

УДК 621.396.96



С. А. Горелишев

МЕТОД ОЦІНЮВАННЯ СТУПЕНЯ ЕЛЕКТРОМАГНІТНОЇ ВЗАЄМОДІЇ ДВОХ МЕТАЛЕВИХ НАНОЧАСТОК У ОПТИЧНОМУ ДІАПАЗОНІ ХВИЛЬ

Запропоновано метод оцінювання ступеня електромагнітної взаємодії наночастинок срібла, які мають скінченну діелектричну проникність у оптичному діапазоні хвиль. Метод ґрунтується на отриманні відносної похибки між значеннями перерізів повного розсіювання, перерізів загасання та перерізів поглинання для моделі з двох наночастинок еліпсоїдальної форми різних розмірів для різних відстаней між ними при розрахунку з урахуванням їх взаємодії та без неї. Визначено мінімальні відстані між наночастинами, для яких їх ЕМ взаємодією можна знехтувати зі збереженням заданої точності обчислень. Отримані дані дозволяють суттєво скоротити об'єм необхідної комп'ютерної пам'яті та час обчислення. Запропонований метод може застосовуватися для наночастинок з інших благородних металів.

К л ю ч о в і с л о в а : електромагнітна взаємодія, електромагнітне розсіювання, інтегральні рівняння Мюллера, наночастка, оптичний діапазон хвиль.

Постановка проблеми. У даний час багато уваги приділяється дослідженням резонансних ефектів при розсіюванні та поглинанні світла матеріалами, які у своєму складі мають нанорозмірні частки благородних металів.

Розробки в галузі нанотехнологій вже сьогодні активно застосовуються, наприклад, у медицині, промисловості та інших галузях діяльності. Лідерами інвестицій у нанорозробках є США, Євросоюз, Японія та Китай [1, 2, 3].

У військовій сфері дослідження спрямовані на вдосконалення засобів зв'язку та пристроїв виявлення хімічних і біологічних забруднень; створення систем, що самовідновлюються; на пошук нових енергетичних ресурсів, а також технології створення та протидії «невидимості». Зокрема здатність наночастинок до розсіювання електромагнітних (ЕМ) хвиль може використовуватися у тканинах одягу, що надає їй властивості невидимості в інфрачервоному діапазоні хвиль завдяки поглинанню тепла людського тіла [4, 5].

Також інтенсивно вивчаються властивості розсіювання оптичних антен [6, 7, 8], що найчастіше є сукупністю наночастинок, розташованих на підкладці. Оптичні антени дозволяють посилити взаємодію світла з речовиною, що дає

можливість успішно використовувати їх для підвищення ефективності роботи таких пристроїв, як біосенсори, сонячні батареї, перемикачі випромінювання, світловипромінюючі органічні діоди тощо [6].

Однак сьогодні є низка невирішених проблем моделювання характеристик ЕМ розсіювання структур з наночастинок у оптичному діапазоні хвиль. Таким чином, отримання та аналіз характеристик ЕМ розсіювання даних структур є актуальним науково-практичним завданням.

Аналіз останніх досліджень та публікацій. У працях [9, 10, 11, 12, 13] досліджуються ЕМ властивості поглинаючих покриттів різних конструкцій. Але у них допускаються обмеження на форму і речовину часток. А також розглядається переважно двовимірне ЕМ розсіювання.

У працях [14, 15, 16] для моделювання тривимірного ЕМ розсіювання різними об'єктами широко використовуються інтегральні рівняння Мюллера. Разом із цим в оптичному діапазоні хвиль розсіювання на наночастиках як однорідних резонансних об'єктах зі скінченною діелектричною проникністю [16, 17, 18, 19] має свої особливості і ще не вивчено детально. Так, запропоновано

чисельний метод розрахунку тривимірного ЕМ розсіювання однією срібною наночасткою з різними розмірами в оптичному діапазоні хвиль [16, 17]. У статті [18] узагальнено даний метод для двох наночасток. У розрахунках дві наночастки розглядалися як єдиний об'єкт для врахування ЕМ взаємодії між ними, що вимагає значного машинного часу та обчислювальних ресурсів.

У праці [20] методом оцінено відстань між металевими сферами, при якій їх ЕМ взаємодією можна зневажити. У такому випадку буде використаний наближений метод розрахунку ЕМ розсіювання, який базується на обчисленні поверхневих струмів на кожному об'єкті окремо, що суттєво зменшує розмірності системи інтегральних рівнянь. Але в даний час відсутні дослідження щодо оцінювання ЕМ взаємодії наночасток.

Таким чином, аналіз відомої наукової літератури показав необхідність розроблення методу оцінювання ступеня ЕМ взаємодії наночасток, в основу якого покладено тривимірне розсіювання на структурі із наночасток з урахуванням їх взаємодії та без неї. Оцінювання ступеня ЕМ взаємодії наночасток у моделі дозволить визначити границі застосовності наближеного методу.

Метою статті є розроблення методу оцінювання ЕМ взаємодії між двома срібними наночастками залежно від їх геометричних розмірів та довжини падаючої ЕМ хвилі.

Виклад основного матеріалу. Розглядається задача падіння плоскої ЕМ хвилі (\vec{E}^0, \vec{H}^0) оптичного діапазону (від 300 нм до 900 нм) з напрямку \vec{R}^0 у вільному просторі V_1 на модель з двох наночасток резонансних розмірів (рис. 1). Кожна наночастка являє собою однорідний еліпсоїд V_2 з відносною діелектричною проникністю $\varepsilon_2(\lambda) = \varepsilon'_2(\lambda) + i\varepsilon''_2(\lambda)$, де i – уявна одиниця, напівосями $a_x = a_y$, a_z та поверхнею. Областям V_1 та V_2 відповідає магнітна проникність $\mu = 1$.

Наночастки відокремлені одна від одної відстанню Δ у площині XOY та симетричні відносно осі OZ . Усі ЕМ поля, що використовуються у роботі, у будь-якій точці простору задовольняють рівняння Максвелла, граничні умови та умови випромінювання на нескінченності.

Завдання полягає у обчисленні розсіяного поля $(\vec{E}^{sc}, \vec{H}^{sc})$ у напрямку \vec{r}^0 з урахуванням та без урахування взаємного ЕМ впливу наночасток. У розрахунках кут падіння плоскої ЕМ хвилі θ набував значення від 0° (напрямок опромінення паралельно осі OZ) до 90° (рис. 1).

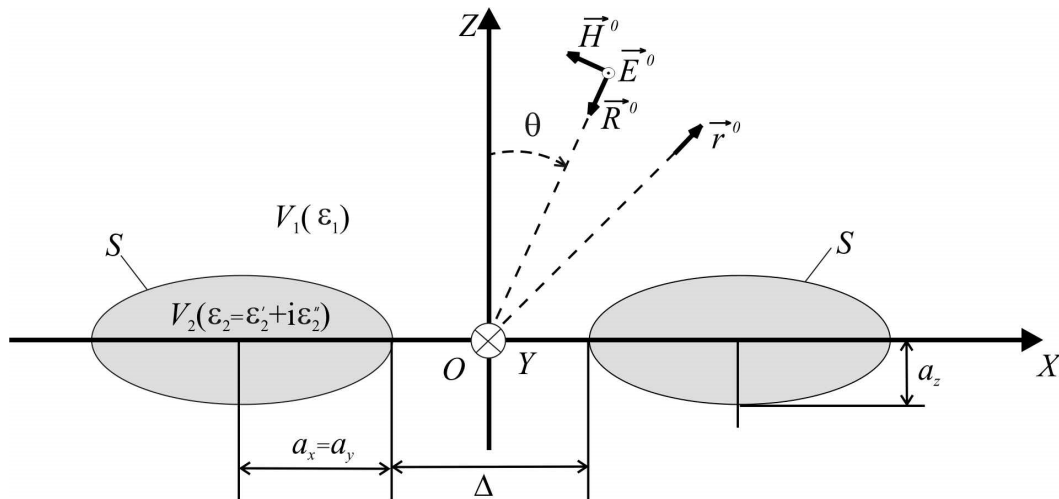


Рисунок 1 – Геометрична постановка задачі розсіювання плоскої ЕМ хвилі моделлю з двох наночасток

Відповідно до оптичної теореми [21, 22] переріз повного розсіювання (ППР) σ_{sc} , переріз загасання (ПЗ) σ_{ext} та переріз поглинання (ПП) σ_{abs} моделі можуть бути обчислені за допомогою таких співвідношень [16, 17, 18].

$$\begin{aligned}\sigma_{sc} &= \int_{\Omega} \left\{ \left| \vec{p}_1 \cdot \vec{E}^{sc} \right|^2 + \left| \vec{p}_2 \cdot \vec{E}^{sc} \right|^2 \right\} r^2 \sin(\theta_1) d\theta_1 d\varphi_1 = \\ &= \frac{1}{k_1^2} \int_{\Omega} \left\{ \left| F_1(\theta_1, \varphi_1) \right|^2 + \left| F_2(\theta_1, \varphi_1) \right|^2 \right\} \sin(\theta_1) d\theta_1 d\varphi_1,\end{aligned}\quad (1)$$

$$\text{де } F_{\alpha}(\theta_1, \varphi_1) = -\frac{k_1^2}{4\pi} \int_S \left[\vec{J}^e(\vec{Q}) \cdot (\vec{p}_{\alpha} - \vec{r}^0 (\vec{p}_{\alpha} \cdot \vec{r}^0)) \zeta_0 + \vec{J}^m(\vec{Q}) \cdot (\vec{p}_{\alpha} \times \vec{r}^0) \right] \exp[ik_1(\vec{r}^0 \cdot \vec{Q})] ds_Q;$$

$\alpha = \{1, 2\}$ – індекс;

k_1 – хвильове число у вільному просторі;

\vec{p}_1 та \vec{p}_2 – два взаємно ортогональні одиничні вектори, дотичні до сфери радіуса r та ортогональні до вектора \vec{r}^0 у точці приймання;

Ω – поверхня сфери радіуса r ;

θ_1, φ_1 – кути, що використовуються для параметризації поверхні сфери Ω ;

$\vec{J}^e(\vec{Q}), \vec{J}^m(\vec{Q})$ – щільність еквівалентних електричного та магнітного поверхневих струмів у точці \vec{Q} ;

ζ_0 – імпеданс вільного простору.

$$\sigma_{ext} = -\frac{4\pi}{k_1^2} \operatorname{Re} \left\{ (\vec{p}_0 \cdot \vec{p}_1) F_1(\theta, \varphi) \Big|_{\vec{r}^0} + (\vec{p}_0 \cdot \vec{p}_2) F_2(\theta, \varphi) \Big|_{\vec{r}^0} \right\}, \quad (2)$$

де \vec{p}_0 – одиничний вектор поляризації падаючої плоскої ЕМ хвилі.

$$\sigma_{abs} = \sigma_{ext} - \sigma_{sc}. \quad (3)$$

Щільності еквівалентних електричного \vec{J}^e та магнітного \vec{J}^m поверхневих струмів у точці \vec{Q} можемо отримати шляхом розв'язання системи інтегральних рівнянь Мюллера для об'єктів зі скінченною діелектричною проникністю [16, 17, 18]:

$$\begin{cases} -2\varepsilon_1 \vec{\tau}_q^0 \cdot \vec{E}^0(\vec{Q}_0) - (\vec{\tau}_q^0 \times \vec{v}^0) \cdot \vec{J}^m(\vec{Q}_0) (\varepsilon_1 + \varepsilon_2) = \\ = \frac{2}{i\omega} \int_S \left[\vec{H}_{21}^e(\vec{\tau}_q^0) \cdot \vec{J}^m(\vec{Q}) \varepsilon_2 + \varepsilon_0^{-1} \vec{D}_{21}^e(\vec{\tau}_q^0) \cdot \vec{J}^e(\vec{Q}) \right] ds_Q, \\ \vec{\tau}_q^0 \cdot \vec{H}^0(\vec{Q}_0) + (\vec{\tau}_q^0 \times \vec{v}^0) \cdot \vec{J}^e(\vec{Q}_0) = \frac{1}{i\omega} \int_S \left[\vec{H}_{21}^m(\vec{\tau}_q^0) \cdot \vec{J}^m(\vec{Q}) + \vec{E}_{21}^m(\vec{\tau}_q^0) \cdot \vec{J}^e(\vec{Q}) \right] ds_Q. \end{cases} \quad (4)$$

де ε_0 – абсолютна діелектрична проникність вільного простору;

$\vec{Q}, \vec{Q}_0 \in S$ – відповідно точки інтегрування та спостереження;

$\vec{\tau}_q^0$ ($q=1, 2$) – взаємно ортогональні одиничні вектори, які є дотичними до поверхні S у точці \vec{Q}_0

та формують праву трійку з вектором зовнішньої нормалі \vec{v}^0 ;

ω – циклічна частота;

$\vec{H}_{21}^e(\vec{\tau}_q^0), \vec{D}_{21}^e(\vec{\tau}_q^0), \vec{H}_{21}^m(\vec{\tau}_q^0), \vec{E}_{21}^m(\vec{\tau}_q^0)$ – ядра системи інтегральних рівнянь (4), що є гладкі функції та являють собою різницю компонент ЕМ полів [16, 17, 18].

Поверхня кожної наночастки S_k ($k=\overline{1, K, K}$ – кількість наночастинок) розбивається на n елементарних електрично малих ділянок (фацетів) $S_{k,n}$ ($n=\overline{1, N}$, N – кількість фацетів на поверхні однієї наночастинки). Таким чином, поверхня S моделі з двох наночастинок подається у вигляді $M=2N$ фацетів $S_{k,n}$, на яких щільності еквівалентних електричного і магнітного струмів вважаються постійними. Враховуючи необхідність визначення двох проєкцій щільностей еквівалентних електричних і магнітних струмів $\vec{J}_{1(2)}^{e(m)} = \vec{\tau}_{1(2)}^0 \cdot \vec{J}^{e(m)}$, має розмірність $(4M \times 4M)$.

Отже, система інтегральних рівнянь (4) розв'язується шляхом зведення її до системи лінійних алгебраїчних рівнянь (СЛАР) [13, 16, 17, 18]:

$$A \cdot \vec{J}^{e(m)} = \vec{B}, \tag{5}$$

де A – обернена матриця, яка розраховується за допомогою інтегрального обчислення та складається з елементів A_n^{pq} для кожного n фацета відповідно до значень $p=1 \dots 4$; $q=1 \dots 4$ [16];

\vec{B} – права частина рівнянь системи (5), яка складається з елементів B_p відповідно до значень $p=1 \dots p 4$.

На рис. 2, а наведена блок-схема алгоритму чисельного розрахунку характеристик ЕМ розсіювання моделі з декількох наночастинок срібла в оптичному діапазоні з урахуванням їх взаємодії.

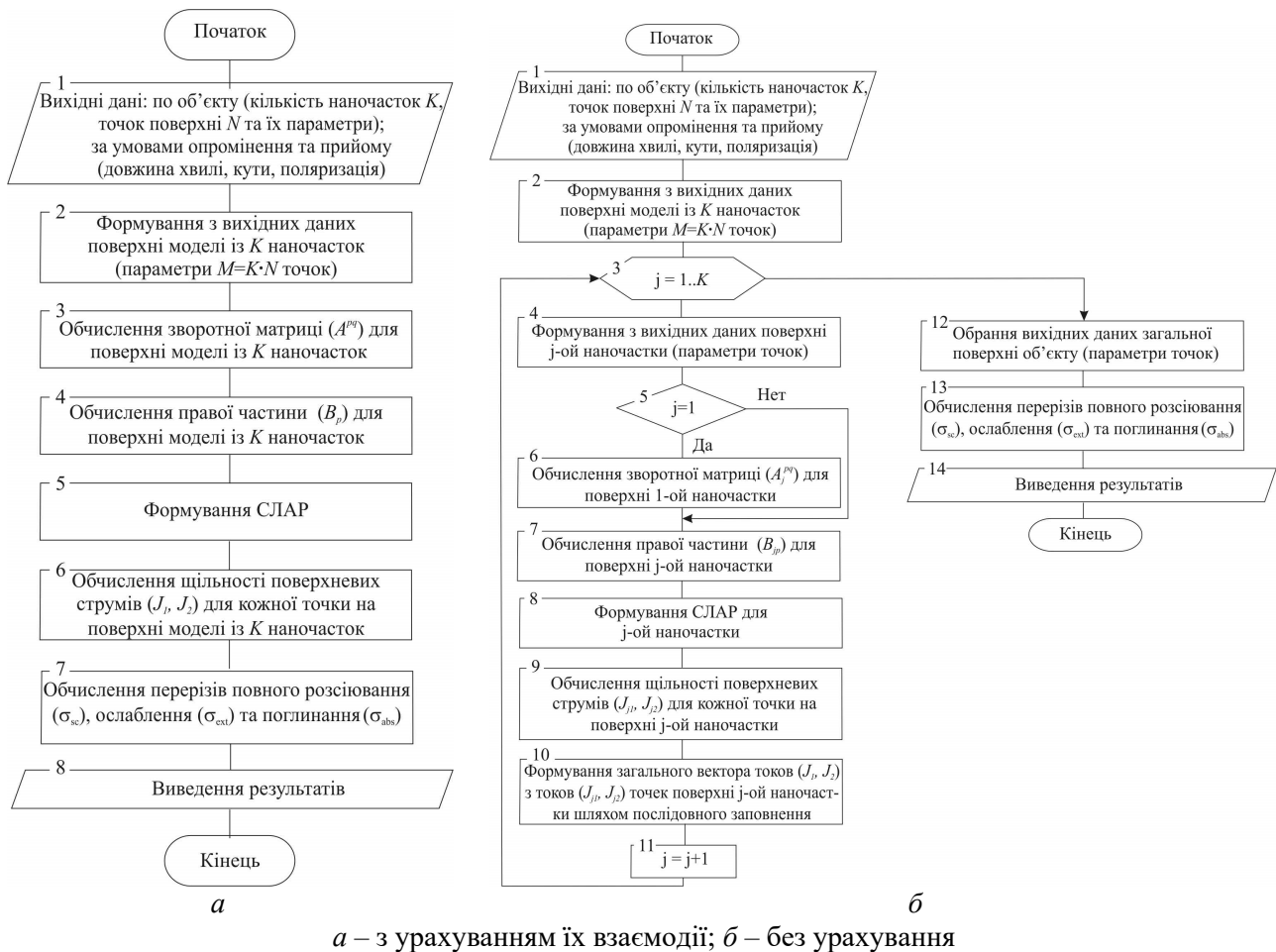


Рисунок 2 – Блок-схема алгоритму розрахунку ЕМ розсіювання металевими наночастиками в оптичному діапазоні

Вихідними даними алгоритму (рис. 2, а блок 1) є:

- параметри розсіювача (кількість наночастинок; напівосі еліпсоїдів, що створюють поверхню наночастинок; координати їх центрів; кути, що визначають їхню орієнтацію);
- умови опромінення та прийому (сітка частот (довжин хвиль) зондування; кути, що задають напрямки з точок опромінення та прийому на модель із наночастинок; відстані від моделі до цих точок; поляризація зондувальної хвилі).

Потім з вихідних даних формуємо модель поверхні, яка складається з сукупності поверхонь K наночастинок (рис. 2, а блок 2). У нашому випадку поверхня S є поєднанням поверхонь двох наночастинок $S = S_1 \cap S_2$. На даному етапі проводиться параметризація загальної поверхні моделі, введення дискретної сітки, що складається з M вузлів струму.

Наступним кроком є формування СЛАР (рис. 2, а блоки 3, 4, 5), яке складається з обчислення елементів зворотної матриці A^{pq} для поверхні моделі з K наночастинок та елементів вектора правої частини B_p .

Щільності еквівалентних поверхневих струмів знаходяться на кожному фацеті обох поверхонь наночастинок сумісно (рис. 2, а блок 6). Проведення обчислень відповідно до запропонованого алгоритму розрахунку ППР, ПЗ та ПП для моделі з срібних наночастинок з урахуванням ЕМ взаємодії потребує значних часових витрат та оперативної пам'яті, а також високої швидкодії.

Відомо, що зі збільшенням відстані між наночастиками слід очікувати ослаблення ЕМ взаємодії між ними [20]. За таких умов при дослідженні наноструктур, у яких використовуються наночастинок однакового розміру та які однаково орієнтовані у просторі, алгоритм розрахунку ЕМ поля, розсіяного групою наночастинок, може бути спрощеним (рис. 2, б).

Особливістю цього алгоритму є те, що для таких структур достаньно один раз знайти обернену матрицю СЛАР (рис. 2, б блоки 3-8) для окремої наночастинок розмірністю $4N \times 4N$. Щільності еквівалентних струмів $\vec{J}^{e(m)}$ у відповідних вузлах на поверхні окремої наночастинок розраховуються залежно від напрямку опромінювання кожної з них (рис. 2, б блок 9). Вектори щільності еквівалентних струмів k -ї наночастинок послідовно зберігаються у загальних векторах токів для поверхні всієї моделі з K наночастинок (рис. 2, б блок 10).

Потім характеристики ЕМ розсіювання, як і у випадку сильної ЕМ взаємодії, обчислюються шляхом інтегрування знайдених струмів на всій поверхні S (рис. 2, б блок 13). Якщо наночастинок однакового розміру мають різну орієнтацію у просторі, то у цьому разі щільність струму у відповідних вузлах на поверхні кожної наночастинок розраховується окремо.

Таким чином, алгоритм наближеного розрахунку ППР, ПЗ та ПП для моделі зі срібних наночастинок без урахування ЕМ взаємодії базується на розв'язанні СЛАР для кожної окремої наночастинок, що значно скоротить витрати машинного часу та знизить технічні вимоги до обчислювального комплексу.

Для використання запропонованого алгоритму наближеного розрахунку ЕМ розсіювання доцільно визначити ступінь ЕМ взаємодії між наночастиками резонансних розмірів і таким чином визначити границі застосовності даного методу. Враховуючи викладене вище, метод оцінювання ЕМ взаємодії між наночастиками срібла у оптичному діапазоні хвиль складається з таких етапів:

- обчислення ППР, ПЗ та ПП з урахуванням ЕМ взаємодії наночастинок на етапі визначення щільностей еквівалентних струмів;
- обчислення ППР, ПЗ та ПП за допомогою алгоритму наближеного розрахунку без урахування взаємодії наночастинок на етапі визначення щільностей еквівалентних струмів;
- розрахунок максимальної відносної похибки між значеннями ППР та ПП з урахуванням та без урахування ЕМ взаємодії наночастинок у заданих діапазонах кутів опромінення для фіксованої довжини хвилі (для заданого діапазону довжин хвиль при фіксованому ракурсі опромінення) на двох поляризаціях;
- визначення ступеня ЕМ взаємодії моделі з двох наночастинок та границь застосовності наближеного методу.

Відносні похибки між значеннями нормованих ППР та ПП при врахуванні взаємодії та без її врахування для кожного значення кута опромінювання θ від 0° до 90° (рис. 1) з кроком 5° розраховані за формулою:

$$\delta_{\theta}(\Delta) = \frac{|\sigma_{\theta_{\theta_{63}}}(\Delta) - \sigma_{\theta_{\theta_{63}}}(\Delta)|}{\sigma_{\theta_{\theta_{63}}}(\Delta)} 100\%, \quad (6)$$

де $\sigma_{\theta_{\theta_{63}}}(\Delta)$ – нормоване значення ППР (ПП) моделі двох наночасток для кута θ , обчислене з урахуванням їхньої взаємодії;

$\sigma_{\theta_{\theta_{63}}}(\Delta)$ – нормоване значення ППР (ПП) моделі двох наночасток для кута θ , обчислене без урахування їхньої взаємодії.

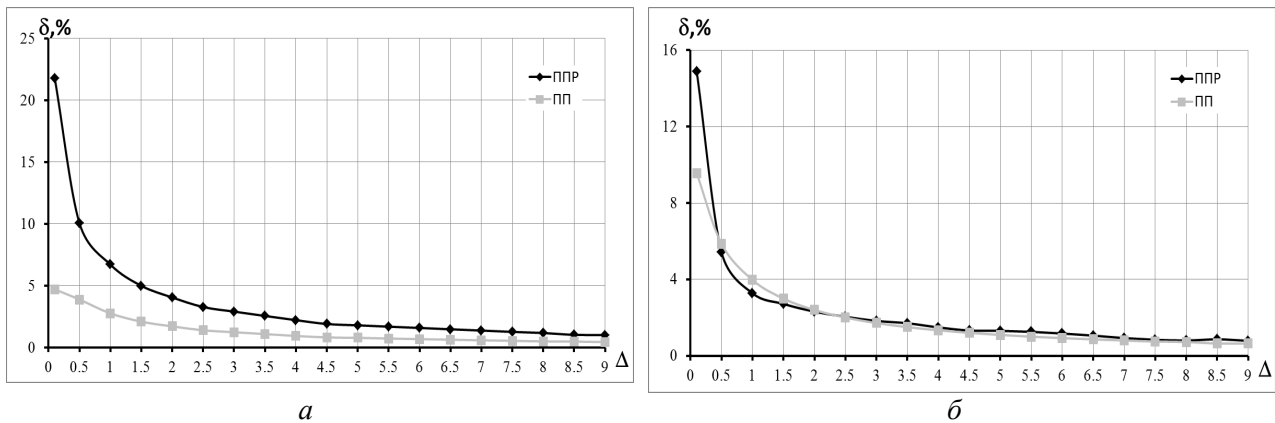
Максимальна відносна похибка для кожного Δ розрахована таким чином:

$$\delta(\Delta) = \max[\delta_{\theta}(\Delta)]. \quad (7)$$

Для оцінювання ЕМ взаємодії між наночастками срібла розглядалися дві моделі, що складаються з двох однакових наночасток срібла, які мають форму еліпсоїда з півосями: перша модель – $a_x = a_y = 75$ нм, $a_z = 25$ нм та друга модель – $a_x = a_y = 100$ нм, $a_z = 20$ нм відповідно за різних значень відстаней між ними Δ (див. рис. 1). Наночастки срібла мають однакову орієнтацію у просторі.

У обчисленнях значення ППР, ПЗ та ПП були пронормовані до величини πa_x^2 відповідного еліпсоїда. Нормовані ППР, ПЗ та ПП отримані з відносною похибкою, яка не перевищувала для першої моделі 0,91 %, для другої моделі – 0,89 % для всього діапазону можливих ракурсів і довжин хвиль видимого оптичного діапазону від 300 нм до 900 нм. Кількості елементарних ділянок поверхні еліпсоїдів, необхідних для досягнення зазначеної точності, склали 1448 (2×724) та 2592 (2×1296) вузлів відповідно.

На рис. 3 подано залежність максимального значення відносної похибки $\delta(\Delta)$ розрахунку ППР (чорна лінія) та ПП (сіра лінія) першої моделі від відстані Δ для двох ортогональних поляризацій на довжині хвилі $\lambda = 300$ нм. Відстань між наночастками Δ на графіках пронормована до даної довжини хвилі.



a – горизонтальна поляризація; b – вертикальна поляризація

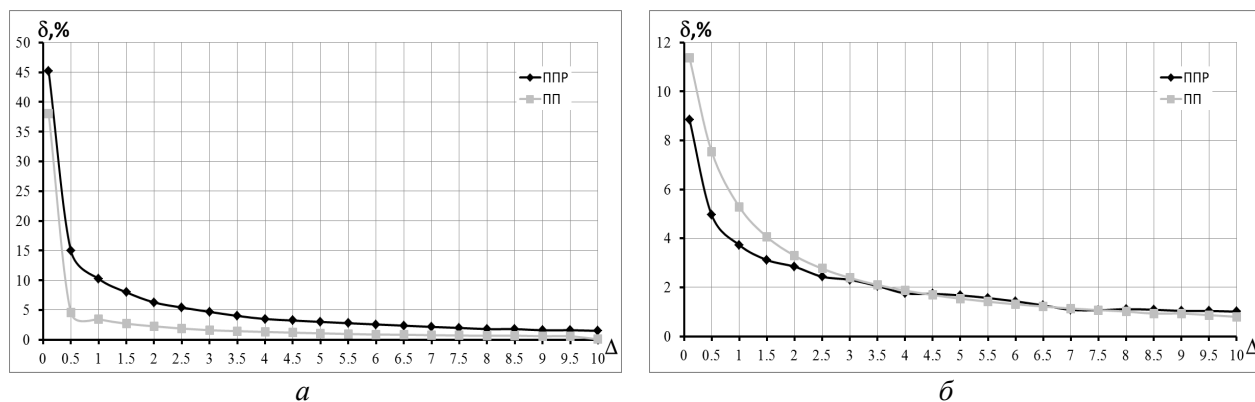
Рисунок 3 – Залежність максимального значення відносної похибки $\delta(\Delta)$ нормованих ППР та ПП першої моделі від відстані Δ у визначеному діапазоні зміни кута опромінення θ

Узагальнені результати кількісного аналізу ступеня ЕМ взаємодії між наночастками резонансних розмірів першої моделі наведено у табл. 1.

Таблиця 1 – Ступінь ЕМ взаємодії між двома наночастиками першої моделі у досліджуваному діапазоні зміни кута опромінення

$\delta(\Delta)$, %	Значення відстані між наночастиками			
	горизонтальна поляризація		вертикальна поляризація	
	ППР	ПП	ППР	ПП
10	0,9 λ (270 нм)	-	0,2 λ (60 нм)	0,1 λ (30 нм)
5	1,5 λ (450 нм)	0,1 λ (30 нм)	0,6 λ (180 нм)	0,8 λ (240 нм)
3	3 λ (900 нм)	1,0 λ (300 нм)	1,5 λ (450 нм)	1,9 λ (570 нм)
1	8,5 λ (2550 нм)	4 λ (1200 нм)	7 λ (2100 нм)	5,5 λ (1650 нм)

На рис. 4 показано залежність максимального значення відносної похибки $\delta(\Delta)$ розрахунку ППР (чорна лінія) та ПП (сіра лінія) другої моделі від відстані Δ для двох ортогональних поляризацій на довжині хвилі $\lambda=300$ нм.



a – горизонтальна поляризація; b – вертикальна поляризація

Рисунок 4 – Залежність максимального значення відносної похибки $\delta(\Delta)$ нормованих ППР і ПП другої моделі від відстані Δ у визначеному діапазоні зміни кута опромінення θ

Узагальнені результати аналізу ступеня ЕМ взаємодії між наночастиками резонансних розмірів другої моделі наведений у табл. 2.

Таблиця 2 – Ступінь ЕМ взаємодії між двома наночастиками другої моделі у досліджуваному діапазоні зміни кута опромінення

$\delta(\Delta)$, %	Значення відстані між наночастиками			
	горизонтальна поляризація		вертикальна поляризація	
	ППР	ПП	ППР	ПП
10	1 λ (300 нм)	0,2 λ (60 нм)	-	0,2 λ (60 нм)
5	3 λ (900 нм)	0,4 λ (120 нм)	0,5 λ (150 нм)	1,2 λ (360 нм)
3	5 λ (1500 нм)	1,5 λ (450 нм)	2 λ (600 нм)	2,5 λ (750 нм)
1	10 λ (3000 нм)	5,5 λ (1650 нм)	10 λ (3000 нм)	8,5 λ (2550 нм)

Аналіз залежностей для першої (рис. 3, a) та другої моделей (рис. 4, a) показує, що для невеликих Δ при горизонтальній поляризації спостерігається помітний ЕМ вплив між наночастиками великих розмірів. Наприклад, для першої моделі при $\Delta=0,1$ похибка ППР становила приблизно 22 %, для другої моделі – 45 %. Однак при вертикальній поляризації (рис. 3, b та 4, b) вже для другої моделі вплив між наночастиками дещо слабший, ніж для першої. Похибка ППР для першої моделі при $\Delta=0,1$ складає 15 %, а для другої моделі тільки 8 %.

Крім того, границі застосовності наближеного методу розрахунку ЕМ розсіювання для другої моделі жорсткіші, тобто чим більше геометричні розміри наночастинок, тим на більшу відстань Δ необхідно їх віддаляти одна від одної для зневажання їх ЕМ впливом.

Таким чином, у даному дослідженні було проаналізовано ЕМ взаємодію наночасток різних розмірів на фіксованій довжині хвилі $\lambda=300$ нм та отримано граничні значення відстаней, починаючи з яких цією взаємодією можна знехтувати.

Висновки

У статті запропоновано метод оцінювання ЕМ взаємодії еліпсоїдальних наночасток срібла в оптичному діапазоні хвиль, заснований на розрахунку максимальної відносної похибки між значеннями ППР та ПП з урахуванням та без урахування ЕМ взаємодії наночасток у заданих діапазонах кутів опромінення при фіксованій довжині хвилі (для заданого діапазону довжин хвиль при фіксованому ракурсі опромінення).

Розроблений метод розрахунку ППР, ПЗ та ПП групи наночасток з урахуванням їх взаємодії та метод наближеного розрахунку є основою оцінювання ЕМ взаємодії між наночастками у структурах. Визначення ступеня ЕМ взаємодії між наночастками дозволяє визначити границі застосовності наближеного методу розрахунку.

Проведено оцінювання ЕМ взаємодії між наночастками двох різних геометричних розмірів при змінних відстанях між ними на фіксованій довжині хвилі $\lambda=300$ нм видимого оптичного спектра.

Оскільки зі зміною довжини хвилі опромінення змінюються і електричні розміри наночасток, то напрямом подальших досліджень є вивчення інтенсивності ЕМ взаємодії на інших довжинах хвиль, зокрема і резонансних, а також для всього видимого спектра від 300 нм до 900 нм. Це дозволить визначити границі застосовності запропонованого наближеного методу розрахунку, що своєю чергою дозволяє зменшити комп'ютерні ресурси та час обчислень з контрольованою точністю.

Перелік джерел посилання

1. Roco Mihail C. The long view of nanotechnology development: the National Nanotechnology Initiative at 10 years. *Journal of Nanoparticle Research*. 2011. Vol. 13. Pp. 427–445. DOI:<https://doi.org/10.1007/s11051-010-0192-z>
2. Innovations in Nanotechnology at the NSECs and NNIN, Highlights of Achievements. June 2011. *National Science Foundation*. URL: <http://surl.li/htddne> (дата звернення: 20.05.2024).
3. David P., Scott John T. The Economic Impacts of Early Stage Consensus Standards Development: A Case Study of Nanotechnology Documentary Standards. May, 2015. *National Institute of Standards and Technology*. URL:<http://dx.doi.org/10.6028/NIST.GCR.15-1001> (дата звернення: 20.05.2024).
4. Altmann Jürgen. Military Nanotechnology. Potential applications and preventive arms control. London and New York, SRC Press Taylor & Francis Group, 2006. 240 p. Available at: <http://surl.li/rfzdsj>
5. Chimera metasurface for multiterrain invisibility / Z.-H. Xu et al. *Applied physical sciences*. 2024. Vol. 121. No. 6, e2309096120.
6. Bharadwaj P., Deutsch B., Novotny L. Optical antennas. *Advances in Optics and Photonics*. 2009. 1 438 p.
7. Q-Han Park. Optical antennas and plasmonics. *Contemporary Physics*. 2009. 50 407 p.
8. Taminiu T. H., Stefani F. D., van Hulst N. F. Enhanced directional excitation and emission of single emitters by a nano-optical Yagi-Uda antenna. *Optics Express*. 2008. 16 p. 10858.
9. Q. Cheng, W. X. Jiang and T. J. Cui. Investigations of the electromagnetic properties of three-dimensional arbitrarily-shaped cloaks. *Progress In Electromagnetics Research*, PIER 94. 2009. Pp. 105–117,
10. Cylindrical invisibility cloak incorporating PEMC at perturbed void region / Shahzad A., Qasim F., Ahmed S. and Naqvi Q. A. *Progress In Electromagnetics Research*. 2011. PIERM 21. Pp. 61–76.
11. Brewster metasurfaces for ultrabroadband reflectionless absorption at grazing incidence / H. Fan et al. *Optica*. 2022. No 9. Pp. 1138–1148.
12. Polarization-insensitive 3D conformal-skin metasurface cloak / H.-X. Xu et al. *Light Sci. Appl*. 2021. Vol. 10, 75.
13. Sukharevsky O., Gorelyshev S., Vasilets V. and Muzychenko A., Pulse signal scattering from perfectly conducting complex object located near uniform half-space, *Progress In Electromagnetics Research* , PIER 29, 2000, pp. 169–185.
14. C. Müller. Foundations of the Mathematical Theory of Electromagnetic Waves, Springer, Berlin, 1969.
15. Surface Integral Equation-Based Characteristic Mode Formulation for Penetrable Bodies / P. Ylä-Oijala et al. *IEEE Trans. Antennas Propag*. 2018. Vol. 66. No. 7. Pp. 3532–3539.

16. Applied Problems in the Theory of Electromagnetic Wave Scattering / in O. I. Sukharevsky (ed.). IOP Publishing, Bristol. 2022. 350 p.
17. Sukharevsky O. I. and Zalevsky G. S. 3-D Electromagnetic Scattering by Ellipsoidal Silver Nanoparticles in Optical Band. *IEEE 17th International Conference on Mathematical Methods in Electromagnetic Theory (MMET)*. Kyiv, Ukraine. 2018. Pp. 152–155. Doi:10.1109/MMET.2018.8460294.
18. Горелишев С. А. Розсіювання електромагнітних хвиль моделлю двох наночастинок у оптичному діапазоні хвиль. *Збірник наукових праць ХНУПС*. Харків, 2023. № 4 (78). С. 63–69. DOI: <https://doi.org/10.30748/zhups.2023.78.09>
19. Johnson P. B. and Christy R. W. Optical constants of the noble metals. *Physical Review. B*. 1972. Vol. 6. No 12. Pp. 4370–4378.
20. Залевський Г. С. Оцінка відстані між об'єктами, при якій їх електромагнітною взаємодією можна знехтувати, проведена методом інтегральних рівнянь. *Системи озброєння і військова техніка*. 2007. Вип. 2 (10). С. 59–63.
21. Н. С. van de Hulst. *Light Scattering by Small Particles*, Wiley Publ., New York, 1957.
22. Bohren C. F. and Huffman D. R., *Absorption and Scattering of Light by Small Particles*. Wiley-VCN Publ. Weinheim, 2004.

Стаття надійшла до редакції 05.09.2024 р.

UDC 621.396.96

S. Horielyshev

METHOD OF ASSESSMENT OF THE DEGREE OF ELECTROMAGNETIC INTERACTION OF TWO METAL NANOPARTICLES IN THE OPTICAL RANGE OF WAVES

A method for calculation the scattering characteristics of a model consisted of several silver nanoparticles, which have a finite dielectric permittivity in the optical band (wavelength from 300 nm to 900 nm) is proposed. Developed numerical method is based on the Müller surface integral equation (IE) set solution for a group of nanoparticles. The values of a total scattering cross-section (TSCS), extinction cross-section (ECS) and absorption cross-section (ACS) were obtained for a model of two nanoparticles of ellipsoidal shape and different sizes (from tens to hundreds of nanometers). Mentioned cross-sections were calculated for various distances between nanoparticles and sounding directions, on two orthogonal polarizations. The calculations were carried out taking into account the electromagnetic (EM) interaction between nanoparticles when determining the densities of equivalent electric and magnetic surface currents, and also without accounting for the specified interaction. The relative errors of calculating the values of TSCS and ACS in the case of neglecting the EM interaction between nanoparticles were obtained.

EM evaluation of the interaction between nanoparticles of two different geometric sizes at variable distances between them at a fixed wavelength of 300 nm of the visible optical spectrum was carried out. The minimum distances between nanoparticles, at which their EM interaction can be neglected while maintaining the specified accuracy of calculations, have been determined. The obtained data make it possible to significantly reduce the dimensions of the Müller IE set, the amount of required computer memory, and the calculation time when studying the scattering characteristics of a large number of nanoparticles. The proposed method can be generalized to nanoparticles of noble metals.

Since the electrical dimensions of nanoparticles also change when the irradiation wavelength changes, the direction of further research is to study the intensity of EM interaction at other wavelengths, in particular resonant ones, as well as for the entire visible spectrum from 300 nm to 900 nm.

К е у в о р д с :electromagnetic interaction, electromagnetic scattering, Müller integral equation, nanoparticle, optical band.

Горелишев Станіслав Анатолійович – кандидат технічних наук, доцент, провідний науковий співробітник науково-дослідного центру Національної академії Національної гвардії України.

<https://orcid.org/0000-0003-1689-0901>