

Траектории заряженных микрочастиц в линейной квадрупольной ловушке с удерживающим напряжением прямоугольной формы

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

Экспериментально и методом компьютерного моделирования исследовано влияние коэффициента заполнения положительной полярности импульса знакопеременного прямоугольного удерживающего напряжения на траектории колебаний заряженных микронных диэлектрических частиц в линейной квадрупольной ловушке в воздухе при атмосферном давлении. Обнаружено, что при изменении коэффициента заполнения положительной полярности прямоугольного импульса при постоянных частоте и амплитуде сигнала меняется угол наклона траекторий частиц в поперечном сечении ловушки. При уменьшении заполнения менее 50% или при увеличении заполнения более 50% меняется диагональ наклона траектории микрочастиц в квадрате поперечного сечения. Обнаруженный экспериментально эффект поворота наклона траекторий микрочастиц согласуется с результатами компьютерного моделирования для одиночной частицы. Обнаруженный эффект можно использовать для управления одиночными частицами и кулоновскими системами заряженных частиц, для определения новых областей устойчивости движения микрочастиц, а также при разработке квантовых компьютеров на основе квадрупольных ловушек.

Ключевые слова: заряженные частицы, линейная электродинамическая квадрупольная ловушка, удержание частиц, траектории движения, воздух при атмосферном давлении, напряжение прямоугольной формы.

DOI: 10.51368/1996-0948-2024-4-96-100

Введение

Линейная квадрупольная электродинамическая ловушка является наиболее распространенным вариантом конструкции для фильтрации и удержания частиц нано- и мик-

ронных размеров как в вакууме, так и в воздухе при атмосферном давлении в силу ее простоты и эффективности. На сегодняшний день создание логических элементов квантовых компьютеров на основе квадрупольных ионных ловушек [1, 2] является лидирующим подходом в этой области исследования благодаря обеспечению длительного нахождения частиц в таких ловушках в устойчивом состоянии [3]. Современные методы [4, 5] описания динамики отдельных частиц в линейных квадрупольных ловушках около положения равновесия позволяют с большой точностью рассчитывать и реализовывать сложные кулоновские системы [6], а также эффективнее использовать такие ловушки в масс спектрометрии при исследовании свойств отдельных частиц. Исследование траекторий одиночной частицы в квадрупольном поле позволяет

Доброклонская Марина Сергеевна, аспирант.
Печеркин Владимир Яковлевич, с.н.с., к.ф.-м.н.
E-mail: vpecherkin@yandex.ru
Владимиров Владимир Иванович, с.н.с.
Василяк Леонид Михайлович, гл.н.с., д.ф.-м.н.
Объединенный институт высоких температур РАН.
Россия, 125412, Москва, ул. Ижорская, 13, стр. 2.

Статья поступила в редакцию 5.07.2024
После доработки 22.07.2024
Принята к публикации 2.08.2024
Шифр научной специальности: 1.3.9

© Доброклонская М. С., Печеркин В. Я.,
Владимиров В. И., Василяк Л. М., 2024

найти области устойчивого удержания и построить их границы, проверить корректность компьютерных моделей. Помимо исследования устойчивых состояний в ловушке, по траекториям можно определить параметры захваченных частиц и их заряд [7, 8]. Удержание и управление кулоновскими системами и отдельными микрочастицами при гармоническом напряжении хорошо изучены теоретически и экспериментально [7–14]. Влияние формы напряжения на удержание частиц микронного размера и создание кулоновских структур ранее не рассматривалось. В предыдущей работе [14] авторы сравнили режимы удержания заряженных диэлектрических частиц микронного размера в линейной квадрупольной ловушке при гармоническом и знакопеременном периодическом напряжении прямоугольной формы. Цель настоящей работы – исследование влияния коэффициента заполнения положительной полярности импульса на траектории удерживаемых частиц.

Эксперимент

Экспериментальная схема и диагностика подробно были описаны нами ранее [11, 13, 14]. Исследования проводились с использованием квадрупольной ловушки, в которой четыре динамических электрода из латунных стержней диаметром 4 мм и длиной 100 мм располагались в вершинах квадрата, расстояние между осями соседних стержней составляло 20 мм. Регистрация частиц и траекторий их движения производилась с торца ловушки CCD камерой при подсветке лазером с длиной волны 532 нм и мощностью 300 мВт узким плоским лучом (лазерный нож) с толщиной около 2 мм. Ось камеры расположена параллельно оси ловушки и перпендикулярно лазерному лучу. Исследования проводились в воздухе при атмосферном давлении, использовали полидисперсные частицы оксида алюминия Al_2O_3 с размерами от 10–80 мкм. Для сообщения заряда частицам, достаточного для захвата и удержания внутри ловушки, использовался метод индукционной зарядки на металлической пластине [13] с потенциалом 5 кВ, выбранным экспериментально. На динамические электроды ловушки подается напряжение в виде периодической последова-

тельности импульсов положительной и отрицательной полярности суммарной длительностью 20 мс, что соответствует частоте повторения 50 Гц, амплитудой в 5 кВ. Длительность положительного полупериода регулировалась, при этом общая длительность положительного и отрицательного импульса всегда составляла 20 мс, т. е. регулировался коэффициент заполнения положительной полярности (далее «заполнение»). Фронт нарастания положительного импульса 1,5 мс, спад -0,1 мс, фронт нарастания отрицательного импульса 0,1 мс, спад -1,5 мс.

Эксперимент проводили в несколько этапов следующим образом. При коэффициенте заполнения положительной полярности импульса 50 % (равной половине периода) под нижние электроды ловушки на расстояние от 2,5 до 1 см подносится зарядная металлическая пластина с постоянным напряжением 5 кВ с тонким слоем частиц на ее поверхности. Частицы отрываются от зарядной пластины и захватываются ловушкой. Распределение захваченных частиц по размеру исследовано нами в работе [14]. После достижения облаком частиц устойчивого состояния в ловушке коэффициент заполнения менялся на 10 %. Обнаружено, что частицы устойчиво захвачены в ловушке в области коэффициента заполнения положительной полярности от 30 до 70 %, и после их дальнейшего уменьшения или повышения, соответственно, все частицы покидают ловушку. Поэтому после достижения этих границ коэффициент заполнения положительной полярности импульса возвращался к 50 %, в ловушку вносились новые заряженные частицы и коэффициент заполнения положительной полярности импульса менялся в сторону другой границы. Поведение системы заряженных частиц фиксировалось на камеру на всех этапах эксперимента.

Численное моделирование

Процесс расчета динамики отдельной частицы подробно описан в наших работах ранее [11, 13, 14] и заключался в численном решении уравнения Ланжевена $ma = F_e + F_f + F_s + F_g$, где сила трения частицы о воздух задана формулой Стокса $F_f = -6\pi\mu r v$, где r – радиус частицы, μ – вязкость воздуха, v – ско-

рость частицы, воздух в ловушке неподвижен. F_e – электрические силы электродов ловушки, F_g – сила гравитации, F_s – стохастическая сила, обусловленная столкновениями с молекулами воздуха. Расчет проведен для частицы размером 20 мкм. Заряд частицы выбран равным 98 000 e таким образом, что при длитель-

ности импульса 50 %, амплитуде 5 кВ и частоте 50 Гц частица устойчиво колеблется в центре ловушки. Для расчета траектории частицы с большей энергией выбран заряд 312 000 e . В соответствии с экспериментом расчет выполнен для 60 % и 40 % заполнения прямоугольного импульса (рис. 1).

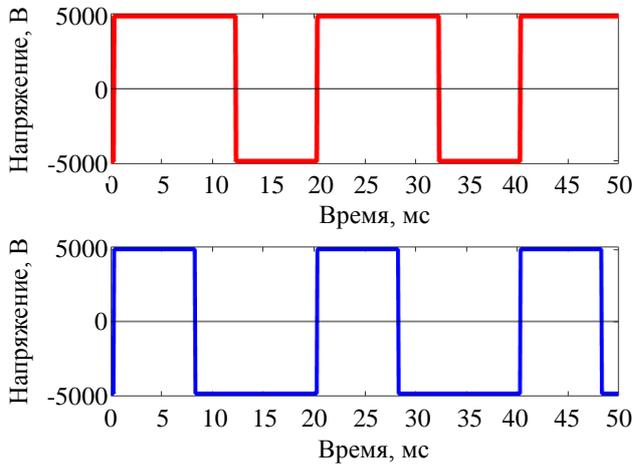


Рис. 1. Форма прямоугольного сигнала амплитудой 5 кВ, частотой 50 Гц, коэффициент заполнения положительной полярности импульса 60 % (красный цвет) и 40 % (синий)

Результаты и обсуждение

При эксперименте наклон траектории в поперечном сечении ловушки от нижнего левого угла квадрата к верхнему правому при заполнении импульса 40 % (рис. 2а) и обратный наклон от верхнего левого угла к правому нижнему при заполнении 60 % (рис. 3а). Расчет для частицы с зарядом, соответствующим устойчивому колебанию (рис. 2–3б), и зарядом, при котором частица вылетает

(рис. 2–3в), при заполнении импульса 50 %, показал отклонение частицы под тем же углом.

При параметрах, соответствующих устойчивому колебанию, видно, что частица выходит за границы потенциальной ямы и с каждым периодом колебания приближается к электроду противоположного знака и далее колеблется вблизи электрода не падая на него. Компьютерное моделирование хорошо согласуется с экспериментальным результатом для частиц с разным зарядом (рис. 2, 3).

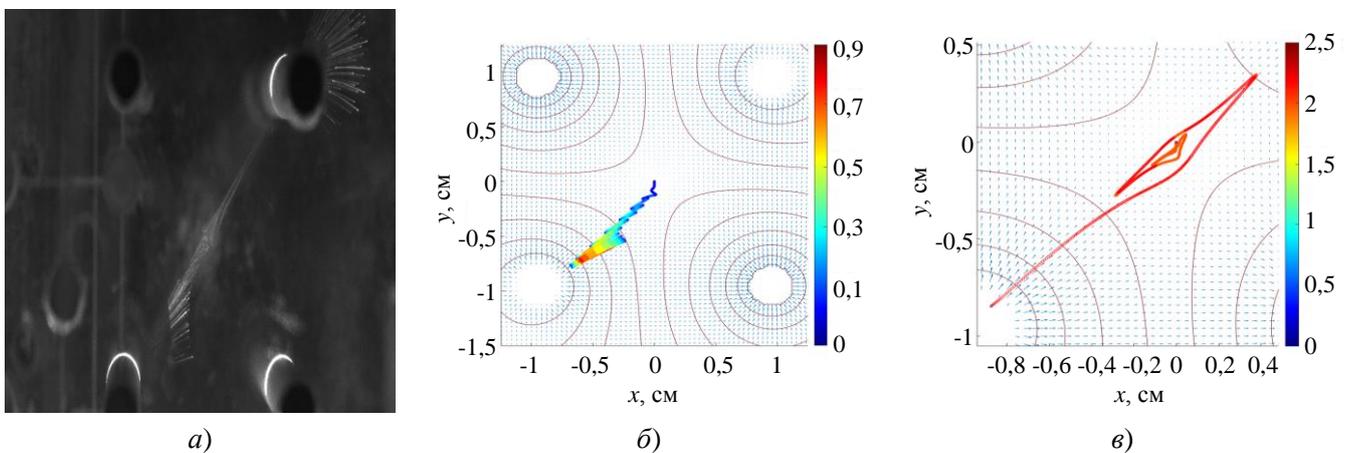


Рис. 2. Траектории частиц в поперечном сечении при заполнении 40 %. а) – эксперимент; б) – расчет для заряда 98000 e ; в) – расчет для 312000 e .

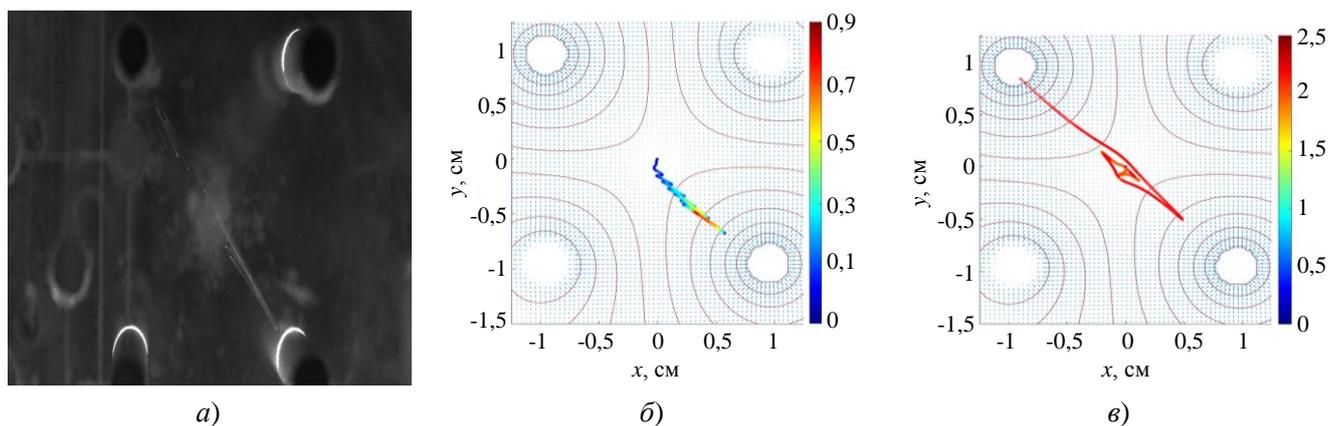


Рис. 3. Траектории частиц при заполнении 60 %. а) – эксперимент; б) – расчет для заряда 98000 e; в) – расчет для 312000 e

Результатом изменения коэффициента заполнения является увеличение времени движения заряженной частицы к электродам противоположного знака, следствием чего является наблюдаемое в эксперименте и расчете движение по одной из диагоналей. Поскольку форма напряжения на электродах одной диагонали одинакова, можно сделать вывод о внутренней энергии частицы, пропорциональной отношению ее заряда к массе, по какой траектории около верхнего или нижнего электрода она колеблется. Таким образом, положение колебания частицы на диагонали при постоянных параметрах ловушки может позволить определить физические параметры самой частицы. Данный подход требует дальнейшего более подробного исследования.

Заключение

Проведены экспериментальные исследования и компьютерное моделирование влияния заполнения положительной полярности прямоугольных импульсов удерживающего напряжения на траекторию заряженной диэлектрической частицы в поперечном сечении ловушки. Обнаружено, что в зависимости от заполнения прямоугольного импульса меняется угол наклона траектории колебания частицы, частица смещается к электроду соответствующей диагонали. Результаты расчетов согласуются с экспериментом. Обнаруженный эффект можно использовать для определения физических параметров частицы, управления одиночными частицами и кулоновскими системами заряженных частиц, определения но-

вых областей устойчивости и при разработке квантовых компьютеров на основе квадрупольных ловушек.

ЛИТЕРАТУРА

1. Cirac J. I., Zoller P. / Phys. Rev. Lett. 1995. Vol. 74. № 20. P. 4091.
2. Wineland D. J., Monroe C., Itano W. M., Leibfried D., King B. E., Meekhof D. M. / J. Res. Natl. Inst. Stand. Technol. 1998. Vol. 103. P. 259.
3. Winter H., Ortjohann H. W. / Am. J. Phys. 1991. Vol. 59. P. 807.
4. Berdnikov A. S. / M&M. 2015. Vol. 21(S4). P. 78.
5. Blekhan I. I., Sorokin V. S. / Procedia IUTAM. 2016. Vol. 19. P. 75.
6. Vasilyak L. M., Vladimirov V. I., Deputatova L. V., Lapitsky D. S., Molotkov V. I., Pecherkin V. Ya., Filinov V. S., Fortov V. E. / NJP. 2013. Vol. 15. P. 043047.
7. Rybin V., Rudyi S., Rozhdestvensky Y. / Int. J. Non-Linear Mech. 2022. Vol. 147. P. 104227.
8. Mihalcea B. M., Filinov V. S., Syrovatka R. A., Vasilyak L. M. / Phys. Rep. 2023. Vol. 1016. P. 1.
9. Major F. G., Gheorghe V. N., Werth G. Charged Particle Traps. Physics and Techniques of Charged Particle Field Confinement. – Germany: Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 2005.
10. Syrovatka R. A., Deputatova L. V., Filinov V. S., Lapitsky D. S., Pecherkin V. Ya., Vasilyak L. M., Vladimirov V. I. / Contrib. Plasma Phys. 2016. Vol. 56. P. 419.
11. Доброклонская М. С., Василяк Л. М., Владимиров В. И., Печеркин В. Я. / Прикладная физика. 2023. № 2. С. 29–34.
12. Pecherkin V. Ya., Vasilyak L. M., Vetchinin S. P., Panov V. A. / Journal of Physics: Conference Series. 2015. Vol. 653. P. 015152.
13. Доброклонская М. С., Василяк Л. М., Владимиров В. И., Печеркин В. Я., Попов Д. И. / Прикладная физика. 2023. № 3. С. 39.
14. Доброклонская М. С., Печеркин В. Я., Владимиров В. И., Василяк Л. М. / Прикладная физика. 2024. № 3. С. 93.

Trajectories of charged microparticles in a linear quadrupole trap with a rectangular retaining voltage

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

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

Received 5.07.2024; revised 22.07.2024; accepted 2.08.2024

The influence of alternating rectangular confinement voltage on the oscillation trajectories of charged micron dielectric particles in a linear quadrupole trap in air at atmospheric pressure at varying the positive polarity duty factor of the pulse has been investigated experimentally and by computer modeling method. Variation of this duty factor was found to change the inclination angle of particle trajectories in the cross section of the trap at constant signal frequency and amplitude. Changing the fill relative to 50 % up and down also changes the diagonal of the trajectory in the cross section. The experimentally detected effect of trajectories inclination rotation agrees with the results of computer modeling for a single particle. The discovered effect can be used to control single particles and Coulomb systems of charged particles, identify new areas of stability, and develop quantum computers based on quadrupole traps.

Keywords: charged particles, linear electrodynamic quadrupole trap, particle trapping, trajectories of motion, air at atmospheric pressure, rectangular voltage.

REFERENCES

1. Cirac J. I. and Zoller P., Physical Review Letters **74** (20), 4091 (1995).
2. Wineland D. J., Monroe C., Itano W. M., Leibfried D., King B. E. and Meekhof D. M., Journal of Research of the National Institute of Standards and Technology **103**, 259 (1998).
3. Winter H. and Ortjohann H. W., American Journal of Physics **59**, 807 (1991).
4. Berdnikov A. S., Microscopy and Microanalysis **21**(S4), 78 (2015).
5. Blekhman I. I. and Sorokin V. S., Procedia IUTAM **19**, 75 (2016).
6. Vasilyak L. M., Vladimirov V. I., Deputatova L. V., Lapitsky D. S., Molotkov V. I., Pecherkin V. Ya., Filinov V. S. and Fortov V. E., New Journal of Physics **15**, 043047 (2013).
7. Rybin V., Rudyi S. and Rozhdestvensky Y., International Journal of Non-Linear Mechanics **147**, 104227 (2022).
8. Mihalcea B. M., Filinov V. S., Syrovatka R. A. and Vasilyak L. M., Physics Reports **1016**, 1 (2023).
9. Major F. G., Gheorghe V. N. and Werth G. Charged Particle Traps. Physics and Techniques of Charged Particle Field Confinement. Germany: Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 2005.
10. Syrovatka R. A., Deputatova L. V., Filinov V. S., Lapitsky D. S., Pecherkin V. Ya., Vasilyak L. M. and Vladimirov V. I., Contributions to Plasma Physics **56**, 419 (2016).
11. Dobroklonskaya M. S., Vasilyak L. M., Vladimirov V. I. and Pecherkin V. Ya., Applied Physics, № 2, 29 (2023) [in Russian].
12. Pecherkin V. Ya., Vasilyak L. M., Vetchinin S. P. and Panov V. A., Journal of Physics: Conference Series **653**, 015152 (2015).
13. Dobroklonskaya M. S., Vasilyak L. M., Vladimirov V. I., Pecherkin V. Ya. and Popov D. I., Applied Physics, № 3, 39 (2023) [in Russian].
14. Dobroklonskaya M. S., Pecherkin V. Ya., Vladimirov V. I. and Vasilyak L. M., Applied Physics, № 3, 93 (2024) [in Russian].