

Кулоновские структуры заряженных микрочастиц в вертикально ориентированной линейной электродинамической ловушке

В. Я. Печеркин, Л. М. Василяк, В. И. Владимиров

Представлены результаты экспериментальных исследований кулоновских структур в вертикально ориентированной линейной электродинамической ловушке Пауля при атмосферном давлении воздуха. Получены устойчивые кулоновские структуры конусообразной формы. Обнаружено, что частицы в таких структурах совершают движение по замкнутым траекториям с малыми амплитудами с частотой переменного поля ловушки.

Ключевые слова: заряженные частицы, линейная электродинамическая квадрупольная ловушка, переменное электрическое поле, кулоновские структуры, воздух при атмосферном давлении.

DOI: 10.51368/1996-0948-2022-4-18-21

Введение

Квадрупольные электродинамические ловушки широко используются как для удержания ионов, так и заряженных частиц в диапазоне размеров от 10 нм до 100 мкм для исследования их свойств [1–5]. Флуоресцентное излучение от одной аэрозольной частицы было измерено в [6]. Масс-спектры ансамблей микросфер полистирола и нанокристаллов алмаза были получены в [7]. Электродинамическое удержание частиц используется в биологии для изучения свойств микроорганизмов и отдельных клеток [8, 9].

Электродинамические ловушки могут быть использованы для создания кулоновских структур заряженных аэрозольных частиц при атмосферном давлении [10]. В таких системах потенциальная энергия межчастичного взаи-

модействия превышает среднюю кинетическую энергию частиц. Различные кулоновские системы, например, пылевая плазма при низких давлениях газа исследуются в различных условиях, в том числе в условиях невесомости на МКС. Изучаются их фазовые переходы, термодинамические свойства, взаимодействия, волны, колебания, реакции на внешние электрические и магнитные поля, лазерное излучение и температурные градиенты. Кулоновские структуры в электродинамической ловушке представляют собой системы одноименно заряженных частиц без плазмы, и их исследования представляют особый интерес, так как нет нейтрализующего плазменного фона, как в пылевой плазме. В [11] кулоновская структура, состоящая примерно из трех тысяч частиц Al_2O_3 , была получена в горизонтальной линейной квадрупольной электродинамической ловушке при атмосферном давлении. Термодинамические параметры такой системы были рассчитаны по измеренным значениям сжимаемости [12]. В настоящее время кулоновские структуры из большого количества частиц были получены в горизонтально расположенных линейных ловушках. Линейная ловушка, расположенная вертикально использовалась только в [13] для измерения заряда одиночной частицы, когда сила

Печеркин Владимир Яковлевич, с.н.с., к.ф.-м.н.
E-mail: vpcherkin@yandex.ru

Василяк Леонид Михайлович, гл.н.с., д.ф.-м.н.

Владимиров Владимир Иванович, н.с., к.ф.-м.н.
Объединенный институт высоких температур РАН.
Россия, 125412, Москва, ул. Ижорская, 13, стр. 2.

Статья поступила в редакцию 09 августа 2022 г.

© Печеркин В. Я., Василяк Л. М., Владимиров В. И.,
2022

гравитации уравнивается электрической силой от заряженного шара.

Целью данной работы было исследование возможности создания стабильных кулоновских структур в вертикальном расположении линейной квадрупольной ловушки.

Экспериментальная часть

Схема устройства вертикальной линейной квадрупольной электродинамической ловушки представлена на рис. 1. Вертикально расположенные динамические электроды 1 из медных стержней диаметром 4 мм и длиной 330 мм были расположены в вершинах квадрата со стороной 20 мм на стойках из полиметилметакрилата. На два диагональных динамических электрода через балластный резистор 9,6 Мом подавалось синусоидальное напряжение с частотой 50 Гц (рис. 1). У нижнего торца на оси ловушки был установлен торцевой электрод в форме шара диаметром 1 см, на который подавался постоянный электрический потенциал 0–5 кВ того же знака, что и знак заряда частиц. Это позволяло варьировать расстояние от заряженных частиц до торцевого электрода.

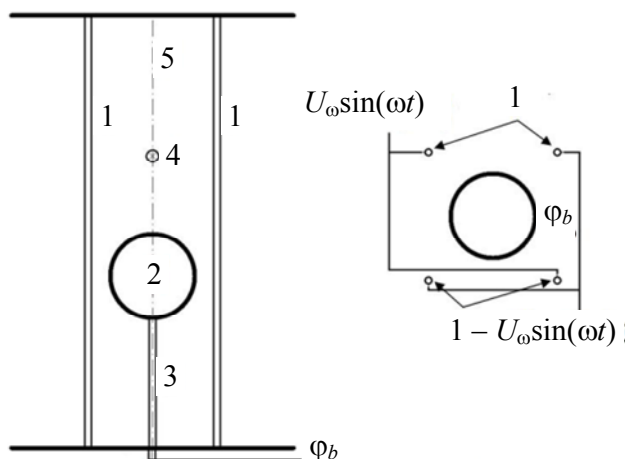


Рис. 1. Схема вертикальной линейной квадрупольной ловушки: 1 – электроды; 2 – торцевой сферический электрод; 3 – стержень крепления торцевого электрода; 4 – микрочастицы оксида алюминия; 5 – осевая линия ловушки

Для фоторегистрации частиц производилась их подсветка лазером с длиной волны 532 нм и максимальной мощностью 300 мВт узким плоским лучом (лазерный нож) с шири-

ной ~ 2 мм. Регистрация частиц обеспечивалась камерой Hi Spec Imaging с максимальным разрешением 1280×1024 пикселей. Ось камеры располагалась перпендикулярно лазерному лучу.

Экспериментальные результаты и обсуждение

Исследования проводились в воздухе при атмосферном давлении, использовали полидисперсные частицы Al_2O_3 с размерами от 10–80 мкм. Так как квадрупольная ловушка проявляет селективность в отношении массы и заряда частиц, в ловушке будут удерживаться только те частицы, которые удовлетворяют условиям удержания [14]. Для получения частиц с зарядами, необходимыми для формирования стабильной упорядоченной структуры использовался метод индукционной зарядки на металлической лопатке с потенциалом 5 кВ, который позволял получать заряд на микрочастицах 10^3 – 10^4 электронов [15].

На рис. 2 представлена фотография стабильной упорядоченной структуры в линейной вертикально ориентированной квадрупольной электродинамической ловушке. Видно, что образовалась структура в виде конуса из большого количества частиц, в отличие от горизонтальной ловушки, в которой образуются цилиндрические кулоновские структуры. Съемка производилась при нулевом угле к горизонтальной плоскости. При таком ракурсе съемки видно, что частицы совершают колебательные движения с небольшой амплитудой с частотой 50 Гц в направлении близком к перпендикулярному по отношению к линейным электродам. Однако, при изменении угла съемки до 30 градусов становится визуально видно, что частицы не только колеблются, а также двигаются по эллиптическим орбитам (рис. 3), что объясняется периодической сменой полярности напряжения на противоположных парах линейных электродов квадрупольной ловушки по синусоидальному закону. Увеличение переменного напряжения на линейных электродах до 9 кВ приводило к вращению структуры (рис. 4). Причем, нижняя часть структуры вращалась существенно медленнее, чем верхняя.

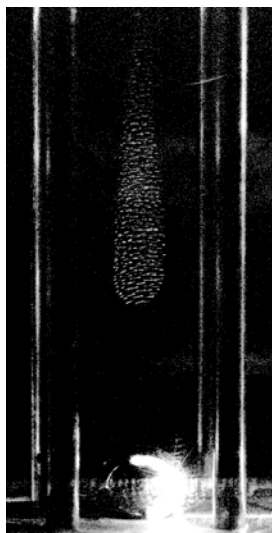


Рис. 2. Фотография стабильной упорядоченной структуры. Переменное напряжение на линейных электродах равно 4 кВ. Постоянное напряжение на торцевом сферическом электроде равно 5 кВ. Время экспозиции кадра 50 миллисекунд

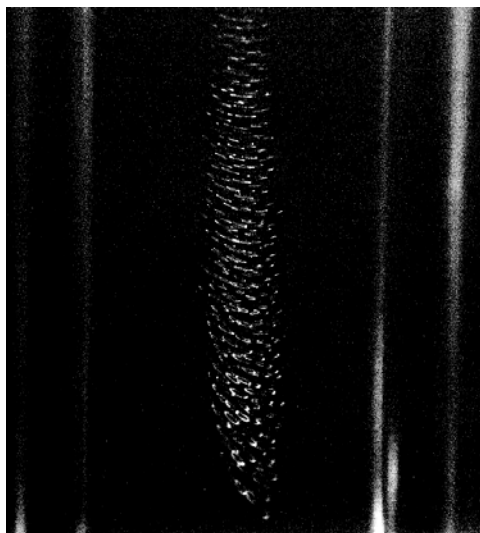


Рис. 3. Увеличенное изображение фрагмента упорядоченной структуры рис. 2. Угол съемки 30°

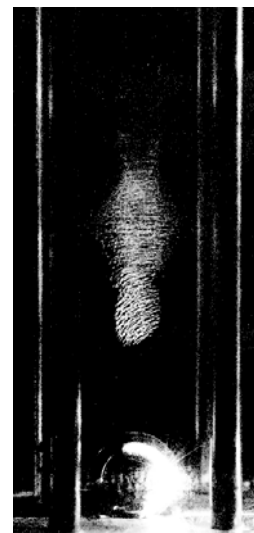


Рис. 4. Фотография структуры. Переменное напряжение на линейных электродах 9,6 кВ. Постоянное напряжение на торцевом сферическом электроде равно 2,3 кВ. Время экспозиции кадра 50 миллисекунд

Дальнейшее увеличение переменного напряжения до 12 кВ приводило к пробою воздушного промежутка между сферическим и линейными электродами, в результате чего часть микрочастиц покидало ловушку в перпендикулярном направлении линейной оси ловушки. Уменьшение величины постоянного напряжения на сферическом электроде от 5 кВ до 1 кВ приводило к уменьшению расстояния между сферическим электродом и нижним краем структуры. При дальнейшем уменьшении напряжения частицы начинали высыпаться на дно ловушки.

Заключение

Показано, что в вертикальных ловушках можно создать устойчивые кулоновские структуры конусообразной формы вследствие воздействия на частицы силы тяжести. Обнаружено, что частицы совершают движение по замкнутым траекториям с маленькой амплитудой и частотой переменного поля ловушки. При увеличении переменного напряжения на линейных электродах стабильность структур нарушается, увеличиваются амплитуды движения отдельных частиц, так и вращательные движения фрагментов верхней части структуры. Экспериментально определены области удержания микрочастиц в линейной квадрупольной электродинамической ловушке. Устойчи-

вые структуры образуются только при поддержании их электрическим постоянным полем торцевого сферического электрода. При уменьшении потенциала на этом электроде до 1 кВ частицы падают на дно ловушки под действием силы тяжести.

Работа выполнена при поддержке
Министерства науки и высшего образования
Российской Федерации
(Государственное задание № 075-01056-22-00).

ЛИТЕРАТУРА

1. Пауль В. // УФН. 1990. Т. 160. № 12. С. 109.
2. Рождественский Ю. В. Электродинамические ловушки для микрочастиц: теория и практика. – Санкт-Петербург. Университет ИТМО. 2021.
3. Kramer B., Hubner O., Vortisch H. // J. Chem. Phys. 1999. Vol. 111. № 14. P. 6521.
4. Kosternoi A., Rudyi S. S., Siryi R. S., Rozhdestvenskii Yu. V. // Pisma v Zhurnal Tekhnicheskoi Fiziki. 2020. Vol. 46. Issue 22. P. 39.
5. Rudyi S. S., Vovk T. A., Kosternoy I. A., Romanova A. V., Rozhdestvensky Y. V. // Journal of Physics Communications. 2020. Vol. 4. № 1. P. 015022.
6. Arnold S., Folan L. M. // Rev. Sci. Instrum. 1986. Vol. 57. Issue 9. P. 2250.
7. Cai Y. // Anal. Chem. 2002. Vol. 74. № 3. P. 232.
8. Wen-Ping Peng, Yi-Chang Yang, Ming-Wei Kang, Yuan T. Lee, Huan-Cheng // J. Am. Chem. Soc. 2004. Vol. 126. № 38. P. 11766.

9. Romanova A. V., Kosternoi I. A., Rozhdestvensky Y. V. // Opt. Spectrosc. 2020. Vol. 128. № 8. P. 1292.
10. Winter H., Ortjohann H. W. // Am. J. Phys. 1991. Vol. 59. Issue 9. P. 807.
11. Syrovatka R. A., Vasilyak L. M., Deputatova L. V., Filinov V. S., Lapitsky D. S., Pecherkin V. Ya., Vladimirov V. I. // Contrib. Plasma Phys. 2016. Vol. 56. № 3-4. P. 321.
12. Лапицкий Д. С., Филинов В. С., Василяк Л. М., Сыроватка Р. А., Депутатова Л. В., Владимиров В. И., Печеркин В. Я. // Прикладная физика. 2017. № 4. С. 32.
13. Syrovatka R. A., Deputatova L. V., Filinov V. S., Lapitsky D. S., Pecherkin V. Ya., Vasilyak L. M., Vladimirov V. I. // Journal of Physics: Conference Series. 2016. Vol. 774. P. 012179.
14. Vasilyak L. M., Vladimirov V. I., Deputatova L. V., Lapitsky D. S., Molotkov V. I., Pecherkin V. Ya., Filinov V. S., Fortov V. E. // New J. Phys. 2013. Vol. 15. № 4. P. 043047.
15. Vetchinin S.P., Panov V.A., Vasilyak L.M., Pecherkin V. Ya. // Journal of Physics: Conference Series. 2015. Vol. 653. № 1. P. 015152.

PACS: 07.50.-e; 37.10.Ty

Coulomb structures of charged microparticles in vertically oriented linear electrodynamic trap

V. Ya. Pecherkin, L. M. Vasilyak, and V. I. Vladimirov

Joint Institute for High Temperatures of Russian Academy of Sciences
Bd. 2, 13 Izhorskaya st., Moscow, 125412, Russia
E-mail: vpecherkin@yandex.ru

Received August 09, 2022

The experimental studies results of Coulomb structures in a vertically oriented linear electrodynamic Paul trap at atmospheric air pressure are presented. Stable cone-shaped Coulomb structures are obtained. It is found that the particles in such structures move along closed trajectories with small amplitudes with the frequency of the alternating field of the trap.

Keywords: charged particles, linear electrodynamic quadrupole trap, alternating electric field, Coulomb structures, air at atmospheric pressure.

DOI: 10.51368/1996-0948-2022-4-18-21

REFERENCES

1. W. Paul, Uspekhi Fizicheskikh Nauk, **160** (12), 109 (1990).
2. Y. V. Rozhdestvensky, *Electrodynamic traps for microparticles: theory and practice* (ITMO University, St. Petersburg, 2021).
3. B. Kramer, O. Hubner, and H. Vortisch, J. Chem. Phys. **111**, 6521 (1999).
4. A. Kosternoi, S. S. Rudyi, R. S. Siryi, and Yu. V. Rozhdestvenskii, Pisma v Zhurnal Tekhnicheskoi Fiziki, **46** (22), 39 (2020).
5. S. S. Rudyi, T. A. Vovk, I. A. Kosternoy, A. V. Romanova, and Y. V. Rozhdestvensky, Journal of Physics Communications **4**, 015022 (2020).
6. S. Arnold and L. M. Folan, Rev. Sci. Instrum. **57**, 2250 (1986).
7. Y. Cai, Anal. Chem. **74**, 232 (2002).
8. Wen-Ping Peng, Yi-Chang Yang, Ming-Wei Kang, Yuan T. Lee, and Huan-Cheng, J. Am. Chem. Soc. **126** (38), 11766 (2004).
9. A. V. Romanova, I. A. Kosternoi, and Y. V. Rozhdestvensky, Opt. Spectrosc. **128**, 1292 (2020).
10. H. Winter and H. W. Ortjohann Am. J. Phys. **59**, 807 (1991).
11. R. A. Syrovatka, L. M. Vasilyak, L. V. Deputatova, V. S. Filinov, D. S. Lapitsky, V. Ya. Pecherkin, and V. I. Vladimirov, Contrib. Plasma Phys. **56**, 321 (2016).
12. D. S. Lapitsky, V. S. Filinov, L. M. Vasilyak, R. A. Syrovatka, L. V. Deputatova, V. I. Vladimirov, and V. Ya. Pecherkin, Applied Physics, No. 4, 32 (2017) [in Russian].
13. R. A. Syrovatka, L. V. Deputatova, V. S. Filinov, D. S. Lapitsky, V. Ya. Pecherkin, L. M. Vasilyak, and V. I. Vladimirov, Journal of Physics: Conference Series **774** (11), 012179 (2016).
14. L. M. Vasilyak, V. I. Vladimirov, L. V. Deputatova, D. S. Lapitsky, V. I. Molotkov, V. Ya. Pecherkin, V. S. Filinov, and V. E. Fortov, NEW J PHYS. **15**, 043047 (2013).
15. S. P. Vetchinin, V. A. Panov, L. M. Vasilyak, and V. Ya. Pecherkin, Journal of Physics: Conference Series **653**, 012152 (2015).