

Отбор пылевых частиц в плазмформирующих газах с различными потенциалами ионизации

© Е.С. Дзалиева, В.Ю. Карасев, Л.А. Новиков, С.И. Павлов, М.С. Голубев, И.Ч. Машек

Санкт-Петербургский государственный университет,
19034 Санкт-Петербург, Россия
e-mail: plasmadust@yandex.ru

Поступило в Редакцию 27 июня 2023 г.

В окончательной редакции 28 июля 2023 г.

Принято к публикации 30 июля 2023 г.

Количественно определены размеры пылевых частиц, способных левитировать в пылевых ловушках в стратах в тлеющем разряде во всех инертных газах при одинаковых параметрах разряда. Установлено более чем двукратное уменьшение размера частиц при переходе от газа с максимальным потенциалом ионизации He до Xe. Обнаруженная в эксперименте закономерность интерпретирована с точки зрения условий левитации частиц. Показано, что в газах с малым потенциалом ионизации сила ионного увлечения превосходит силу тяжести, при этом абсолютные значения сил уменьшаются с уменьшением размеров частиц. Обнаруженный эффект может быть использован для тонкого улавливания пылевых частиц в плазменных ловушках.

Ключевые слова: пылевая плазма, тлеющий разряд, полидисперсные частицы, инертные газы, сила ионного увлечения.

DOI: 10.61011/JTF.2023.10.56280.160-23

Введение

Главными особенностями пылевой плазмы является самоорганизация пылевой компоненты в упорядоченную структуру, способную формировать разные типы пространственной кристаллической упаковки [1,2], появление новых типов волн [3], а также экстремальные для обычного вещества свойства — механические, термодинамические, магнитные [1,4,5]. При формировании пылевой плазмы происходит отбор пылевых гранул, способных левитировать в плазменной ловушке. Отбор происходит по ряду параметров частиц: массе (размеру и плотности), электроемкости (размеру и форме). Для изучения характеристик отбора частиц в ловушках, а также для практического использования пылевых плазменных фильтров представляет интерес экспериментальное исследование параметров полидисперсных пылевых частиц при вариации основных плазменных параметров, прежде всего — температуры (энергии) электронов. Такое исследование возможно при применении полидисперсных частиц одинаковой плотности в разряде разных инертных газов.

Пылевые структуры, сформированные в тлеющем разряде, могут содержать до 8000 частиц. Метод улавливания частиц непосредственно из разряда был разработан в [6]. Извлеченные из разряда частицы наблюдаются в оптическом микроскопе, а для изучения формы поверхности применяется электронный микроскоп [7,8]. Проекционный двумерный размер частиц определяется статистически по собранным образцам [9]. Далее по характерному размеру частиц определяется

масса, электроемкость и оцениваются силы, участвующие в балансе сил при левитации частиц в пылевой ловушке.

Особенностью представленного исследования является изучение характеристик отобранных в пылевой ловушке частиц в зависимости от параметров разряда. При вариации рабочего газа от гелия к ксенону потенциал ионизации изменяется вдвое. Соответственно меняются электрические характеристики: энергия электронов (заряд пылевых частиц), удерживающее электрическое поле. Масса ионов, входящая в силу ионного увлечения [1–3], возрастает в 33 раза. С одной стороны, это создало сложности при формировании пылевой плазмы в сильно различающихся условиях, как это проявилось в специальном подборе условий в неоне и криптоне [10,11] и при использовании смеси газов гелия и ксенона в ограниченных пропорциях [12]. С другой стороны, преодолев эту трудность, нам удалось последовательно проследить изменение размеров левитирующих частиц при переходе от газа с максимальным потенциалом ионизации (гелий, 24 eV) к газу с минимальным потенциалом (ксенон, 12 eV). Данное изменение показало, что в условиях эксперимента (одинаковое давление и ток разряда) изменяются силы, участвующие в балансе. Абсолютные значения сил падают, но изменяется их соотношение. В легких инертных газах баланс определяется весом частицы и электростатической силой, в газах тяжелее аргона вес оказывается несущественным — баланс определяется электростатической силой и силой ионного увлечения.

1. Эксперимент

Для исследования применялся полидисперсный кварц плотностью 2.5 g/cm^3 , просеянный через систему вибросит, диапазон размера исходного порошка до $25 \mu\text{m}$. Характерный размер d определялся по проекционным измерениям максимального размера частицы x и перпендикулярного размера y как $d = (x + y)/2$ [9,13]. Неидеальность (несферичность) формы поверхности частиц оценивалась по фактору формы $f = x/y$ [9]. У исходного порошка фактор формы f не зависел от размера частиц d , его среднее значение $\langle f \rangle$ было близко к 1.5.

Пылевые ловушки формировались в стоячих стратах в тлеющем разряде в разных инертных газах при одинаковых параметрах разряда: давление $P = 0.33 \text{ Torr}$, разрядный ток $i = 1.5 \text{ mA}$. Использование разрядной диафрагмы принудительно формировало положительный столб в стратифицированном режиме. В вертикальный участок разрядной камеры (трубку длиной 10 cm и радиусом 1 cm) со сформированной системой страт сверху из контейнера с сетчатым дном инжектировались частицы, они левитировали в головной части страт — области с сильным электрическим полем. Находясь в плазме, частицы оказываются под плавающим потенциалом U_{fl} и накапливают на поверхности отрицательный электрический заряд, в наших условиях порядка 10^4 элементарных. Если вертикальный и радиальный баланс сил выполняются, то в пылевой ловушке формируется пылевая структура. В наших экспериментах не подбирались строгие условия для левитации калиброванных частиц заданного размера. Напротив, в эксперименте из полидисперсных частиц в разряде отбирались способные к левитации частицы, в разных инертных газах частицы своего размера.

Для улавливания и сбора частиц нижняя часть разрядной камеры имела горизонтальный участок, по которому могло перемещаться собирающее устройство. Оно состояло из металлической каретки, управляемой извне постоянным магнитом, и помещенной на него полоски покровного стекла или кремниевой пластинки, в зависимости от типа используемого микроскопа. После формирования пылевой плазмы в вертикальном участке камеры под него подводилось собирающее устройство, и разряд гасился. Процесс формирования и улавливания пылевой структуры контролировался посредством подсветки и записи на видеокамеру, расположенную сбоку. Схематическое изображение разрядной трубки показано на рис. 1. Electroды для создания поля нужной полярности для удерживания отрицательно заряженных частиц располагались в боковых отростках (катод снизу, анод сверху).

После извлечения собирающего устройства с уловленными частицами из разрядной камеры оно помещалось под микроскоп. Использовался оптический микроскоп марки Axio Lab A1. Производилось фотографирование собранных объектов с требуемым увеличением и наблюдение их размеров и формы. По полученным данным,

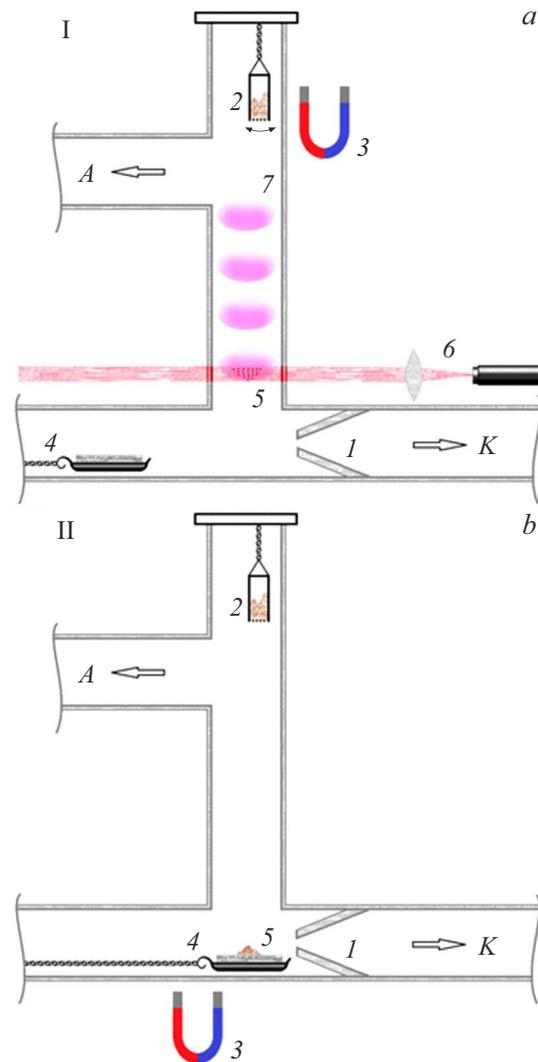


Рис. 1. Схема экспериментальной установки, показывающая две стадии эксперимента: *a* — Стадия I — отбор стратифицированным разрядом пылевых частиц; *b* — Стадия II — улавливание и извлечение левитировавших частиц из разрядной камеры. 1 — диэлектрическая вставка, служащая для формирования стоячих страт; 2 — контейнер, заполненный засыпным полидисперсным порошком; 3 — магнит, перемещающий металлические подвижные элементы внутри разрядной камеры; 4 — собирающее устройство; 5 — частицы, отобранные разрядом для левитации; 6 — система лазерной подсветки; 7 — стоячие страты.

аналогично тому, как это делалось в работе [12], строились распределения, по которым определялись средний характерный размер d , фактор формы f и дисперсия распределения по размерам в разных газах σ . Эти величины должны характеризовать параметры пылевых частиц и плазменной ловушки. Вероятно, d и f должны характеризовать глубину ямы, а σ может быть связана с шириной, поскольку страта является объемной ловушкой, и в разных ее фазах параметры плазмы (поле, концентрация заряженных частиц, энергия электронов)

различны [14–16]. Экспериментальные данные не выявили значимого отличия для f и σ в разных газах, но обнаружили существенное изменение для d . Например, в гелии и ксеноне отношение d равно 2.1, т.е. массы частиц отличаются почти на порядок. Зависимость характерного размера частиц d от сорта газа представлена на рис. 2. Далее мы проанализируем данный результат с точки зрения действующих сил и условия левитации частиц.

2. Анализ условий левитации пылевых частиц в разных газах

Обнаруженные изменения среднего размера частиц от 6.3 до 3.0 μm показывают очень большое изменение силы тяжести, от 3.27 pN в гелии до 0.34 pN в ксеноне. Это должно сильно повлиять на вертикальный баланс удерживающих частицы сил, что необходимо оценить количественно. Из рис. 2 следует, что характер изменения размера частиц между гелием и неоном и между криптоном и ксеноном различный. Кривая зависимости размера d от потенциала ионизации U_i в целом является гладкой, но ее производные слева и справа различаются. В разрядах слабого тока и низкого давления от потенциала ионизации газа существенно зависят основные характеристики, прежде всего, энергия электронов и величина поля [16]. Кривая на рис. 2 указывает на изменение характера зависимости для легких и тяжелых инертных газов. Если представить зависимость изменения d от массы иона (рис. 3), то получается гладкое изменение с постоянным значением производной $\Delta d/\Delta m_i$ и для области легких, и для области тяжелых газов. Изменение размеров частиц более чувствительно к замене потенциала ионизации газа, чем к замене массы иона. Изменение потенциала ионизации влияет на поле разряда, среднюю энергию электронов и, как следствие, на заряд пылевой частицы [1–3]. Экспериментальная зависимость, показанная на рис. 2, а также ее представление в виде производной $\Delta d/\Delta m_i$ в зависимости от U_i или от m_i указывают, что изменение характеристик разряда проявляется существенно в тяжелых газах, когда масса уловленных пылевых частиц наименьшая. В этом диапазоне параметров разряда связанные с зарядом частиц силы должны существенно меняться. Это связано с изменением поля E , заряда частиц q в удерживающей силе qE , а также дополнительно с изменением концентрации ионов n_i и температуры электронов T_e в силе ионного увлечения. Оценим изменения этих сил количественно в соответствии с динамикой уединенных пылевых частиц [1–3].

При типичных экспериментах с пылевой плазмой электрическое поле для компенсации веса частиц направлено против силы тяжести [17]. Такая геометрия вызывает движение ионов, создающее силу ионного увлечения F_{id} , направленную вниз. Тогда уравнение

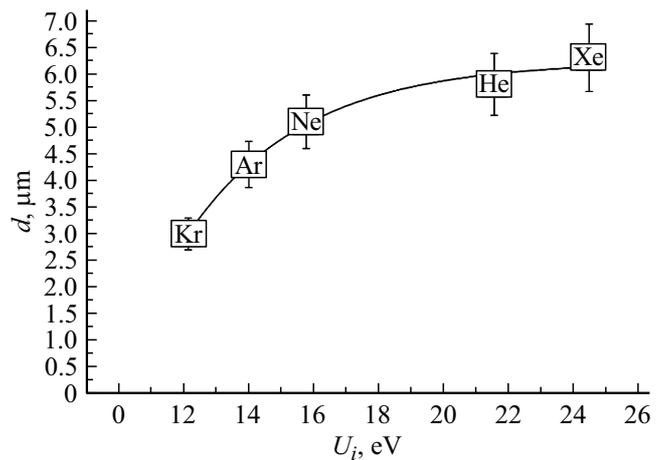


Рис. 2. Зависимость среднего размера частицы от энергии ионизации атома плазмформирующего газа, в котором собирались левитирующие частицы. Для всех газов давление — 0.33 Torr, разрядный ток — 1.5 mA.

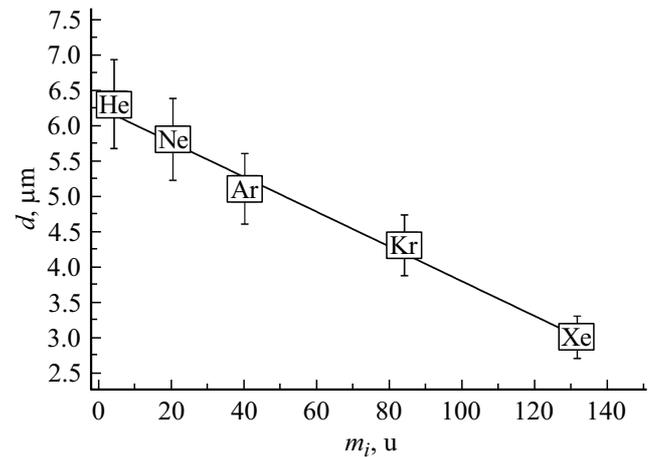


Рис. 3. Зависимость среднего размера частицы от массы атома плазмформирующего газа, в котором она левитирует. Для всех газов давление — 0.33 Torr, разрядный ток — 1.5 mA.

баланса сил для левитирующей частицы записывается как

$$qE = mg + F_{id}. \quad (1)$$

В электрической силе

$$F_E = qE \quad (2)$$

электрическое поле E определяется условиями в плазме, а заряд частицы q зависит от ее емкости и плавающего потенциала U_{fl} . Выражение для силы ионного увлечения имеет вид

$$F_{id} = \frac{8\sqrt{2\pi}}{3} a^2 n_i m_i V_T V \left\{ 1 + \frac{z\tau}{2} + \frac{z^2\tau^2}{4} \Pi \right\}, \quad (3)$$

где V_T и V — тепловая и направленная скорость ионов; $z = |Z_d|e^2/aT_e$ — безразмерный заряд частиц; Z_d —

Силы, действующие на частицу в разных газах

Силы	He	Ne	Ar	Kr	Xe
qE , pN	5.40	4.80	3.20	2.15	1.35
mg , pN	3.27	2.44	1.56	0.90	0.34
F_{id} , pN	2.13	2.36	1.64	1.25	1.01
F_{id}/qE	0.40	0.49	0.51	0.58	0.75

зарядовое число; a — радиус частицы; отношение температур электронов и ионов $\tau = T_e/T_i$; Π — кулоновский логарифм, проинтегрированный по функции распределения ионов [1–3], $\Pi \sim 1$. Для интерпретации полученных размеров частиц необходимо выполнить оценки сил в (1) для всех инертных газов. В (2) для оценки заряда в зависимости от сорта газа и размера частиц используются результаты моделирования на основе модели OML [1–3], поле E определялось по экспериментальным измерениям. В (3) концентрация плазмы n_i определялась по току разряда. Значения температуры T_e в разных газах брались по расчетам [18–20]. Выполненные численные оценки сведены в таблицу. Нижняя строка таблицы показывает изменение отношения силы ионного увлечения к силе тяжести (обе силы направлены вниз). Видно, что когда сила ионного увлечения превосходит силу тяжести, изменение размера происходит быстрее (кривая на рис. 2, начиная с аргона).

Касательно усиления действия силы ионного увлечения нужно заметить следующее. В выражении (3) можно выделить два фактора: увеличение массы иона и изменение заряда пылевой частицы, дающих вклады в силу при изменении сорта газа. В представленных экспериментах относительное увеличение силы происходит по мере перехода к газу с более низким потенциалом ионизации. В недавней серии работ [12,21], где рассматривалась задача левитации пылевых частиц в смесях газов при добавлении легко ионизируемого ксенона к основному гелию, m_i изменялось сразу же при минимальной добавке, а параметры плазмы (E , T_e , n_e) менялись постепенно по мере увеличения добавки. В чистом гелии отношение F_i/qE было порядка 0.2, а при добавке ксенона в 10% отношение стало порядка единицы. Ионное увлечение превосходило силу тяжести уже примерно при 5% добавке (в [12] давление P было 1.0 Torr), хотя замена иона гелия на ион ксенона в (3) при степени ионизации плазмы 10^{-7} происходит при крайне малых добавках [22]. Проведенный анализ позволяет отдельно оценить два фактора относительного увеличения силы ионного увлечения и обнаружить замещение ею силы тяжести, происходящее в тяжелых плазмформирующих газах.

Согласно имеющимся литературным данным, превышение F_i над m_g регистрировалось лишь для частиц размером менее $1 \mu\text{m}$ и при больших направленных скоростях потока ионов (при низком давлении) [23,24]. Обнаруженный в настоящей работе эффект в тяжелых

газах позволяет создать пылевые плазменные ловушки при обращенном направлении электрического поля.

Можно заметить, что, поскольку в применяемой методике используется механическое улавливание, она может быть применена в широком диапазоне масс пылевых частиц, типов газа и параметров плазмы. В частности, используемый метод может работать в диапазоне давления от близкого к атмосферному [25] до случая сильно разреженного газа, или в безатмосферных условиях [26,27].

Заключение

В работе экспериментально подобраны условия тлеющего разряда, при которых можно создавать пылевые ловушки в стратах в разных инертных газах при одинаковых параметрах разряда (ток, давление, радиус трубки). Определены размеры пылевых частиц, отобранных разрядом в разных инертных газах. Обнаружено, что размеры частиц в гелии и ксеноне отличаются вдвое.

Показано, что при замене рабочего газа на газ с меньшим потенциалом ионизации крупные частицы выбрасываются из ловушки из-за возрастания силы ионного увлечения по отношению к весу частицы.

Проведенные исследования позволяют создать пылевые ловушки при инвертированном электрическом поле, когда пылевая плазма может быть удержана за счет силы ионного увлечения, действующей против силы тяжести.

Финансирование работы

Работа была поддержана РФФИ, грант № 22-22-00154.

Конфликт интересов

Авторы заявляют, что у них нет конфликта интересов.

Список литературы

- [1] V.E. Fortov, G.E. Morfill. *Complex and Dusty Plasmas: from Laboratory to Space* (Taylor & Francis Group, NY., 2010)
- [2] S.V. Vladimirov, K. Ostrikov, A.A. Samarian. *Physics and Applications of Complex Plasmas* (Imperial College Press, London, 2005)
- [3] V.N. Tsytovich, G.E. Morfill, S.V. Vladimirov, H.M. Thomas. *Elementary Physics of Complex Plasmas* (Springer, NY., 2008)
- [4] Н.А. Ворона, А.В. Гавриков, А.С. Иванов, О.Ф. Петров, В.Е. Фортов, И.А. Шахова. *ЖЭТФ*, **132**, 941 (2007).
- [5] N. Sato. *AIP Conf. Proc.*, **799**, 97 (2005). DOI: 10.1063/1.2134577
- [6] Е.С. Дзлиева, М.А. Ермоленко, В.Ю. Карасев. *ЖТФ*, **82** (1), 147 (2012).
- [7] М.А. Ермоленко, Е.С. Дзлиева, В.Ю. Карасев, С.И. Павлов, В.А. Полищук, А.П. Горбенко. *Письма в ЖТФ*, **41** (24), 77 (2015).
- [8] В.Ю. Карасев, В.А. Полищук, А.П. Горбенко, Е.С. Дзлиева, М.А. Ермоленко, М.М. Макара. *ФТТ*, **58**, 1007 (2016).

- [9] Х. Грин, В. Лейн. *Аэрозоли — пыли, дымы и туманы* (Химия, Л., 1969)
- [10] Е.С. Дзалиева, М.А. Ермоленко, В.Ю. Карасев. *ЖТФ*, **82** (7), 51 (2012).
- [11] A. Siasko, Yu. Golubovskii, S. Pavlov, E. Dzljeva, L. Novikov, M. Golubev, V. Karasev. *Phys. Plasmas*, **30**, 033701 (2023). DOI: 10.1063/5.0135329
- [12] Е.С. Дзалиева, С.А. Майоров, Л.А. Новиков, С.И. Павлов, М.В. Балабас, И.Р. Крылов, В.Ю. Карасев. *Физика плазмы*, **48**, 914 (2022). DOI: 10.31857/S0367292122600741
- [13] П. Райст. *Аэрозоли. Введение в теорию* (Мир, М., 1987)
- [14] А.М. Липаев, В.И. Молотков, А.П. Нефедов, О.Ф. Петров, В.М. Торчинский, В.Е. Фортов, А.Г. Храпак, С.А. Храпак. *ЖЭТФ*, **112**, 2030 (1997).
- [15] Ю.П. Райзер. *Физика газового разряда* (Наука, М., 1992)
- [16] Ю.Б. Голубовский, А.А. Кудрявцев, В.О. Некучаев, И.А. Прохорова, Л.Д. Цендин. *Кинетика электронов в неравновесной газоразрядной плазме* (СПбГУ, СПб, 2004)
- [17] В.Е. Фортов, А.Г. Храпак, С.А. Храпак, В.И. Молотков, О.Ф. Петров. *УФН*, **174** (5), 495 (2004). DOI: 10.3367/UFNr.0174.200405b.0495
- [18] С.А. Майоров. *Физика плазмы*, **35**, 869 (2009).
- [19] С.А. Майоров. *Краткие сообщения по физике ФИАН*, **4**, 18 (2021).
- [20] Р.И. Голятина, С.А. Майоров. *Прикладная физика*, **3**, 11 (2021). DOI: 10.51368/1996-0948-2021-3-11-16
- [21] Е.С. Дзалиева, С.А. Майоров, Л.А. Новиков, С.И. Павлов, М.В. Балабас, И.Р. Крылов, В.Ю. Карасев. *Физика плазмы*, **49**, 98 (2023). DOI: 10.31857/S0367292122600911
- [22] Л.В. Шибкова, В.М. Шибков. *Разряд в смесях инертных газов* (Физматлит, М., 2005)
- [23] M.S. Barnes, J.H. Keller, J.S. Forster, J.A. O'Neill, D.K. Coultas. *Phys. Rev. Lett.*, **68**, 313 (1992). DOI: 10.1103/PhysRevLett.68.313
- [24] S.A. Khrapak, A.V. Ivlev, G.E. Morfill, H.M. Thomas. *Phys. Rev. E*, **66**, 046414 (2002). DOI: 10.1103/PhysRevE.66.046414
- [25] D.S. Lapitskiy, V.S. Filinov, L.V. Deputatova, L.M. Vasilyak, V.I. Vladimirov, V.Ya. Pecherkin. *High Temperature*, **53**, 1 (2015). DOI: 10.1134/S0018151X15010162
- [26] S.I. Popel, A.P. Golub', A.I. Kassem, L.M. Zelenyi. *Phys. Plasmas*, **29**, 013701 (2022). DOI: 10.1063/5.0077732
- [27] С.И. Попель, А.П. Голубь. *Письма в ЖЭТФ*, **115**, 629 (2022). DOI: 10.31857/S1234567822100056