погруженных в плазму, и для частиц, извлеченных из плазмы, были построены графики (рис. 19).

Из графиков распределения отчетливо видно, что периметр поверхностных глобул у частиц, извлеченных из плазмы с временами экспозиции 10, 20, 40 мин, увеличился на 100–300 нм по сравнению с частицами, которые не были погружены в плазму. Вместе с тем средняя высота поверхностных глобул у частиц, извлеченных из плазмы, уменьшилась на 5–20 нм, то есть они

стали более приплюснутыми сверху и одновременно увеличились в размерах по периметру. Все это говорит о том, что условия экспонирования приводят к заметной модификации поверхностной и внутренней структуры макрочастиц в разряде и могут повлиять на физико-химические характеристики среды упорядоченных плазменно-пылевых структур, на создание наноразмерных фрагментов вещества макрочастиц, а также на характеристики процессов зарядки, адсорбции и десорбции для погруженных в плазму частиц конденсированной дисперсной фазы.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Проведенные экспериментальные исследования и представленные выше экспериментальные данные показывают следующее:

1. Изменение физико-химических свойств системы макрочастица – газ приводит к существ-

венному изменению характеристик (таких как межчастичное расстояние, форма, объем, вид структуры) образующихся плазменно-пылевых образований.

2. Рассматривать пылевые структуры как объекты, состоящие из отдельных идеализированных макрочастиц определенного размера, не совсем корректно. Наличие процесса коагуляции приводит к образованию многочастичных комплексов с зарядовым числом и размерами, значительно превышающими расчетные.
3. Условия экспонирования приводят к заметной модификации поверхностной структуры макрочастиц в разряде и могут повлиять на физико-химические характеристики среды упорядоченных плазменно-пылевых структур, а также на характеристики процессов зарядки, адсорбции и десорбции для погруженных в плазму частиц конденсированной дисперсной фазы.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Липаев А. М., Молотков В. И., Нefeldов А. П. и др. Упорядоченные структуры в неидеальной пылевой плазме тлеющего разряда // ЖЭТФ. 1997. Т. 112, вып. 6(12). С. 2030–2044.
2. Ichimaru S. Strongly Coupled Plasmas: High-Density Classical Plasmas and Degenerate Electron Liquids // Rev. Mod. Phys. 1982. V. 54. P. 1017–1059.
3. Ikezi H. Coulomb Solid of Small Particles in Plasmas // Phys. Fluids. 1986. V. 29. P. 1764–1766.
4. Fortov V. E., Nefeldov A. P., Torchinskii V. M. Crystallization of a dusty plasma in the positive column of a glow discharge // JETP Lett. 1996. V. 64. № 2. P. 92–98.
5. Molotkov V. I., Nefeldov A. P., Pustyl'nik M. Yu. Liquid Plasma Crystal: Coulomb Crystallization of Cylindrical Macroscopic Grains in a Gas-Discharge Plasma // JETP Lett. 2000. V. 71. № 3. P. 102–105.