

10

## **Аномально высокая зарядка дисперсных частиц электронным пучком с энергией электронов 25 keV**

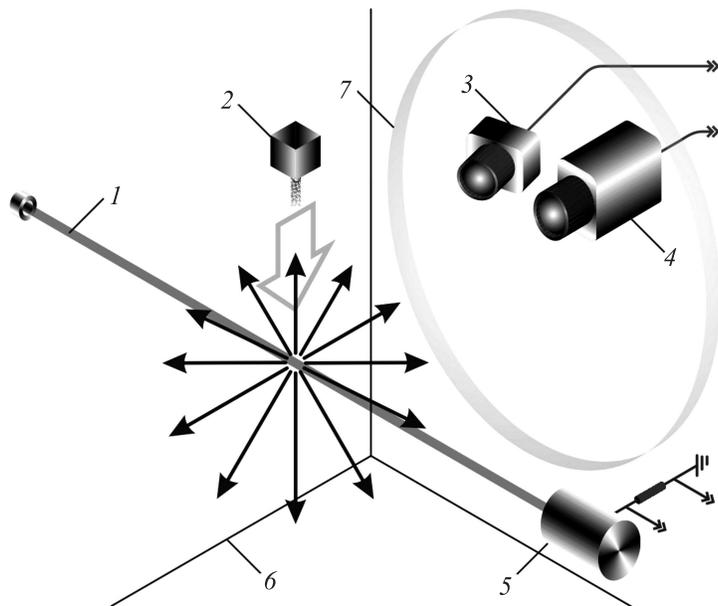
© М.Н. Васильев, Н.А. Ворона, А.В. Гавриков, О.Ф. Петров,  
В.С. Сидоров, В.Е. Фортон

Объединенный институт высоких температур РАН, Москва  
Московский физико-технический институт (Государственный университет), Москва  
E-mail: raraavis@ihed.ras.ru

Поступило в Редакцию 19 июля 2010 г.

Экспериментально осуществлена и исследована сверхвысокая зарядка пылевых частиц при воздействии электронного пучка. Энергия электронов в пучке составляла 25 keV, характерные размеры используемых в эксперименте макрочастиц оксида алюминия — 100  $\mu\text{m}$ . Заряд, приобретаемый пылевой частицей, составил  $5 \cdot 10^7 e$ , что соответствует заряду  $10^6 e$  для частицы микронных размеров и более чем на два порядка превышает характерные значения заряда частиц такого же размера в газовых разрядах низкого давления.

Процессы зарядки макрочастиц представляют интерес в связи с изучением космических объектов (туманности, хвосты комет, кольца планет и др.) [1], высоких и средних слоев атмосферы Земли (заряженные частицы в ионосфере, серебристые облака) [2,3], с освоением космоса (создание космических двигателей, источников энергии) [4,5], с перспективами широкого применения плазменно-пылевых технологий в промышленности (производство дисперсных композитных материалов и др.) [6]. В настоящее время широко представлены работы по изучению процессов зарядки пылевых частиц в плазме различных типов газового разряда — в высокочастотном разряде [7], разряде постоянного тока [8], а также в термической плазме [9] и в плазме, индуцированной УФ-излучением [10]. В лабораторных условиях, как правило, заряд пылевых частиц в плазменно-пылевых структурах не превышает  $10^3 - 10^4 e$  ( $e$  — элементарный заряд) для частиц микронных размеров. Между тем определенный интерес представляет получение значительно более высоких зарядов на частицах. В электростатическом поле таких частиц



**Рис. 1.** Схема эксперимента: 1 — электронный пучок, 2 — система вброса частиц, 3 — фотокамера, 4 — видеокамера, 5 — цилиндр Фарадея, 6 — вакуумная камера, 7 — иллюминатор.

ионы будут ускоряться до высоких энергий, что открывает перспективы применения сильно заряженных пылевых частиц для каталитического ускорения скорости реакций с высоким энергетическим барьером, для глубокой имплантации ионов и получения материалов с новыми поверхностными свойствами, в ионных двигателях для ускорения космических объектов и др.

Данная работа посвящена экспериментальному исследованию сверх-высокой зарядки частиц электронным пучком с энергией электронов 25 keV. Для исследования зарядки макрочастиц при прямом воздействии электронного пучка была разработана схема эксперимента, представленная на рис. 1. Эксперименты были выполнены в атмосфере воздуха при давлении  $P_n = 10^{-4}$  Torr с макрочастицами оксида алюминия ( $Al_2O_3$ ). При этом использовалась полидисперсная фракция



**Рис. 2.** Кадр видеозаписи эксперимента.

макрочастиц со средним радиусом  $r_d = 50 \mu\text{m}$  и дисперсией  $15 \mu\text{m}$ . Ток электронного пучка составлял  $I_b = 10 \text{ mA}$ , его радиус —  $r_b = 3 \text{ mm}$ , энергия электронов пучка  $W_e = 25 \text{ keV}$ . Пылевые частицы инжектировались при помощи специальной системы вброса непосредственно в реакционную область, где они взаимодействовали с электронным пучком. В результате воздействия пучка электронов наблюдался интенсивный разлет частиц, который фиксировался при помощи видеокамеры (частота съемки  $25 \text{ Hz}$ ), а также при помощи фотокамеры. Типичный кадр из полученных видеоданных представлен на рис. 2.

Анализ видеоизображений, полученных в ходе экспериментов, позволил установить, что характерные скорости  $V_d$  разлета макрочастиц оксида алюминия меняются в диапазоне от  $1.5$  до  $4.5 \text{ m/s}$  в зависимости от направления движения. Оценка сверху силы трения  $F_n = \beta V_d$ , действующей на пылевую частицу в условиях эксперимента, показала, что  $F_n \leq 4 \cdot 10^{-12} \text{ N}$  ( $\beta = 8 \cdot 10^{-13} \text{ kg/s}$  — коэффициент сопротивления

среды [11],  $V_d \leq 4.5$  m/s). При этом сила тяжести, действующая на макрочастицу,  $F_g = m_d g = 2 \cdot 10^{-8}$  N ( $m_d$  — масса макрочастицы). Скорости разлета частиц в вертикальном и горизонтальном направлении совпадают по порядку величины. Таким образом,  $F_g, F_\Sigma \gg F_n$ , где  $F_\Sigma$  — суммарная сила, приводящая к разлету макрочастиц, и при проведении дальнейшего анализа действие силы трения на пылевые частицы не будет учитываться.

Пылевая частица под действием гравитационной силы приобретает скорость  $V_y = 1.5$  m/s. Разность  $V = V_d - V_y$  представляет собой дополнительную скорость, возникающую у макрочастицы при взаимодействии с электронным пучком. Восстановленные из экспериментальных данных значения  $V$  составляют 3 m/s и не зависят от направления движения. Такая особенность разлета показывает, что за время взаимодействия пылевых частиц с электронным пучком влияние сил, действующих вдоль определенного направления (например, гравитационной силы), пренебрежимо мало по сравнению с силами, приводящими к изотропному разлету. Основные силы, которые могут приводить к разлету макрочастиц, можно представить в виде

$$F_\Sigma = F_{th} + F_b + F_e,$$

где  $F_{th}$  — сила, связанная с нагревом пылевых частиц при поглощении электронов пучка,  $F_b$  — сила увлечения макрочастиц электронами пучка,  $F_e$  — электрическая сила, обусловленная зарядкой частиц в пучке и взаимодействием частиц друг с другом и с электронами пучка.

Сила  $F_{th}$  связана с отличием температуры макрочастицы от температуры буферного газа, т.е. с нагревом пылевых частиц при поглощении электронов пучка. Изменение температуры макрочастиц в условиях эксперимента может быть оценено из соотношения

$$\Delta T = \frac{W_e N_e}{m_d c_d},$$

где  $c_d$  — удельная теплоемкость материала частицы,  $N_e$  — количество электронов, поглощенных частицей за время ее нахождения в пучке. Оценка сверху для величины  $N_e$  может быть получена из выражения

$$N_e = \frac{I_b}{e} \frac{S_d}{S_b} t_d = 7 \cdot 10^{10},$$

где  $S_d = 7 \cdot 10^{-9}$  m<sup>2</sup> — характерная площадь сечения пылевой частицы,  $S_b = \pi r_b^2$  — площадь сечения пучка электронов,  $t_d = 2r_b/V_y =$

$= 4 \cdot 10^{-3}$  s — время прохождения пылевой частицы через пучок электронов. Таким образом,  $\Delta T = 180$  К, т.е. разогрева, при котором началось бы испарение материала макрочастиц, не происходит. Это, в свою очередь, означает, что  $F_{th}$  определяется только термофоретическим эффектом, т.е.  $F_{th} \sim 4 \cdot 10^{-11}$  N [12], и в условиях эксперимента  $F_{th} \ll F_g$ .

Сила увлечения пылевой частицы электронами пучка не является изотропной и имеет выделенное направление действия вдоль пучка, поэтому в силу изотропности разлета макрочастиц ее действием можно пренебречь. Этот результат подтверждается и следующей оценкой: импульс, приобретаемый пылевой частицей при поглощении электронов пучка,

$$p_d = \sqrt{2W_e m_e} N_e,$$

что соответствует изменению скорости макрочастицы  $\Delta V_d = 3$  mm/s, т.е.  $\Delta V_d \ll V_d$  ( $m_e$  — масса электрона). Проведенный анализ позволяет сделать вывод, что, взаимодействуя с электронным пучком, пылевые частицы приобретают значительный заряд, который и приводит к их разлету за счет электрического взаимодействия друг с другом и (или) с электронным пучком, причем эта сила взаимодействия существенно превышает другие силы ( $F_g$ ,  $F_n$ ,  $F_{th}$ ,  $F_b$ ), действующие на частицу. По этой причине для оценки заряда, приобретаемого макрочастицей, была рассмотрена следующая модель: при зарядке в пучке все макрочастицы приобретают одинаковый заряд  $Q$ , который при дальнейшем движении частицы не меняется. Кроме сил электрического взаимодействия пылевых частиц друг с другом и с электронами пучка, другие силы не учитываются. В электронном пучке из-за непрерывной подачи порошка находится  $N$  макрочастиц, каждая из которых уже имеет заряд  $Q$ , причем объем, занимаемый заряженными макрочастицами, рассматривается как сферический. Радиус заряженного шара из пылевых частиц  $r_b = 3$  mm совпадает с радиусом электронного пучка. Электронный пучок рассматривается как равномерно заряженный стержень с линейной плотностью заряда

$$k_b = \frac{I_b}{\sqrt{(2W_e/m_e)}} \approx -10^{-10} \text{ C/m}.$$

Макрочастицы начинают движение с поверхности сферы с нулевой начальной скоростью и ускоряются в поле шара и стержня. Закон сохранения энергии для частицы,двигающейся в горизонтальной плоскости

перпендикулярно оси электронного пучка, в рамках данной модели принимает следующий вид:

$$\frac{1}{2\pi\epsilon_0} k_b Q \ln \frac{r}{r_b} + \frac{1}{4\pi\epsilon_0} N Q^2 \left( \frac{1}{r_b} - \frac{1}{r} \right) - \frac{m_d V^2}{2} = 0, \quad (1)$$

где  $r = 10$  см — расстояние от частицы до центра шара (и до оси пучка) в момент, когда скорость частицы равна  $V$ ,  $\epsilon_0$  — электрическая постоянная,  $N = 50$  — среднее количество частиц, образующих заряженный шар. Решая это уравнение, получим заряд на частице:  $Q \approx 5 \cdot 10^7$  е.

Сравнение с максимальным зарядом

$$Q_{\max} = 4\pi\epsilon_0 r_d \phi_d = -1.4 \cdot 10^{-10} \text{C} = 9 \cdot 10^8 \text{e},$$

где  $\phi_d = 25$  кВ — потенциал поверхности частицы, который она может приобрести, заряжаясь пучком с энергией электронов  $W_e = 25$  кэВ, показывает, что заряд  $Q$ , приобретаемый пылевой частицей в условиях эксперимента, меньше максимально достижимого более чем на порядок. В качестве причин, которые приводят к такому отличию, могут быть следующие: вторичная эмиссия электронов, термоэлектронная эмиссия, недостаточное для полной зарядки макрочастицы время взаимодействия с пучком электронов, экранировка пылевой частицы ионами, нарабатываемыми электронным пучком в буферном газе.

Коэффициент вторичной электронной эмиссии веществ существенно зависит от энергии первичных электронов [13,14]. Для оксида алюминия при энергиях первичных электронов, реализованных в экспериментах, коэффициент вторичной эмиссии электронов становится существенно меньше единицы [15].

Следовательно, отличие заряда, приобретаемого макрочастицей при непосредственном взаимодействии с электронным пучком, от максимально возможного обусловлено совместным влиянием перечисленных выше причин, причем ни одна из них не может быть выделена в качестве доминирующей.

Таким образом, в ходе выполненных экспериментальных исследований была продемонстрирована сверхвысокая зарядка пылевых частиц при прямом воздействии электронного пучка. Заряд, приобретаемый частицами, составил  $Q \approx 5 \cdot 10^7$  е, что соответствует заряду  $10^6$  е для частицы микронного размера и более чем на два порядка превышает характерные значения заряда частиц такого же размера в газовых

разрядах низкого давления. Относительная погрешность результатов составила 50%. Нагрев материала макрочастиц в результате взаимодействия с пучком электронов составил  $\Delta T = 180$  К, время зарядки —  $t_{ch} = 5 \cdot 10^{-4}$  с.

Работа частично поддержана Программой фундаментальных исследований президиума РАН „Теплофизика и механика экстремальных энергетических воздействий и физика сильно сжатого вещества“, Государственной корпорацией по атомной энергии „Росатом“ (Гос. контракт № N.4e.45.03.10.1025), Министерством образования и науки РФ (Гос. контракт № 02.740.11.0236), проектом РФФИ № 10-02-01428.

## Список литературы

- [1] *Horanyi M.* // Annu. Rev. Astron. Astrophys. 1996. V. 34. N 1. P. 383.
- [2] *Cho J.Y.N., Rottger J.* // J. Geophys. Res. 1997. V. 102. P. 2001.
- [3] *Kopin S.I., Popel S.I., Yu M.Y.* // Phys. Plasmas. 2009. V. 16. N 6. P. 063705.
- [4] *Trottenberg T., Kersten H., Neumann H.* // New J. Phys. V. 10. P. 063012.
- [5] *Ваулина О.С., Фортвов В.Е., Петров О.Ф., Храпак А.Г., Храпак С.А.* // Пылевая плазма: эксперимент и теория. М.: Изд-во физико-математической литературы, 2009.
- [6] *Kersten H., Schmetz P., Kroesen G.M.W.* // Surf. Coat. Technol. 1998. V. 108–109. P. 507.
- [7] *Ваулина О.С., Самарян А.А., Джеймс Б., Петров О.Ф., Фортвов В.Е.* // ЖЭТФ. 2003. Т. 123. № 6. С. 1179.
- [8] *Fortov V.E., Nefedov A.P., Molotkov V.I., Poustylnik M.Y., Torchinsky V.M.* // Phys. Rev. Lett. 2001. V. 87. N 20. P. 205002.
- [9] *Rosenberg M., Mendis D.A., Sheehan D.P.* // IEEE Transactions on Plasma Science. 1999. V. 27. N 1. P. 239.
- [10] *Vaulina O.S., Nefedov A.P., Petrov O.F., Fortov V.E.* // Phys. Rev. Lett. 2002. V. 88. N 3. P. 035001.
- [11] *Gavrikov A., Shakhova I., Ivanov A., Petrov O., Vorona N., Fortov V.* // Phys. Lett. A. 2005. V. 336. N 4–5. P. 378.
- [12] *Fortov V.E., Morfill G.E.* // Complex and Dusty Plasmas: From Laboratory to Space. USA: CRC Press, 2010.
- [13] *Кикоин И.К.* Таблицы физических величин: Справочник. М.: Атомиздат, 1976.
- [14] *Walch B., Hor'anyi M., Robertson S.* // Phys. Rev. Lett. 1995. V. 75. N 3. P. 838.
- [15] *Рау Э.И., Эвстафьева Е.Н., Андрианов М.В.* // ФТТ. 2008. Т. 50. В. 4. С. 599–607.