

Линейная квадрупольная ловушка Пауля с заряженной нитью

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

Заряженная нить, натянутая вдоль оси линейной электродинамической ловушки, совершает колебательно-вращательное движение, в результате которого заряженные частицы захватываются нитью в областях пучностей. Такая динамическая нить фактически является дополнительной ловушкой внутри ловушки Пауля.

Ключевые слова: ловушка Пауля, линейная квадрупольная ловушка, заряженные пылевые частицы, атмосферное давление.

DOI: 10.51368/1996-0948-2021-5-88-92

Введение

Удержание локализованных систем заряженных частиц необходимо для научных исследований и для различных устройств и технологий. Согласно теореме Ирншоу, статическая система заряженных частиц неустойчива, поэтому для их стабильного удержания необходимы ловушки. Такие ловушки можно создать в низкотемпературной плазме низкого давления за счет потоков электронов и ионов плазмы, вследствие чего в плазме возникают внутренние электрические поля [1–5].

В вакууме или при высоких давлениях газа порядка атмосферного плазменный метод не работает, и в этих условиях применяют метод электродинамического удержания в ловушке Пауля [6, 7]. Сначала ловушки Пауля применялись в условиях вакуума, однако в

последнее время они стали применяться и при атмосферных давлениях газа. В настоящее время электродинамические ловушки Пауля различных конструкций широко применяются в научных исследованиях, например, для создания и исследования кулоновских систем [7–10], для исследования реакций ионов при комнатных и криогенных температурах [11, 12], а также на их основе созданы различные устройства, например, для измерения заряда частиц [13].

В линейной квадрупольной электродинамической ловушке в воздухе при атмосферном давлении были получены и исследованы устойчивые протяженные системы заряженных пылевых частиц [14]. Показано, что они могут работать как селективный фильтр для улавливания пылевых частиц из воздушного потока [15], также создано устройство для очистки поверхностей [16], в том числе поверхностей солнечных элементов [17]. Конструкции электродинамических ловушек постоянно совершенствуются, например, созданы линейные ловушки с различными количествами электродов (8 или 12 и даже 22) для исследований при криогенных температурах [18–21], используются дополнительные электроды в торцах ловушки и др.

Цель настоящей работы – исследование возможности дополнительной стабилизации и захвата заряженных частиц с помощью дополнительной упругой заряженной нити.

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

E-mail: vasilyak@ihed.ras.ru

Владимиров Владимир Иванович, с.н.с.

Депутатова Лидия Викторовна, с.н.с., к.т.н.

Печеркин Владимир Яковлевич, с.н.с., к.ф.-м.н.

Сыроватка Роман Александрович, с.н.с., к.ф.-м.н.

Филинов Владимир Сергеевич, гл.н.с., д.ф.-м.н.

Объединенный институт высоких температур РАН.

Россия, 125412, Москва, ул. Ижорская, 13, стр. 2.

Статья поступила в редакцию 27 августа 2021 г.

© Василяк Л. М., Владимиров В. И., Депутатова Л. В., Печеркин В. Я., Сыроватка Р. А., Филинов В. С., 2021

Эксперимент

Схема эксперимента представлена на рис. 1. В работе использовалась линейная квадрупольная электродинамическая ловушка длиной 30 см с четырьмя электродами (1) и (2) диаметром 4 мм. Электроды ловушки располагались в вершинах квадрата со стороной 2 см. На электроды подавался переменный электрический потенциал с частотой 50 Гц, причем одинаковый для электродов, расположенных в противоположных углах квадрата, и с разностью фаз 180 градусов между электродами в соседних углах. Ловушка помещалась в прозрачный защитный короб (8) из оргстекла, для того чтобы внешние воздушные потоки не воздействовали на захваченные пылевые частицы. По оси ловушки была натянута нейлоновая нить (3) диаметром 30 мкм. Натяжение нити можно было регулировать специальным устройством (5). По оси ловушки была натянута нейлоновая нить (3) диаметром 30 мкм. Натяжение нити можно было регулировать специальным устройством (5).

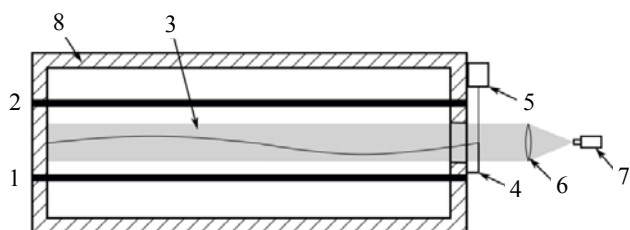


Рис. 1. Схема эксперимента, вид сбоку на линейную ловушку: 1 и 2 – электроды ловушки; 3 – нейлоновая нить; 4 – устройство крепления нити; 5 – устройство для натяжения нити; 6 – линза; 7 – полупроводниковый лазер; 8 – прозрачный защитный короб.

Полидисперсные микрочастицы из Al_2O_3 с максимумом распределения в области 20–30 мкм помещались тонким слоем на специальный плоский электрод, находящийся под постоянным потенциалом 10 кВ, и, вследствие индукционной зарядки, приобретали электрический заряд $(4-6) \times 10^5 e$, где e – заряд электрона. Затем заряженные микрочастицы высыпались в ловушку через отверстие в верхней крышке короба. Динамика микрочастиц и нейлоновой нити регистрировалась скоростной видеокамерой. Для подсветки микрочастиц использовался полупроводниковый лазер (7) с длиной волны 532 нм.

Экспериментальные результаты и их обсуждение

При амплитуде переменного напряжения на электродах ловушки 4–6 кВ нить начинает

изгибаться и вращаться, а поскольку концы нити закреплены, то движения нити стабилизируются и становятся подобным стоячей волне с локализованными узлами и пучностями. Для стабилизации движения нити необходимо подобрать соответствующее натяжение. Период колебаний нити был равен 40 мс, т. е. удвоенному периоду колебаний напряжения на электродах ловушки (20 мс). В течение переходного отрезка времени заряженная нейлоновая нить при своем колебательно-вращательном движении воздействует на захваченные микрочастицы, захваченные ловушкой, в результате чего микрочастицы постепенно сдвигаются вдоль нити и концентрируются в пучностях колебаний нити. На рис. 2 представлены два изображения захваченных микрочастиц в пучностях колеблющейся нити при амплитуде напряжения на электродах ловушки 5 кВ. Временной сдвиг между изображениями составляет полпериода колебаний нити (20 мс), поэтому на этих изображениях нить изогнута в противоположные стороны. Скоростная фотосъемка показывает, что частицы всегда находятся в пучностях нити при ее вращательно-колебательном движении. Нить фактически является еще одной ловушкой, которая собирает частицы со всего объема и локализует их в пучностях, в результате чего концентрация заряженных частиц увеличивается, несмотря на их взаимное отталкивание.

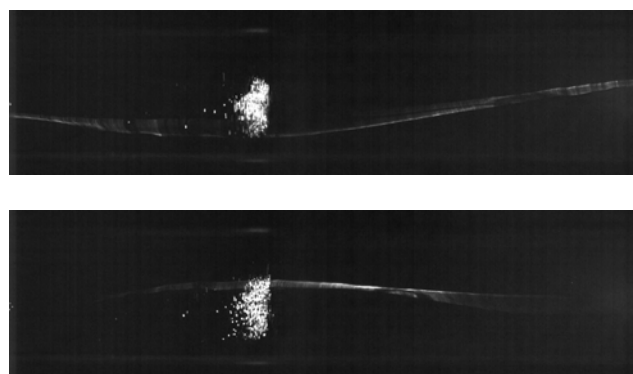


Рис. 2. Два изображения пучности колеблющейся нити с захваченным облаком заряженных пылевых частиц. Временной сдвиг между изображениями составляет полпериода колебаний нити.

На рис. 3 показаны фотографии, сделанные с торца электродинамической ловушки. Для этих условий фотосъемки лазерный луч с сечением в виде тонкой нити (лазерный «нож») направлен поперек ловушки, поэтому

видеокамера фиксирует изображение только в том сечении ловушки, где она освещается лазером. Для наблюдений были выбраны местоположения узла и пучности колеблющейся нити. На первой фотографии видно изображение траектории колебаний нити в узле. В этой области нить движется по относительно небольшому ограниченному замкнутому пути. На второй фотографии показано изображение траектории нити в пучности без частиц и с захваченными заряженными частицами на третьей. Хорошо видно, что амплитуда колебаний нити в пучности больше, чем в узле. Тра-

ектория нити с захваченными заряженными частицами еще шире, что можно объяснить силой кулоновского отталкивания, действующей на нить со стороны частиц пыли.

Было выполнено компьютерное моделирование методом молекулярной динамики на основе уравнения Ньютона. Нить моделировалась отрезками заряженной цепочки с сосредоточенной массой, которые соединены упругими силами. Задавалось начальное возмущение. Показано, что движение сгустка заряженных частиц, захваченных пучностью колеблющейся нити, будет устойчивым.



Рис. 3. Изображения траектории движения нити в узле (первое изображение), в пучности без частиц и в пучности с заряженными частицами. Вид с торца ловушки. В правом нижнем углу видно яркое пятно из-за сильного рассеяния лазерного излучения на электроде ловушки.

Заключение

Как эксперименты, так и компьютерное моделирование показали, что в натянутой заряженной нити возникают колебательно-вращательные движения, похожие на стоячие волны. Заряженная нить при таком движении захватывает заряженные частицы в объеме ловушки Пауля и сдвигает их в пучность волны. Поскольку сгусток частиц обладает объемным зарядом, то в результате сил отталкивания амплитуда траектории нити становится больше. Такой захват частиц фактически означает, что вращающаяся заряженная нить является дополнительной динамической ловушкой для сгустка заряженных частиц. Применение такой дополнительной ловушки дает возможность создавать сгустки заряженных частиц с более высокой концентрацией и более высоким объемным зарядом.

ЛИТЕРАТУРА

1. Fortov V. E., Morfill G. E. (ed) 2010 Complex and Dusty Plasmas: From Laboratory to Space (Boca Raton, FL: Taylor and Francis).

2. Fortov V. E., Ivlev A. V., Khrapak S. A., Khrapak A. G., Morfill G. E. // Phys. Rep. 2005. Vol. 421. № 1. P. 1.
3. Usachev A. D., Zobnin A. V., Petrov O. F., Fortov V. E., Annaratone B. M., Thoma M. H., Hofner H., Kretschmer M., Fink M., Morfill G. E. // Phys. Rev. Lett. 2009. Vol. 102. № 4. P. 045001.
4. Polyakov D., Shumova V., Vasilyak L. // J. Appl. Phys. 2020. Vol. 128. № 5. P. 053301. DOI: <http://dx.doi.org/10.1063/5.0014944>
5. Polyakov D. N., Shumova V. V., Vasilyak L. M. // Plasma Sources Sci. T. 2021. Vol. 30. № 7. P. 07LT01. DOI: <http://dx.doi.org/10.1088/1361-6595/ac0a46>
6. Davis E. J. // Aerosol Sci. Technol. 1997. Vol. 26. № 3. P. 212.
7. 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.
8. Singh M., Thaokar R., Khan A., Mayya Y. S. // Phys. Rev. E. 2018. Vol. 98. № 3. P. 032202.
9. Syrovatka R., Medvedev Yu., Filinov V., Vasilyak L., Deputatova L., Vladimirov V., Pecherkin V. // Phys. Lett. A. 2019. Vol. 383. № 4. P. 338.
10. Syrovatka R., Filinov V., Vasilyak L., Fortov V., Deputatova L., Vladimirov V., Pecherkin V. // Phys. Lett. A. 2019. Vol. 383. № 16. P. 1942.
11. Drakoudis A., Söllner M., Werth G. // Int. J. Mass Spectrom. 2006. Vol. 252. № 1. P. 61.
12. Schwarz M., Versolato O. O., Windberger A., Brunner F. R., Ballance T., Eberle S. N., Ullrich J.,

Schmidt P. O., Hansen A. K., Gingell A. D., Drewsen M. // Rev. Sci. Instrum. 2012. Vol. 83. № 8. P. 083115.

13. 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. № 5. P. 419.

14. 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.

15. Lapitsky D. S., Filinov V. S., Vasilyak L. M., Syrovatka R. A., Deputatova L. V., Vladimirov V. I., Pecherkin V. Y. // Europhysics Letters. 2015. Vol. 110. P. 15001.

16. Deputatova L. V., Syrovatka R. A., Vasilyak L. M., Filinov V. S., Lapitsky D. S., Vladimirov V. I., Pecherkin V. Ya. // Contrib. Plasma Phys. 2019. Vol. 59. № 3. P. 340.

17. Syrovatka R. A., Filinov V. S., Vasilyak L. M., Pecherkin V. Ya., Deputatova L. V., Vladimirov V. I., Popel O. S., Tarasenko A. B. // J. Electrostat. 2021. Vol. 112. P. 103583.

18. Asvany O., Bielau F., Moratschke D., Krause J., Schlemmer S. // Rev. Sci. Instrum. 2010. Vol. 81. № 7. P. 076102.

19. Asvany O., Brunken S., Kluge L., Schlemmer S. // Appl. Phys. B. 2014. Vol. 114. P. 203.

20. Asvany O., Schlemmer S., Avoird Ad., Szidarovszky T., Csaszar A. // J. Molecular Spectroscopy. 2021. Vol. 377. P. 111423.

21. Salomon Th., Domenech J., Schmid Ph., Michael E., Schlemmer S., Asvany O. // J. Molecular Spectroscopy. 2021. Vol. 377. P. 111421.

PACS: 07.50.-e; 37.10.Ty

Linear quadrupole Paul trap with a charged filament

L. M. Vasilyak, V. I. Vladimirov, L. V. Deputatova, V. Ya. Pecherkin,
R. A. Syrovatka, and V. S. Filinov

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

Received August 27, 2021

A charged filament stretched along the axis of a linear electrodynamic trap performs an oscillatory-rotational motion, as a result of which the charged particles are captured by the filament in the regions of the antinodes. Such a dynamic thread is actually an additional trap inside the Paul trap.

Keywords: Paul trap, linear quadrupole trap, charged dust particles, atmospheric pressure.

DOI: 10.51368/1996-0948-2021-5-88-92

REFERENCES

1. V. E. Fortov and G. E. Morfill (ed). *Complex and Dusty Plasmas: From Laboratory to Space* (Boca Raton, FL: Taylor and Francis, 2010).
2. V. E. Fortov, A. V. Ivlev, S. A. Khrapak, A. G. Khrapak, and G. E. Morfill, Phys. Rep. **421**, 1 (2005).
3. A. D. Usachev, A. V. Zobnin, O. F. Petrov, V. E. Fortov, B. M. Annaratone, M. H. Thoma, H. Hofner, M. Kretschmer, M. Fink, and G. E. Morfill, Phys. Rev. Lett. **102**, 045001 (2009).
4. D. Polyakov, V. Shumova, and L. Vasilyak, J. Appl. Phys. **128**, 053301 (2020).
DOI: <http://dx.doi.org/10.1063/5.0014944>
5. D. N. Polyakov, V. V. Shumova and L. M. Vasilyak, Plasma Sources Sci. T. **30**, 07LT01 (2021).
DOI: <http://dx.doi.org/10.1088/1361-6595/ac0a46>
6. E. J. Davis, Aerosol Sci. Technol. **26**, 212 (1997).
7. 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).

8. M. Singh, R. Thaokar, A. Khan, and Y. S. Mayya, *Phys. Rev. E* **98**, 032202 (2018).
9. R. Syrovatka, Yu. Medvedev, V. Filinov, L. Vasilyak, L. Deputatova, V. Vladimirov, and V. Pecherkin, *Phys. Lett. A* **383**, 338 (2019).
10. R. Syrovatka, V. Filinov, L. Vasilyak, V. Fortov, L. Deputatova, V. Vladimirov, and V. Pecherkin, *Phys. Lett. A* **383**, 1942 (2019).
11. A. Drakoudis, M. Söllner, G. Werth, *Int. J. Mass Spectrom.* **252**, 61 (2006).
12. M. Schwarz, O. O. Versolato, A. Windberger, F. R. Brunner, T. Ballance, S. N. Eberle, J. Ullrich, P. O. Schmidt, A. K. Hansen, A. D. Gingell, and M. Drewsen, *Rev. Sci. Instrum.* **83**, 083115 (2012).
13. R. A. Syrovatka, L. V. Deputatova, V. S. Filinov, D. S. Lapitsky, V. Ya. Pecherkin, L. M. Vasilyak, and V. I. Vladimirov, *Contrib. Plasma Phys.* **56**, 419 (2016).
14. 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).
15. D. S. Lapitsky, V. S. Filinov, L. M. Vasilyak, R. A. Syrovatka, L. V. Deputatova, V. I. Vladimirov, and V. Y. Pecherkin, *Europhysics Letters*, **110**, 15001 (2015).
16. L. V. Deputatova, R. A. Syrovatka, L. M. Vasilyak, V. S. Filinov, D. S. Lapitsky, V. I. Vladimirov, and V. Ya. Pecherkin, *Contrib. Plasma Phys.* **59**, 340 (2019).
17. R. A. Syrovatka, V. S. Filinov, L. M. Vasilyak, V. Ya. Pecherkin, L. V. Deputatova, V. I. Vladimirov, O. S. Popel, A. B. Tarasenko, and J. Electrostat. **112**, 103583 (2021).
18. O. Asvany, F. Bielau, D. Moratschke, J. Krause, and S. Schlemmer, *Rev. Sci. Instrum.* **81**, 076102 (2010).
19. O. Asvany, S. Brunken, L. Kluge, and S. Schlemmer, *Appl. Phys. B* **114**, 203 (2014).
20. O. Asvany, S. Schlemmer, Ad. Avoird, T. Szidarovszky, and A. Csaszar, *J. Molecular Spectroscopy* **377**, 111423 (2021).
21. Th. Salomon, J. Domenech, Ph. Schmid, E. Michael, S. Schlemmer, and O. Asvany, *J. Molecular Spectroscopy* **377**, 111421 (2021).