

ОПТИЧЕСКАЯ ДЕТЕКЦИЯ РАДИАЛЬНОЙ ДИНАМИКИ ЗАРЯЖЕННЫХ МИКРОЧАСТИЦ В ЛИНЕЙНЫХ КВАДРУПОЛЬНЫХ ЛОВУШКАХ

Кропотов А. А.¹, Рыбин В. В.¹

Научный руководитель – к.ф.-м.н., Щербинин Д. П.¹

¹Университет ИТМО

arseniy.kropotov@mail.ru

Работа выполнена при поддержке Российского научного фонда, проект № 25-22-00694.

Введение

Методы левитодинамики позволяют удерживать одиночные частицы в ограниченном пространстве без прямого механического контакта за счёт взаимодействия с внешними электрическими, магнитными или оптическими полями. Локализованные “левитирующие” частицы являются удобными пробными объектами для исследований в таких областях, как квантовая сенсорика, неравновесная термодинамика и материаловедение [1, 2]. Управление и детекция движения локализованных частиц чаще всего осуществляется с помощью оптических методов. Для этого могут быть использованы лазерные методы детектирования, которые обладают высоким пространственным и временным разрешением [3]. В настоящей работе будет рассматриваться динамика микрочастиц в линейных квадрупольных ловушках. В таких системах наибольший интерес представляет движение локализованных частиц в радиальной плоскости, то есть в плоскости перпендикулярной принципиальной оси ловушки. Интерес обусловлен тем, что в радиальной плоскости в системе проявляются нелинейные эффекты, которые могут обеспечивать возможность реализации сенсорных систем на базе линейных квадрупольных ловушек [4]. В работе предлагается метод детектирования динамики заряженных микрочастиц в квадрупольной ловушке с оптическим доступом вдоль её принципиальной оси. Такой подход позволяет исследовать и полно описывать динамику частицы в радиальной плоскости с учетом всего многообразия динамических режимов возникающих в рассматриваемой системе.

Основная часть

В рамках работы была разработана вертикальная конфигурация линейной квадрупольной электродинамической ловушки с открытым оптическим доступом вдоль её принципиальной оси. В такой конфигурации ловушки радиальная динамика частицы определяется взаимодействием с электрическим полем стержневых электродов. В свою очередь аксиальное движение частицы ограничивается торцевыми электродами. Для обеспечения возможности реализации методов лазерного детектирования вдоль принципиальной оси ловушки требуется обеспечить прямой оптический доступ сквозь ловушку вдоль её оси. Для ограничения аксиальной динамики заряженных частиц использовался торцевой электрод, представляющий из себя стеклянную подложку, покрытую тонкой пленкой оксидом индия-олова (ITO). ITO это широкозонный полупроводник обладающий прозрачностью в видимой области спектра и обладающей почти металлической электропроводностью.

В разработанной ловушке применяется лазерный метод детектирования динамики локализованной частицы в радиальной плоскости ловушки. Лазерное излучение заводится вдоль принципиальной оси ловушки и фокусируется на локализованной частице. В таком случае прошедшее излучение можно разделить на две компоненты: рассеянную на частице и не провзаимодействовавшую с частицей. Результат интерференции этих двух компонент регистрируется квадрантным детектором [5]. При этом, распределение рассеянного на частице вперед лазерного

излучения на сегментах детектора будет являться функцией положения частицы в лазерном пучке. В зависимости от соотношения разностного сигнала квадрантного детектора восстанавливается положение частицы в радиальной плоскости ловушки.

В работе анализ радиальной динамики может быть выполнен с помощью построения временной зависимости разностного сигнала получаемого с фотодетектора. Анализ частот трансляционных осцилляций частиц в радиальной плоскости проводится с помощью преобразования Фурье разностных сигналов. В работе производится первичная апробация метода оптического детектирования радиальной динамики заряженных микрочастиц в линейных квадрупольных ловушках с восстановлением двумерной траектории радиального движения. В качестве пробного объекта использовалась полистироловая сфера размером 30 мкм. Построены траектории движения частицы при разных значениях напряжения на ловушке и частотах удерживающего потенциала. Была проанализирована зависимость траектории движения частицы и ее спектрального состава как функции напряжения на электродах ловушки вблизи точки фазового перехода.

Выводы

В работе впервые был предложен метод детектирования динамики частицы в радиальной плоскости ловушки. Была проведена экспериментальная верификация предложенного метода. Была проанализирована координата движения частицы, построена траектория движения частицы и спектры ее трансляционных осцилляций. Предложенный метод представляет интерес для проведения ряда прикладных и фундаментальных исследований в области неравновесной физики, теории хаоса и метрологии.

Литература

1. Gonzalez-Ballester C. et al. Levitodynamics: Levitation and control of microscopic objects in vacuum //Science. 2021. Vol. 374, no. 6564. P. eabg3027. <https://doi.org/10.1126/science.abg3027>
2. Jin Y. et al. Towards real-world applications of levitated optomechanics //arXiv preprint arXiv:2407.12496. 2024. <https://doi.org/10.48550/arXiv.2407.12496>
3. Millen J. et al. Optomechanics with levitated particles //Reports on Progress in Physics. 2020. Vol. 83, no. 2. P. 026401. <https://doi.org/10.1088/1361-6633/ab6100>
4. Rybin V. et al. Phase transition between linear and nonlinear motion in a quadrupole-trap-based levitodynamic system with massive particles //Physical Review A. 2025. Vol. 112, no. 3. P. 033501. <https://doi.org/10.1103/wh14-rd9k>
5. Gittes F., Schmidt C. F. Interference model for back-focal-plane displacement detection in optical tweezers //Optics letters. 1998. Vol. 23, no. 1. P. 7-9. <https://doi.org/10.1364/OL.23.000007>