

УДК 535.214

УПРАВЛЕНИЕ ВРАЩАТЕЛЬНОЙ ДИНАМИКОЙ ЧИСТИЦЫ СЛОЖНОЙ НЕСФЕРИЧЕСКОЙ ФОРМЫ

Лещев А.С. (ИТМО),

Научный руководитель д.ф.-м.н., профессор Рождественский Ю.В.(ИТМО)

Введение. Идея оптического пинцета, которая заключается в локализации частиц с помощью электромагнитного излучения, была предложена Артуром Ашкиным в 1970 году [1]. С тех пор данная технология развивалась и нашла применение в физике для локализации коллоидных микрочастиц, диэлектрических и металлических частиц, а также для трансляционного охлаждения микрочастиц в приложениях оптомеханики [2]. Также, оптический пинцет применяется в биологии для сортировки, изучения и управления динамикой клеток, например, эритроцитов, так и для диагностики различных заболеваний по исследованию жёсткости клеточной мембраны [3]. При этом подробно изучена динамика сферических частиц под действием электромагнитного излучения, тогда как динамика частиц сложной формы недостаточно исследована. Так, в работах [4,5] исследовалась динамика наночастиц несферической формы, а в работе [6] для частиц, сравнимых с длиной волны излучения, тогда как биологические клетки, как правило, намного больше длины волны электромагнитного излучения. В данной работе мы исследуем возможность управления вращательной динамикой частицы несферической формы, что может представлять интерес, например, для биологических исследований, когда необходимо зафиксировать изучаемый объект не только в пространстве, но и по угловым координатам. В левитирующей оптомеханике управление вращательной динамикой, то есть придать частице угловую скорость или, наоборот, остановить вращение, может быть интересно при локализации искусственных частиц метаматериалов.

Основная часть. На данный момент, для описания динамики частицы в электромагнитном поле, размеры которой превышают длину волны излучения, существует два подхода. Первый заключается в применении теории Ми, что ведет к прямому решению уравнений Максвелла при рассеянии на частице оптического излучения [7,8]. Несмотря на то, что данный метод является универсальным, у него есть ряд недостатков. Теория Ми применяется для частиц, с диаметром частицы больше λ , где λ - длина волны оптического излучения [9]. Однако, по результатам вычислений трудно определить вклад различных физических процессов. Например, в работе [10] специально обсуждается, как с помощью теории Ми определить силы светового давления, которые уже хорошо известны по работам Ашкина [11]. Другими словами, сложно интерпретировать результаты численных расчетов, сопоставляя их с физическими механизмами. Второй подход заключается в применении приближения геометрической оптики, когда длина волны оптического излучения существенно меньше размера частицы. Тогда можно использовать формулы Френеля и получить относительно простые и физически понятные выражения для силы светового давления, действующей на диэлектрическую частицу. Самый базовый случай, когда на сферическую частицу действует один лазерный луч, был рассмотрен Ашкиным [11], что позволило практически перейти к экспериментальной реализации локализации не только диэлектрических частиц, но и биологических объектов таких как бактерии и клетки [12]. В настоящей работе мы рассматриваем динамику частицы сложной формы под действием оптического излучения в резонаторе Фабри-Перо. Исследуемая частица состоит из двух сфер, соединённых невесомым жёстким стержнем. Локализация подобных частиц уже успешно проводилась [13], однако не было проведено математическое моделирование динамики таких частиц. В такой системе наблюдается как движение центра масс системы, так и вращательное движение. Стоит отметить, что в этом году была выпущена статья по спектроскопии наночастиц на основе вращательной и поступательной динамики [14]. В работе [14] моделирование динамики наночастиц проводилось в приближении Рэлея и поэтому применимо только для частиц размеры которых существенно меньше длины волны

излучения. Мы исследуем возможность удержания, охлаждения и манипуляции составными частицами в зависимости от параметров оптической установки (такие как мощность лазера, длина резонатора, коэффициенты отражения зеркал резонатора) и от параметров частицы (масса всей системы и массы сфер относительно друг друга). Результаты данной работы применимы как для исследования различных биологических частиц [12], так и для точного контроля динамики микромоторов [15] и даже для создания структур из частиц, как это было сделано в работе [16] для наночастиц серебра.

Выводы. Исследовано управление вращательной динамикой частицы сложной формы в поле оптического излучения резонатора Фабри-Перо. Получены условия вращательного охлаждения такой структуры и определены углы при которых структура находится в состоянии покоя.

Список использованных источников:

1. Ashkin A. Acceleration and trapping of particles by radiation pressure //Physical review letters. – 1970. – Т. 24. – №. 4. – С. 156.
2. Rodenburg B. et al. Quantum model of cooling and force sensing with an optically trapped nanoparticle //Optica. – 2016. – Т. 3. – №. 3. – С. 318-323.
3. Sleep J. et al. Elasticity of the red cell membrane and its relation to hemolytic disorders: an optical tweezers study //Biophysical journal. – 1999. – Т. 77. – №. 6. – С. 3085-3095.
4. Brzobohatý O. et al. Non-spherical gold nanoparticles trapped in optical tweezers: shape matters //Optics express. – 2015. – Т. 23. – №. 7. – С. 8179-8189.
5. Herranen J. et al. Non-spherical particles in optical tweezers: A numerical solution //PloS one. – 2019. – Т. 14. – №. 12. – С. e0225773.
6. Nieminen T. A., Rubinsztein-Dunlop H., Heckenberg N. R. Calculation and optical measurement of laser trapping forces on non-spherical particles //Journal of Quantitative Spectroscopy and Radiative Transfer. – 2001. – Т. 70. – №. 4-6. – С. 627-637.
7. Mie G. Beiträge zur Optik trüber Medien, speziell kolloidaler Metallösungen //Annalen der physik. – 1908. – Т. 330. – №. 3. – С. 377-445.
8. Гузатов Д. В., Гайда Л. С. Теоретическое исследование силы светового давления, действующей на сферические наночастицы в поле лазерного излучения //Вестник БГУ. Серия 1, Физика. Математика. Информатика. – 2010. – №. 3. – С. 29-33.
9. Hulst H. C., van de Hulst H. C. Light scattering by small particles. – Courier Corporation, 1981.
10. Neves A. A. R., Cesar C. L. Analytical calculation of optical forces on spherical particles in optical tweezers: tutorial //JOSA B. – 2019. – Т. 36. – №. 6. – С. 1525-1537.
11. Ashkin A. Forces of a single-beam gradient laser trap on a dielectric sphere in the ray optics regime //Biophysical journal. – 1992. – Т. 61. – №. 2. – С. 569-582.
12. Corsetti S., Dholakia K. Optical manipulation: advances for biophotonics in the 21st century //Journal of Biomedical Optics. – 2021. – Т. 26. – №. 7. – С. 070602-070602.
13. Lindahl L., Furenäs S., Hainer T. Dynamics of Optically Levitated Microdumbbells. – 2021.
14. Gosling J. M. H. et al. Levitodynamic spectroscopy for single nanoparticle characterisation //arXiv preprint arXiv:2401.11551. – 2024.
15. Xu L. et al. Light-driven micro/nanomotors: from fundamentals to applications //Chemical Society Reviews. – 2017. – Т. 46. – №. 22. – С. 6905-6926.
16. He G. C. et al. The conductive silver nanowires fabricated by two-beam laser direct writing on the flexible sheet //Scientific reports. – 2017. – Т. 7. – №. 1. – С. 41757.

Автор _____ Лещев А.С.

Научный руководитель _____ Рождественский Ю.В.