

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Представленные результаты свидетельствуют об эффективности применения комбинированной магнетронно-лазерной технологии для получения пленочных структур типа металлические частицы в диэлектрической матрице. В частности, применение этой технологии для формирования покрытий с частицами Ag в матрице  $\text{TiO}_2$  позволило достичь в них высокого поглощения, вызванного поверхностным плазмонным резонансом.

## БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЕ ССЫЛКИ

1. Горшков, О.Н. Наноразмерные частицы кремния и германия в оксидных диэлектриках. Формирование, свойства, применение / О.Н. Горшков, Д.И. Тетельбаум, А.Н. Михайлов. – Нижний Новгород: Изд-во ННГУ, 2006. – 83 с.
2. Гончаров, В.К. Формирование и комплексная диагностика спектрально-морфологических параметров наноразмерной фазы серебра в полимерной пленке / В.К. Гончаров, К.В. Козадаев, Д.И. Шиман // ЖПС. – 2010. – Т. 77, № 5. – С. 732–736.
3. Application of PLD to the production of plasmonic structures containing Ag nanoparticles based on chalcopyrite solar cells / G. Baraldi [et al.] // Energy Procedia. – 2011. – Vol. 10. P. 38–42.
4. Потапов, А.Л., Морфология серебряных наночастиц, сформированных в поливинилспиртовой пленке / А.Л. Потапов, Н.А. Иванов, В.Е. Агабеков // Полимерные материалы и технологии. – 2016. – Т. 2, №3. – С. 24–29.
5. Попок, В.Н. Синтез наночастиц серебра в стеклах методом ионной имплантации и исследование их оптических свойств / В.Н. Попок, А.Л. Степанов, В.Б. Оджаев // ЖПС. – 2005. – Т. 72, № 2. – С. 218–223.
6. Бурмаков, А.П. Комбинированное магнетронно-лазерное осаждение диэлектрических покрытий, содержащих металлические частицы / А.П. Бурмаков, О.Р. Людчик, В.Н. Кулешов // Вестн. БГУ. Сер. 1. – 2016. – № 2. – С. 41–48.
7. Бурмаков, А.П. Особенности формирования комбинированной магнетронно-лазерной плазмы в процессах нанесения пленочных покрытий / А.П. Бурмаков, В.Н. Кулешов, К.Ю. Прокопчик // ИФЖ. – 2016. – Т. 89, № 5. – С. 1281–1287.
8. Бурмаков, А.П. Комбинированное магнетронно-лазерное осаждение пленочных плазмонных структур оксида титана с наночастицами серебра / А.П. Бурмаков, В.Н. Кулешов, А.В. Столяров // Журнал Белорусского государственного университета. – Физика. – 2020. – Т. 1. – С. 54–59.
9. Синтез и свойства наночастиц серебра: достижения и перспективы / Ю.А. Крутяков [и др.] // Успехи химии. – 2008. – Т. 77, № 3. – С. 242–265.

## ПЕРЕМЕЩЕНИЕ СФЕРИЧЕСКИХ НАНООБЪЕКТОВ В БИОЛОГИЧЕСКОМ МАТЕРИАЛЕ СИЛАМИ СВЕТОВОГО ДАВЛЕНИЯ

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

*Гродненский государственный университет им. Я. Купалы, Гродно, 230023 Беларусь, e-mail: gls@grsu.by*

Проведены теоретические исследования воздействия сил светового давления на диэлектрические наночастицы, которые находятся в жидкости эквивалентной крови человека. Рассмотрены основные выражения для расчета двух компонент сил светового давления: градиентной силы и силы рассеяния. Получены зависимости скорости перемещение наночастиц от времени воздействия лазерного излучения. Результаты, полученные в работе, могут быть использованы для численных расчетов, для интер-

претации экспериментальных данных и для оптимизации экспериментов по воздействию сил светового давления на наночастицы.

**Ключевые слова:** диэлектрические наночастицы; гауссов пучок; градиентная сила; сила рассеяния.

## DISPLACEMENT OF SPHERICAL NANO OBJECTS IN BIOLOGICAL MATERIAL BY LIGHT PRESSURE FORCES

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

---

*Yanka Kupala State University of Grodno, 230023 Belarus*

*Corresponding author: L. S. Gaida (gls@grsu.by)*

Theoretical studies of the effect of light pressure forces on dielectric nanoparticles, which are in a liquid equivalent to human blood, have been carried out. The main expressions for calculating two components of the forces of light pressure are considered: the gradient force and the scattering force. The dependences of the speed of movement of nanoparticles on the time of exposure to laser radiation are obtained. The results obtained in this work can be used for numerical calculations, for interpreting experimental data, and for optimizing experiments on the effect of light pressure forces on nanoparticles.

**Key words:** dielectric nanoparticles; Gaussian beam; gradient force; scattering force.

### ВВЕДЕНИЕ

Сфокусированный лазерный луч позволяет проводить манипуляцию микро- и наноразмерных объектов с учетом их размеров и оптических свойств. Манипуляция объектов осуществляется при помощи сил светового давления, которые возникают при взаимодействии света с веществом. Силы светового давления нашли свое применение в биологии и медицине. Например, при исследовании вирусов и бактерий [1], молекул ДНК [2], сортировки клеток по их собственным оптическим характеристикам [3], исследовании движения хромосом [4], индуцированном синтезе клетки [5], микрооперациях в иммунологии и молекулярной генетике [6] и др. Управление транспортировкой наночастиц в биологической ткани при воздействии на них лазерного излучения позволяет говорить о новых терапевтических направлениях в области медицины, таких как доставка лекарств внутрь клеток или обнаружение и уничтожение раковых опухолей на ранней стадии развития [7]. С возникновением лазерного пинцета получило широкое применение тканевая инженерия и регенеративная медицина [8].

В настоящей работе представлены теоретические зависимости скорости перемещения диэлектрических наночастиц в жидкой среде под действием сил светового давления лазерного излучения. Представлена экспериментальная лазерная установка по перемещению диэлектрических наночастиц используя оптоволоконную систему.

### ОСНОВНЫЕ ПОЛОЖЕНИЯ

Полное выражение для силы светового давления, действующей на диэлектрической наночастицы можно представить в следующем общем виде [9, 10]:

$$F^{light} = F^{grad} + F^{scat} \quad (1)$$

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

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

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

Силы  $F^{grad}$  и  $F^{scat}$  будем определять по следующим формулам [11, 12]:

$$\begin{aligned} \vec{F}^{scat} &= \vec{z} \frac{8}{3} \pi \frac{n_m}{c} k_m^4 \alpha^2 I \exp\left(-\frac{z^2}{r_0^2}\right) \\ \vec{F}^{grad} &= \vec{r} 2\pi \frac{n_m}{c} \alpha \left(-\frac{2z}{r_0^2}\right) I \exp\left(-\frac{z^2}{r_0^2}\right) \\ \alpha &= R^3 \left(\frac{n_p^2 - n_m^2}{n_p^2 + 2n_m^2}\right) \end{aligned} \quad (3)$$

где  $I$  – интенсивность излучения, действующего на наночастицу,  $k_m = 2\pi n_m / \lambda$  – волновое число,  $n_m$  – показатель преломления данной среды,  $\lambda$  – длина волны в вакууме,  $c$  – скорость света в вакууме,  $\alpha$  – поляризуемость наночастицы,  $n_p$  – показатель преломления материала наночастицы,  $z$  – положение наночастицы,  $r_0$  – радиус исходного пучка.

Интенсивность падающего сфокусированного лазерного излучения определяется следующим выражением [13]:

$$I = \frac{I_0}{\left(1 - \frac{z}{f}\right)^2 + \left(\frac{z}{k_m r_0^2}\right)^2}, \quad (4)$$

где  $I_0$  – исходная интенсивность лазерного излучения,  $f$  – фокусное расстояние линзы.

Для численного анализа уравнений (2, 3) и (4) рассмотрим наночастицу ( $n_p = 1,57$ ), что соответствует полистиролу радиусом 50 нм, на которую действует ИК- излучение лазера на длине волны 730 нм с максимальной мощностью до 1 Вт, шейка лазерного пучка имеет радиус 0,5 мм. И детально рассмотрим случаи расположения наночастицы в жидкости со средней плотностью 1050 кг/м<sup>3</sup> (кровь) и диэлектрической проницаемостью 85,5. Фокусное расстояние линзы 0,1 м.

На рисунке 1 представлена теоретическая зависимость скорости движения наночастиц в лазерном пучке от времени, полученная с помощью численного моделирования уравнения (2)

Максимальная скорость (рисунок 1) оказалась равной  $v = 10,8 \cdot 10^{-12}$  м/с для момента времени, когда наночастицы находятся в точке перетяжки лазерного луча. Так как в данной точке интенсивность лазерного излучения достигает наибольшего значения, это приводит, согласно выражению (3) к увеличению силы рассеяния. В области за точкой перетяжки лазерного луча силы, действующие на наночастицы со

стороны лазерного излучения, уменьшаются, что приводит к уменьшению их скорости.

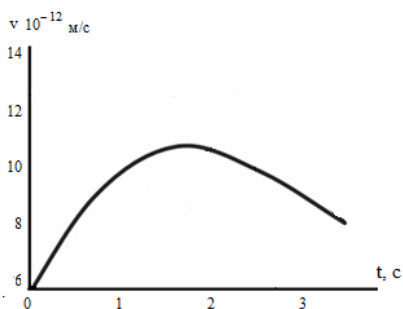
## ЭКСПЕРИМЕНТ

В настоящее время существует большое количество работ, посвященных экспериментальному исследованию воздействия лазерного излучения на металлические и диэлектрические наночастицы. Например, авторами [14] для перемещения микро- и наночастиц использовалось эванесцентное поле, созданное на поверхности канонических волокон, скорость перемещения микрочастиц (из полистирола, радиусом 2 мкм) составила  $\approx 6,98$  мкм/с, при воздействии лазерного излучения мощностью 3Вт. Данные демонстрируют осуществимость захвата и дают представление об огромных возможностях, которые еще предстоит изучить. При построении однолучевой оптической ловушки особое внимание должно быть уделено выбору изображений для захвата и удержания наночастицы. Авторами работы [15] продемонстрировано устройство, позволяющее перемещать металлические наночастицы в водном растворе вдоль внешней поверхности плазмонного оптоволокна. Лазерный луч направлялся на один из концов оптоволокна и возбуждал локализованные поверхностные плазмоны. Оптические силы, индуцированные поверхностными плазмонами, способны улавливать наночастицы. При этом перемещение наночастиц происходила от места захвата до места освещения оптоволокна лазером. В работе [16] продемонстрировано движение полистирольных сфер радиусом 3 мкм вдоль оптического волновода под действием сил светового давления лазерного излучения. Скорость перемещения малых частиц колебалась в диапазоне 7–15 мкм/с.

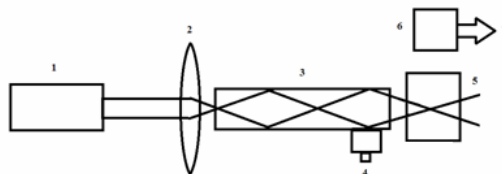
Отдельно рассмотрен случай перемещения 75 нм диэлектрических наночастиц вдоль субволновых щелевых световодов с сердечником [17]. Проведены исследования перемещения полых диэлектрических микросфер с толщиной оболочки 60 нм. При толщине оболочки менее чем 60 нм [18]. Рассмотрено перемещение атомов двухмодовым затухающим световым полем, созданным вокруг оптоволокна, при условии круговой поляризации световых волн [19]. Показано, что наночастицы могут быть перемещены слабыми световыми полями за счет возникающих в диэлектрических частицах резонансов волн шепчущей галереи (WG) и резонансов локализованных поверхностных плазмонов (LSP) в металлических наночастицах [20].

В данной работе будем рассматривать лазерную установку, в которой силы светового давления возникают в световом поле сфокусированного лазерного излучения, прошедшего через оптоволокно. Схема экспериментальной установки представлена на рисунке 2.

Данная экспериментальная установка позволяет осуществлять перемещение наночастиц не только вдоль лазерного луча, но и перемещать вдоль луча зрения микроскопа поднимая регулируемый столик. В качестве источника оптического излучения использовался лазер ЛТИ-701. Лазерный пучок с гауссовым распределением интенсивности фокусировался на кювету посредством собирающей линзы с фокусным расстоянием  $f = 0,1$  м. Визуализация движения наночастиц осуществлялась при помощи цифровой видеокамеры Logitech c920, которая использовалась в комбинации с микроскопом.



**Рисунок 1.** – Теоретическая зависимость скорости движения наночастиц в поле лазерного излучения от времени на основании численного моделирования уравнения (2). Максимальная скорость в момент  $t = 1,8$  с равна  $v = 10,8 \cdot 10^{-12}$  м/с



**1** – лазер, **2** – собирающая линза, **3** – оптоволокно, **4** – регулируемый столик, **5** – микроскоп, **6** – веб-камера, **7** – компьютер.  
**Рисунок 2.** – Схема экспериментальной установки по перемещению наночастиц силами светового давления

Максимальная скорость, полученная из эксперимента, составила  $v = 8,5 \cdot 10^{-12}$  м/с для момента времени, когда наночастицы находятся в точке перетяжки лазерного луча. Сравнивая теоретически рассчитанное и экспериментально полученное значение скорости движения наночастиц можно сделать вывод о том, что в теоретической модели не учитывались образование парового облака (наблюдаемого в эксперименте) в окрестности наночастиц и вскипание жидкости, которые индуцированы воздействием лазерного излучения на наночастицу и окружающую её среду в результате на движение наночастиц оказывают влияние и конвекционные потоки самой жидкости.

### БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЕ ССЫЛКИ

1. Ashkin, A. Optical trapping and manipulation of viruses and bacteria / A. Ashkin, J. M. Dziedzic, T. Yamane // Science. – 1987. – Vol. 235. – P. 1517–1520.
2. Austin, R. H. Stretch genes / R. H. Austin, J. P. Brodgi, E. C. Cox, T. Duke, W. Volkmuth. // Phys. Today. – 1997. – Vol. 50. – P. 32–38.
3. MacDonald, M. P. Microfluidic sorting in an optical lattice / M. P. Macdonald, G. C. Spalding, K. Dholakia // Nature. – 2003. – Vol. 426. – P. 421–424.
4. Berns, M. V. Use of a laser-induced optical force trap to study chromosome movement on the mitotic spindle / M. V. Berns, W. H. Wright, B. J. Tromberg, G. A. Profeta, J. J. Andrews, R. J. Walter // Proc. Natl. Acad. Sci. USA. – 1989. – Vol. 86. – P. 7914–7918.
5. Steubing, R. W. Laser induced cell fusion in combination with optical tweezers: the laser cell fusion trap / R. W. Steubing, S. Cheng, W. H. Wright, Y. Numajiri, M. W. Berns // Cytometry. – 1991. – Vol. 12 – P. 505–510.
6. Seeger, S. Application of laser optical tweezers in immunology and molecular genetics / S. Seeger, S. Monajembashi, K. J. Hutter, K. J. Futterman, J. Wolfrum, K. O. Greulich // Cytometry. – 1991. – Vol. 12 – P. 497–504.
7. Lapotko, D. Intensity profiles of linearly polarized light backscattered from skin and tissue-like phantoms / D. Lapotko, A. Shnip, E. Lukianova. J. Biomed // Opt. – 2005. – Vol. 10 – P. 1–12.
8. Zhang, Hu. Optical tweezers for single cells/ Hu Zhang, Kuo-Kang Liu // J. R. Soc Interface. – 2008. – Vol. 5(24) – P. 671–690.
9. Гузатов, Д.В. Теоретическое исследование силы светового давления, действующей на сферические наночастицы в поле лазерного излучения / Д.В. Гузатов, Л.С. Гайда // Вестник БГУ: Серия 1. – 2010. – № 3. – С. 29–33.
10. Кац, А. В. Радиационная сила, действующая на частицу в электромагнитном поле при произвольном соотношении между размером частицы и длиной волны / А.В. Кац // Изв. ВУЗов: Радифизика. - 1975. - Т. 28, № 4. - С. 566-575.

11. Афанасьев, А. А. О радиационных силах, действующих на прозрачную наночастицу в поле сфокусированного лазерного пучка / А.А. Афанасьев, Л. С. Гайда, Д. В. Гузатов, А. Н. Рубинов, А. Ч. Свистун // Квантовая электроника.- 2015 .- Т.45. - № 10.- С.604-607.
12. Афанасьев, А. А. Транспортировка сферической прозрачной наночастицы радиационными силами в поле гауссова пучка лазерного излучения / А.А. Афанасьев, Л.С. Гайда, Д.В. Гузатов, Д.В. Новицкий, Е.В. Матук.// Оптика и спектроскопия.- 2016 .- Т.120. - № 1.- с.53–57.
13. Ахманов, С.А. Физическая оптика / С.А. Ахманов, С.Ю. Никитин. – Москва: Наука, 2004. – 654 с.
14. Skelton, S.E. Evanescent wave optical trapping and transport of micro- and nanoparticles on tapered optical fibers / S.E. Skelton [et. al.] // Journal of Quantitative Spectroscopy and Radiative Transfer.– 2012. – Vol.113.–P.2512-2520.
15. Yang, C. Guided transport of nanoparticles by plasmonic nanowires / C. Yang [et.al.] // Nanoscale.– 2016. – Vol.8.– P.19195–19199.
16. Bramblla, G. Optical manipulation of microsphere along a sub wavelength wire / G. Bramblla [et.al] // Optics Letters. – 2015. – Vol.32. – P.3041-3043.
17. Yang, A. Optical manipulation of nanoparticles and biomolecules in sub-wavelength slot waveguides / A.Yang [et.al] // Nature. – 2009. – Vol.457. – P.71-75.
18. Ahluwalia, B.S. Waveguide trapping of hollow glass sphere / B.S. Ahluwalia, P. Lovhagen, O.G. Helleso// Optics Letters. – 2011. – Vol.36. – P.3347-3349.
19. Kien, F.L. Atom trap and waveguide using a two-color evanescent light field around a subwavelength-diameter optical fiber/ F.L. Kien, V.I. Balykin, K. Hakuta // Phys. Review. – 2004. – Vol. 70. – P.06343-1–9.
20. Xiao, J.J. Bipolar optical forces on dielectric and metallic nanoparticles by evanescent wave/ J.J. Xiao [et.al]// Opt. Letters. – 2010. – Vol.35. – P.962-964.

## ОСОБЕННОСТИ НИЗКОТЕМПЕРАТУРНОГО МАГНИТОСОПРОТИВЛЕНИЯ ДИСКА КОРБИНО С МАГНИТНЫМ УПОРЯДОЧЕНИЕМ

**В. И. Головчук, М. Г. Лукашевич**

*Белорусский государственный университет, пр. Независимости, 4, 220030 Минск, Беларусь,  
e-mail: Lukashevich@bsu.by*

В температурном интервале  $T=300-2K$  изучены петли гистерезиса поперечного магниторезистивного эффекта в диске Корбино с магнитным упорядочением при параллельной ( $\varphi = 0^\circ$ ) и перпендикулярной ( $\varphi=90^\circ$ ) ориентациях направления магнитного поля с индукцией до  $B = \pm 1Tл$  и плоскостью диска. Показано, что на магнитопольных зависимостях магнитосопротивления (МС) наблюдаются резкие пики отрицательного МС (ОМС), обусловленные перестройкой доменной структуры при перемагничивании образца, положение которых определяется углом между направлением магнитного поля и плоскостью диска, а также температурой.

**Ключевые слова:** пермаллой; магнитосопротивление; подложка; пленка; диск Корбино; магнитное упорядочение.