

ДИНАМИКА ЧАСТИЦЫ В ОПТИЧЕСКОМ ПИНЦЕТЕ

Константинова Э.М. (Лицей ФТШ), Пятницкая Я.А. (Лицей ФТШ)

Научный руководитель - м. н. с., к. ф.-м. н. Костина Н.А. (Университет ИТМО)

Введение. С развитием технологий создания и использования нано- и микрообъектов, всё более актуальной становится задача о захвате и точном перемещении частиц для их дальнейшего использования и изучения. В 1986 году А. Ашкиным был продемонстрирован т.н. “оптический пинцет” - световой пучок с гауссовым распределением, в центре которого возможно было удерживать частицы с размерами от 25 нм до 10 мкм [1]. С тех пор оптический пинцет используется для изучения и характеристики биологических объектов, например, вирусов или белков [2], атомов, сортировки объектов [3], плазмонных и диэлектрических элементов фотоники. Отметим, что оптический пинцет делает возможным точное размещение частиц в пространстве, но имеет некоторые ограничения по размерам и материалам захватываемых объектов, а также по размерам области, в которой будет ограничено их положение. В настоящее время создается множество схем, позволяющих расширить функционал оптического захвата, к примеру, был исследован захват частиц в электромагнитных полях со сложным пространственным распределением интенсивности, также проводятся исследования по захвату частиц различной формы и с разными показателями преломления. Кроме того, если в гауссовом пучке перемещение частицы происходит за счет пространственного перемещения оптического пинцета, то сейчас существуют и более сложные оптические ловушки, обеспечивающие движение частиц по заданным траекториям. В таких задачах важную роль играет динамика частицы в этих ловушках. В данном проекте нами была создана модель для описания динамического поведения частицы в поле оптического пинцета и изучена траектория ее движения в зависимости от ее показателя преломления.

Основная часть. В простейшем случае, наноразмерный объект при взаимодействии с электромагнитным полем описывается при помощи дипольной модели. В таком приближении можно получить выражения для сил, действующих на систему из связанных положительного и отрицательного зарядов. После ряда преобразований становится очевидно, что на объект в электромагнитном поле действуют два вида сил: градиентная сила и сила рассеяния. Градиентная сила появляется в результате взаимодействия диполя с неоднородным электромагнитным полем, она пропорциональна градиенту интенсивности этого поля. Под действием градиентной силы нерезонансная диэлектрическая частица затягивается в максимум интенсивности поля, что соответствует центру перетяжки пучка в случае стандартных оптических пинцетов с гауссовым распределением. Кроме того, из-за передачи импульса от электромагнитного поля на частицу действует сила рассеяния, которая перемещает ее в направлении волнового вектора излучения.

Таким образом, захватить наноразмерный объект возможно либо при помощи двух противоположных волн, в которых силы рассеяния компенсируют друг друга, либо же при помощи неоднородного распределения интенсивности. Следует отметить, что сила рассеяния всегда соответствует направлению распространения излучения, тогда как градиентная сила может как затягивать, так и выталкивать объект из максимума интенсивности поля, например, в случае, когда показатель преломления частицы меньше показателя преломления среды [4]. Также важно знать соотношение силы рассеяния и градиентной силы, чтобы оценить возможность захвата частицы, поскольку сила рассеяния может выталкивать частицу из области захвата. Таким образом, градиентная сила должна превосходить силу рассеяния, что достигается либо изменением свойств частицы, либо уменьшением размера пятна фокусировки излучения. При различных размерах максимума интенсивности оптического поля изменяется и стабильность захвата частицы в оптической ловушке. В нашей работе рассмотрена модель дипольной частицы, помещенной в световой

пучок с гауссовым распределением интенсивности, в данном случае учитываются и градиентная сила, и сила рассеяния.

В ходе работы были получены пространственные зависимости оптической силы, действующая на частицу. В дальнейшем полученная зависимость использовалась для подстановки в уравнение Ньютона, траектории частицы получались путем численного решения дифференциального уравнения. В качестве оптимального метода решения был выбран метод Стёрмера-Верле (ещё называемый методом Velocity-Verlet). Для увеличения точности метода использовалась интерполяция кубическими сплайнами распределения интенсивности в трехмерном пространстве, с помощью языка программирования Python было решено данное уравнение и построено распределение сил в оптическом пинцете, получена динамика частицы при произвольных начальной координате и скорости частицы. Визуализация динамики и траекторий частицы проводилась с использованием библиотеки matplotlib.py.

Выводы. В ходе работы были исследованы оптические силы, действующие на наноразмерные объекты в оптическом пинцете. Были получены пространственные распределения этих сил и построены траектории частиц с различными показателями преломления в оптическом пинцете. Разработанные в ходе работы программы будут в дальнейшем использованы для описания поведения резонансных частиц сложной формы (которые нельзя описать дипольным приближением) в оптических полях в рамках существующих задач современной оптомеханики.

Список использованных источников:

1. A. Ashkin, J. M. Dziedzic, J. E. Bjorkholm, and Steven Chu, "Observation of a single-beam gradient force optical trap for dielectric particles," Opt. Lett. 11, 288-290 (1986)
2. A. Ashkin, J. M. Dziedzic, "Optical trapping and manipulation of viruses and bacteria," Science. 1987 Mar 20;235(4795):1517-20.
3. A. Ashkin, "History of optical trapping and manipulation of small-neutral particle, atoms, and molecules," in IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics, vol. 6, no. 6, pp. 841-856, Nov.-Dec. 2000
4. Вартамян Т.А., Ващенко Е.В. Введение в наноплазмонику. Учебное пособие. - СПб: НИУИТМО, 2012.– 86 с.