

4. Деклараційний патент на винахід №38413А, G01R2/02. Калориметр для вимірювання НВЧ-потужності. Водотовка В.І., Репа Ф.М. Бюл. №3 від 30.06.2000.
5. Новиков Ю.В., Калашников О.А., Гуляев С.Э., Разработка устройств сопряжения персонального компьютера типа IBM PC. // Под общей ред. Ю.В. Новикова. Практическое пособие – М.: ЭКОМ, 2002. –224 с.

<p>Водотовка В.И., Евко И.Г. Метод повышения точности калориметрического измерителя СВЧ мощности. Изложен перспективный метод повышения точности калориметрического измерителя СВЧ мощности. Приведена конкретная реализация калориметра СВЧ, работающего по такому методу. Определена функция измерительного преобразования, источники возникновения погрешностей и алгоритм измерительного процесса.</p>	<p>Vodotovka V.I., Evko I.G. Method of increase of accuracy of a calorimetric measuring instrument of the UHF power. The method of increase of accuracy of a calorimetric measuring instrument of the microwave power is stated. Concrete realization of a calorimeter of the microwave working on such method is resulted. Function of measuring transformation, sources of occurrence of errors and algorithm of measuring process is certain.</p>
---	---

Надійшла до редакції 20 квітня 2006 року

УДК 621.372

ДОБРОТНІ КОЛИВАННЯ СФЕРИЧНИХ ДІЕЛЕКТРИЧНИХ РЕЗОНАТОРІВ ОПТИЧНОГО ІНФРАЧЕРВОНОГО ДІАПАЗОНІВ

Трубін О.О.

Проаналізовано електромагнітні параметри діелектричних резонаторів оптичного та інфрачервоного діапазонів. Розраховано частоти та добротності власних коливань вищих типів двошарових діелектричних резонаторів сферичної форми. Досліджено добротні коливання великих систем зв'язаних сферичних резонаторів.

Вступ. Постановка задачі

Як відомо, відносні значення проникності більшості діелектриків в оптичному та інфрачервоному діапазонах невеликі. Дана обставина не дозволяє використовувати традиційні методи реалізації діелектричних резонансних структур з нижчими коливаннями. У цей час головними кандидатами на роль діелектричного резонатора (ДР) у зазначеному діапазоні є резонатори із хвилями галереї, що шепотять [1], а також резонатори, виконані із застосуванням фотонних кристалів [2]. Новим напрямком у цій області досліджень може стати ідея використання систем, що складаються з дуже великого числа зв'язаних ДР із нижчими типами коливань. Як буде

показано, в таких структурах також можуть існувати добротні коливання при невисоких значеннях відносної діелектричної проникності.

Метою статті є дослідження діелектричних резонансних структур оптичного та інфрачервоного діапазонів, що характеризуються високою власною добротністю і мають бути реалізовані методами сучасних технологій. У роботі розглядаються однорідні й двошарові ДР сферичної форми, виконані із плавленого кварцу, а також структури, що складаються з великого числа (100) зв'язаних сферичних резонаторів.

Параметри власних коливань кварцового сферичного діелектричного резонатора

Сферичний діелектричний резонатор оптичного діапазону порівняно просто може бути реалізований на основі кварцового скла, що має, як відомо, дуже низькі втрати. У роботі [1] було експериментально показано, що кварцові сферичні резонатори із хвилями галереї, що шепотять, можуть мати власну добротність, більшої 10^8 . У цьому випадку виникає питання: при яких мінімальних значеннях азимутальних індексів n добротність власних коливань сферичного резонатора із кварцового скла перевищить, наприклад, величину 10^3 ? Для відповіді на нього досліджуємо більш докладно рішення завдання власних коливань однорідної діелектричної кулі з $n \gg l$ у відкритому просторі.

Розглянемо діелектричну кулю радіуса r_0 , що виготовлена з діелектрика з комплексною діелектричною проникністю $\epsilon_1 + i\epsilon_2$ (рис. 1а).

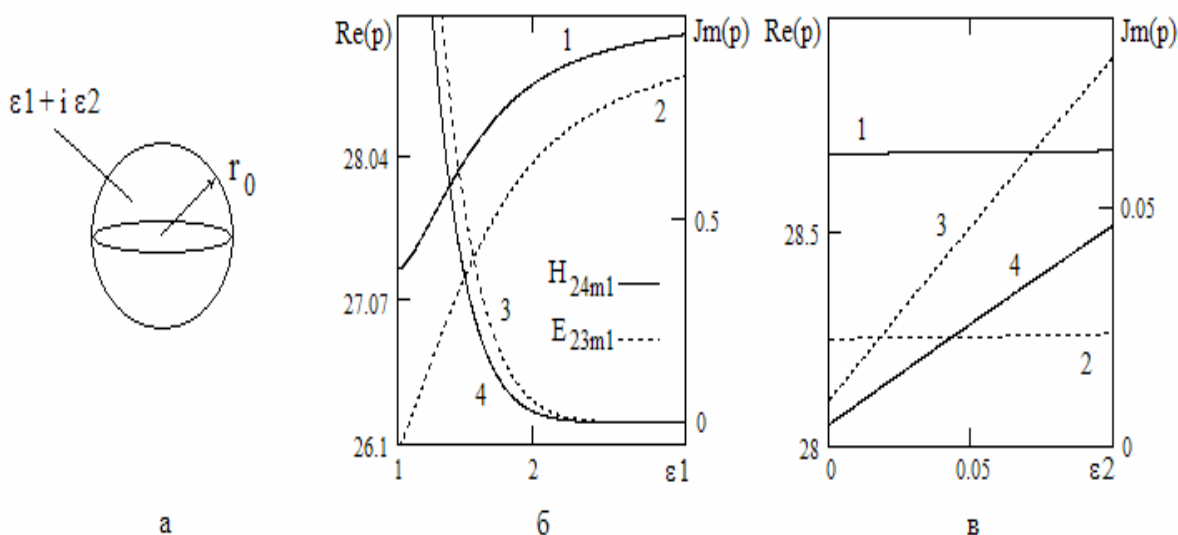


Рис. 1. Характеристичні параметри кварцових сферичних мікрорезонаторів

Рішення задачі власних коливань цього виду резонаторів добре вивчено [3]. Комплексне рішення характеристичного рівняння відносно па-

раметра $p = k_1 r_0$, де $k_1 = \omega \sqrt{\epsilon_1 \mu_0}$, а r_0 - радіус кулі, дозволяє розрахувати частоту й добротність власних коливань резонатора, обумовлену одночасно як втратами в матеріалі, так і випромінюванням у навколишній простір. Залежність дійсної й мнимі частини p від величини відносної діелектричної проникності матеріалу показана на рис. 1б при $\epsilon_2 = 0$, а на рис. 1в при $\epsilon_1 = 2.25$ для магнітних H_{nml} ($n = 24$, $l = 1$) і електричних типів E_{nml} ($n = 23$, $l = 1$). Тут і нижче n - меридіональний, m - азимутальний, а l - радіальний індекси [3].

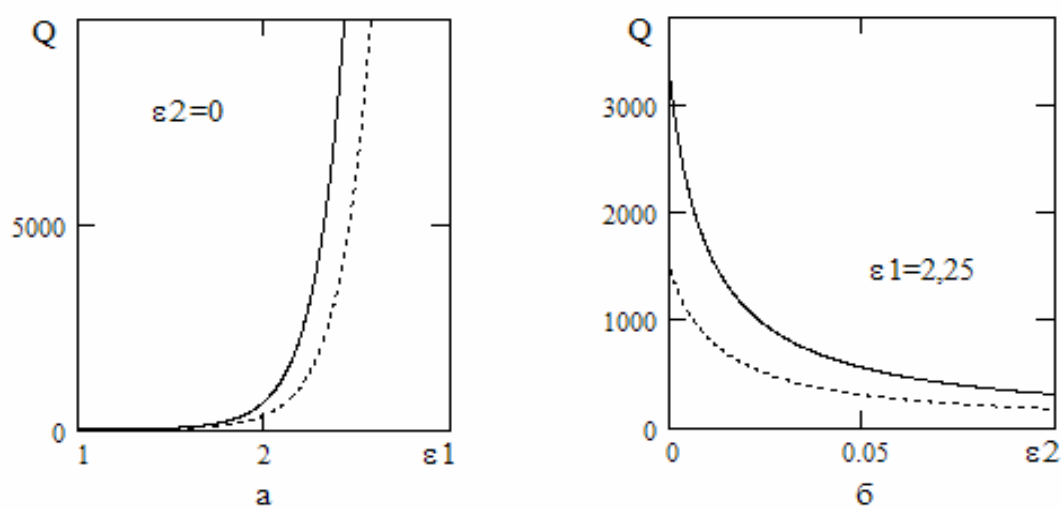


Рис. 2. Залежність власної добротності кварцового резонатора від параметрів матеріалу (для H_{24ml} - суцільні, для E_{23ml} - пунктирні криві)

Як видно з наведених результатів обчислень, характеристичні параметри помітно змінюються в області малих значень діелектричної проникності. Відзначене раніше збільшення власної добротності кварцового резонатора ($\epsilon_1 = 2.25$) має місце для коливань із $n > 23$ (рис. 2а). При цьому, значення добротності швидко зменшується зі збільшенням втрат у діелектрику (рис. 2б).

У цілому, як випливає з даних, наведених на рис. 1б, "щільність" розподілу частот власних коливань цього виду ДР є високою ($\delta\omega/\omega \approx 3\%$, тут $\delta\omega$ - відстань між частотами сусідніх добротних коливань резонатора).

Власні коливання двошарового сферичного діелектричного резонатора оптичного діапазону

Нову можливість деякого розрідження спектру для коливань типу "галереї, що шепотить," за рахунок зменшення добротності частини коливань дає використання порожніх сферичних ДР, виконаних з плавленого кварцу.

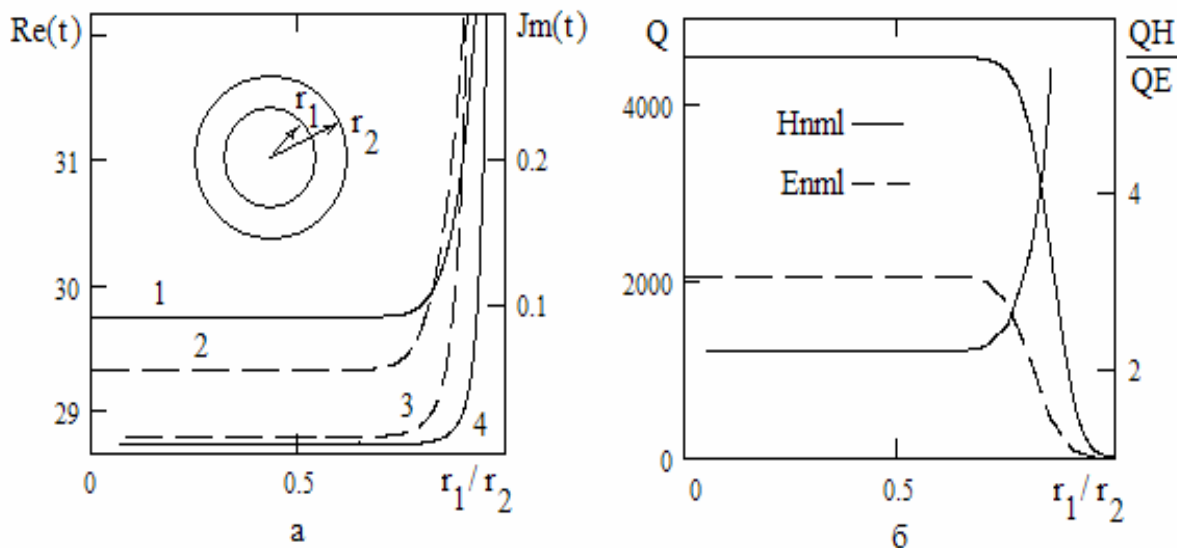


Рис. 3. Характеристичні параметри порожнього кварцового резонатору (а), та значення відносної добротності (б)

На рис. 3а наведена розрахункова залежність комплексних характеристикних параметрів $t = k_2 r_2$ для власних магнітних H_{24m1} і електричних E_{23m1} коливань від відносного розміру сферичної повітряної порожнини в центрі кулі, що має відносну діелектричну проникність $\varepsilon_{2r} = 2,25$ (тут $k_2 = \omega \sqrt{\varepsilon_2 \mu_0}$, r_2 - радіус діелектричної кулі, а r_1 - радіус порожнини) [4]. Суцільними кривими зображені залежності $Re p(r_1/r_2)$, пунктирними – залежності $Im p(r_1/r_2)$.

Цікаво, що в перехідній області $0,9 < r_1/r_2 < 1$ зміни характеристикних параметрів спостерігається помітне збільшення відносних значень добротності коливання магнітного типу в порівнянні з добротністю коливання електричного типу (рис. 3б, правий). У цілому ж щільність розташування резонансних частот залишається високої.

Коефіцієнти взаємного зв'язку сферичних діелектричних резонаторів у відкритому просторі

Однією з нових можливостей реалізації діелектричного резонатора оптичного діапазону довжин хвиль є застосування структур, що містять значне число однакових діелектричних тіл сферичної форми. У сучасній оптиці такі структури відомі як штучні опали, структура яких має вигляд одне, або багат шарових просторових структур, що складаються з однакових SiO_2 сфер діаметром 0,4-20 мкм. На рис. 4 наведені найбільш прості можливі конфігурації таких резонаторів - одномірні, двовимірні й кільцеві, виконаних з однорідних однакових сферичних ДР.

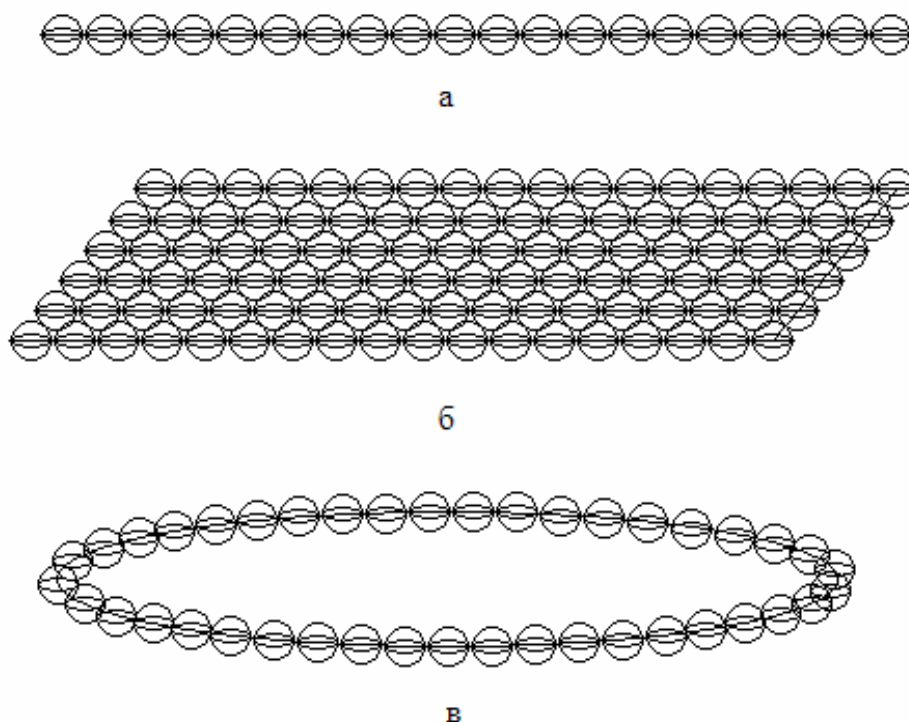


Рис. 4. Складові мікрорезонатори на основі періодичних сферичних структур (а - одномірна, б - двовимірна, в - кільцева)

Для аналізу параметрів власних коливань таких складних структур ДР скористаємося теорією збурень [5]. Із цією метою проведемо розрахунок комплексних коефіцієнтів взаємного зв'язку $\kappa_{1,2}$ сферичних ДР у відкритому просторі з основними магнітними коливаннями H_{1m1} .

Для випадку порушення основних магнітних коливань H_{101} , з поляризацією магнітного поля в центрах резонаторів, спрямованого по з'єднуючій їх прямій

$$\kappa_{1,2} = i \cdot 2 \cdot 3 \cdot \alpha_1^H(p, q) \cdot \frac{h_1^{(2)}(k_0 \delta z)}{k_0 \delta z}. \quad (1)$$

У випадку основних магнітних коливань H_{111} , з поляризацією магнітного поля в центрах резонаторів, спрямованого ортогонально з'єднуючій їх прямій

$$\kappa_{1,2} = i \cdot 3 \cdot \alpha_1^H(p, q) \cdot \left[h_0^{(2)}(k_0 \delta z) - \frac{h_1^{(2)}(k_0 \delta z)}{k_0 \delta z} \right], \quad (2)$$

тут $\alpha_1^H(p, q)$ - відома функція зв'язку [3], $q = k_0 r_0$, $k_0 = \omega \sqrt{\mu_0 \epsilon_0}$, ω - резонансна частота, δz - відстань між центрами ДР, $h_1^{(2)}(z)$ - сферична функція Ханкеля другого роду [6].

На рис. 5 наведені залежності комплексних коефіцієнтів взаємного зв'язку сферичних ДР із $\epsilon_1 = 9$ від відносної відстані між їхніми центрами, розраховані по формулах (1, 2).

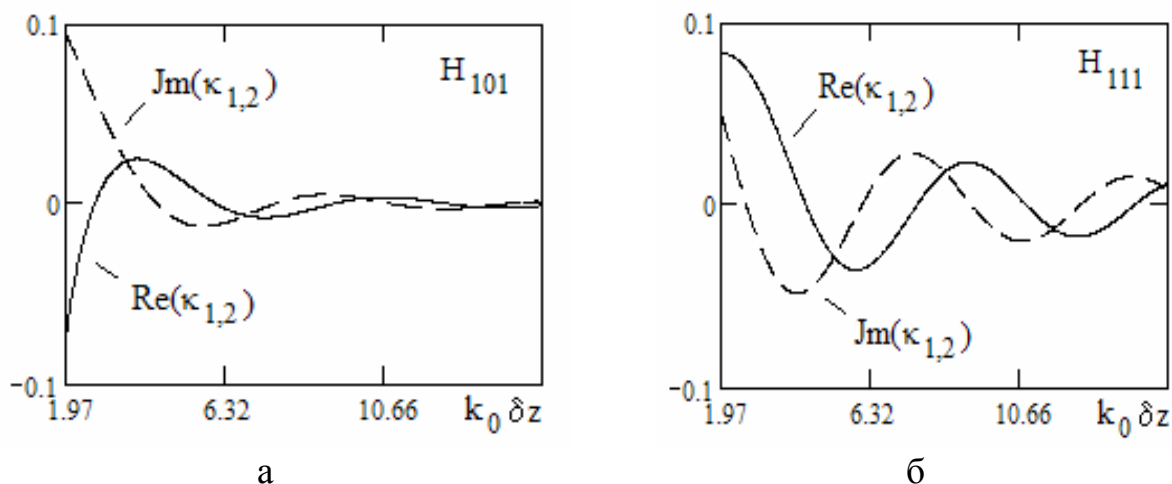


Рис. 5. Коефіцієнти взаємного зв'язку сферичних ДР із $\epsilon_1 = 9$ у відкритому просторі з коливаннями H_{101} (а), H_{111} (б)

Власні коливання складених сферичних діелектричних резонаторів

Досліджуємо можливість збільшення добротності складеного резонатора шляхом збільшення числа зв'язаних ДР. Виходячи з результатів теорії збурень, амплітуди й частоти зв'язаних коливань системи N ДР повинні задовольняти системі рівнянь [5]

$$\sum_{s=1}^N \kappa_{sn} b_s - \lambda b_n = 0, \quad n = 1, 2, \dots, N, \quad (3)$$

де κ_{sn} - комплексний коефіцієнт взаємного зв'язку між s -м і n -м резонатором, b_s - амплітуда зв'язаного коливання в центрі s -го ДР, що відповідає частоті ω , а

$$\lambda = 2 \cdot \left(\frac{\delta\omega}{\omega_0} + i \frac{\omega''}{\omega_0} \right) -$$

власне значення, що визначає комплексну частоту зв'язаного коливання

$$\varpi = \omega + i\omega'', \quad \delta\omega = \omega - \omega_0,$$

ω_0 - частота власного коливання одиночного ДР.

Нами досліджувалися параметри зв'язаних коливань системи із 100 сферичних ДР, виконаних з матеріалу з $\epsilon_1 = 9$, зображеної на рис. 4. Вели-

чина еквівалентної добротності зв'язаного коливання структури розраховувалася по формулі $Q = \omega / 2\omega''$.

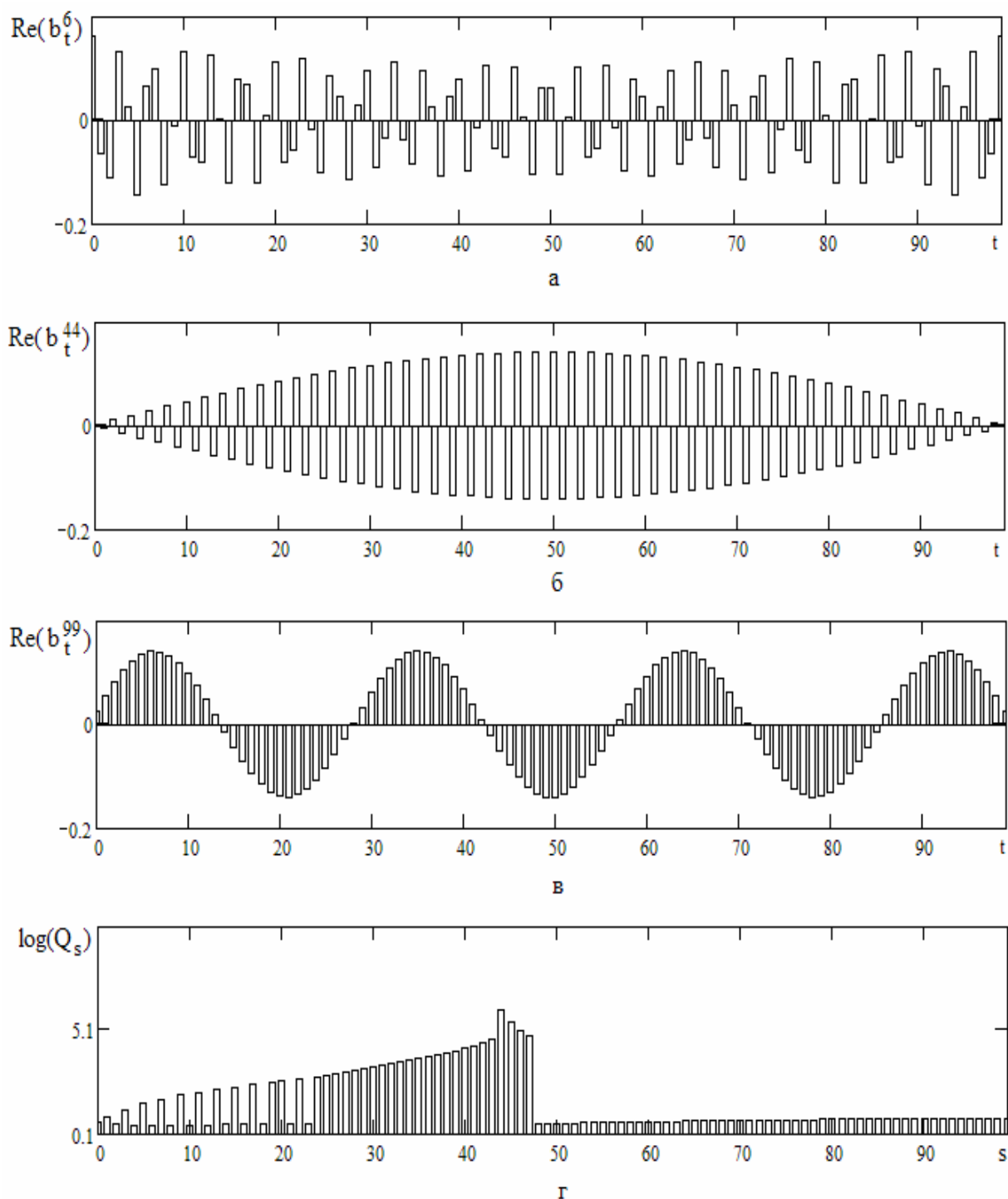


Рис. 6. Амплітуди (а-в) та добротності (г) власних коливань лінійного складеного резонатора

На рис. 6 показані результати розрахунку дійсних частин амплітуд b_t^s і добротності власних коливань лінійної системи зв'язаних ДР, зображеної на рис. 4а. Тут індекс s відповідає типу коливань частота якого визначається власним значенням λ_s , а індекс t позначає номер парціального ДР у системі.

Як видно з даних, наведених на рис. 6г, максимальне значення добротності має коливання з індексом $s = 44$. Добротність його дорівнює $2,7 \cdot 10^4$. Амплітуди парціальних резонаторів для цього типу коливань, зображені на рис. 6б, характеризуються попарно-протифазним розподілом. Розподіл амплітуд найменш добротного коливання ($s = 6$) наведено на рис. 6а, а найвищого по частоті – на рис. 6в. Щільність розподілу частот зв'язаних коливань залишається високою і для даного числа парціальних ДР також не перевищує 3%.

Розрахунок зв'язаних коливань планарних багато резонаторних структур, зображених на рис. 4б, 4в, показав, що добротність їх зв'язаних коливань взагалі не перевищує величини добротності одиночного ДР.

Висновки

Створення високо добротних ДР, виконаних на основі діелектриків з низькими значеннями проникності в оптичному діапазоні, можна проводити декількома способами.

Діелектричні резонатори оптичного діапазону можуть бути реалізовані як з використанням коливань типу “галереї, що шепотить”, так і на основі структур, що складаються з великого числа зв'язаних ДР із нижчими типами коливань.

Головним недоліком резонаторів цього класу залишається дуже висока щільність частот їх власних коливань.

Література

1. Брагинский В.Б., Ильченко В.С. Оптический диэлектрический микрорезонатор: добротность свыше 10^8 в видимом диапазоне // Сб. трудов.: “Проектир. Радиоэлектр. Устройств на диэлектрических волноводах и резонаторах”. – Материалы конф.– Тбилиси. – 1988. – С. 31 - 33.
2. Vuckovic J., Loncar M., Mabuchi H., Scherer A. Design of photonic crystal microcavities for cavity QED // Phys. Rev. E., v.65, 016608. – 2001. – р. 1 - 11.
3. Ильченко М.Е., Трубин А.А. Электродинамика диэлектрических резонаторов. Киев.: Наукова думка, 2004. – 265 с.
4. Трубин А.А. Резонансные колебания открытых двухслойных сферических структур // “Проектир. и прим. Радиоэлектр. Устройств на диэлектрических волноводах и резонаторах”. – Материалы конф. – Саратов. – 1983. – С. 32 - 33.
5. Трубин А.А. Резонансные диэлектрические антенны // Сб. трудов. 14-й Межд. Крымской конференции “СВЧ-техника и телекоммуникационные технологии”. Севастополь. 2004, С. 366 - 367.

6. Справочник по специальным функциям / Под ред. М. Абрамовица и И. Стиган: М. Наука, 1979. – 830 с.

<p>Трубин А.А. Добротные колебания сферических диэлектрических резонаторов оптического и инфракрасного диапазонов. Приведены результаты анализа электромагнитных параметров диэлектрических резонаторов, выполненных из низко проницаемых диэлектриков оптического и инфракрасного диапазонов. Проведен анализ частот и добротностей собственных колебаний высших типов двухслойных диэлектрических резонаторов сферической формы. Показано существование высоко добротных колебаний.</p>	<p>Trubin A.A. High-Q Spherical Dielectric Resonator oscillations in the optical and infrared ranges. It's provided the analysis results for the Dielectric Resonators electromagnetic parameters with low permittivity dielectric in the optical and infrared wave-length ranges. The frequencies and Q-factors of the Spherical two-layer Dielectric Resonators is tested. It's studied resonances of very big number coupling Spherical Resonators. An existence of high-Q resonances is demonstrated.</p>
--	--

Надійшла до редакції 20 квітня 2006 року