

УДК 537.535:538.6

МАКСИМ СЕРГЕЕВИЧ ГОЛУБЕВ

аспирант кафедры общей физики 1-го физического факультета Санкт-Петербургского государственного университета
maksider@yandex.ru

ЕЛЕНА СОСЛАНOVНА ДЗЛИЕВА

кандидат физико-математических наук, старший преподаватель кафедры общей физики 1-го физического факультета Санкт-Петербургского государственного университета
Viktor.Karasev@pobox.spbu.ru

МАКСИМ АНАТОЛЬЕВИЧ ЕРМОЛЕНКО

аспирант кафедры общей физики 1-го физического факультета Санкт-Петербургского государственного университета
Viktor.Karasev@pobox.spbu.ru

АРTEM ЮРЬЕВИЧ ИВАНОВ

аспирант кафедры общей физики 1-го физического факультета Санкт-Петербургского государственного университета
artyom_ivanov@hotbox.ru

ВИКТОР ЮРЬЕВИЧ КАРАСЕВ

кандидат физико-математических наук, доцент кафедры общей физики 1-го физического факультета Санкт-Петербургского государственного университета
Viktor.Karasev@pobox.spbu.ru

АЛЕКСЕЙ ИГОРЕВИЧ ЭЙХВАЛЬД

кандидат физико-математических наук, доцент кафедры общей физики 1-го физического факультета Санкт-Петербургского государственного университета
eichel@e-mail.ru

УПРАВЛЕНИЕ ПЛАЗМЕННЫМИ СТРУКТУРАМИ И ОТДЕЛЬНЫМИ ЧАСТИЦАМИ В ГАЗОВЫХ РАЗРЯДАХ

В настоящей работе приводится обзор применения методов воздействия разной природы на пылевые структуры с целью осуществления управления – изменения их локализации внутри разрядов, их формы, внутреннего расположения отдельных частиц. Акцент ставится на иллюстрации конкретных реализаций воздействий – описаны способы, виды рабочих камер и полученные результаты. Представленные методы воздействия и диагностики могут быть использованы в технологических процессах при работе с микро- и наночастицами.

Ключевые слова: газовый разряд, пылевая плазма, динамика уединенной пылевой частицы, макрочастицы, наночастицы

Макрочастицы размером от десятков нанометров до десятков микрометров, находящиеся внутри газовых разрядных камер, способны влиять на свойства основной плазмы. Например, в работе [1] количественно были обнаружены такие влияния на вольт-амперные характеристики тлеющего разряда, а в работах [22], [27] описано изменение электронной концентрации при росте и агломерации наночастиц. В [1] обнаружено изменение оптических свойств разряда. Следовательно, для работы газоразрядных устройств в условиях возможного появления пылевых частиц необходимо учитывать их влияние на разряд. В энергетических устройствах и установках ИТЭР [23] появление частиц вблизи стенок может приводить к срывам.

В современных технологических процессах обработки поверхностей, плазменном травлении и напылении, пылевые частицы являются нежелательным побочным продуктом. Например, при

изготовлении компьютерных микрочипов вырванные ионами фрагменты материала зависают в виде облаков над изготавляемыми образцами. В случае их последующего осаждения при существенной агломерации или росте размеров со временем появляется брак в выходящей продукции [24], [27], [45]. На производстве сегодня применяется контроль пылевых облаков в камерах при помощи рассеяния лазерного излучения, а также используются специальные устройства для удаления частиц.

Для оптимизации работы технологических устройств, в которых используется или может появляться пылевая компонента, необходимо применять стойкие к плазменному воздействию материалы покрытия стенок и использовать в качестве управления пылью методы динамики, развитые в последние годы в фундаментальных научных исследованиях пылевой плазмы. Краткое представление последних является предме-

том настоящей статьи, основанной как на специальной учебной литературе и научной периодике, так и на собственных исследованиях авторов [8], [9], [10], [14]. Ряд обзорных изложений можно найти в работах [16], [17], [18].

1. МЕТОДЫ ВОЗДЕЙСТВИЯ

Методы воздействия, используемые в лабораторных и промышленных установках, способны действовать на пыль, находящуюся внутри разрядных камер. Они основаны на применении динамики пылевых частиц, описанной в ряде публикаций [16], [20], [25], [37], [39]. Не повторяя их подробно, остановимся на конкретных реализациях воздействий.

1.1. Термофоретическое воздействие может быть рассмотрено на примере работ [1], [3]. За счет внешних по отношению к камере источников тепла создается управляемый температурный градиент нейтрального газа разрядов, в которых находится пылевая компонента. Радиальная позиция частиц определяется силовым балансом между силой термофореза, направленной против градиента температуры, и электрической силой, связанной с амбиполярным полем разряда. При изменении баланса сил возможно вытеснять частицы из приосевой части камеры, оттеснять их к стенкам, разрывать объемную структуру на отдельные части и управлять формой пылевого образования. На рис. 1 показано вертикальное сечение пылевого образования, смещенное из центра разрядной трубы за счет разного нагрева ее стенки.

Размер кадра по горизонтали – 14 мм. Штрихованной линией обозначена ось разряда. Частицы – ниобат лития размером 2–4 мкм. Подсветка вертикальной плоскостью толщиной 1 мм. Условия: газ – неон, давление $p = 0,7$ Торр, разрядный ток $i = 2,5$ мА.

1.2. Сфокусированное излучение лазера, воздействуя на отдельную частицу, может выводить ее из пылевого образования. Подобные эксперименты использовались в работах [28], [40] для диагностики заряда гранул и при исследовании характера сил взаимодействия между пылинками. Рис. 2 и 3 в [40] показывают смещение нижних по потоку ионов частиц при смещении верхней пылинки в сформированном ими рядцепочке. Таким образом, воздействуя на верхний слой, оказывается возможным сдвигать все пылевое образование. Аналогичные результаты наблюдались в слабом магнитном поле при вращательном движении пылевых структур (рис. 2).

1.3. Электростатическое воздействие производится полями, создаваемыми электродами разрядных камер или дополнительными электродами и электрическими зондами, вносимыми или перемещаемыми внутри объема камер.

Первые работы (например, [42], см. также [19]) имели целью диагностику параметров пылинок – электрического заряда на их поверхности. Эта задача реализуется в два этапа. Сначала

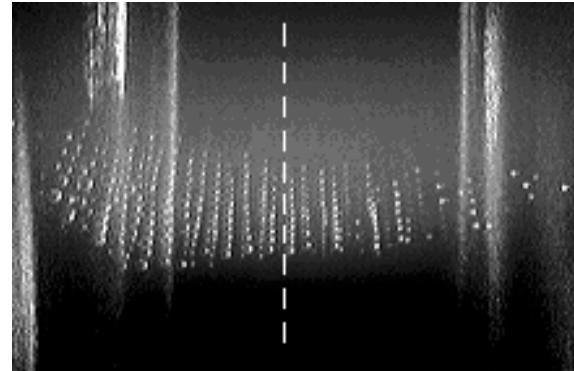
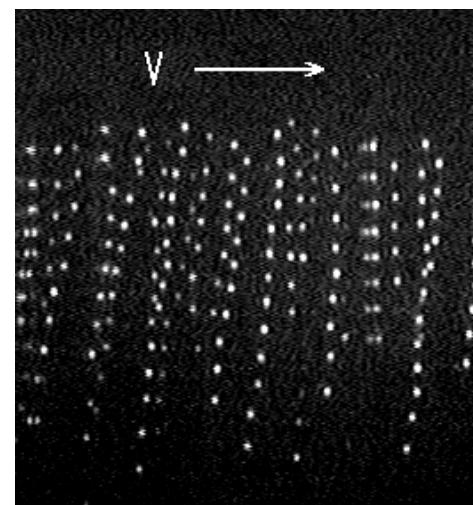
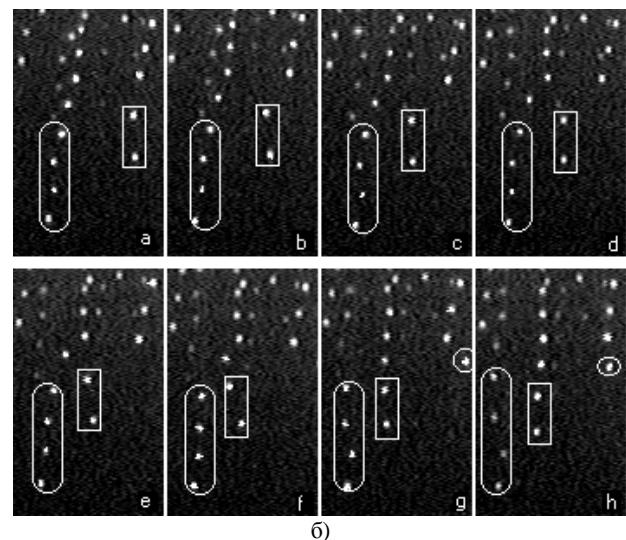


Рис. 1. Вертикальное сечение структуры, смещенной влево с оси разряда с помощью силы термофореза



а)



б)

Рис. 2. а) Вертикальное сечение врачающейся в магнитном поле структуры. Стрелкой обозначено направление движения в показанном сечении. $V = 150$ Гц. Размер кадра по вертикали – 2,8 мм. Частицы – ниобат лития размером 2–4 мкм.

Условия: Ne с малой примесью воздуха, $p = 0,7$ Торр, $i = 1,7$ мА. б) Процесс разрыва цепочек, на рисунке обведены фрагменты цепочек, движущихся как целое

в плазменно-пылевую ловушку вводится единственная частица, по ней определяют распределение потенциала в ловушке. Далее на силовой электрод подается переменная составляющая потенциала, вызывающая периодические или апериодические движения частицы, после чего по видеозаписи исследуется движение частицы и определяется ее заряд.

Частицы микронного размера для диагностики плазмы и газов использовались и до появления пылевой плазмы. Например, в [21] изложены методы измерения характеристик переноса – теплопроводности и вязкости – по наблюдению за падающими в разряде частицами сферической формы. В [4] указано на возможность измерения диффузии частиц по наблюдению модуляции их блеска.

Электростатическое воздействие используется для управления внешней формой пылевых образований. В работе [41] и других на нижний электрод помещались дополнительные вставки в виде вертикальных игл. На каждую из них подавались независимые потенциалы, различной комбинацией которых производилось изменение формы структуры, а также ее движение в горизонтальном направлении (рис. 3).

Вытеснение пылевых частиц из конкретного места разрядной камеры может быть достигнуто помещением в эту область макротела, подвеса или зонда, находящегося под плавающим потенциалом или с поданным на него отрицательным потенциалом. В работе [35] вблизи частиц располагался провод, на который подавался постоянный или переменный потенциал, что изменяло положение частиц в одном с проводом горизонтальном сечении. В работе [43] применялся сегментный электрод, на каждое кольцо которого подавался свой потенциал (рис. 4). Среди результатов можно отметить полученные в вертикальном сечении структуры конической формы (рис. 5) и кольцевого облака при немонотонной зависимости потенциала в радиальном направлении (рис. 6).

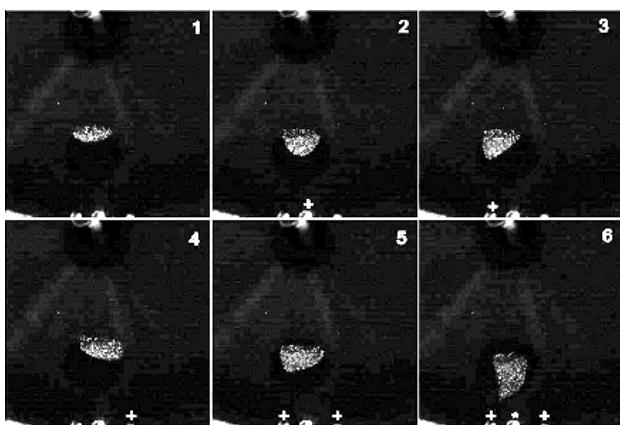


Рис. 3. Варианты облака различной формы, получаемые при различной комбинации потенциалов на дополнительных электродах

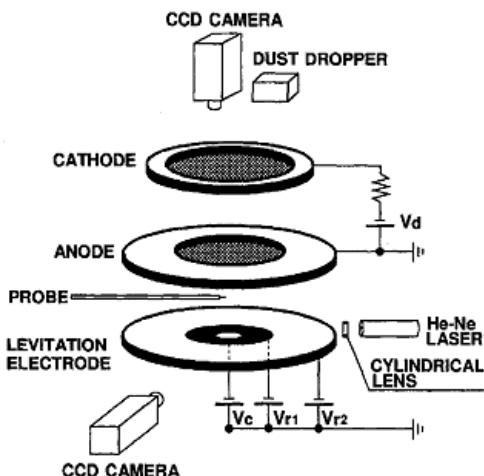


Рис. 4. Схема установки с сегментными электродами

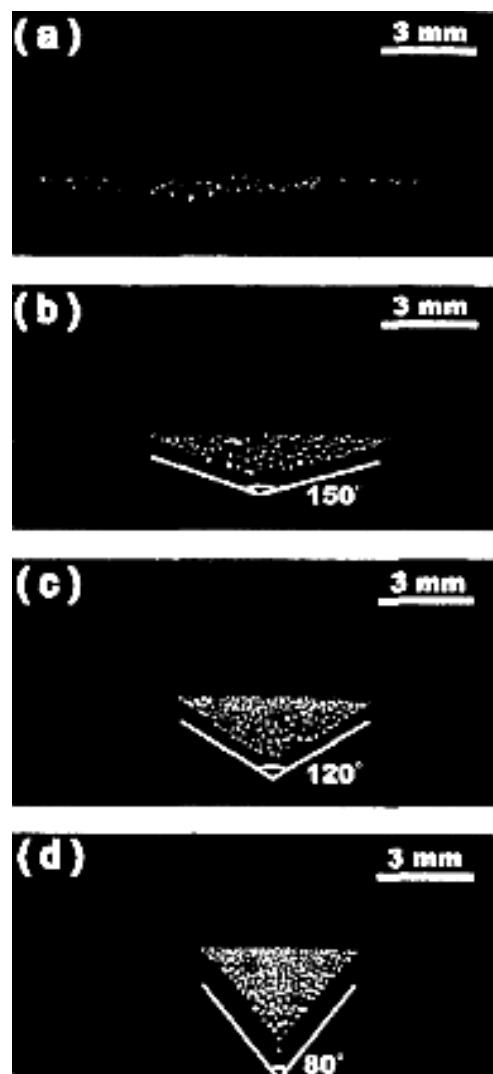


Рис. 5. Демонстрация управления формой облака

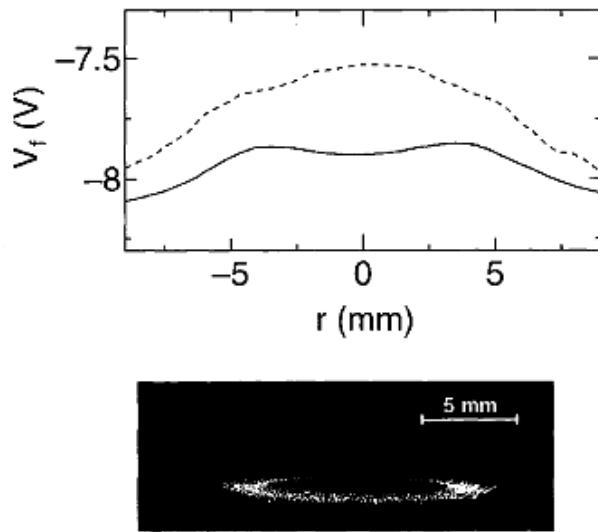


Рис. 6. Получение кольцевого облака

Применение пары заряженных проводящих пластин либо трубы позволяет удалять из разрядной камеры пылевые частицы, что использовалось в работах [5], [37]. Рис. 7 показывает влияние таких пластин на движение пыли. Примененные позднее трубы предназначались для очистки электродов и объема камеры (рис. 8). В [5] трубка-пылесос применена для дистанционного извлечения пыли из камер с ядерно-возбуждаемой плазмой.

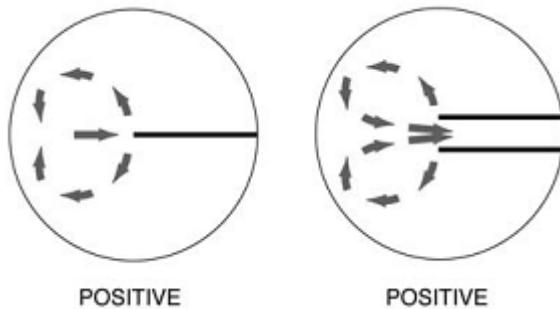


Рис. 7. Пылевые вихри вблизи двух заряженных пластин



Рис. 8. Процесс удаления пылевых структур пылесборником

1.4. Наклон разрядной камеры как целого создает «скатывающую» составляющую силы тяжести, что приводит к самопроизвольному «стеканию» структуры к боковой стенке камеры, откуда ее удаление производится существенно проще. Данное воздействие было предложено в наших исследованиях [6], [7] и служило для перемещения пылевой структуры внутри камеры из приосевой области к пристеночной (рис. 9, 10).

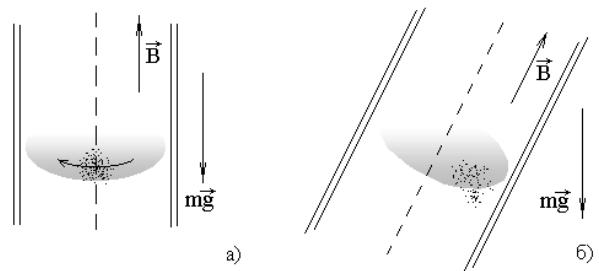


Рис. 9. Изображение пылевого облака в страте и геометрия разрядной трубы при ее наклоне в поле силы тяжести:

а) без наклона трубы, б) при ее наклоне. При переходе от а) к б) первоначально существующее вращение в магнитном поле (показано стрелкой на рис. 9а) прекращается. Структура смещается к стенке трубы и удерживается радиальным электрическим полем.

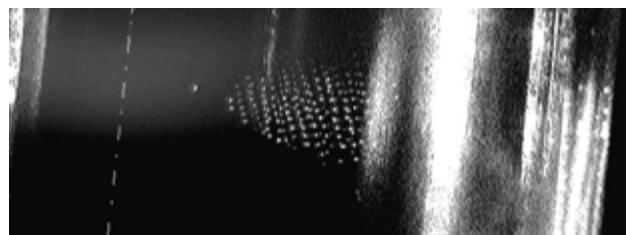


Рис. 10. Вид сбоку структуры, смещенной с оси разряда с помощью наклона разрядной трубы на угол 6° к вертикали.

Размер кадра по горизонтали – 19 мм. Частицы – ниобат лития размером 2–4 мкм. Подсветка вертикальной плоскостью толщиной 1 мм. Условия: неон, $p = 0,7$ Торр, $i = 2,5$ мА.

Отметим, что данное воздействие, как и термофоретическое, является воздействием неэлектрической природы и очень удобно тем, что действует непосредственно на пылевые частицы, но не на плазменные. Поэтому его очень удобно использовать в сочетании с другими воздействиями, например с наложенным магнитным полем [11]. При комбинации воздействий в камерах можно не только смещать структуры, но и перемешивать частицы внутри пылевого облака.

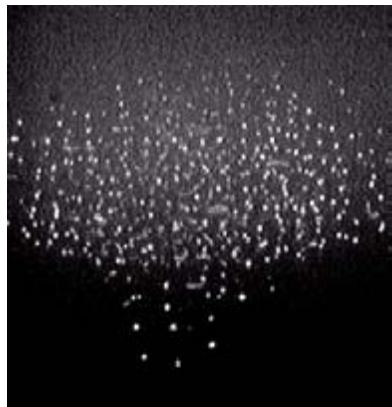
1.5. Наложение *магнитного поля* первоначально применялось для изучения сил, действующих на пылевые частицы, в частности сил, оказываемых потоками плазмы [31], [33], [44], затем оно использовалось для придания структурам заданной формы. Обзор работ по магнитному полю был представлен ранее в [8], [17], [36]. Некоторые новые данные см. в [26], [29], [32].

Можно управлять процессом образования и изменения внешних и внутренних характеристик пылевых структур, комбинируя свойства порошков и разрядных условий, а также используя перечисленные выше методы воздействия.

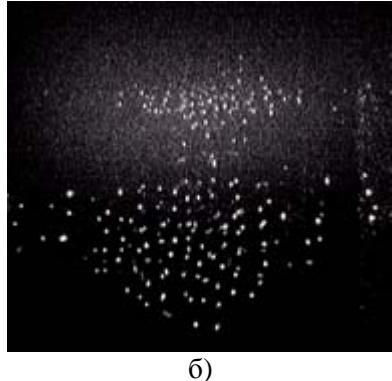
2. СОЗДАНИЕ ПЫЛЕВЫХ СТРУКТУР СЛОЖНОЙ ФОРМЫ

Используя существенно разные по дисперсности засыпные порошки, можно добиваться левитации структур на разных вертикальных координатах в одном разряде. Меняя разрядные условия, можно создавать благоприятные условия либо для верхнего, либо для нижнего пылевого облака (рис. 11, 12, 13 [12]).

Структуры можно вертикально вытягивать в разряде постоянного тока. Подобные исследования выполнялись при криогенных температурах [2], получены структуры длиной до 12 см (см. также [15], [34]). Фрагменты протяженной структуры показаны на рис. 14 [10]. Образованию более протяженных структур препятствовал отрыв верхних элементов по 3–7 частиц, что показано на рис. 15.



а)



б)

Рис. 11. а), б) Двойные структуры (вертикальные сечения), сформированные из более легких частиц вверху (в центре светящейся части страты) и более тяжелых внизу (под светящейся частью страты):

условия: частицы кварца с характерными размерами 5 и 10 мкм, газ Ne, $p = 0,7$ Торр, $i = 2$ мА. Горизонтальный размер изображения: а) 7,2 мм, б) 9,5 мм.

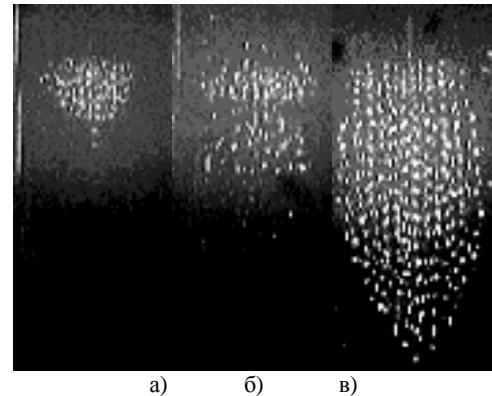


Рис. 12. Динамика формирования структуры из полидисперсных частиц

Al_2O_3 в Ar, $i = 1$ мА, $P = 0,2$ Торр. Горизонтальный размер – 4 мм. Из первоначально созданной структуры методом ВЧ-воздействия отфильтрована фракция мелких частиц, на рис. 12а они в центре головы страты, рис. 12б – начало формирования большой структуры при инъекции новой порции частиц, рис. 12в – окончательно сформированная структура. Первоначальное и новое формирования разделены граничным слоем, в котором отсутствуют частицы.

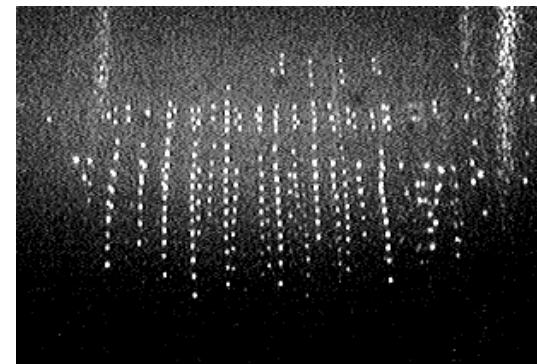


Рис. 13. Вертикальное сечение пылевого образования из трех структур, разделенных двумя горизонтальными граничными слоями:

условия: частицы LiNbO_3 , газ Ne, $p = 0,7$ Торр, $i = 2$ мА. Горизонтальный размер изображения – 9,5 мм.

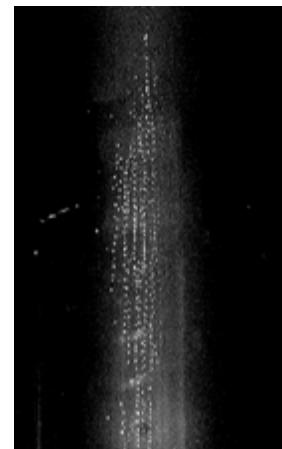


Рис. 14. Фрагмент сечения протяженной пылевой структуры, образованной вертикально вытянутыми цепочками частиц:

горизонтальный размер изображения – 2,5 см. Условия: газ – воздух, частицы – полидисперсный кремний плотностью $2,5 \text{ г}/\text{см}^3$, давление – 0,3 Торр, разрядный ток – 2 мА.

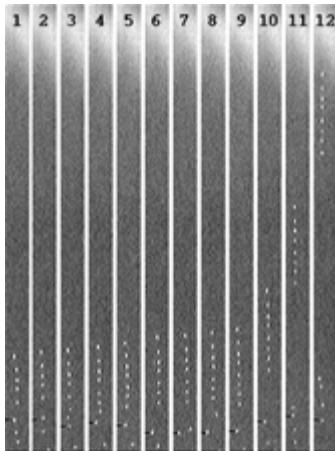
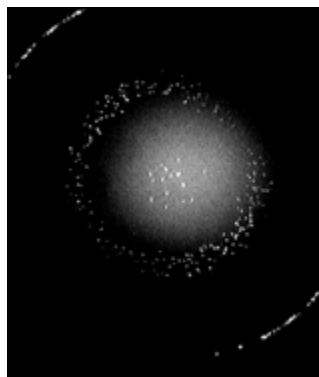


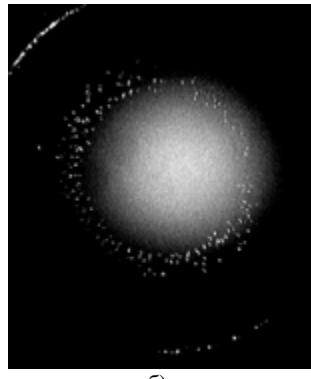
Рис. 15. Последовательные моменты формирования, отрыва и подъема верхних частей пылевой структуры (приведенной на рис. 14):

риской отмечена частица, не участвующая в подъеме цепочки. Интервалы времени между кадрами 1–12 равны 200, 80, 240, 280, 1880, 240, 120, 160, 1800, 1960, 1640 мс соответственно.

Сложные образования в горизонтальном сечении, формируемые за счет неоднородного тепловыделения [1], [3] и за счет применения полидисперсных несферических частиц [14], показаны на рис. 16. В магнитном поле такая неоднородность может существенно усиливаться [29].



а)



б)

Рис. 16. Сложные структуры в горизонтальном сечении: условия: частицы кварца с характерными размерами 2 и 5 мкм; газ – неон, давление 0,7 мм рт. ст., разрядный ток $i = 1,4$ мА (а), $i = 2$ мА (б).

Механизм изменения положения частиц при воздействиях и изменении разрядных условий наиболее наглядно может быть наблюдаем на элементарных фрагментах структур – горизонтальных кластерах и вертикальных цепочках. Рис. 17 демонстрирует уменьшение межчастичного расстояния при увеличении числа частиц в кластере. На рис. 18 показано изменение межчастичного расстояния при вариации разрядного тока, показывающей существенную анизотропию структуры. К изменению межчастичного расстояния приводят и столкновительные эксперименты с двумя пылевыми структурами. В данном случае изменение концентрации пыли остается устойчивым (рис. 19) и может отражать процессы динамики формирования структуры как в лабораторных экспериментах, так и в космических пылевых образованиях.

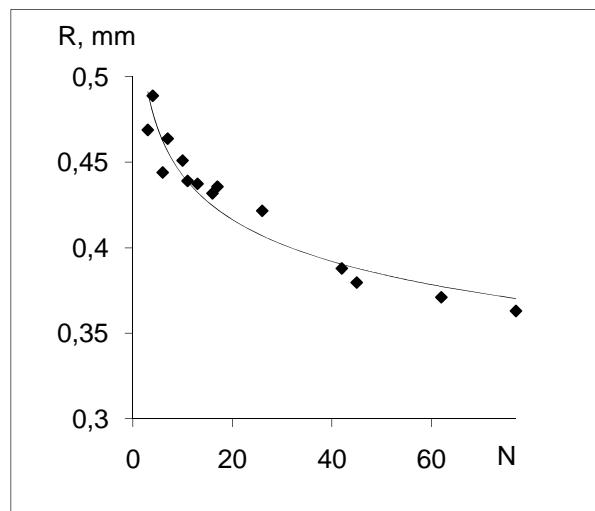


Рис. 17. Зависимость горизонтального межчастичного расстояния в кластере от числа частиц N

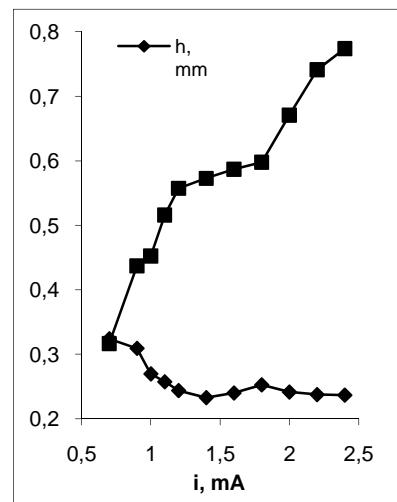
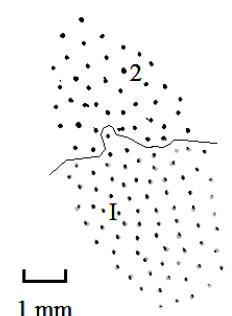


Рис. 18. Зависимость межчастичного расстояния от условий разряда. Продольное h и радиальное r расстояния в малом кластере в зависимости от тока



а)



б)

Рис. 19. а) Динамика столкновения двух структур (вид сверху, горизонтальное сечение структуры); б) Граница, разделяющая в новой структуре две области (1 и 2) с отношением плотностей $n_1/n_2 = 1,4$.

условия: газ – неон, давление $P = 0,8$ Торр, разрядный ток $i = 1$ мА.
Наложено 19 последовательных видеокадров, частота съемки – 1 кадр/с, время записи – 19 с. б) Граница, разделяющая в новой структуре две области (1 и 2) с отношением плотностей $n_1/n_2 = 1,4$.

3. ЭКСПЕРИМЕНТЫ С ОТДЕЛЬНЫМИ ПЫЛЕВЫМИ ЧАСТИЦАМИ

Данные эксперименты в первую очередь представляют интерес для целей диагностики. Кроме того, они могут применяться для изучения взаимодействия потока плазмы с поверхностью гранулы, прецизионного осаждения частиц на поверхность образцов и пленок, а также для модификации материала пылинок в разрядах. На рис. 20 представлена установка, модифицированная по сравнению с [36] и позволяющая извлекать частицы из разряда, а также наблюдать отдельные гранулы с высоким оптическим увеличением [30]. Рис. 21 демонстрирует распределение по размерам полых микросфер, имеющих первоначальные размеры при инъекции 5–60 мкм. В данном случае сепарация частиц в разряде осуществляется по толщине стенок сфер. Диаграмма на рис. 22 пока-

зывает сепарацию полидисперсных частиц кремния, их вариации по характерному среднему проекционному размеру и по фактору формы [14].

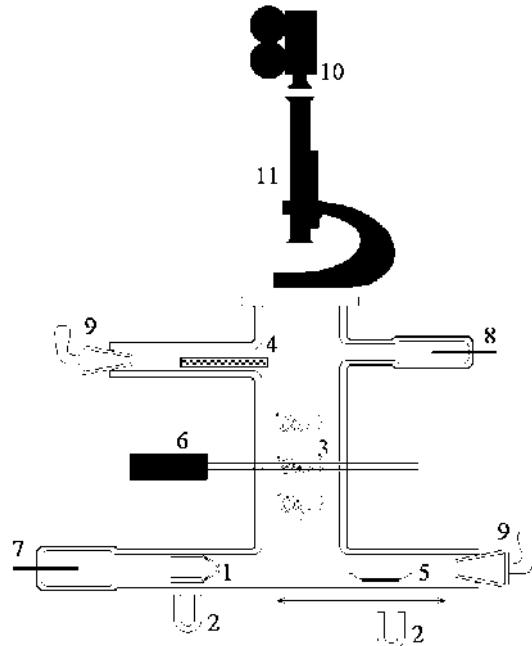


Рис. 20. Экспериментальная установка для наблюдения отдельных частиц:

1 – подвижная диафрагма; 2 – магнит; 3 – страты; 4 – контейнер с частицами; 5 – контейнер для собирания частиц; 6 – лазер; 7 – катод; 8 – анод; 9 – вакуумные краны; 10 – видеокамера; 11 – микроскоп.

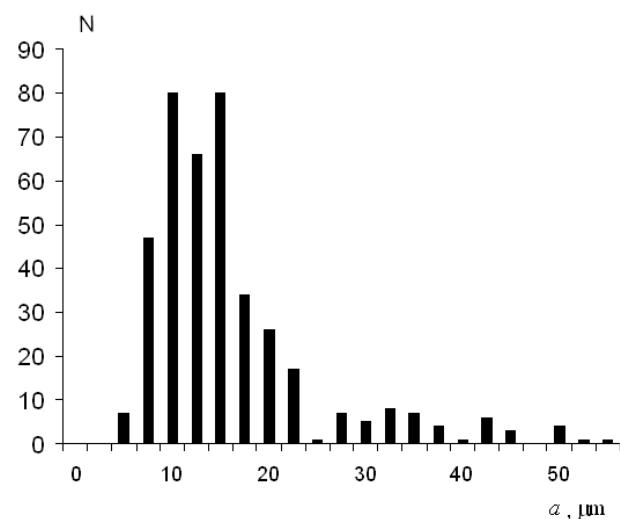


Рис. 21. Распределение по размерам макросфер, левитировавших в разряде:

условия: газ – Ne, давление 0,2 Торр, разрядный ток – 1 мА, a – радиус сферы. Гистограмма построена по данным для 400 частиц.

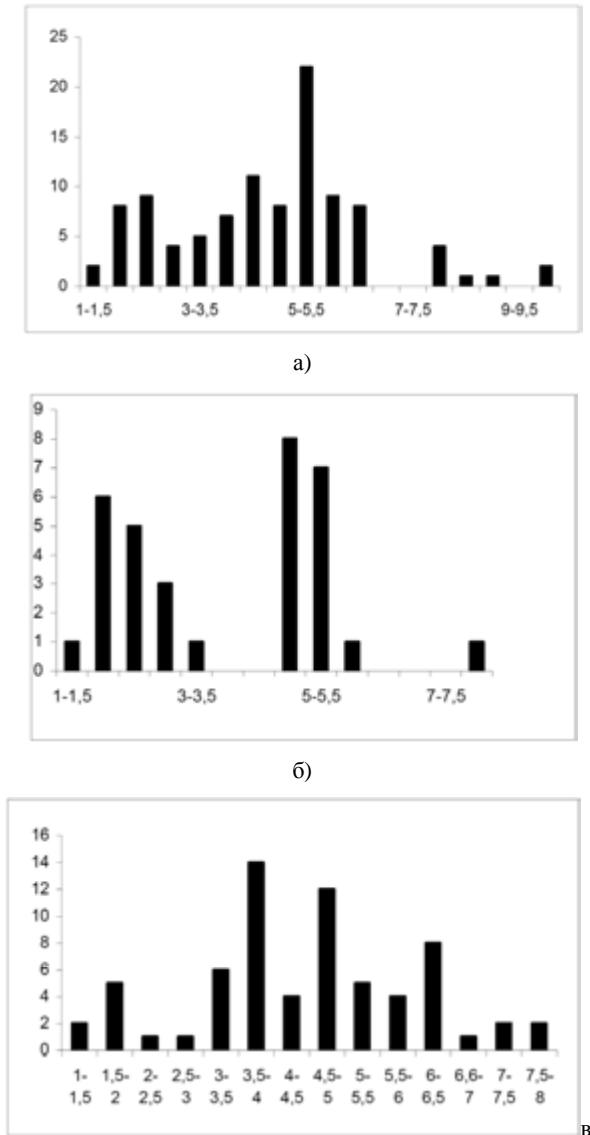


Рис. 22. (а) Распределение по характерному размеру частиц, левитировавших в разряде; (б) Выборка из гистограммы 22а, соответствующая условию «квадратным» частицам для соотношения между характерными размерами d_{\max} и d_{\min} менее 1,25. (в) Выборка из гистограммы 22а, соответствующая условию «вытянутым» частицам.

гистограмма построена по данным для 102 частиц. (б) Выборка из гистограммы 22а, соответствующая условию «квадратным» частицам для соотношения между характерными размерами d_{\max} и d_{\min} менее 1,25. (в) Выборка из гистограммы 22а, соответствующая условию «вытянутым» частицам.

Собственное вращательное движение частиц-сфер и сфер, имеющих дефекты, размером 15–60 мкм, частиц ниобата лития размером 0,5–2,0 мкм и частиц кремния может быть использовано для наблюдения изменения характеристик разряда [13], [30].

На примере отдельных частиц можно изучать магнитные свойства пылевой плазмы – ориентацию магнитных моментов частиц. Предварительные эксперименты показывают проявление парамагнитных свойств пылевых частиц, величину магнитного момента отдельной гранулы до 10^5 магнетонов Бора, наблюдение агломерации ферромагнитных частиц в сильных магнитных полях. Иллюстративный пример левитации отдельной частицы неправильной формы представлен на рис. 23.

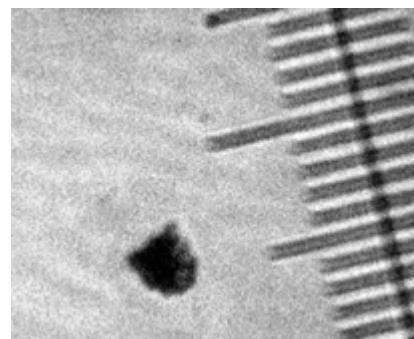


Рис. 23. Фотография осколка стеклянной микросферы, левитирующей в разряде:

подсветка лампой снизу, цена деления шкалы – 14 мкм.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Перечисленные динамические методы воздействия, а также их экспериментальные реализации в работах разных авторов с различными видами камер и типами разрядов пригодны для управления пылевыми структурами и отдельными частицами в диапазоне от десятков нанометров до десятков микрометров.

Работа поддержана РФФИ № 08-08-00628 и грантом Президента РФ для поддержки молодых ученых № МК-3462.2008.2.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Василяк Л. М. и др. Кооперативный характер образования пылевых структур в плазме // ЖЭТФ. 2002. Т. 121. Вып. 3. С. 609–613.
2. Василяк Л. М. и др. Пылевые частицы в термофоретической ловушке в плазме // ЖЭТФ. 2003. Т. 123. Вып. 3. С. 493–497.
3. Василяк Л. М. и др. Формирование пылевых структур сложной формы в плазме при неоднородном выделении тепла // ЖЭТФ. 2005. Т. 127. Вып. 5. С. 1166–1172.
4. Грин Х., Лейн В. Аэрозоли – пыли, дымы и туманы: Пер. с англ. Л.: Химия, 1969. 427 с.
5. Депутатова Л. В. и др. Пылевые кристаллы в плазме, создаваемой пучком протонов // Фундаментальные проблемы приложений низкотемпературной плазмы: Материалы школы-семинара. Петрозаводск, 2005. 220 с.
6. Дзлиева Е. С., Карапес В. Ю., Эйхвальд А. И. О вращении плазменно-пылевой структуры в магнитном поле при ее смещении с оси разрядной трубы // Материалы конф. ФНТП-2004. Петрозаводск, 2004. Т. 1. С. 273–276.
7. Дзлиева Е. С., Карапес В. Ю., Эйхвальд А. И. О гипотезе вращения газа в магнитомеханическом эффекте // Оптика и спектроскопия. 2004. Т. 97. № 1. С. 107–113.

8. Дзлиева Е. С., Карасев В. Ю., Эйхвальд А. И. Пылевая плазма в магнитном поле // Фундаментальные проблемы приложений низкотемпературной плазмы: Материалы школы-семинара. Петрозаводск, 2005. С. 244–263.
9. Дзлиева Е. С., Карасев В. Ю., Эйхвальд А. И., Иванов А. Ю. Об управлении ППС в лабораторных экспериментах и технологических процессах // Лазерные исследования в СПбГУ. СПб., 2009. С. 171–179.
10. Карасев В. Ю., Дзлиева Е. С. О балансе сил и равновесии пылевых частиц // Вестник СПбГУ. Сер. 4. 2009. Вып. 1. С. 136–139.
11. Карасев В. Ю., Эйхвальд А. И., Дзлиева Е. С. Возникновение вращательного движения плазменно-пылевых структур в стратах в тлеющем разряде в магнитном поле // Оптика и спектроскопия. 2006. Т. 100. № 3. С. 499–506.
12. Карасев В. Ю., Эйхвальд А. И., Дзлиева Е. С. Упорядоченные плазменно-пылевые структуры в стратах тлеющего разряда // Вестник СПбГУ. Сер. 4. 2008. Вып. 1. С. 36–41.
13. Карасев В. Ю., Эйхвальд А. И., Дзлиева Е. С. О наблюдении вращательного движения пылевых частиц, помещенных в низкотемпературную плазму // Вестник СПбГУ. Сер. 4. 2008. Вып. 4. С. 115.
14. Карасев В. Ю., Эйхвальд А. И., Дзлиева Е. С. Сепарация полидисперсных пылевых частиц в тлеющем разряде // Вестник СПбГУ. Сер. 4. 2009. Вып. 1. С. 140–144.
15. Липаев А. М., Молотков В. И., Недедов А. П. и др. Упорядоченные структуры в неидеальной пылевой плазме тлеющего разряда // ЖЭТФ. 1997. Т. 112. Вып. 6. С. 2030–2044.
16. Материалы лекций школ по физике низкотемпературной плазмы / Под ред. А. Д. Хахаева. Петрозаводск, 2001. 360 с.
17. Материалы лекций школ по физике низкотемпературной плазмы / Под ред. А. Д. Хахаева. Петрозаводск, 2002. 200 с.
18. Материалы семинаров-школ молодых ученых, студентов и аспирантов / Под ред. А. Д. Хахаева. Т. 1. Петрозаводск, 2004. 290 с.
19. Морфилл Г. Е., Цытович В. Н., Томас Х. Комплексная плазма: II. Элементарные процессы в комплексной плазме // Физика плазмы. 2003. Т. 29. № 1. С. 3–36.
20. Недедов А. П., Петров О. Ф., Фортов В. Е. Кристаллические структуры в плазме с сильным взаимодействием частиц // УФН. 1997. Т. 167. № 11. С. 1215–1226.
21. Ротер В. Применение сферических частиц для диагностики низкотемпературной плазмы // Свойства низкотемпературной плазмы и методы ее диагностики / Под ред. М. Ф. Жукова. Новосибирск: Наука, 1977. С. 257–267.
22. Цытович В. Н. Плазменно-пылевые кристаллы, капли и облака // УФН. 1997. Т. 167. С. 57–99.
23. Цытович В. Н., Морфилл Г. Е., Томас Х. Комплексная плазма: IV. Теория комплексной плазмы. Приложения // Физика плазмы. 2004. Т. 30. № 10. С. 877–929.
24. Фортов В. Е., Петров О. Ф., Молотков В. И. и др. Пылевая плазма // УФН. 2004. Т. 174. № 5. С 495–544.
25. Фортов В. Е., Храпак А. Г., Якубов И. Т. Физика неидеальной плазмы. М.: Физматлит, 2004. 500 с.
26. D'yachkov L. G., Petrov O. F., Fortov V. E. Dusty plasma structures in magnetic DC discharges // Contrib. Plasma Phys. 2009. Vol. 49. № 3. P. 134–147.
27. Dusty plasmas / Ed. by A. Boushoule. Orlean, 1999. 408 p.
28. Fortov V. E., Nefedov A. P., Molotkov V. I. et al. Dependence of the Dust-Particle Charge on Its Size in a Glow-Discharge Plasma // Phys. Rev. Lett. 2001. Vol. 87. P. 205002.
29. Karasev V. Yu., Dzlieva E. S., Ivanov A. Yu., Éikhval'd A. I. Rotational motion of dusty structures in glow discharge in longitudinal magnetic field // Phys. Rev. E. 2006. Vol. 74. 066403. P. 1–12.
30. Karasev V. Yu., Dzlieva E. S., Ivanov A. Yu., Éikhval'd A. I. Single dust-particle rotation in glow-discharge plasma // Phys. Rev. E. 2009. Vol. 79. P. 026406.
31. Konopka U., Samsonov D., Ivlev A. V., Goree J., Steinberg V., Morfill G. E. Rigid and differential plasma rotation induced by magnetic fields // Phys. Rev. E. 2000. Vol. 61. № 2. P. 1890–1898.
32. Nedospasov A. V. Motion of plasma-dust structures and gas in magnetic field // Phys. Rev. E. 2009. Vol. 79. P. 036401.
33. Nunomura S., Ohno N., Takamura S. Effects of Ion Flow by $\vec{E} \times \vec{B}$ Drift on Dust Particle Behavior in Magnetized Cylindrical Electron Cyclotron Resonance Plasmas // Jpn. J. Appl. Phys. 1997. Vol. 36. Part. 1. № 2. P. 877–883.
34. Podryadchikov S. F. et al. The ordered dusty plasma structures. Experiments and hypothesis // Intern. Conf. PPPT-V. Minsk, 2006. Vol. I. P. 376–379.
35. Samsonov D., Ivlev A. V., Morfill G. E. Long-range attractive and repulsive forces in a two-dimensional complex (dusty) plasmas // Phys. Rev. E. Vol. 59. P. R025401–R025404.
36. Sato N. Magnetic Effects in Dusty Plasmas // Dusty Plasmas in the New Millennium: Verheest AIP Conf. Proc. / Ed. by R. Bharuthram, M. A. Hellberg, P. K. Shukla F. 2002. Vol. 649. P. 66–73.
37. Sato N. Dust collection and removal – NFP collector // Thin Solid Films. 2004. Vol. 457. P. 285.
38. Sato N., Uchida G., Kaneko T., Shimizu S., Iizuka S. Dynamics of Fine Particles in magnetized plasmas // Phys. Plasmas. 2001. Vol. 8. № 5. P. 1786–1790.
39. Shukla P. K., Mamun A. A. Introduction to Dusty Plasma Physics. IoP Publishing. London, 2002. 271 p.
40. Takahashi K., Oishi T., Shimonai K., Hayashi Y., Nishino S. Analyses of attractive forces between particles in Coulomb crystal of attractive forces by optical manipulations // Phys. Rev. E. 1998. Vol. 58. № 6. P. 7805–7811.
41. Thomas E. Controlled interactions of two microparticle clouds in a dc glow discharge dusty (complex) plasma // New Jour. Phys. 2003. Vol. 5. P. 45.1–45.13.
42. Trottenberg T., Melzer A., Piel A. Measurement of the electric charge on particulates forming coulomb crystals in the sheath of a radiofrequency plasma // Plasma. Sources. Sci. Technol. 1995. Vol. 4(3). P. 450–458.
43. Uchida G., Iizuka S., Sato N. Fine-Particle Clouds Controlled in a DC Discharge Plasma // IEEE Trnsactions on Plasma Science. 2001. Vol. 29. № 2. P. 274–277.
44. Uchida G., Ozaki R., Iizuka S., Sato N. Generation and Control of Vortex Flow of Fine Particle With Coulomb Lattice // Proc. 15th Symp. on Plasma Processing, Hamamatsu, Japan. 1998. P. 152–155.
45. Vladimirov S. V., Ostrikov K., Samarian A. A. Physics and Applications of Complex Plasmas / Imperial College. London, 2005.