

УДК 535.2, 535.8

## **Візуалізація та вимірювання нанорозмірних об'єктів за допомогою зв'язаних оптичних резонаторів**

*Поздняков Д.С., к.т.н., доц. Чадюк В.О.*

### **Вступ.**

З розвитком нанотехнологій зросла потреба у засобах візуалізації, вимірювання та переміщення нанорозмірних об'єктів. В оптиці одними з найбільш чутливих та точних є інтерферометричні методи. Оптичний резонатор (інтерферо-метр Фабрі-Перо) є інструментом, дуже чутливим до зміни його добротності та оптичної довжини. Зміна добротності впливає на амплітуду коливань на його виході, а зміна довжини зміщує спектральне «вікно прозорості» резонатора і відповідно змінює потужність та частоту вихідного випромінювання. Для дослідження можливостей використання оптичного резонатора як інструмента нанотехнологій потрібна модель взаємодії нанооб'єкта з внутрірезонаторними випромінюванням.

### **Побудова моделі та її аналіз.**

Розгляньмо можливість використання зв'язаних оптичних резонаторів (активного, лазерного та пасивного, вимірювального) для візуалізації та вимірювання нанорозмірних об'єктів, зокрема частинок. На Рис. 1 зображена схема поєднання таких резонаторів.

Нехай активний резонатор лазера з довжиною хвилі випромінювання  $\lambda$  має оптичну довжину  $L_1$  і утворений плоскими дзеркалами 4 та 6 з коефіцієнтами відбиття за амплітудою  $r_1$  та  $r_2$ , а також підсилювальним середовищем з ненасиченим коефіцієнтом підсилення  $g_0$ . Для спрощення розрахунків вважатимемо, що активне середовище повністю заповнює лазерний резонатор.

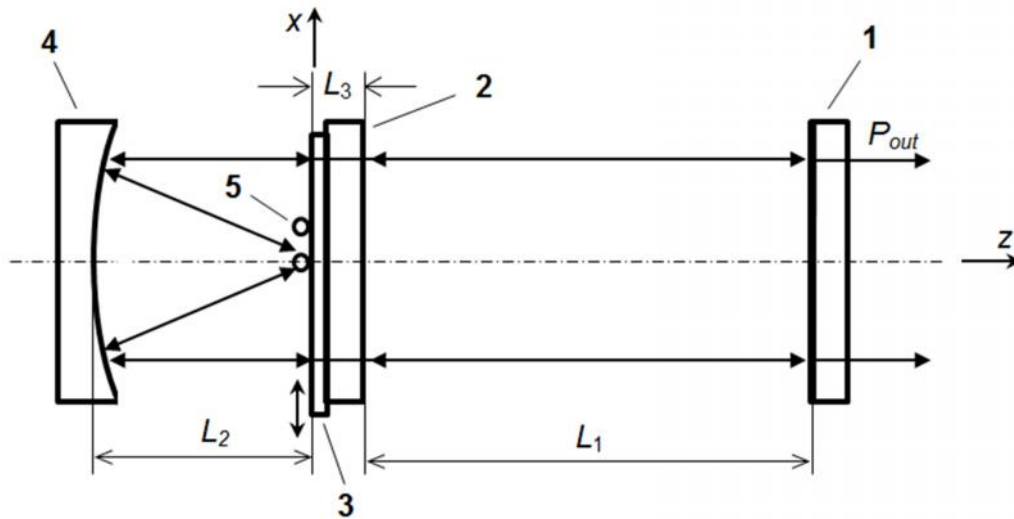


Рис. 1. Зв'язані резонатори – активний (лазерний) та пасивний:

1, 2 – дзеркала лазера; 3, 4 – дзеркала пасивного резонатора; 5 – активне середовище; 6 – досліджувана частинка

Пасивний напівконфокальний резонатор довжиною  $L_2$  формують сферичне дзеркало 4 з радіусом кривизни  $R_4 = 2L_2$  (фокусною відстанню  $f = R_4/2$ ) та коефіцієнтом відбиття  $r_4$ , а також плоске дзеркало (предметне скло) 3 з коефіцієнтом відбиття  $r_3$ , на якому знаходиться наночастинка радіусом  $a \ll \lambda$  з матеріалу з показником заломлення  $n_p$ . Предметне скло має можливість за допомогою п'єзоприводу переміщуватись на імєрсії перпендикулярно оптичній осі лазера, не змінюючи довжину резонатора  $L_2 = f$ . Частинка як точковий розсіювач, потрапляючи у фокус сферичного дзеркала 4 пасивного резонатора, збільшує коефіцієнт відбиття предметного скла і ефективний коефіцієнт відбиття предметного скла стає рівним

$$r_{3eff} = r_3 + \frac{4a^2}{d_f^2}(r_p - r_3) \quad (1)$$

де  $d_f$  – діаметр фокальної плями на дзеркалі 3, утвореної внаслідок

фокусування лазерного випромінювання сферичним дзеркалом 4.

Поява частинки у фокусі дзеркала 4 збільшує добротність пасивного резонатора, оскільки збільшується розсіяння світла у бік сферичного дзеркала. Частинка згідно з формулою Релея має ефективний коефіцієнт відбиття [1]

$$r_p = \frac{16\pi^4 a^6}{\lambda^4 f^2} \left( \frac{n_p^2 - 1}{n_p^2 + 2} \right)^2 \quad (2)$$

Розсіяне на частинці лазерне випромінювання збирається дзеркалом 3 у паралельний пучок і спрямовується в активний резонатор для підсилення. Пасивний резонатор має довжину  $f$ , яка трохи зменшується у разі появи на предметному склі 4 частинки, змінюючи тим самим резонансні частоти резонатора.

Умовою лазерної генерації є:

$$r_1 r_{2eff} \exp(2g_0 L_1) \geq 1, \quad (3)$$

де  $r_{2eff}$  – ефективний коефіцієнт відбиття дзеркала 2 лазерного резонатора, причому

$$r_{2eff} = r_2 + (1-r_2^2)(1-r_{3eff}^2)r_4 \exp[i2k(L_2 + nL_3)]. \quad (4)$$

Налаштуванням довжини пасивного резонатора можна досягти, щоб  $k(L_2 + nL_3) = q\pi$ , де  $q$  – велике ціле число; тоді

$$r_{2eff} = -r_2 - (1-r_2^2)(1-r_{3eff}^2)r_4. \quad (5)$$

Потужність вихідного лазерного випромінювання можна знайти за формулою [2]

$$P = \frac{(1-r_1^2)\sigma}{\eta(1+r_1^2)} \left[ \frac{g_0 L_1}{\alpha L_1 + \ln(r_1 r_{2eff})^{-1}} - 1 \right] \quad (6)$$

де  $\sigma$  – ефективний переріз активного середовища,  $\eta$  – параметр насичення активного середовища,  $\alpha$  – втрати за один прохід резонатора на розсіяння в активному середовищі, на вікнах Брюстера (в газовому лазері), а також дифракційні втрати.

Відносну зміну потужності випромінювання, викликану появою частинки у фокусі дзеркала 4, можна подати як

$$\delta P_{rel}(a) = \frac{P_a}{P_0} - 1, \quad (7)$$

де  $P_a$  та  $P_0$  – потужності випромінювання за наявності та

відсутності частинки у фокусі дзеркала 4.

Позначимо через  $r_{2(a)}$  та  $r_{2(0)}$  ефективні коефіцієнти відбиття дзеркала 2 за наявності та відсутності частинки у фокусі дзеркала 4. Тоді відносна зміна потужності

$$\delta P_{rel}(a) = K \frac{g_0 L_1}{\alpha L_1 + \ln(r_1 r_{2(a)})^{-1}} - 2, \quad (8)$$

де  $K$  – коефіцієнт, який не залежить від розміру частинки;

$$K = \frac{\alpha L_1 + \ln(r_1 r_{2(0)})^{-1}}{(g_0 - \alpha) L_1 - \ln(r_1 r_{2(0)})^{-1}}, \quad (9)$$

Рівняння (1), (2), (5), (8) та (9) описують математичну модель вимірювальної системи на основі зв'язаних резонаторів, яка дозволяє вибрати оптимальні значення коефіцієнтів відбиття дзеркал та підібрати активне середовище з необхідним коефіцієнтом підсилення для досягнення максимальної чутливості вимірювань.

Для побудови залежності відносної зміни потужності вихідного лазерного випромінювання від розміру наночастинки використано такі значення параметрів моделі:

$$L_1 = 1 \text{ м}; L_2 = 0,1 \text{ м}; L_3 = 0,01 \text{ м}; r_1 = -0,95; r_2 = -0,95 \text{ та } -0,9; r_3 = -0,2; r_4 = -0,999; n = 1,5; n_p = 2,3; g_0 = 0,1 \text{ м}^{-1}; \lambda = 633 \text{ нм}; \alpha = 0,02 \text{ м}^{-1}; d_f = 1 \text{ мкм}.$$

Залежність зображена на Рис. 2 для значень  $r_2 = -0,95$  та  $0,9$ . На Рис. 3 показано фрагмент цієї залежності для  $r_2 = -0,95$  та діапазону  $a = 0-100$  нм.

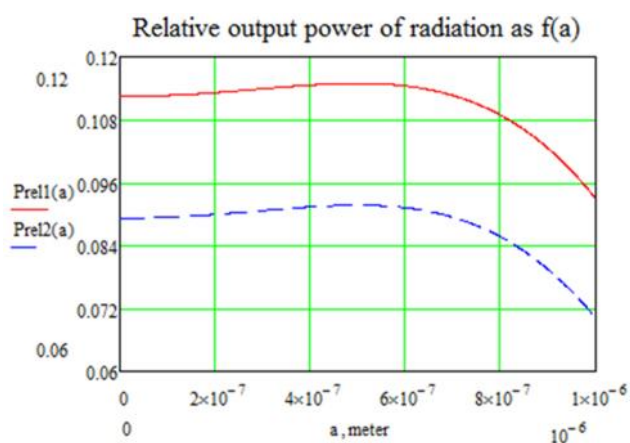


Рис. 2. Залежності відносної потужності випромінювання лазера зі зв'язаними резонаторами від радіуса внутрішньо резонаторної частинки для  $\gamma_2 = -0,95$  (верхня крива) та  $\gamma_2 = -0,9$  (нижня крива)

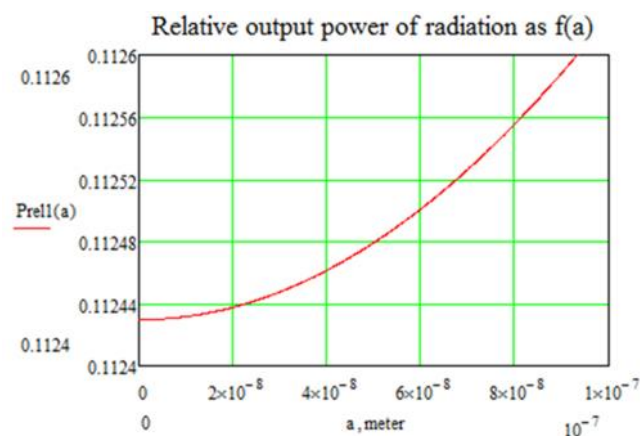


Рис. 3. Фрагмент верхньої кривої

Рис. 2 для діапазону  $\alpha = 0-100$  нм

## Висновки

Розглянуто математичну модель зв'язаних оптичних резонаторів – активного та пасивного, які запропоновано використати для візуалізації та вимірювання нанорозмірних об'єктів. Отримано залежність відносної зміни потужності вихідного лазерного випромінювання від розміру наночастинки.

## Література

1. Bohren C.F. Absorption and scattering of light by small particles / C.F. Bohren, D. R. Huffman. – Weinheim: Wiley-VCH, 2004. – 530 p.
2. Ищенко Е.Ф. Оптические квантовые генераторы / Е.Ф. Ищенко, Ю.М. Климков. – М.: Сов. радио, 1968. – 472 с.