

5. Spectral fit refinement in XPS analysis technique and its practical applications / A.V. Boryakov [et al] // J. El. Spec. Rel. Phen. – 2018. – Vol. 229. – P. 132–140
6. Гришечкин, С. К. Обзор возможных способов формирования диффузионных газовых покрытий, повышающих термическую стойкость гидрида титана / С. К. Гришечкин, В. Г. Киселёв, В. А. Сясин, А. С. Хапов // Гидриды и гидридные превращения // – 2023. – Москва. – С. 248–264.
7. Hidetoshi, M. Refractive index and dielectric constant of SiO_x films deposited by reactive sputtering / M. Hidetoshi // Phys. Chem. Glasses: Eur. J. Glass Sci. Technol. B. – 2010. – Vol. 51, № 2. – P.136–137.
8. Keisoku, K.K / Alteration of Ti 2p XPS spectrum for titanium oxide by low-energy Ar ion bombardment / K.K. Keisoku // Surf. Interface Anal. – 2002. –Vol. 34. 262–265.

НАГРЕВ СФЕРОИДАЛЬНЫХ МЕТАЛЛИЧЕСКИХ НАНОЧАСТИЦ В ЖИДКОЙ СРЕДЕ ЛАЗЕРНЫМ ИЗЛУЧЕНИЕМ

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

*Гродненский государственный университет им. Янки Купалы, ул. Ожешко, 22, 230023
г. Гродно, Беларусь, e-mail: Matuk_EV@grsu.by*

В работе приведены результаты теоретических исследований по нагреву сфероидальных металлических наночастиц, находящихся в жидкости под воздействием лазерного излучения. Рассмотрены уравнения, описывающие зависимость приращения температуры кластеров серебряных наночастиц от времени воздействия лазерного излучения. Полученные в настоящей работе результаты могут быть использованы при проведении экспериментов по транспортировке серебряных наночастиц в жидкости с помощью лазерного излучения.

Ключевые слова: металлические наночастицы; температура; поглощение излучения; рассеяние света.

HEATING OF SPHEROIDAL METAL NANOPARTICLES IN A LIQUID MEDIUM BY LASER RADIATION

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

*Yanka Kupala State University of Grodno, Ozheshko str., 22, 230023 Grodno, Belarus
Corresponding author: E. B. Matuk (Matuk_EV@grsu.by)*

The paper presents the results of theoretical studies on the heating of spheroidal metal nanoparticles in a liquid under the influence of laser radiation. Equations describing the dependence of the temperature increment of clusters of silver nanoparticles on the time of exposure to laser radiation are considered. The results obtained in this work can be used when conducting experiments on the transport of silver nanoparticles in liquids using laser radiation.

Key words: metal nanoparticles; temperature; radiation absorption; light scattering.

ВВЕДЕНИЕ

Воздействие оптического излучения на наночастицы – это многогранная и динамично развивающаяся область исследований. Понимание взаимодействия света с наночастицами и средой, в которой они находятся, открывает новые возможности для разработки инновационных технологий и методов в науке, медицине и промышленности [1; 2].

1. Манипуляция наночастицами. Лазерные пинцеты используются для захвата и перемещения наночастиц, что позволяет проводить точные эксперименты на уровне отдельных молекул и клеток. Оптические вихри (лазерные пучки с орбитальным угловым моментом) могут использоваться для вращения наночастиц, что открывает новые возможности для изучения их механических свойств.

2. Фототермическая терапия. Нагрев наночастиц лазерным излучением используется для уничтожения раковых клеток. Этот метод позволяет локально нагревать опухоль, минимизируя повреждение окружающих здоровых тканей. Исследования показывают, что эффективность фототермической терапии зависит от размера, формы и материала наночастиц, а также от длины волны и мощности лазерного излучения [3].

3. Сенсоры и диагностика. Наночастицы могут использоваться в качестве сенсоров для детекции различных химических и биологических веществ. Оптические свойства наночастиц изменяются при взаимодействии с целевыми молекулами, что позволяет проводить высокочувствительные измерения. В медицине наночастицы могут использоваться для улучшения визуализации в методах, таких как оптическая когерентная томография (ОКТ) и флуоресцентная микроскопия.

Одними из важных факторов, влияющих на результат взаимодействия оптического излучения с частицами вещества, являются физические свойства наночастиц [4; 5], а также физические свойства среды, в которой расположены наночастицы.

Размер, форма и материал наночастиц играют ключевую роль в их взаимодействии с оптическим излучением [6–10]. Например, металлические наночастицы, такие как золото и серебро, обладают сильным поверхностным плазмонным резонансом, что делает их особенно чувствительными к свету определенных длин волн. Диэлектрические наночастицы, такие как кремний или титан, также могут взаимодействовать с оптическим излучением, но их механизмы взаимодействия отличаются от металлических наночастиц.

Вязкость, плотность и оптические свойства среды также могут существенно влиять на поведение наночастиц под воздействием оптического излучения [11–20]. В жидких средах, таких как вода или физиологический раствор, наночастицы могут испытывать гидродинамическое сопротивление, что влияет на их движение и нагрев. В газовых или вакуумных средах световое давление может приводить к более свободному движению наночастиц [21].

Нагрев сфероидальных металлических наночастиц в жидкой среде лазерным излучением – это интересная и актуальная тема, особенно в контексте биомедицинских приложений, таких как фототермическая терапия рака, а также в области нанотехнологий и материаловедения. Так, например, нагретые наночастицы могут использоваться для уничтожения раковых клеток. Наночастицы вводятся в опухоль и облучаются лазером, что приводит к локальному нагреву и гибели раковых клеток (фототермическая терапия). Наночастицы также могут использоваться в качестве контра-

стных агентов для улучшения визуализации в различных методах диагностики, таких как оптическая когерентная томография (ОКТ). В материаловедении нагрев наночастиц может использоваться для инициирования химических реакций или модификации поверхности материалов (синтез новых материалов), для детекции молекулярных взаимодействий, для управления химическими реакциями, для улучшения теплопроводности жидкости, для обработки материалов, а также нагретые наночастицы могут выступать в роли катализаторов в различных химических реакциях.

Металлические наночастицы, такие как золото или серебро, обладают уникальными оптическими свойствами, которые позволяют им эффективно поглощать и рассеивать свет. При облучении лазером наночастицы поглощают энергию света и преобразуют её в тепло. Этот процесс основан на явлении поверхностного плазмонного резонанса, который возникает, когда частота падающего света совпадает с собственной частотой колебаний свободных электронов на поверхности наночастиц. Сфероидальные наночастицы имеют форму, близкую к сферической, но могут быть слегка вытянутыми или сплюснутыми. Форма и размер наночастиц сильно влияют на их оптические свойства и эффективность нагрева. Для оптимального нагрева важно подобрать наночастицы с подходящими размерами и формой, чтобы их поверхностный плазмонный резонанс совпадал с длиной волны используемого лазерного излучения.

Наночастицы обычно диспергируются в жидкой среде, которая может быть водой, физиологическим раствором или другой биосовместимой жидкостью. Жидкая среда играет роль в передаче тепла от нагретых наночастиц к окружающей среде, что важно для контроля температуры и предотвращения перегрева. Лазеры с различными длинами волн могут использоваться для нагрева наночастиц. Наиболее часто применяются лазеры в видимом и ближнем инфракрасном диапазоне. Мощность и длительность лазерного импульса также являются важными параметрами, которые необходимо контролировать для достижения желаемого эффекта.

Нагрев сфероидальных металлических наночастиц в жидкой среде лазерным излучением представляет собой мощный инструмент с широким спектром применений. Исследования в этой области продолжаются, и новые открытия могут привести к еще более эффективным и безопасным методам использования наночастиц в науке и технике.

Основной целью данной работы является теоретическое исследование нагрева металлических сфероидальных наночастиц, которые находятся в жидкости под воздействием лазерного излучения.

ОСНОВНЫЕ СООТНОШЕНИЯ

Степень нагрева металлических наночастиц зависит от их сечения поглощения σ^{abs} , которое для сфероидальной наночастицы определяется по формуле [22]:

$$\sigma^{abs} = \frac{4}{3} \pi k_m \text{Im}(\alpha(x, y, z)) \quad (1)$$

где k_m – волновое число, соответствующее излучению, распространяющемуся в среде.

Значения компонентов поляризуемости для сфероида зависят от положения частицы относительно осей координат. Будем рассматривать вытянутый сфероид для которого компоненты поляризуемости в направлении осей x и y одинаковы, а вдоль оси z отличаются от них [22]:

$$\alpha(x) = \alpha(y) = \frac{ab^2}{3} \frac{\varepsilon_p(\omega) - \varepsilon_m}{\varepsilon_m + L_{\perp}(\varepsilon_p(\omega) - \varepsilon_m)}, \quad \alpha(z) = \frac{ab^2}{3} \frac{\varepsilon_p(\omega) - \varepsilon_m}{\varepsilon_m + L_{II}(\varepsilon_p(\omega) - \varepsilon_m)}, \quad (2)$$

где a – большая полуось сфероид, b – малая полуось, $L_{\perp}$ и L_{II} – геометрические факторы деполяризации, которые удовлетворяют соотношению: $L_{II} + 2L_{\perp} = 1$, и для сфер $L = 1/3$ [23], $\varepsilon_p(\omega)$ – диэлектрическая проницаемость металлической наночастицы, зависящая от частоты падающего излучения ω , ε_m – диэлектрическая проницаемость среды, в которой расположен сфероид.

Геометрический фактор деполяризации вытянутого ($b < a$) сфероид L_{II} определяется по формуле [22]:

$$L_{II} = (e_s^2 - 1) \left(\frac{e_s}{2} \ln \frac{1 + e_s}{e_s - 1} - 1 \right), \quad (3)$$

где $e_s = \sqrt{1 - a/b}$ – эксцентриситет сфероид.

Зависимость приращения температуры наночастицы от времени воздействия лазерного излучения согласно работам [2; 24; 25] можно записать в виде:

$$\Delta T_p \approx \frac{3\sigma^{abs} I_0}{4\alpha_m \pi} \left[1 - \frac{1}{\sqrt{\pi t}} \frac{\sqrt{\rho_m c_m}}{\sqrt[3]{ab^2} \sqrt{\alpha_m \rho_p c_p}} \right], \quad (4)$$

где I_0 – интенсивность излучения на оси падающего пучка в плоскости $z = 0$, t – длительность лазерного импульса, ρ_m , c_m – соответственно плотность и удельная теплоемкость при постоянной температуре и давлении жидкой среды, ρ_p , c_p – плотность и удельная теплоемкость при постоянном давлении наночастицы соответственно, α_m – коэффициент теплопроводности среды.

ЧИСЛЕННЫЕ РАСЧЕТЫ

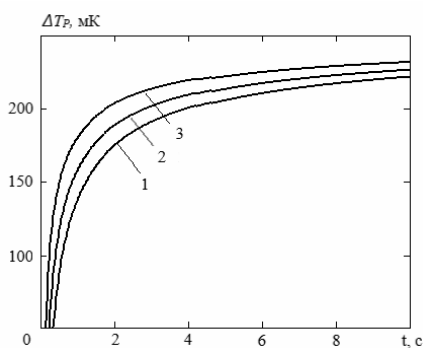
При расчете приращения температуры наночастицы в результате нагрева лазерным излучением (длина волны 532 нм) учтём следующие значения параметров серебра и воды: $\rho_p = 1,05 \cdot 10^4$ кг/м³, $c_p = 2,5 \cdot 10^2$ Дж/(кг·К), $\rho_m = 1,0 \cdot 10^3$ кг/м³, $c_m = 4,2 \cdot 10^3$ Дж/(кг·К), $\alpha_m = 0,603$ Вт/(м·К), показатель преломления материала окружающей среды (воды) $\varepsilon_m = 1,769$; показатель преломления материала наночастицы (серебра по отношению к излучению с длиной волны 532 нм) $\varepsilon_p = -12,856 + i0,43$ [26].

Результаты вычислений, произведенных по формуле (4) с учетом (1), иллюстрированы на рисунке 1, где изображена зависимость приращения температуры наночастицы ΔT_p от времени t для следующих значениях длин полуосей сфероид: $b = 50$ нм и $a = 120$ нм ($e_s = 0,76$), 150 нм ($e_s = 0,82$), 180 нм ($e_s = 0,85$).

Анализируя рисунок представленный рисунок, видим, что приращение температуры (и, следовательно, значение температуры) сфероидальной наночастицы из серебра стабилизируется за время меньшее десяти секунд. При увеличении размеров частицы время нагрева до стабильного («рабочего») значения температуры увеличивается.

При увеличении длительности лазерного импульса изменение температуры наночастицы не происходит вследствие остывания эффективного объема воды в результате теплоотдачи в оставшуюся ее часть, что возможно вследствие малого объема наночастицы [2].

Соответственно при неизменной температуре наночастицы, скорость их перемещения не должна изменяться, что можно наблюдать в эксперименте.



Рассчитанная по формуле (4) зависимость приращения температуры сфероидальной наночастицы из серебра ΔT_p , локализованной в воде, от времени воздействия лазерного излучения t . Интенсивность лазерного излучения $I_0 = 5,1 \cdot 10^6$ Вт/м²; $b = 50$ нм; длина полуоси a и эксцентриситет сфероида (e_s):
 кривая 1 – 120 нм ($e_s = 0,76$);
 2 – 150 нм ($e_s = 0,82$);
 3 – 180 нм ($e_s = 0,85$)

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Произведены расчеты приращений температуры наночастицы при ее нагреве в результате воздействия лазерного излучения. Показано, что в гауссовом световом пучке температура наночастицы из серебра изменяется на ~ 200 мК за менее чем четыре секунды. При последующем длительном воздействии лазерного излучения скорость нагрева наночастицы существенно уменьшается.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЕ ССЫЛКИ

1. Хлебцов, Н.Г. Оптика и биофотоника наночастиц с плазмонным резонансом / Н.Г. Хлебцов // Квантовая электроника. – 2008. – № 38 (6). – С. 504–509.
2. Гузатов, Д.В. Транспортировка металлических наночастиц в вязкой среде с помощью лазерного излучения / Д.В. Гузатов, Л.С. Гайда // Веснік Гродзенскага дзяржаўнага ўніверсітэта імя Янкі Купалы. Сер 2. Матэматыка. Фізіка. Інфарматыка. Вылічальная тэхніка і кіраванне. – 2012. – № 1 (126). – С. 109–119.
3. Гайда, Л.С. Движение металлической наночастицы в кровезамещающей жидкости под действием лазерного излучения / Л.С. Гайда, Е.В. Матук, А.Ч. Свистун // Вестник Гродненского государственного университета имени Янки Купалы. Серия 2. Математика. Физика. Информатика, вычислительная техника и управление. – 2022. – Т. 12, № 2. – С. 104–112.
4. Aberration correction in holographic optical tweezers / K.D. Wulff [et al.] // Opt. Express. – 2006. – Vol. 14. – P. 4169–4174.
5. Wang, L.G. Dynamic radiation force of a pulsed Gaussian beam acting on Rayleigh dielectric sphere / L.G. Wang, C.L. Zhao // Opt. Express. – 2007. – Vol. 15, № 17. – P. 10615–10621.
6. Концентрационная нелинейность суспензии прозрачных микросфер под действием градиентной силы в поле периодически модулированного лазерного излучения / А.А. Афанасьев [и др.] // Квантовая электроника. – 2016. – Т. 46, № 10. – С. 891–894.

7. Afanas'ev, A.A. Effect of focusing the laser beam on the radiation Gaussian forces acting on the transparent nanoparticle / A.A. Afanas'ev, L.S. Gaida, A.Ch. Svistun // *Zurnal Prikladnoj Spektroskopii*. – 2016. – Vol. 83, No. 6–16. – P. 77–78.
8. Движение серебряных наночастиц в жидкости с различной вязкостью под действием сил светового давления / А.А. Афанасьев [и др.] // *Проблемы физики, математики и техники*. – 2016. – № 4 (29). – С. 7–12.
9. Локализация диэлектрической сферической наночастицы под действием градиентной силы в интерференционном поле, формируемом при наложении встречных пучков лазерного излучения / А.Ч. Свистун [и др.] // *Журнал прикладной спектроскопии*. – 2023. – Т. 90, № 4. – С. 599–605.
10. Иванов, В.И. Сепарация частиц в полидисперсной наносuspension в поле лазерного излучения / В.И. Иванов, С.А. Пячин // *Физико-химические аспекты изучения кластеров, наноструктур и наноматериалов*. – 2021. – № 13. – С. 146–155.
11. Савельев, М.В. Пространственно-временные характеристики четырёхволнового преобразователя излучения с учётом поля тяжести Земли, действующего на растворённые в прозрачной жидкости наночастицы / М.В. Савельев, А.Д. Ремзов // *Компьютерная оптика*. – 2022. – Т. 46, № 4. – С. 547–554.
12. Гайда, Л.С. Взаимодействие электромагнитного излучения с сфероидальными металлическими наночастицами в жидкости / Л.С. Гайда, Е.В. Матук, А.Ч. Свистун // *Проблемы физики, математики и техники*. – 2018. – № 1 (34). – С. 24–28.
13. Свистун, А.Ч. Анализ светового давления эванесцентной электромагнитной волны на диэлектрическую сферическую наночастицу / А.Ч. Свистун, Э.В. Мусафиров, Д.В. Гузатов // *Журнал прикладной спектроскопии*. – 2024. – Т. 91, № 4. – С. 532–539.
14. Влияние оптических параметров лазерного излучения и металлической наночастицы на ее транспортировку силами светового давления / Л.С. Гайда [и др.] // *Вестник Гродненского государственного университета имени Янки Купалы. Серия 2. Математика. Физика. Информатика, вычислительная техника и управление*. – 2018. – Т. 8, № 3. – С. 93–101.
15. Исследование локализации углеродных нанотрубок, взвешенных в жидкости, под действием градиентной силы в интерференционном поле лазерного излучения / Л.С. Гайда [и др.] // *Вестник Гродненского государственного университета имени Янки Купалы. Серия 2. Математика. Физика. Информатика, вычислительная техника и управление*. – 2009. – № 1 (77). – С. 121–127.
16. Матук, Е.В. Вращение наночастиц в эллиптически поляризованном электромагнитном поле / Е.В. Матук, Л.С. Гайда, А.Ч. Свистун // *Вестник Гродненского государственного университета имени Янки Купалы. Серия 2. Математика. Физика. Информатика, вычислительная техника и управление*. – 2023. – Т. 13, № 3. – С. 109–117.
17. О радиационных силах, действующих на прозрачную наночастицу в поле сфокусированного лазерного пучка / А.А. Афанасьев [и др.] // *Квантовая электроника*. – 2015. – Т. 45, № 10. – С. 904–907.
18. Свистун, А.Ч. Локализация диэлектрической сферической наночастицы под действием двух радиационных сил в поле сфокусированного лазерного пучка гауссовой формы / А.Ч. Свистун, Л.С. Гайда, Е.В. Матук // *Журнал прикладной спектроскопии*. – 2019. – Т. 86, № 2. – С. 298–303.
19. Гузатов, Д.В. Плазмонные осцилляции дипольной мультипольности в трехосном наноэллипсоиде / Д.В. Гузатов, А.Ч. Свистун // *Вестник Гродненского государственного университета имени Янки Купалы. Серия 2. Математика. Физика. Информатика, вычислительная техника и управление*. – 2009. – № 3 (87). – С. 104–109.
20. Матук, Е.В. Движение металлической наночастицы вблизи поверхности пузырька воздуха в жидкости под действием силы светового давления / Е.В. Матук, Л.С. Гайда, Д.В. Гузатов // *Проблемы физики, математики и техники*. – 2015. – № 3 (24). – С. 17–20.
21. Перемещение и локализация наночастиц в идеальной жидкости под действием градиентной силы светового давления / А.Ч. Свистун [и др.] // *Проблемы физики, математики и техники*. – 2024. – № 1(58). – С. 44–49.
22. Климов, В.В. Наноплазмоника / В.В. Климов. – М. : Физмалит, 2009. – С. 136–176.
23. A hybridization model for the Plasmon response of complex nanostructures / E. Prodan [et al.] // *Science*. – 2003. – Vol. 302. – P. 419–422.
24. Tribelsky, M.I. Laser heating of dielectric particles for medical and biological applications / M.I. Tribelsky, Y. Fukumoto // *Biomedical Optics Express*. – 2016. Vol. 7, No. 7 – P.2781–2788.
25. Acoustic signals generated by laser – irradiated metal nanoparticles / S. Egerev [et al.] // *Appl. Opt.* – 2009. – Vol. 48, № 7. – P. 38–45.
26. Таблицы физических величин / под ред. И.К. Кикоина. – М. : Атомиздат, 1976. – С. 56–281.