

Металлическая сферическая наночастица в световом поле

Е. В. Матук, Л. С. Гайда, А. Ч. Свистун

Гродненский государственный университет им. Янки Купалы, Гродно, Беларусь;
e-mail: eugeniusz91@mail.ru

В работе приведены результаты теоретических исследований действия сил светового давления на движение сферических серебряных наночастиц в жидкости. Приведено выражение основного уравнения динамики с учетом градиентной составляющей силы светового давления и составляющей силы, действующей вдоль направления распространения излучения и равной сумме сил, возникающих вследствие поглощения и рассеяния излучения.

Ключевые слова: световое давление, лазерное излучение, металлическая сферическая наночастица.

Введение

Одним из актуальных направлений, рассматриваемых в научном мире, является вопрос о взаимодействии лазерного излучения с наночастицами. Излучение лазера может использоваться как для изучения структуры, состава и свойств наночастиц [1–6], так и для высокоточных манипуляций с ними посредством силы светового давления.

С исследованиями силы светового давления, обусловленной действием лазерного излучения на металлические и диэлектрические наночастицы, связаны широкие перспективы её практического использования в различных областях науки и техники, в том числе в исследованиях по медицинским и биологическим проблемам [7, 8]. С применением «лазерного пинцета» в медицине ученым удастся осуществлять пространственное перемещение клеток крови и дрожжей, манипулировать вирусами и бактериями, разрушать патологические клетки.

Силу светового давления, действующую на металлическую наночастицу, можно условно разделить на составляющие:

- градиентную составляющую F^{grad} силы светового давления, направленную вдоль градиента интенсивности поля и отличную от нуля только в неоднородном электрическом поле;
- составляющую силы, действующую вдоль направления распространения излучения и равной сумме сил, возникающих вследствие поглощения F^{abs} и рассеяния F^{scat} излучения [9].

Основные соотношения

Для теоретического исследования воздействия силы светового давления на наночастицу распределение амплитуд в поперечном сечении гауссова пучка, направленного вдоль оси z , на входе в среду в декартовой системе координат (x, y, z) можно представить в виде:

$$E(x, y, 0) = E_0 \cdot \exp\left(-\frac{x^2 + y^2}{2r_0^2}\right), \quad (1)$$

где E_0 и r_0 – соответственно, амплитуда электромагнитной волны на оптической оси пучка и радиус его поперечного сечения.

Для случая, когда лазерный луч фокусируется тонкой линзой на кювету с наночастицами, выражение для интенсивности падающего электромагнитного поля будем использовать в форме:

$$I(r, z) = I_0 \frac{r_0^2}{r^2(z)} \exp\left(-\frac{\rho^2}{r^2(z)}\right), \quad (2)$$

где I_0 – интенсивность излучения на оси падающего пучка в плоскости $z = 0$;

r_0 – радиус поперечного сечения пучка в плоскости $z = 0$;

$r(z) = r_0 \sqrt{1 + (z/z_d)^2}$ – радиус лазерного пучка в сечении, удаленном на расстояние z от плоскости $z = 0$;

$z_d = k_m r_0^2$ – дифракционная длина пучка;

$$\rho = |\rho| = \sqrt{x^2 + y^2 + z^2}.$$

Следует отметить, что на наночастицу, находящейся в центре лазерного пучка, будут действовать как составляющая силы, обусловленная рассеянием F^{scat} и поглощением F^{abs} излучения, так и продольная градиентная составляющая силы $F^{grad,z}$.

Основное уравнение динамики для наночастицы, находящейся на оси лазерного пучка, можно представить в следующем виде:

$$m \cdot \frac{d^2 z}{dt^2} + k \cdot \frac{dz}{dt} = F^{grad,z} + F^{scat} + F^{abs}, \quad (3)$$

где $k = 6 \cdot \pi \cdot \eta \cdot R$ – коэффициент трения в жидкости с динамической вязкостью η , R – радиус наночастицы.

Для численного анализа составляющей силы, обусловленной рассеянием излучения F^{scat} , и градиентной составляющей силы $F^{grad,z}$ для наночастицы, расположенной на оси лазерного пучка ($x = y = 0$), будем использовать выражения [1, 10]:

$$F^{scat} = \frac{8}{3} \pi \frac{\sqrt{\varepsilon_m}}{c} k_m^4 \alpha^2 \frac{I_0}{\left(1 - \frac{z}{f}\right)^2 + \left(\frac{z}{z_d}\right)^2}, \quad (4)$$

$$F^{grad,z} = \frac{4\pi|\alpha|I_0}{cf} \frac{1 - z/z_w}{\left[\left(1 - z/f\right)^2 + \left(z/z_d\right)^2\right]^2},$$

где $z_w = \frac{f}{1 + (f/z_d)^2}$ – координата, соответствующая положению плоскости перетяжки лазерного пучка.

В отличие от диэлектрической, на металлическую наночастицу лазерное излучение действует с силой давления, в которой, кроме градиентной составляющей силы и силы, обусловленной рассеянием излучения, имеется еще одна составляющая силы, обусловленная поглощением излучения F^{abs} [11]:

$$F^{abs} = \frac{\sqrt{\varepsilon_m} I(x, y, z) \sigma^{abs}}{c}, \quad (5)$$

где σ^{abs} – сечение поглощения металлической наночастицы.

Определение скорости движения серебряной наночастицы в поле сфокусированного лазерного луча

На рис. изображена зависимость модуля скорости движения наночастицы в лазерном пучке от времени, построенная в результате численного моделирования с использованием уравнения (3), для случая нахождения наночастицы в водной среде. При вычислениях использованы следующие значения материальных параметров сферической серебряной наночастицы: радиус $R = 50$ нм, показатель преломления $n_p = 0,06 + i3,586$, плотность материала $\rho = 10500$ кг/м³ [12]. Кроме того, учитывались длина волны лазерного излучения $\lambda = 532$ нм, мощность лазера 4 Вт, радиус поперечного сечения лазерного пучка $\rho_0 = 0,5 \cdot 10^{-3}$ м, фокусное расстояние линзы $f = 0,1$ м. Частица считалась находящейся в воде, показатель преломления которой $n_m = 1,33$, а коэффициент динамической вязкости $\eta_m = 100,4 \cdot 10^{-6}$ кг/(см·с).

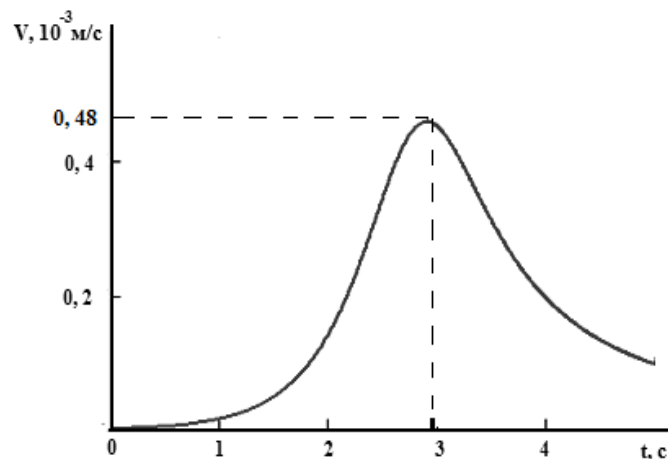


Рис. – Временная зависимость модуля скорости движения серебряной наночастицы, находящейся в воде, в световом поле, полученная в результате численного моделирования на основе уравнения (3).

Максимальную скорость, равную $v = 4,8 \cdot 10^{-4}$ м/с, наночастица имеет в момент времени, когда они пересекают плоскость перетяжки лазерного пучка. Так как в этом месте интенсивность лазерного излучения достигает наибольшего значения, то, в соответствии с выражениями (4) и (5), максимальны и значения составляющих силы, обусловленных рассеянием и поглощением излучения. В области, расположенной за плоскостью перетяжки лазерного пучка, составляющие силы светового давления, действующие на наночастицу, уменьшаются, что приводит к уменьшению скорости ее транспортировки. Суммарное значение силы светового давления, определенное при вышеуказанных условиях в результате численного моделирования, равно $2,56 \cdot 10^{-15}$ Н.

Выводы

Таким образом, приведены выражения для трех составляющих силы светового давления, действующих на серебряную сфероидальную наночастицу, находящуюся на оси лазерного пучка, и показано, что до плоскости перетяжки лазерного пучка продольная градиентная составляющая силы, как и составляющая силы, обусловленная рассеянием излучения, действуют в направлении его распространения. За плоскостью перетяжки лазерного пучка продольная градиентная составляющая силы изменяет знак и становится направленной противоположно составляющей силы, обусловленной рассеянием излучения, что приводит к уменьшению скорости транспортировки наночастицы. Результаты работы могут стать основой для дальнейших теоретических и

экспериментальных исследований по влиянию сил светового давления лазерного излучения на металлические наночастицы в жидких средах.

Литература

1. Афанасьев А. А., Гайда Л. С., Гузатов Д. В., Новицкий Д. В., Матук Е. В. Транспортировка сферической прозрачной наночастицы радиационными силами в поле гауссова пучка лазерного излучения. *Оптика и спектроскопия*. 2016. Т. 120, № 1. С. 153–157.
2. Wang H. F., Yan E. C. Y., Liu Y., Eisenthal K.B. Energetics and Population of Molecules at Microscopic Liquid and Solid Surfaces. *J. Phys. Chem. B*. 1998. V. 102. № 23. P. 4446–4450. doi 10.1021/jp980491y
3. Yan E. C. Y., Liu Y., Eisenthal K. B. New Method for Determination of Surface Potential of Microscopic Particles by Second Harmonic Generation. *J. Phys. Chem. B*. 1998. V. 102. № 33. P. 6331–6336. doi 10.1021/jp981335u
4. Kapshai, V. N., Shamyna A. A. Second-Harmonic Generation from a Thin Spherical Layer and No-Generation Conditions. *Optics and Spectroscopy*. 2017. V. 123, № 3. P. 440–453.
5. Kitz M. [et al.] Vapor bubble generation around gold nano – particles and its application to damaging of cells. *Biomed. Opt. Express*. 2011. Vol. 2, № 2. P. 291–304.
6. Эшкин, А. Давление лазерного излучения. *УФН*. 1973. Т. 110, № 1. С. 101–116.
7. Хлебцов, Н. Г. Оптика и биофотоника наночастиц с плазмонным резонансом. *Квантовая электроника*. 2008. № 38 (6). С. 504 – 509.
8. Гузатов, Д. В., Гайда Л. С. Транспортировка металлических наночастиц в вязкой среде с помощью лазерного излучения. *Веснік Гродзенскага дзяржаўнага ўніверсітэта імя Янкі Купалы*. Сер 2. 2012. № 1 (126). С. 109–119.
9. Chaumet, P. C. Time-averaged total force on a dipolar sphere in an electromagnetic field / P. C. Chaumet, M. Nieto-Vesperinas. *Opt. Lett.* 2000. Vol. 25, № 15. P. 1065–1067.
10. Матук Е. В., Остапчук И. А. Исследование действия радиационных сил на металлические наночастицы в лазерном луче гауссовской формы. *Физика конденсированного состояния: материалы XXIV междунар. науч.-практ. конф. аспирантов, магистрантов и студентов, Гродно, 21 апр. 2016 г. / ГрГУ им. Я. Купалы– Гродно, 2016. С. 166–169.*
11. Матук, Е. В., Гайда Л. С., Гузатов Д. В. Движение металлической наночастицы вблизи поверхности пузырька воздуха в жидкости под действием силы светового давления. *Проблемы физики, математики и техники*. 2015. № 3 (24). С. 17–20.
12. Таблицы физических величин /под ред. И. К. Кикоина. М.: Атомиздат, 1976. С. 56–281.

Metal spherical nanoparticle in a light field

E.V. Matuk, L.S. Gaida, A.Ch. Svistun

*Yanka Kupala State University of Grodno, Belarus;
e-mail: eugeniusz91@mail.ru*

The paper presents the results of theoretical studies of the action of forces of light pressure on the movement of spherical silver nanoparticles in a liquid. An expression for the basic equation of dynamics is given taking into account the gradient component of the light pressure force and the component of the force acting along the direction of propagation of radiation and equal to the sum of the forces arising from absorption and scattering of radiation.

Key words: light pressure, laser radiation, metal spherical nanoparticle.