

ПОЛЯРИЗОВАНІСТЬ СИСТЕМИ ДВОХ МАЛИХ ЧАСТИНОК ІЗ УРАХУВАННЯМ МУЛЬТИПОЛЬНОЇ ВЗАЄМОДІЇ МІЖ НИМИ

*Н. Г. Шкода, кандидат фізико-математичних наук
Інститут хімії поверхні НАН України
С. В. Шостак, кандидат фізико-математичних наук
Національний університет біоресурсів
і природокористування України
e-mail: nni.elektrik@gmail.com*

Анотація. Отримано аналітичні вирази для поляризованості системи, що складається з двох малих сферичних частинок із урахуванням мультипольної взаємодії між ними. Для випадку двох різних сферичних частинок у зовнішньому електричному полі розраховано частоти поверхневих мод. Усі розрахунки проведено в електростатичному наближенні.

Ключові слова: *поверхневий плазмон, електродинамічний відгук, мультипольна взаємодія*

Вивчення процесів взаємодії електромагнітного випромінювання (ЕМВ) з ансамблями малих часток (МЧ) становлять величезний інтерес як з точки зору неруйнівного контролю поверхні, так і при створенні композитних матеріалів із наперед заданими електродинамічними властивостями [1–6].

У загальному випадку на характеристики спектрів поглинання МЧ (висоту, ширину й положення піків) впливають декілька чинників. Ті з них, які розглядаються в класичній теорії, зручно об'єднати в групи, які відповідають типам взаємодії в системі малих частинок. Перелічимо ці взаємодії в порядку зменшення їх інтенсивності і, відповідно, їх впливу на оптичні спектри поглинання [5, 6] такими системами.

По-перше, взаємодія МЧ із зовнішнім електромагнітним полем. Вона зумовлена тільки характеристиками самих МЧ – їх формою, розміром, структурою (наявністю оболонок, додаткових шарів тощо) і властивостями матеріалу, з якого вони виготовлені.

По-друге, міжчастинкова взаємодія в системі МЧ. Ця взаємодія зумовлена характером просторового розподілу МЧ (щільний або розріджений розподіл; для МЧ несферичної форми має значення також характер їх просторової орієнтації: чи є вона впорядкованою або хаотичною), а також характером розподілу їх за розмірами (моно- або полідисперсний розподіл).

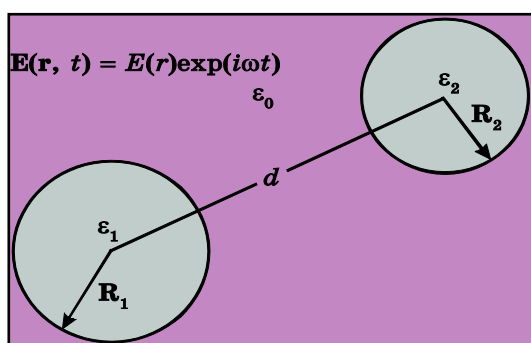
Мета досліджень – вивчення характеру електродинамічного відгуку в системі сферичних МЧ, що знаходяться в зовнішньому електричному

полі $E_0 e^{i\omega t}$; визначення поляризованості МЧ, частоти поверхневих мод, а також аналіз частотного спектра поверхневих збуджень дипольної взаємодії частинок між собою.

Матеріали та методика досліджень. Можливо, найбільш важливою та дослідженою із задач у теорії поглинання й розсіяння плоских електромагнітних хвиль малими частинками є задача про кулю з довільним радіусом і відомим показником заломлення або діелектричною проникністю. Для розв'язання цієї задачі можуть бути використані різні методи. З відомих методів розв'язку виокремимо три: метод Стреттона, метод потенціалів Дебая і метод Т-матриць. У цій роботі ми використали механізми та закономірності поглинання й розсіяння ЕМВ окремими кульовими частинками з урахуванням мультипольної взаємодії між ними.

Розв'язок задачі розсіяння плоскої електромагнітної хвилі на кулі, згідно із загальноприйнятою термінологією, будемо називати розв'язком Мі, яка застосовується відносно взаємодії світла з частинками, розміри яких достатньо малі для того, щоб їх можна було описувати в межах електростатичного наближення ($R \ll \lambda$).

Результати досліджень. Розглянемо випадок двох металевих сферичних часток, що знаходяться на відстані d один від одного (див. рисунок) у зовнішньому (змінному за часом) електричному полі з довжиною хвилі λ_0 значно більшою за розмір частинок і d [7, 8].



Дві малі кульові частинки на поверхні твердого тіла у зовнішньому електричному полі $\vec{E}(r, t)$

З урахуванням тільки дипольної взаємодії між частинками, тензор поляризованості i -тої частинки може бути поданий у вигляді:

$$\alpha_{im_i}^m = 4\pi a_{i1} \frac{1 + (-1)^m \eta_m a_{\bar{i}1} \delta_m^{m'}}{1 - \eta_m^2 \frac{a_{11} a_{21}}{d^6}} \quad (1)$$

де $\bar{i} = 1$, якщо $i = 2$;
 $\bar{i} = 2$, якщо $i = 1$, $\epsilon_0 \equiv \epsilon_a$;
 R_i - радіус i -частинки:

$$a_i = \frac{\epsilon_i - \epsilon_0}{\epsilon_i + 2\epsilon_0} R_i^3, \quad i = 1, 2 \quad (2)$$

Умова для знаходження частот поверхневих плазмонів (рівність нулю знаменника в (1)) у цьому випадку набуває вигляду:

$$\eta_m^2 \frac{R_1^3 R_2^3}{d^6} \left(\frac{\varepsilon_{1\infty} - \varepsilon_0}{\varepsilon_{1\infty} + 2\varepsilon_0} \right) \left(\frac{\varepsilon_{2\infty} - \varepsilon_0}{\varepsilon_{2\infty} + 2\varepsilon_0} \right) \left(\frac{\omega^2 - \omega_{e1}^2}{\omega^2 - \omega_{f1}^2} \right) \left(\frac{\omega^2 - \omega_{e2}^2}{\omega^2 - \omega_{f2}^2} \right) = 1. \quad (3)$$

Діелектричні проникності металевих сфер було вибрано в друдівському вигляді [2]:

$$\varepsilon_1(\omega) = \varepsilon_{1\infty} - \frac{\omega_{p1}^2}{\omega(\omega + i\gamma_1)}; \quad \varepsilon_2(\omega) = \varepsilon_{2\infty} - \frac{\omega_{p2}^2}{\omega(\omega + i\gamma_2)},$$

а при отриманні (3) γ_1, γ_2 прямували до нуля. Крім того, в (3) введено позначення:

$$\omega_{fi}^2 = \frac{\omega_{pi}^2}{\varepsilon_{i\infty} + 2\varepsilon_0}; \quad \omega_{ei}^2 = \frac{\omega_{pi}^2}{\varepsilon_{i\infty} - \varepsilon_0}, \quad i = 1, 2. \quad (4)$$

З урахуванням цих зауважень з рівняння (3) знаходимо частоти поверхневих плазмонів:

$$2(\omega_m^\pm)^2 = \bar{\omega}_{f1}^2 + \bar{\omega}_{f2}^2 \pm \left[(\bar{\omega}_{f1}^2 - \bar{\omega}_{f2}^2)^2 + 4\bar{\omega}_{f1}^2 \cdot \bar{\omega}_{f2}^2 \frac{(1-\alpha_1)(1-\alpha_2)A_m^2}{(1-\alpha_1 A_m^2)(1-\alpha_2 A_m^2)} \right]^{\frac{1}{2}}, \quad (5)$$

де

$$A_m^2 = \eta_m^2 \frac{R_1^3 R_2^3}{d^6}, \quad \alpha_{12} = \alpha_1 \alpha_2; \quad \alpha_i = \frac{\varepsilon_{i\infty} - \varepsilon_0}{\varepsilon_{i\infty} + 2\varepsilon_0}; \quad (6)$$

$$\bar{\omega}_{f1}^2 = \omega_{f1}^2 \frac{1-\alpha_2 A_m^2}{1-\alpha_{12} A_m^2}; \quad \bar{\omega}_{f2}^2 = \omega_{f2}^2 \frac{1-\alpha_1 A_m^2}{1-\alpha_{12} A_m^2}; \quad i = 1, 2.$$

Вираз (5) являє собою основну формулу для розрахунку частот поверхневих плазмонів у системі двох металевих сферичних різних частинок, що знаходяться в зовнішньому електричному полі на відстані d .

Розглянемо окремий випадок, коли частинки складаються з одного матеріалу ($\varepsilon_1(\omega) = \varepsilon_2(\omega)$), але мають різні розміри ($R_1 \neq R_2$). Тоді, з рівняння (5) знаходимо частоти поверхневих плазмонів у системі двох частинок [3]:

$$(\omega_m^\pm)^2 = \frac{(1 \pm A_m)\omega_f^2}{1 \pm \alpha_0 A_m}; \quad \omega_f = \frac{\omega_p^2}{\varepsilon_\infty + 2\varepsilon_0}; \quad \varepsilon_1(\omega) = \varepsilon_2(\omega) \equiv \varepsilon(\omega),$$

де

$$\varepsilon(\omega) = \varepsilon_\infty - \frac{\omega_p^2}{\omega^2}; \quad \Delta = R_2/R_1 \quad (R_2 \leq R_1); \quad \alpha_0 = \frac{\varepsilon_\infty - \varepsilon_0}{\varepsilon_\infty + 2\varepsilon_0}; \quad A_m = \eta_m \Delta^{3/2} (R_1/d)^3; \quad \eta_m = \begin{cases} 2, & m = (0; II) \\ 1, & m = (\pm 1; \perp). \end{cases} \quad (7)$$

Знак II означає, що поле $\mathbf{E}_0$ спрямоване вздовж прямої, що сполучає центри частинок, а знак $\perp$ — поле, спрямоване перпендикулярно цій прямій:

$$(\Delta\omega)^2 \equiv (\omega_0^+)^2 - (\omega_1^-)^2 = 3\omega_p^2 \left[\frac{(R_1 R_2)^{1/2}}{d} \right]^3 \quad (8)$$

При $R_1 = R_2$ максимальне значення $\Delta\omega$ досягається при $d = 2R_1$. Якщо $\varepsilon_\infty = \varepsilon_0 = 1$, то

$$\Delta\omega = (1/8)^{1/2} \omega_p \sim 0,35 \omega_p. \quad (9)$$

Зазначимо, що величина $\Delta\omega$ становить третю частину плазмової частоти ω_p матеріалу МЧ і є оціночною. У реальних системах необхідно враховувати електронне згасання (γ_1, γ_2) і реальні частотні залежності $\varepsilon_1(\omega)$ і $\varepsilon_2(\omega)$. Це потребує громіздких чисельних обчислень і буде проведено надалі.

Висновки

На підставі розробленої нами загальної теорії взаємодії наночастинок із різноманітними поверхнями (у тому числі й біологічними) можна стверджувати, що мультипольна взаємодія виникає лише за присутності зовнішнього електричного поля $\mathbf{E}_0$ і вона призводить до зміни електродинамічних властивостей як МЧ, так і поверхні – перерозподілу зарядів, зрушенню положення піків і зміні інтенсивності поглинання електромагнітного випромінювання системою наночастинок, що знаходяться на поверхні.

Характер зміни процесів поглинання й розсіювання як наночастинок, так і поверхнею залежить від електродинамічних параметрів поверхні і наночастинок (ефективна діелектрична проникність, фізико-хімічний стан поверхні тощо). Це дає можливість отримувати інформацію про фізичні й хімічні параметри поверхні на підставі аналізу оптичних спектрів поглинання адсорбованих на ній малих частинок, наночастинок і молекул.

Список літератури

1. Борен К. Поглощение и рассеяние света малыми частицами / К. Борен, Д. Хафмен. – М. : Мир, – 1986. – 837 с.
2. Okamoto T. Optical absorption study of the surface plasmons resonance in gold nanoparticles immobilized onto a gold substrate by self-assembly technique / T.Okamoto, I. Yamaguchi. // J. Phys. Chem. B. – 2003. – V. 107, N 38. – P. 10321–10324.
3. Kreibig U. Optical Properties of Metal Clusters / U. Kreibig, M. Vollmer. – Berlin: Springer, 1995. – 532 p.
4. Gozhenko V.V. Electrodynamics of spatial clusters of spheres: substrate effects / V.V. Gozhenko, L.G. Grechko, K.W. Whites. // Phys. Rev. B. – 2003. – V. 68, N 13. – P. 125422–125438.
5. Gozhenko V.V. Substrate influence on infrared absorption by clusters of small spheres / V.V. Gozhenko, L.G. Grechko, N.G. Shkoda, K.W. Whites. // Proc. 6-th Int. Conf. on Material Science and Material Properties for Infrared Optoelectronics. – Proc. SPIE. – 2003. – Vol. 5065. – P. 122–126.
6. M.T. Haarmans and D. Bedeaux. Thin Solid Film, 224, page 117, 1993.

7. Gozhenko V.V. Electrodynamics of spatial clusters of spheres: substrate effects. / V.V. Gozhenko, L.G. Grechko, K.W. Whites. // Phys. Rev. B., 68, 125422-1–125422-16 (2003).

8. Blank A.Ya. Optical surface modes in a system of fine metallic particles / A.Ya. Blank, L.Y. Garanina, L.G. Grechko // Fiz. Nizk. Temp, V.25, N.10, (1067–1072), 1999.

ПОЛЯРИЗУЕМОСТЬ СИСТЕМЫ ДВУХ МАЛЫХ ЧАСТИЦ С УЧЕТОМ МУЛЬТИПОЛЬНОГО ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ МЕЖДУ НИМИ

Н. Г. Шкода, С. В. Шостак

Аннотация. *Получены аналитические выражения для поляризуемости системы из двух сферических малых частиц с учетом мультипольного взаимодействия их между собой. Для случая двух разных сферических частиц во внешнем электрическом поле рассчитаны частоты поверхностных мод. Все расчеты проведены в электростатическом приближении.*

Ключевые слова: *поверхностный плазмон, электродинамический отклик, мультипольное взаимодействие*

POLARIZABILITY SYSTEM OF TWO PARTICLES WITH MULTIPOLE INTERACTION

N. Shkoda, S. Shostak

Annotation. *Analytical expressions for the polarizability of a system of two small particles were received taking into account multipole substrate-particle interactions as well as interactions between the particles themselves. For a case of two different spherical particles, frequencies of surface plasmon modes were obtained. All the calculations are performed in the electrostatic approximation.*

Key words: *surface plasmon, electrodynamics response, multipole interaction*