

04;12

Определение размеров левитирующих частиц в пылевой плазме в тлеющем разряде

© Е.С. Дзлиева, М.А. Ермоленко, В.Ю. Карасев

Научно-исследовательский институт физики Санкт-Петербургского государственного университета,
198504 Петергоф, Санкт-Петербург, Россия
e-mail: plasmadust@yandex.ru

(Поступило в Редакцию 14 марта 2011 г.)

Изучено распределение по размерам пылевых частиц в объемных плазменно-пылевых структурах, формирующихся в тлеющем разряде. В качестве пылевой компоненты использованы полидисперсные частицы кварца. Обнаружено, что в тлеющем разряде помимо пылевой ловушки в стратах пылевая плазма формируется в нижней пристеночной области разрядной камеры. Пылевые образования в данной области существенно велики, содержат до тридцати тысяч частиц. Обнаружено, что в стратах размер левитирующих частиц в 3 раза превышает размер частиц, левитирующих в пристеночном слое. Предложена идея по применению пылевой плазмы тлеющего разряда для разделения полидисперсных порошков по фракциям.

Введение

Знание действительных размеров пылевых частиц необходимо как для диагностики пылевой плазмы [1,2] — заряда, длины экранирования, действующих сил, так и при создании и контроле пылевых структур — их размеров и формы. Вместе с тем определение размеров представляет собой проблему, пока технически не решенную. Есть основания считать, что в плазме для левитации выбираются и удерживаются частицы с определенными характеристиками даже при применении монодисперсных калиброванных частиц, например частицы с отклонением от сферичности или частицы из края распределения по размерам. Эта проблема особенно актуальна при исследованиях, проводимых в тлеющем разряде, где пылевая плазма формируется в объемных структурах, а пылевые частицы в различных областях могут иметь различные размеры.

Экспериментальные исследования, в которых предприняты попытки определения действительных размеров пылевых частиц в плазме, проведенные по разным методикам, указывают на следующее. Размеры частиц засыпного порошка в случае полидисперсных частиц существенно отличаются от размеров левитирующих частиц [3], причем частицы могут отличаться по форме. Вероятно, этим объясняется существование пылевых структур сложной формы в горизонтальном направлении, наблюдавшихся в работах [3,4]. Для частиц сферической формы, но разного размера такой отбор в разряде происходит по плотности [5]. Оптические измерения [6] дают основания считать, что в объемных структурах размер частиц изменяется вдоль вертикальной координаты, увеличиваясь в нижнем направлении. При длительных экспериментах с пластиковыми частицами зарегистрирована деградация их поверхности [7]. В этом случае изменение размера и формы, а значит заряда и характера его распределения по поверхности, происходит непосредственно во время левитации.

Целью настоящей работы является детальное исследование отбора пылевых частиц плазмой, изучение их распределения по размерам и форме в структурах, формирующихся в тлеющем разряде в ловушках в стратах, а также в ловушках, образующихся в областях сужения канала тока [8,9], и над нижней стенкой разрядной камеры в пристеночном слое [3,10]. Для диагностики размеров частиц в работе применена оригинальная методика [3,5], позволяющая извлекать из разряда пылевые частицы, непосредственно находящиеся в пылевой плазме, с последующим определением распределения по размерам [11].

Эксперимент

Разработанная ранее методика извлечения пылевых гранул из разряда была реализована в модификации разрядной камеры, представленной на рис. 1. Камера состояла из стеклянной трубки внутренним диаметром 1.8 см, с длиной вертикального участка 12 см и имела 2 верхних и 2 нижний боковых отростков. В верхних отростках располагались контейнер с засыпным порошком и анод, в нижних — катод, а также устройство для сбора и извлечения из разряда левитирующих частиц. Устройство представляло собой металлическую пластину — „касетку“, перемещаемую с помощью магнита по горизонтальному отростку, на которую сверху помещалась стеклянная полоска размером 1×4 см. Последняя с попавшим на ее поверхность порошком извлекалась из разряда и помещалась под микроскоп для определения размеров частиц.

Откачка разрядной камеры производилась форвакуумным насосом. В качестве рабочих газов использовались криптон или неон. В диапазоне давлений от 0.3 до 1.5 mm Hg и разрядных токах 1–4 mA был реализован стратифицированный режим тлеющего разряда. Узкая диафрагма для формирования стоячих страт располагалась в горизонтальном отростке перед катодом. Она

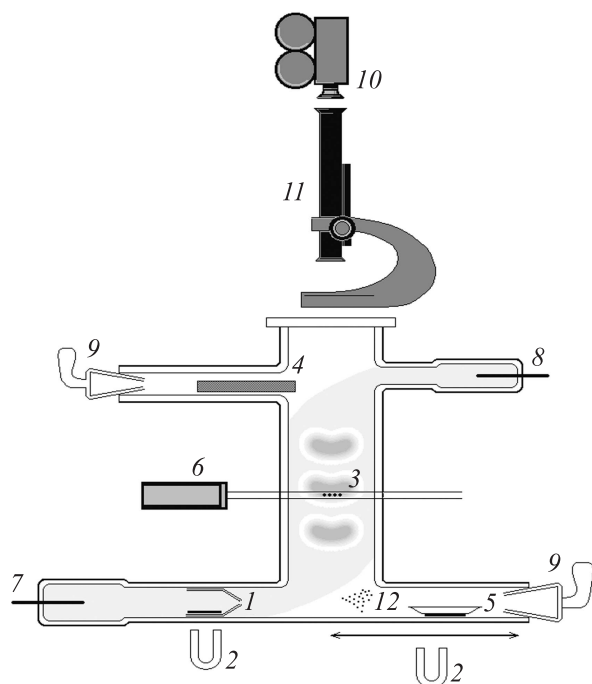


Рис. 1. Разрядная камера. 1 — подвижная диафрагма, 2 — магнит, 3 — страты, 4 — контейнер с частицами, 5 — собирающее устройство, 6 — лазер, 7 — катод, 8 — анод, 9 — кран, 10 — видеокамера, 11 — микроскоп, 12 — пылевая структура над нижней стенкой.

была подвижной, имела металлическую вставку, ее положение изменялось при помощи магнита.

Для исследований были использованы полидисперсные частицы кварца плотностью материала 2.3 g/cm^3 . В контейнер были засыпаны частицы размером $1\text{--}45 \mu\text{m}$, имеющие произвольную форму и сильно выраженный максимум дисперсности при $30\text{--}35 \mu\text{m}$.

Эксперимент проводился следующим образом. Зажигался разряд при выбранных параметрах и пылевые частицы инжектировались в разряд. Некоторая их часть зависала в стратах. Далее под вертикальную часть трубки подводилось устройство для сбора частиц, и разряд выключался. Процесс падения пылевых гранул и попадания их на поверхность стеклянной полоски контролировался съемкой на видеокамеру. Собранные частицы вместе с устройством извлекались из разрядной камеры. Число попадавших на стекло частиц в одном эксперименте составляло более тысячи. Их размеры определялись в оптическом микроскопе.

Результаты и обсуждение

Первые наблюдения, проводимые в неоне, показали, что пылевая плазма в примененной камере образуется как в стратах, так и непосредственно над нижней стенкой в области поворота трубки. В зависимости от условий разряда, тока и давления газа обнаруженное пылевое

образование имеет различный размер. Смена рабочего газа с неона на криптон также показала наличие пылевых структур как в стратах, так и в области разрядной камеры над нижней стенкой (рис. 1). Однако диапазон давлений, в котором реализовалась возможность для существования пылевых структур, оказался существенно меньше. Ниже будут представлены результаты, полученные только в криптоне.

На рис. 2 показана фотография нескольких вертикальных сечений пылевого образования над стенкой. При условиях разряда, когда структура имеет максимальный размер, давление 0.3 mm Hg , ток 1.6 mA , ее объем оценен в 1 cm^3 , а количество частиц порядка $27\,000$. Из данного пылевого образования частицы собирались следу-



Рис. 2. Изображение вертикального сечения пылевой структуры, формирующейся над нижней стенкой разрядной камеры. Размер по горизонтали 12 mm . Условия: газ криптон, давление 0.3 mm Hg , ток 1.6 mA .

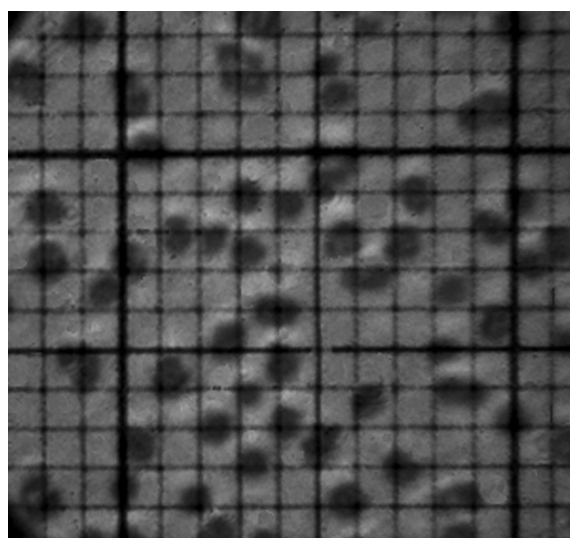


Рис. 3. Фрагмент изображения пылевых частиц, собранных из ловушки, формирующейся над нижней стенкой разрядной камеры, сфотографированный через микроскоп. Цена деления $2.8 \mu\text{m}$. Условия соответствуют рис. 2.

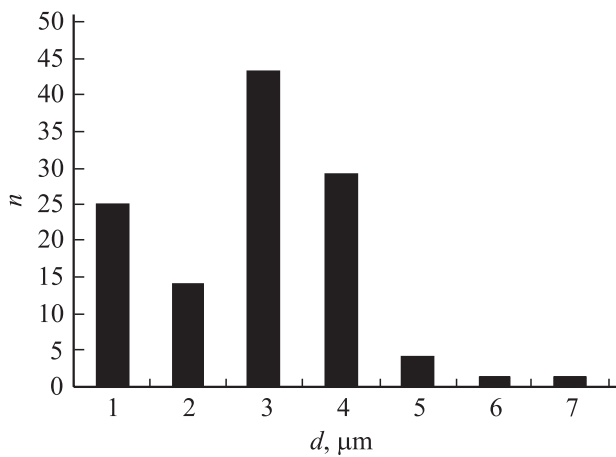


Рис. 4. Распределение по среднему размеру пылевых частиц, извлеченных из ловушки над нижней стенкой разрядной камеры. Условия соответствуют рис. 2.

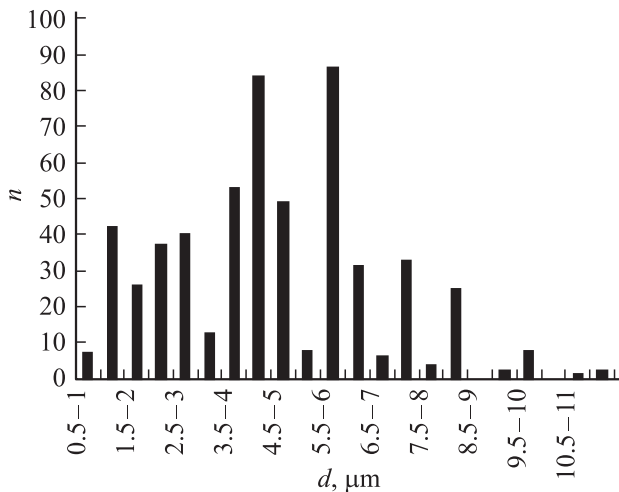


Рис. 5. Распределение по среднему размеру пылевых частиц, извлеченных из ловушки в стратах. Условия соответствуют рис. 2.

ющим образом. Под структуру подводилась каретка, над структурой располагался источник тепла, аналогичный примененному в [12]. Частицы под действием силы термофореза двигались вниз на собирающую поверхность. Фрагмент изображения извлеченных частиц представлен на фотографии на рис. 3.

Пример распределения частиц по размерам показан на рис. 4. Частицы имеют характерный размер 3–4 μm и компактную форму.

Детальное изучение под микроскопом всей поверхности собирающей пластинки показало следующее. Области на пластинке, куда попадало пылевое образование, оказались окруженными по периметру пылевыми частицами существенно меньшего размера, не разрешимыми в оптическом диапазоне, но уверенно регистрируемыми по дифракционным картинам. Обнаруженный эффект го-

ворит о возможности существования в пылевой плазме в тлеющем разряде фракции пылевых частиц наноразмерного диапазона. Для его количественного изучения необходимо отдельное исследование.

При сборе и извлечении пылевых частиц из страт в собранном порошке присутствовала некоторая доля частиц, левитировавших над стенкой трубки. Она могла доминировать или быть принудительно уменьшенной за счет применения термофореза аналогично описанному ранее способу воздействия. Пример распределения частиц, извлеченных преимущественно из страт, показан на рис. 5. Частицы имеют характерный размер порядка 5 μm. Их геометрическая форма может быть произвольной (от компактной до асимметричной) с различным фактором формы. Основная часть частиц асимметрична, причем максимальное число частиц имеет отношение наибольшего линейного размера, к наименьшему равное двум.

Левитация таких частиц в тлеющем разряде вне страт — над узкой вставкой — наблюдалась ранее [8,9,13]. В используемой установке такая вставка располагалась в боковом отростке горизонтально (рис. 1), и частицы, не обладающие условиями левитации в стратах, оказались способными удерживаться не над ней, а в нижнем пристеночном слое. Характерный вес таких частиц менее 10^{-13} N. Согласно приближенным оценкам [1], их заряд $5 \cdot 10^{-16}$ C, для их левитации требуется поле порядка 1 V/cm.

Частицы, извлеченные из страт, имеют характерный вес 10^{-12} N. При оценке их заряда в $1 \cdot 10^{-15}$ C электрическое поле для левитации оказывается порядка 10 V/cm, что характерно для головной части страты [14].

Обнаружение левитирующих частиц в нижнем пристеночном слое, а также то, что размер данного пылевого образования достаточно велик, позволяют использовать плазму тлеющего разряда как „естественный“ сепаратор пылевых гранул.

Выводы и заключение

Экспериментальное исследование, проведенное в двух газах с накоплением существенной количественной статистики, показывает, что в плазме тлеющего разряда осуществляется распределение полидисперсных пылевых частиц по размеру. Впервые обнаружено формирование объемных пылевых образований в нижнем пристеночном слое камеры с количеством частиц, существенно превышающим число частиц в пылевой ловушке в страте. Обнаруженная сепарация частиц в диапазоне от менее 1 до 10 μm позволяет использовать тлеющий разряд в качестве устройства для разделения частиц по размерам.

Работа поддержана РФФИ, грант № 11-02-01329а.

Список литературы

- [1] *Фортов В.Е., Молотко В.И., Петров О.Ф.* и др. // УФН. 2004. Т. 174. № 5. С. 495–544.
- [2] *Цытович В.Н., Морфилл Г.Е., Томас Х.* // Физика плазмы. 2002. Т. 28. № 8. С. 675–707.
- [3] *Карасев В.Ю., Эйхвальд А.И., Дзлиева Е.С.* // Вестн. СПбГУ. Сер. 4. 2009. Вып. 1. С. 140–144.
- [4] *Василяк Л.М., Ветчинин С.П., Поляков Д.Н., Фортов В.Е.* // ЖЭТФ. 2005. Т. 127. № 5. С. 1166–1172.
- [5] *Karasev V.Yu., Dzlieva E.S., Ivanov A.Yu., Éikhval'd A.I.* // Phys. Rev. E. 2009. Vol. 79. P. 026 406.
- [6] *Petrov O.F., Vaulina O.S., Fortov V.E.* // Intern. Conf. PPPT-6. Minsk: IMAP NASB, 2009. Vol. 2. P. 856.
- [7] *Stoffels W.W., Stoffels E., Swinkels G.H.P.M., Boufnichil M., Kroesen G.M.W.* // Phys. Rev. E. 1999. Vol. 59. P. 2302.
- [8] *Луцаев А.М., Молотков В.И., Нефедов А.П.* и др. // ЖЭТФ. 1997. Т. 112. № 6. С. 2030–2044.
- [9] *Karasev V.Yu., Dzlieva E.S., Ivanov A.Yu., Éikhval'd A.I.* // Phys. Rev. E. 2006. Vol. 74. P. 066 403.
- [10] *Дзлиева Е.С., Карасев В.Ю., Эйхвальд А.И.* // Опт. и спектр. 2004. Т. 97. № 1. С. 107–113.
- [11] *Грин Х., Лейн В.* Аэрозоли — пыли, дымы и туманы. Л.: Химия, 1969. 400 с.
- [12] *Карасев В.Ю., Иванов А.Ю., Дзлиева Е.С.* // ЖЭТФ. 2008. Т. 133. № 2. С. 460–465.
- [13] *Дзлиева Е.С., Карасев В.Ю., Эйхвальд А.И.* // Опт. и спектр. 2002. Т. 92. № 6. С. 1018–1023.
- [14] *Райзер Ю.П.* Физика газового разряда. М.: Наука, 1992. 536 с.