

01.5

Электродинамическая ловушка для микрочастиц с поворотным тороидальным электродом

© И.А. Костерной¹, С.С. Рудый¹, Р.С. Сирый², Ю.В. Рождественский¹¹ Университет ИТМО, Санкт-Петербург, Россия² Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет „ЛЭТИ“, Санкт-Петербург, Россия

E-mail: ivan.kosternoi@gmail.com

Поступило в Редакцию 23 марта 2020 г.

В окончательной редакции 17 июля 2020 г.

Принято к публикации 13 августа 2020 г.

Представлена модификация радиочастотной ловушки Пауля с поворотным тороидальным электродом для локализации заряженных микрообъектов в нормальных условиях. Продемонстрирована локализация спор растений рода *Lycopodium Clavatum* с характерным размером $33 \pm 3 \mu\text{m}$. При локализации таких объектов наблюдались расширенные орбиты. Описан принцип формирования двумерных расширенных орбит в электродинамической ловушке с поворотным электродом.

Ключевые слова: электродинамическая ловушка, ловушка Пауля, нелинейная динамика, расширенные орбиты.

DOI: 10.21883/PJTF.2020.22.50307.18305

В настоящее время ловушки для захвата заряженных объектов представлены широким спектром технических устройств, различающихся конструктивными характеристиками [1–3]. Так, наиболее распространенным экспериментальным инструментом для манипуляции одиночными заряженными объектами является радиочастотная ловушка Пауля. Трехмерная конфигурация ловушки Пауля позволяет локализовать атомарные ионы, молекулы и относительно крупные наноразмерные объекты, такие как квантовые точки [4,5]. Радиочастотные и электродинамические ловушки наряду с оптическим пинцетом получили распространение в биологических приложениях. Современные методы масс-спектрометрии для микрочастиц позволяют определять массу, заряд и другие характеристики биологических объектов [6–9].

Массивные биологические частицы микронных размеров, такие как споры, могут быть локализованы только в низкочастотных (50–200 Hz) электродинамических ловушках, поскольку глубина потенциальной ямы обратно пропорциональна квадрату частоты переменного напряжения. Кроме того, в случае локализации микрочастиц значительное влияние оказывает гравитация. Гравитация влияет как на динамику микрообъекта, так и на процесс локализации в целом. Так, в [10] показана модификация зон устойчивости в электродинамической ловушке с учетом гравитации, а в [11] рассмотрена внешняя локализация боросиликатных сфер с характерным размером $50 \pm 5 \mu\text{m}$ в ловушке с тороидальным электродом. Было отмечено, что экспериментально наблюдаемые положения равновесия смещены относительно результатов моделирования [11].

Отдельно следует рассмотреть формирование расширенных орбит в электродинамических ловушках. Расширенные (или zero-crossing) двумерные орбиты образу-

ются при высокой амплитуде переменного напряжения и только при наличии диссипации энергии [12]. Такие орбиты, характеризующиеся удвоением периода осцилляций, неоднократно наблюдались при локализации микрочастиц в линейных ловушках. В то же время формирование двумерных орбит в рабочей области трехмерной ловушки не обнаружено даже при высоких значениях амплитуды переменного напряжения на электродах [11]. При этом процесс удвоения периода вдоль оси симметрии тора однозначно наблюдался в трехмерной ловушке [13,14]. Последнее позволяет судить о существовании вырождения двумерных траекторий в том случае, когда сила тяжести сонаправлена с осью симметрии тора. Действительно, в [11] вектор силы тяжести совпадает с осью симметрии тороидального электрода, что в общем случае может не выполняться. Вследствие случайного смещения положения тора или намеренного поворота проекция силы тяжести в плоскости тороидального электрода будет отлична от нуля. В результате изменение пространственной ориентации тороидального электрода может оказывать существенное влияние на динамику микрообъекта.

Для исследования влияния пространственного положения электрода на процесс формирования расширенных орбит в трехмерной конфигурации была сконструирована электродинамическая (ЭД) ловушка с вращательной степенью свободы тороидального электрода. Экспериментально получена локализация биологических объектов спор растений рода *Lycopodium Clavatum* с характерным размером $33 \pm 3 \mu\text{m}$ в ЭД-ловушке при напряжении 5 kV на тороидальном электроде. Предложено качественное описание принципа формирования расширенных орбит в трехмерной конфигурации.

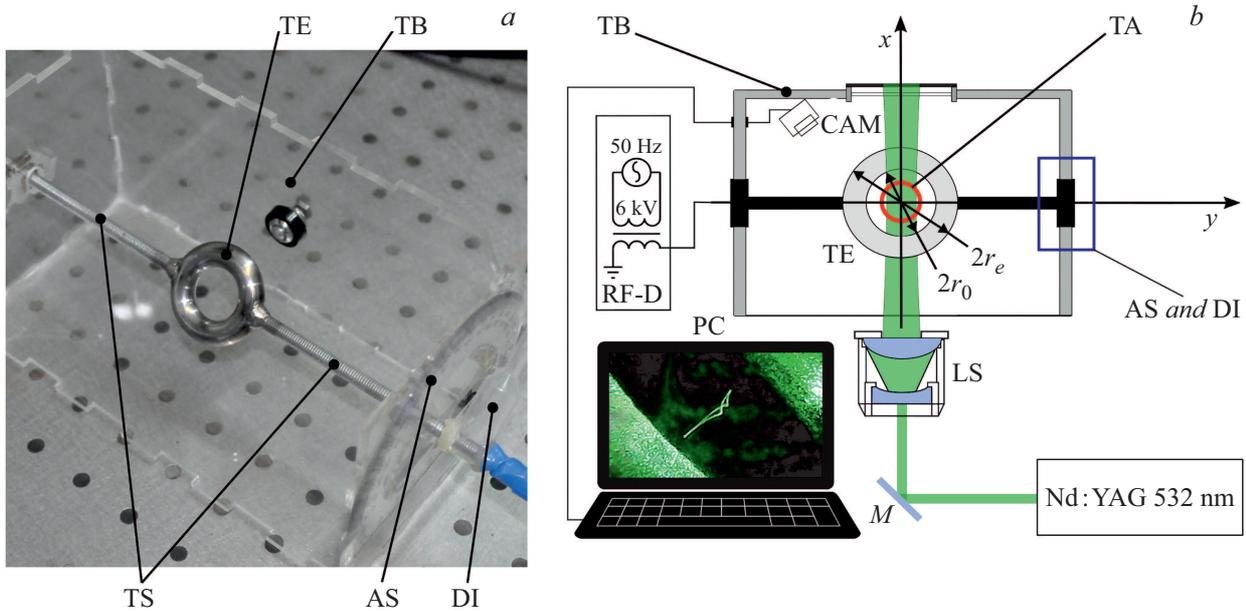


Рис. 1. *a* — фотография ЭД-ловушки с поворотным тором. TE — тороидальный электрод, TS — резьбовые шпильки, TB — корпус ловушки, AS — угловая шкала, DI — стрелочный индикатор. *b* — схема экспериментальной установки для локализации микрочастиц в вязкой среде. TE и TB — то же, что на части *a*, AS and DI — угловая шкала и стрелочный индикатор, LS — расширитель пучка, *M* — зеркало для направления лазерного излучения в область локализации, TA — область локализации, RF-D — система питания, CAM — камера. На схеме также указаны внутренний и внешний диаметры $2r_0$ и $2r_e$.

Предложенная ЭД-ловушка состоит из тороидального электрода и прозрачного корпуса (рис. 1, *a*). Тороидальный электрод изготовлен из нержавеющей стали 08X18H10 и имеет внутренний диаметр $2r_0 = 20$ mm и внешний диаметр $2r_e = 40$ mm. К тороидальному электроду приварены резьбовые шпильки, за счет которых осуществляется поворот электрода вокруг оси OY на угол φ (φ — угол между плоскостью электрода и горизонтом). Корпус ловушки изготовлен из листов оргстекла толщиной 5 mm с двумя отсутствующими смежными стенками для лазера и камеры. В боковых стенках корпуса, находящихся на противоположных сторонах, имеются резьбовые отверстия для крепления тороидального электрода без ограничения вращательной степени свободы. На корпусе и резьбовой шпильке имеются угловая шкала и стрелочный индикатор соответственно.

Экспериментальная установка включает в себя ЭД-ловушку, системы питания и регистрации (рис. 1, *b*). Выходные параметры системы питания были следующими: регулируемое переменное напряжение V до 6 kV с фиксированной частотой $\omega = 50$ Hz. Система регистрации состоит из лазера, расширителя пучка и камеры. Локализованные частицы подсвечиваются Nd:YAG-лазером KLM-532/SLN-100 с длиной волны 532 nm и выходной мощностью до 100 mW. Поскольку лазер обладает малой расходимостью в 1 mrad и малым диаметром пучка на выходном окне 1.2 mm, необходимо использовать расширитель пучка с коэффициентом расширения 10 для равномерной засветки области локализации. Регистрация рассеянного от частицы излучения осуществлялась

камерой со скоростью видеосъемки 25 fps. Исследуемые объекты инжестировались в область локализации методом впрыскивания ансамбля частиц. Селекция локализованного ансамбля частиц при необходимости производилась по методу масс-селективного накопления [15].

Предложенная ловушка рассчитана на локализацию частиц в твердом агрегатном состоянии с характерным размером от 500 nm до 100 μ m с массой не более 1 μ g. В качестве локализуемых объектов использованы споры растения рода Плаун булавовидный или *Lycopodium Clavatum* (далее ликоподии) с характерным размером 33×3 μ m. Споры обладают каплевидной формой и пористой структурой [16].

Удержание микрочастицы в ЭД-ловушке реализуется в три этапа. Первоначально локализуется ансамбль ликоподий при напряжении $V = 5$ kV. Следующим шагом производится сепарация ансамбля, в результате чего осуществляется локализация единичного объекта. На третьем этапе осуществляются повышение напряжения V и поворот тороидального электрода для изменения проекции силы тяжести.

В результате у одиночной частицы при напряжении V выше критического $V_{crit} = 5.3$ kV наблюдалось появление расширенных орбит при $\varphi \neq 0^\circ$, схожих с орбитами, описанными в работе [12]. Колебания в радиальном направлении соответствуют частоте переменного напряжения на электродах $\omega = 50$ Hz. Вдоль оси симметрии электрода OZ наблюдается процесс удвоения периода, а частота колебаний соответствует $\omega/2 = 25$ Hz. При угле поворота тора $\varphi = 90^\circ$ (плоскость тора перпенди-

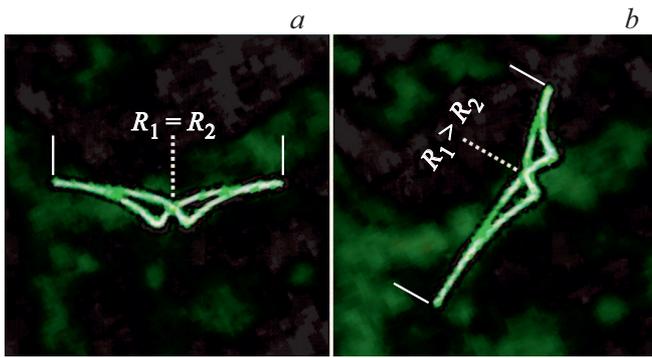


Рис. 2. Расширенные орбиты ликоподий при углах поворота тора $\varphi = 90$ (a) и 40° (b) при $V = 5.4$ kV. Длительность одного кадра камеры составляет 50 ms, за один кадр камера снимает два периода осцилляций частицы в радиальном направлении. Пунктирные линии указывают на „узловую“ точку орбиты.

Отношение плеч орбиты (R_2/R_1) *Lycopodium Clavatum* в зависимости от значения угла φ

$\varphi,^\circ$	R_2/R_1
90	1.00
80	0.99
70	0.94
60	0.88
50	0.78
40	0.63
30	0.54

кулярна горизонту) наблюдаемая орбита симметрична (рис. 2, a). В то же время при повороте тора на произвольный угол в интервале $0 < \varphi < 90^\circ$ наблюдаются деформация орбиты и нарушение симметрии (рис. 2, b). При $\varphi = 0^\circ$ (плоскость тора параллельна горизонту) имеет место вырождение, аналогичное полученному в работах [10,12], и двумерные расширенные орбиты не наблюдаются.

В качестве характеристики асимметрии представленных орбит ликоподий выбрано отношение „плеч“ R_2/R_1 . Длины плеч орбиты R_1 и R_2 измерялись в относительных единицах от центральной узловой точки изображения траектории до крайних засвеченных пикселей (рис. 2). В таблице представлено отношение плеч при различных значениях угла φ .

Таким образом, существует явная зависимость асимметрии расширенной орбиты от угла поворота тороидального электрода (см. таблицу). При изменении угла поворота φ от строго перпендикулярного расположения соотношение длин плеч R_2/R_1 меняется. При значении угла $\varphi \rightarrow 0$ длина плеча R_2 стремится к нулю, и наблюдается вырождение орбиты, характеризующееся отношением $R_2/R_1 \rightarrow 0$.

Подчеркнем, что расширенные орбиты в трехмерных ловушках являются проявлением динамики частиц, кото-

рая возможна только в нелинейных системах. Движение частицы в радиочастотной ловушке Пауля в отсутствие неконсервативных сил описывается линейными дифференциальными уравнениями второго порядка (уравнения Матве). При наличии диссипативных сил, обусловленных, например, вязким трением или лазерным охлаждением, возможна реализация двумерных замкнутых траекторий — предельных циклов. На рис. 2 представлены примеры траекторий ликоподий в ЭД-ловушке в условиях вязкого трения, которое обусловлено взаимодействием со средой. Сила трения напрямую связана с числом Рейнольдса $N_{Re} = \rho v D_G / \eta$, где ρ — плотность среды, v — характерная скорость, D_G — гидравлический диаметр, η — динамическая вязкость среды. При этом малые значения числа Рейнольдса соответствуют трению согласно закону Стокса; при больших значениях N_{Re} возникает нелинейная зависимость силы трения от скорости локализованной частицы. Так, когда амплитуда переменного напряжения $V < V_{crit}$, значение линейной скорости частицы соответствует малому характерному значению числа Рейнольдса. Повышение амплитуды переменного напряжения увеличивает скорость частицы и, как следствие, характерное значение числа Рейнольдса. Тогда при достижении критического значения $V = V_{crit}$ происходит переход от линейного трения к нелинейному, характеризующемуся удвоением периода, и траектория преобразуется от одномерных колебаний к двумерным замкнутым траекториям движения (рис. 2). Увеличение амплитуды переменного напряжения при $V > V_{crit}$ приводит к увеличению размера расширенной орбиты до момента столкновения с электродом.

В линейной конфигурации квадрупольной ловушки удвоение периода одновременно происходит по ортогональным осям в плоскости XY, поскольку идеальный цилиндрический псевдопотенциал $\propto V^2(x^2 + y^2)$. В таком случае V_{crit} по осям OX и OY имеет одинаковое значение, и расширенная орбита имеет ромбовидную форму [12]. Однако в трехмерной ловушке Пауля амплитуда поля по оси OZ в 2 раза больше амплитуды в радиальном направлении, поэтому V_{critZ} имеет меньшее значение по оси OZ, чем V_{critR} в радиальном направлении.

Тем не менее в работах [11,13,14] двумерные орбиты, подобные представленным на рис. 2, не наблюдались. Настоящее вырождение орбит связано с особенностью проекции силы тяжести в плоскости локализации XY. При совпадении вектора силы тяжести с осью симметрии тороидального электрода ($\varphi = 0^\circ$ в предложенной конфигурации ЭД-ловушки) проекция силы тяжести в плоскости XY равна нулю. При увеличении угла наклона тора ($\varphi \neq 0^\circ$) проекция силы тяжести в радиальном направлении вызывает слабый ангармонизм в колебаниях частицы и обуславливает „вытягивание“ орбиты (рис. 2).

Таким образом, впервые реализованы двумерные расширенные орбиты в трехмерной электродинамической ловушке при локализации заряженной микрочастицы в нормальных условиях. Данные орбиты характеризуются

удвоением периода в аксиальном направлении и слабым ангармонизмом в радиальном направлении при угле поворота тороидального электрода $\varphi \neq 0^\circ$. Показано, что асимметрия орбиты зависит от угла наклона тора φ и может быть описана через отношение длин плеч орбиты R_2/R_1 .

Финансирование работы

Работа поддержана Министерством образования и науки РФ (проект № 3.821.2014/К), грантом 074-U01 для лидирующих университетов РФ и грантом „БАЗИС“ 19-1-5-136-1.

Конфликт интересов

Авторы заявляют, что у них нет конфликта интересов.

Список литературы

- [1] Rösch D., Gao H., Kilaj A., Willitsch S. // EPJ Techn. Instrum. 2016. V. 3. N 1. P. 5.
- [2] Campbell E.K., Holz M., Maier J.P., Gerlich D., Walker G.A.H., Bohlender D. // Astrophys. J. 2016. V. 822. N 1. P. 17.
- [3] Holtkemeier B., Weckesser P., Lopez-Carrera H., Weidemüller M. // Phys. Rev. Lett. 2016. V. 116. N 23. P. 233003.
- [4] Bautista-Salvador A., Zarantonello G., Hahn H., Preciado-Grijalva A., Morgner J., Wahnschaffe M., Ospelkaus C. // New J. Phys. 2019. V. 21. N 4. P. 043011.
- [5] Bell D.M., Howder C.R., Johnson R.C., Anderson S.L. // ACS Nano. 2014. V. 8. N 3. P. 2387–2398.
- [6] Vreeker G.C.M., Nicolardi S., Madunic K., Kotsias M., van der Burgt Y.E.M., Wuhrer M. // Int. J. Mass Spectrom. 2020. V. 448. P. 116267.
- [7] Singhal N., Kumar M., Kanaujia P.K., Virdi J.S. // Front. Microbiol. 2015. V. 6. P. 791.
- [8] Turecek F., Liu Y., Dang A., Urban J. // Angew. Chem. Int. Ed. 2020. V. 59. N 20. P. 7772–7777.
- [9] Rybin V., Rudyi S., Kokorina O. // Vibroeng. PROCEEDIA. 2020. V. 32. P. 156–159.
- [10] Mihalcea B.M., Giurgiu L.C., Stan C., Visan G.T., Ganciu M., Filinov V., Lapitsky D., Deputatova L., Syrovatka R. // J. Appl. Phys. 2016. V. 119. N 11. P. 114303.
- [11] Rudyi S.S., Vovk T.A., Kosternoi I.A., Romanova A.V., Rozhdestvensky Y.V. // J. Phys. Commun. 2020. V. 4. N 1. P. 015022.
- [12] Vinitzky E.A., Black E.D., Libbrecht K.G. // Am. J. Phys. 2015. V. 83. N 4. P. 313–319.
- [13] Ziaeiian I., Noshad H. // Int. J. Mass Spectrom. 2010. V. 289. N 1. P. 1–5.
- [14] Nasse M., Foot C. // Eur. J. Phys. 2001. V. 22. N 6. P. 563–574.
- [15] Wang Y., Zhang X., Zhai Y., Jiang Y., Fang X., Zhou M., Deng Y., Xu W. // Anal. Chem. 2014. V. 86. N 20. P. 10164–10170.
- [16] Romanova A.V., Kosternoi I.A., Rozhdestvensky Y.V. // Optics and Spectroscopy. 2020. V. 128. N 8. P. 1292–1297.