

Удаление пыли с поверхностей с помощью электродинамической ловушки

Л. М. Василяк, В. И. Владимиров, Л. В. Депутатова, Д. С. Лапицкий,
В. Я. Печеркин, Р. А. Сыроватка и В. С. Филинов

Объединенный институт высоких температур РАН, Ижорская ул., 13, стр.2, Москва
125412, Россия

E-mail: syrovatkara@gmail.com

Статья поступила в редакцию 26 ноября 2018 г.

Аннотация. Работа посвящена экспериментальным и численным исследованиям возможности очистки запыленных диэлектрических поверхностей с помощью электродинамических ловушек. Рассматривались линейная квадрупольная ловушка и полидисперсный порошок оксида алюминия. Численное моделирование было выполнено методами молекулярной динамики. Экспериментально наблюдался эффект поднятия и захвата частиц ловушкой со стеклянной подложки. С помощью численного моделирования были определены параметры, необходимые для поднятия и захвата частиц. <https://doi.org/10.33849/2019101>

1. ВВЕДЕНИЕ

Электродинамические ловушки Пауля были разработаны в конце 50-х годов прошлого века [1]. Эти ловушки состояли из одного кольцевого и двух запирающих электродов, на которые подавался электрический потенциал. Были получены результаты по удержанию алюминиевых частиц в вакууме [2]. Авторами было отмечено, что частицы колебались вдоль силовых линий электрического поля ловушки.

В настоящее время электродинамические ловушки нашли широкое применение в различных фундаментальных и прикладных исследованиях: изучении фазовых переходов в кулоновских системах [3], спектроскопии молекулярных ионов и изучении химических реакций при температуре, близкой к абсолютному нулю [4]. Исследуются свойства частиц размером от 100 нм до 100 мкм, например, замерзание капель переохлажденной воды [5], флуоресцентная эмиссия с одиночной частицы аэрозоля [6]. Электродинамические ловушки нашли применение в биологии для изучения свойств отдельных микроорганизмов и клеток [7].

Линейные электродинамические ловушки используются для создания и исследования протяженных кулоновских структур, состоящих из нескольких тысяч частиц [8, 9]. Были выполнены работы, показавшие возможность захвата заряженных частиц из воздушного потока [10, 11]. Настоящая работа посвящена исследованию возможности очистки запыленных поверхностей с помощью линейной электродинамической ловушки.

2. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ УСТАНОВКА

В работе использовалась линейная квадрупольная электродинамическая ловушка (рисунок 1), состоящая из четырех параллельных стальных цилиндрических электродов диаметром 3 мм и длиной 30 см. Электроды были расположены в вершинах квадрата со стороной 2 см. Переменный потенциал $U_a \sin(\omega t)$ с частотой $f = \omega/2\pi = 50$ Гц подавался на электроды ловушки. Потенциал на противоположных электродах совпадал по фазе, в то время как фазовый сдвиг между соседними электродами был равен π . Электродинамическая ловушка помещалась в оптически прозрачный пластиковый короб для защиты от воздушных потоков. Для предотвращения выхода частиц из ловушки через ле-

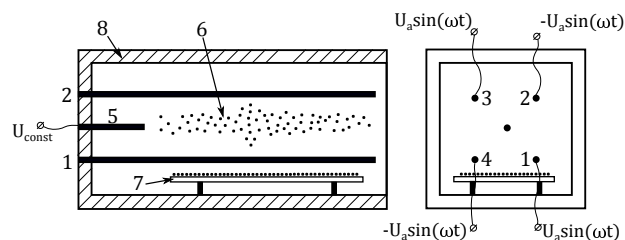


Рисунок 1. Схема электродинамической ловушки (слева — продольное сечение, справа — поперечное сечение): 1, 2, 3, 4 — электроды ловушки, 5 — торцевой электрод; 6 — захваченные пылевые частицы, 7 — стеклянная подложка с незагрязненными частицами, 8 — прозрачный пластиковый короб.

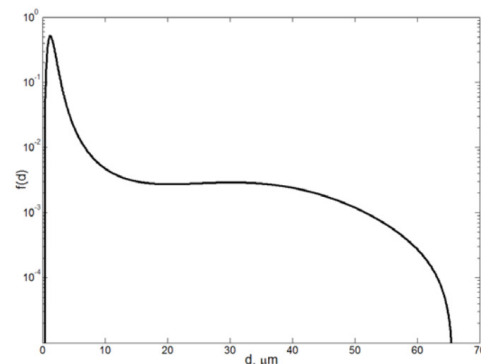


Рисунок 2. Распределение частиц по размерам Al_2O_3 .

вый край (рисунок 1) был смонтирован дополнительный электрод, на который подавался постоянный потенциал $U = 1$ кВ. Под ловушку помещалась стеклянная подложка с тонким слоем полидисперсного порошка Al_2O_3 . Распределение частиц по размерам представлено на рисунке 2. Видеорегистрация частиц, подсвеченных лазером, осуществлялась с помощью цифровой видеокамеры HiSpec-1.

3. ЭКСПЕРИМЕНТ

При увеличении амплитуды U_a до критического значения (например, 2.5 кВ для расстояния 0.5 см между подложкой и электродами ловушки), частицы начинают втягиваться в ловушку. На рисунке 3 представ-

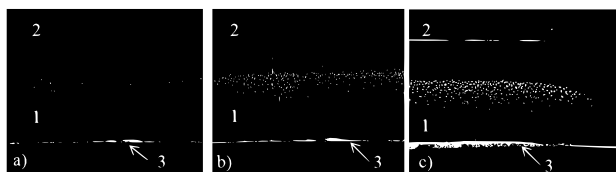


Рисунок 3. Захват частиц Al_2O_3 со стеклянной подложки, расположенной на расстоянии 0.5 см от электродов ловушки: (a) $U_a = 3.5$ кВ, (b) и (c) $U_a = 5$ кВ; 1, 2 — электроды ловушки, 3 — стеклянная подложка с частицами; (a) и (b) — изображения центральной части ловушки, (c) — изображение у открытого торца ловушки.

лены изображения частиц Al_2O_3 , захваченных ловушкой. Эти частицы были захвачены со стеклянной подложки, расположенной на расстоянии 0.5 см от электродов ловушки. Между подложкой и нижними электродами ловушки можно наблюдать траектории взлетающих частиц. Кроме того, наблюдаются захваченные ловушкой частицы, которые медленно движутся к открытому краю. При увеличении напряжения U_a с 3.5 кВ (рисунок 3(a)) до 5 кВ (рисунок 3(b)), число захваченных частиц существенно увеличивается. На рисунке 3(c) представлено изображение правого торца ловушки. Можно видеть, что захваченные частицы движутся к открытому торцу ловушки, после чего вылетают из ловушки и падают вниз. Обнаруженный эффект может использоваться для очистки запыленных поверхностей и сбора захваченных частиц. На рисунке 4 представлены фотографии стеклянной подложки, расположенной на расстоянии 1 см (4a), 0.5 см (4b) и 0.15 см (4c) от электродов ловушки при $U_a = 5$ кВ. Темные области на рисунке 4 — это области, очищенные от частиц. Эти области расположены около проекций электродов (обозначены сплошными линиями) на подложку. При уменьшении расстояния между подложкой и электродами, область подложки, с которой частицы втягиваются в ловушку, увеличивается. На рисунке 4(d) представлена фотография подложки, полученная после ее сдвига перпендикулярно электродам. Наблюдается широкая область, свободная от частиц. Штриховые линии обозначают начальное положение электродов, в то время как сплошные — конечное.

На рисунке 5(a) представлено изображение траекторий частиц (вид с торца ловушки) при времени экспозиции равному одному периоду $T = 2\pi/\omega$. Видно, что часть частиц затягивается в ловушку и в ловушке образуется структура с осциллирующими частицами, а изогнутые траектории некоторых частиц вблизи электродов указывают на отражение частиц и их дальнейшее движение вниз. На рисунке 5(b) представлено увеличенное изображение траектории одной из частиц в окрестности правого нижнего электрода (обозначен черным кругом, белые пятна — блики). Видно, как частица отражается от электрода при смене полярности потенциала на электроде.

4. МЕХАНИЗМ ЗАХВАТА

Анализ изображений рисунка 5 позволяет сделать следующее предположение о затягивании частиц в ловушку. Возникновение заряда на пылевых частицах может происходить посредством поляризационного и три-

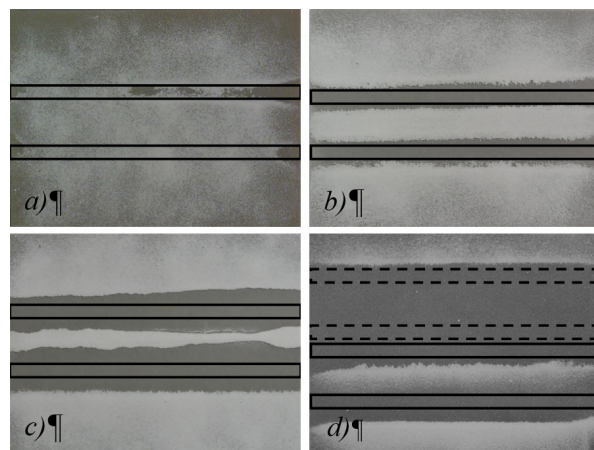


Рисунок 4. Фотографии стеклянной подложки с частицами Al_2O_3 , помещенной на различных расстояниях l от электродов ловушки при $U_a = 5$ кВ: (a) $l = 1$ см, (b) и (d) $l = 0.5$ см, (c) $l = 0.15$ см. Проекция электродов обозначены сплошными линиями. На изображении (d) начальная проекция электродов ловушки на подложку обозначена штриховыми линиями, конечная — сплошными.

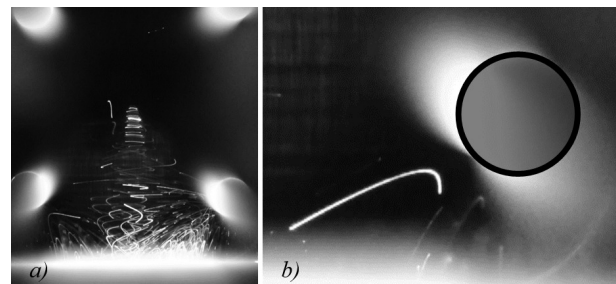


Рисунок 5. Траектория частиц в электродинамической ловушке (вид с торца) при следующих значениях напряжения: (a) $U_a = 4$ кВ; (b) $U_a = 3$ кВ.

боэлектрического физических механизмов. На подложке изначально нейтральная пылевая частица, поляризуясь в неоднородном электрическом поле, начинает перемещаться и, благодаря трению о подложку и другие частицы, приобретает электрический заряд [12]. После зарядки частицы начинают притягиваться к электроду ловушки, а после изменения полярности на электроде частицы будут отталкиваться от него.

Если в полупериод времени, пока частица притягивается к электроду, частица успевает приблизиться к электроду достаточно близко, то в следующий полупериод, когда происходит отталкивание от электрода, она может попасть в ловушку. По-видимому, ловушкой захватываются те частицы, скорость которых после изменения полярности электрода направлена внутрь ловушки. Однако даже в этом случае не все частицы будут захвачены переменными полями ловушки. На рисунке 6 представлены несколько последовательных изображений траектории частицы, скорость которой направлена внутрь ловушки после отражения от электрода (рисунок 6(a)), однако, поскольку амплитуда напряжения 2.5 кВ на электродах ловушки недостаточна для удержания частицы в ловушке, то частица падает вниз (изображения 6(b), 6(c)). Время между изображениями (a), (b), (c), соответствует $3T$.

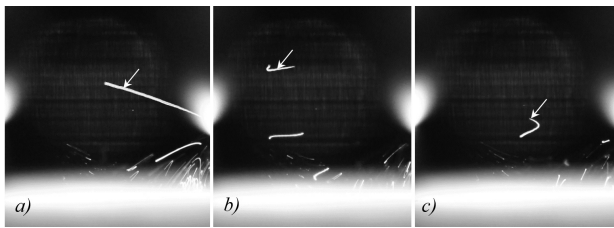


Рисунок 6. Траектория частицы (отмечена стрелочкой) при напряжении ловушки 2.5 кВ, которое недостаточно для удержания. Время между изображениями равно $3T$, экспозиция равна T .

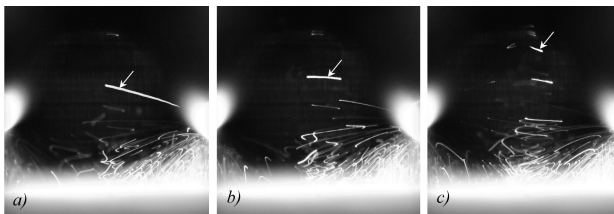


Рисунок 7. Траектория частицы (отмечена стрелочкой) при напряжении ловушки 3.5 кВ. Частица захватывается и поднимается к центру ловушки. Время между изображениями равно $3T$, экспозиция равна T .

При увеличении амплитуды напряжения до определенной величины условия подъема и захвата частиц ловушкой улучшаются. На рисунке 7 представлены три изображения траектории частицы, отраженной от электрода в направлении ловушки при амплитуде напряжения 3.5 кВ. В этом случае силы переменного электрического поля возросли, и частица поднимается к центру ловушки. Аналогично ведут себя другие частицы, захваченные ловушкой.

5. ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ЗАХВАТА ЧАСТИЦ

Экспериментальные наблюдения, рассмотренные выше, согласуются с результатами проведенного численного исследования возможности подъема заряженных частиц и их дальнейшего захвата ловушкой. В работах [8, 9] методами броуновской динамики нами было выполнено численное моделирование движения заряженных частиц в различных линейных ловушках и были получены условия удержания как одной частицы, так и ансамбля частиц в виде кулоновской структуры.

В данной работе целью моделирования являлось выяснение условий подъема заряженных частиц и их дальнейшего захвата ловушкой.

Вполне естественно, что при низких напряжениях на электродах электрическое поле не может поднять заряженную частицу, как и было обнаружено экспериментально при амплитуде напряжения менее 2.5 кВ. При повышении напряжения, если частице удастся набрать на начальном этапе скорость, направленную в ловушку, то вероятность захвата такой частицы становится высокой. На рисунке 8 представлены результаты моделирования траектории движения частицы, в начальный момент времени находящейся снизу от ловушки и обладающей начальной скоростью, направленной вертикально вверх. Радиус частицы — 20 мкм, заряд — $5 \times 10^5 e$, где

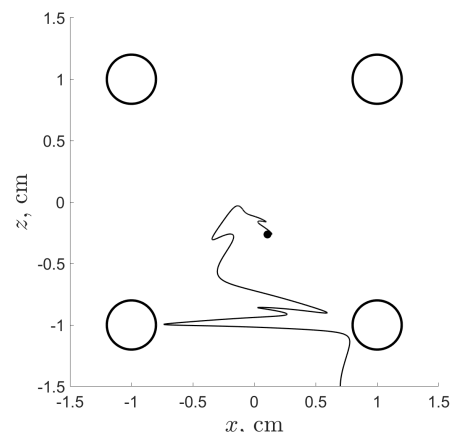


Рисунок 8. Траектория частицы, обладающей начальной скоростью. Радиус частицы — 20 мкм, заряд — $5 \times 10^5 e$, скорость — 0.5 м/с, $U_a = 3.5$ кВ. На осях отложено горизонтальное и вертикальное смещение частицы относительно оси ловушки.

e — заряд электрона, скорость — 0.5 м/с, $U_a = 3.5$ кВ. Эта величина напряжения соответствует проведенному эксперименту при напряжении 3.5 кВ (рисунок 7). Частица захватывается ловушкой, и ее траектория похожа на экспериментальные изображения (рисунок 7).

При моделировании нас также интересовал и другой вопрос, а именно: какими должны быть условия, при которых заряженная частица поднимается с поверхности подложки под ловушкой, втягивается в ловушку, и затем удерживается или уходит из нее, как это было экспериментально обнаружено. На рисунке 9 представлены результаты численного моделирования траектории движения заряженной частицы, первоначально расположенной под ловушкой (обозначена кружком), для следующих параметров: $U_a = 5$ кВ, радиус частиц — 20 мкм, заряд — $15 \times 10^5 e$. При таких, достаточно больших значениях напряжения и заряда, частица получает слишком большую скорость, пока движется около нижнего правого электрода, и вылетает из ловушки влево, либо попадает на левый нижний электрод (как показано на рисунке 9). Проведенное моделирование, а также ранее выполненные нами эксперименты показывают, что для удержания частицы в ловушке ее заряд должен быть порядка $5 \times 10^5 e$, и более низкие амплитуды напряжения 3–5 кВ, поэтому при более высоких значениях этих параметров эффективность захвата будет уменьшаться. Этот вывод важен для практического использования линейных ловушек для очистки и захвата, поскольку свидетельствует, что повышение напряжения не всегда приводит к лучшему захвату.

6. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Впервые продемонстрирована возможность очистки диэлектрических поверхностей от пылевых частиц с помощью линейной электродинамической ловушки. Важной особенностью является то, что пылевые частицы могут быть захвачены ловушкой, перемещены вдоль ее оси и высыпаются или помещены в торце ловушки в специальный контейнер. Проведены оценки параметров

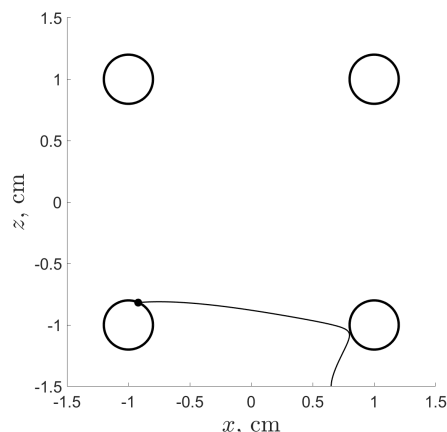


Рисунок 9. Траектория движения заряженной частицы в области ловушки при большой амплитуде напряжения на электродах и величине заряда частицы (начальное положение частицы — красная точка). $U_a = 5$ кВ, радиус частиц — 20 мкм, заряд — $15 \times 10^5 e$. На осях отложено горизонтальное и вертикальное смещение частицы относительно оси ловушки.

ловушки и зарядов пылевых частиц, которые необходимы для их затыгивания с подложки и удержания в ловушке. Наибольшая эффективность затыгивания и удержания частиц в ловушке достигается в определенной области напряжений (3.5–4.5 кВ) и зарядов частиц. Показано, что, если амплитуда напряжения на электродах

будет слишком велика, то захваченные с поверхности подложки частицы не будут удерживаться в ловушке.

7. БЛАГОДАРНОСТИ

Работа выполнена при поддержке Программы президентства РАН 1.13 "Конденсированное вещество и плазма при высоких плотностях энергии".

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Fisher E 1959 *Z. Phys.* **156** 1–26
2. Wuerker R F, Shelton H and Langmuir R V 1959 *J. App. Phys.* **30** 342–349
3. Walter H 1995 *Phys. Scr.* **59** 360–368
4. Wester H 2009 *J. Phys. B: At. Mol. Phys.* **42** 154001
5. Kramer B, Hubner O and Vortish O 1999 *J. Chem. Phys.* **111** 6521–6527
6. Arnold S and Hessel N 1985 *Rev. Sci. Instrum.* **56** 2066–2069
7. Peng W P and et al 2004 *J. Am. Chem. Soc.* **126** 11766–11767
8. Syrovatka R A, Vasilyak L M, Deputatova L V, Filinov V S, Lapitsky D S, Pecherkin V Y and Vladimirov V I 2015 *Contrib. Plasma Phys.* **56** 321–326
9. Vasilyak L M, Vladimirov V I, Deputatova L V, Lapitsky D S, Molotov V I, Pecherkin V Y, Filinov V S and Fortov V E 2013 *New J. Phys.* **15** 043047
10. Lapitsky D S, Filinov V S, Vasilyak L M, Syrovatka R A, Deputatova L V, Vladimirov V I and Pecherkin V Y 2015 *EPL* **110** 15001
11. Lapitsky D S 2016 *J. Phys.: Conf. Ser.* **774** 012178
12. Lowell J and Rose-Innes A C 1980 *Advances in Physics* **29**