

УДК 621.372.54:534

Л.М. Смеркло, В.П. Шкоропад
Львівський науково-дослідний радіотехнічний інститут**ВИСОКОЕФЕКТИВНІ РЕЗОНАТОРИ НА ПОВЕРХНЕВИХ
АКУСТИЧНИХ ХВИЛЯХ**

© Смеркло Л.М., Шкоропад В.П., 2001

Розглянуто питання розробки високоефективних резонаторів на ПАХ. Наведено методику їх розрахунку. Досліджено залежність добротності від кількості елементів решітки і від питомого опору плівки, що формує топологію рисунка резонаторів. Визначено похибку встановлення центральної частоти.

The design of high-efficient resonators on surface acoustic waves is considered. The method of resonators calculations is presented. The dependence of Q-factor on grate element amount and on specific resistance of film which forms resonator topological image is investigated. The error of central frequency set is determined.

Резонатори на поверхневих акустичних хвилях (ПАХ) становлять важливий клас функціональних елементів акустоелектроніки, які застосовуються в різних пристроях, де вимагається точність і стабільність частоти. Вони доповнюють кварцеві резонатори на об'ємних хвилях і використовуються в автогенераторах, датчиках, пристроях вузько-смугової фільтрації в діапазоні частоти 20...1500 МГц. Резонатори на ПАХ мають малі габарити, більш високу порівняно з кварцевими резонаторами механічну міцність і меншу вібраційну чутливість.

Конструктивно резонатор на ПАХ – це структура на підкладці звукопроводу, яка складається із двох розподілених відбивачів у вигляді решітки (ВР) і закорочених тонких Al-смужок. ВР утворює резонансну порожнину з коефіцієнтом відбивання ПАХ, близьким до 1 і всередині якої розміщені два зустрічно-штирові перетворювачі (ЗШП) для збудження і приймання ПАХ (рис. 1).

За основу розрахунку резонаторів на ПАХ прийнята модель інтерферометра Фабрі-Перо і модель відбиваючої решітки, яка враховує ефекти нагромадження енергії і генерації об'ємних хвиль на краях решітки. Модель відбиваючої решітки дозволяє розраховувати резонатори на вищих гармоніках і враховувати більш повно паразитні ефекти.

За аналогією з інтерферометром Фабрі-Перо добротність випромінювання резонатора на ПАХ, яка зв'язана з витком енергії через ВР, визначається довжиною порожнини і коефіцієнтом відбивання решітки

$$Q = \frac{2\pi l_{e\phi}}{\lambda(1 - \Gamma^2)},$$

де $l_{e\phi}$ – ефективна довжина резонансної порожнини; Γ – коефіцієнт відбивання решітки; λ – довжина ПАХ.

Для отримання резонансу на центральній частоті ВР необхідне виконання умови балансу фаз [1]

$$\Phi_p + \Phi_n = \pi n,$$

де Φ_p – фаза решітки; Φ_n – набіг фази між відбивачами; n – ціле число.

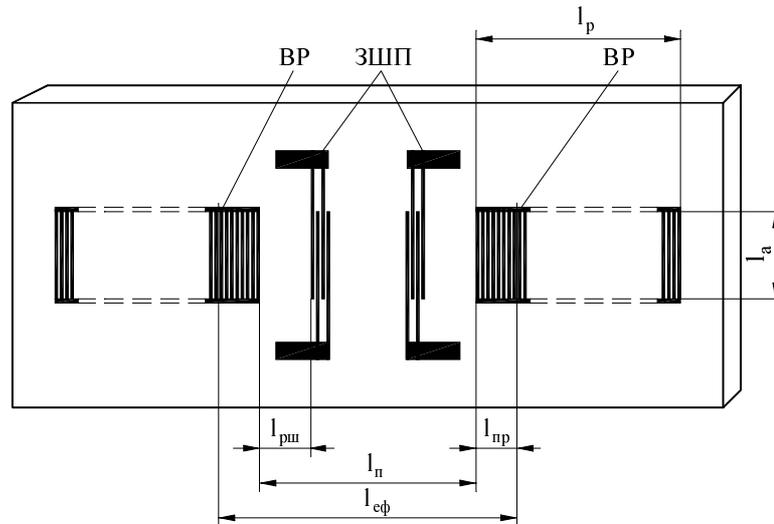


Рис. 1. Структура двовходового резонатора на ПАХ

Для реалізації заданих характеристик необхідно отримати високий коефіцієнт відбивання ВР, виконання умови балансу фаз в резонансній порожнині і забезпечити оптимальне розміщення ЗШП в максимумах стоячої хвилі. Оскільки основні параметри резонатора на ПАХ сильно взаємозв'язані, конструкцію оптимізовано за критерієм максимальної добротності з врахуванням обмежень на габаритні розміри звукопроводу і узгодження вхідного і вихідного опору резонатора з генератором і навантаженням.

Виходячи з заданих вхідних даних, вибираємо матеріал підкладки, а також присвоюємо параметру решітки Π_p значення 3...4.

Визначаємо коефіцієнт відбивання решітки за допомогою формули

$$\Gamma = \frac{e^{2\Pi_p} - 1}{e^{2\Pi_p} + 1}.$$

Обчислюємо спочатку максимальну ненавантажену добротність

$$Q_{max}^i = (Q_m^{-1} + Q_p^{-1})^{-1},$$

потім вибираємо радіаційну добротність з умови

$$Q_{pmax} \leq Q_{max}^i.$$

Визначаємо коефіцієнт розузгодження акустичного імпедансу з умови $N_p \leq \frac{1}{2\Delta z}$:

$$|\Delta z| = \frac{2\pi}{Q_{pmax}(1-d^2)}.$$

Виразуємо кількість елементів решітки

$$N_p = \frac{\Pi_p}{\Delta z}.$$

Визначаємо довжину рисунка топології резонатора (в довжинах хвиль)

$$l = (2N_p + N_n),$$

а також товщину металізації

$$h = \frac{\lambda \Delta z}{0,575}.$$

Обчислюємо опір резонатора при заданих втратах α і опорі навантаження R_n ,

$$R_1 = (10^{\frac{\alpha}{20}} - 1)R_n,$$

а також опір перетворювачів

$$R_0 = \frac{1+d}{1-d} \cdot \frac{1}{\sqrt{2}} R_1.$$

Основна задача при розрахунку і конструюванні резонаторів на ПАХ зводиться до визначення основних втрат, які викликають зниження добротності.

Добротність резонатора (Q) на ПАХ визначається [2]:

$$1/Q = 1/Q_m + 1/Q_n + 1/Q_d + 1/Q_p + 1/Q_o + 1/Q_i,$$

де Q_m – втрати на поширення в матеріалі (добротність матеріалу):

$$Q_m = 1,04 \cdot 10^4 \cdot 1/f_0 \text{ (ГГц)} - \text{для ST-кварцу};$$

$$Q_m = 3, 10^4 \cdot 1/f_0 \text{ (ГГц)} - \text{для ніобату літію},$$

де f_0 – центральна частота резонатора;

Q_n – втрати навантаження повітрям:

$$Q_n = 90000 \text{ для ST-кварцу}; Q_n = 10500 \text{ для ніобату літію};$$

$$Q_d - \text{дифракційні втрати: } Q_d = 11 Na^2,$$

де Na – апертура резонатора в довжинах ПАХ;

Q_p – радіаційні втрати:

$$Q_p = \frac{\pi N_{e\phi}}{1 - \Gamma^2},$$

де $N_{e\phi} = 1,5 / |\Delta z|$;

Q_o – втрати на генерацію об'ємних хвиль:

$$Q_o = \frac{2\pi N_{e\phi}}{k_e (h/\lambda)^2},$$

де $k_e = 10$ для ST-кварцу, $k_e = 8,7$ для ніобату літію; Q_i – інші втрати.

За наведеною методикою розроблені та виготовлені резонатори на ПАХ з центральними частотами 40...400 МГц [3], розраховані на габарити звукопроводу 20 x 10 мм. Одержані добротності становили величину до 30000 і відрізнялись від розрахункових не більше, ніж на 5 %. Внесені втрати становили 3...6 дБ і відрізнялись від розрахункових не більше, ніж на 1 дБ. Придушення за смугою пропускання становили 25...30 дБ. На рис. 2 наведена АЧХ резонатора на ПАХ на частоту 100 МГц.

Досліджено залежність добротності резонатора на ПАХ від кількості елементів ВР. Коефіцієнт відбивання решітки можна записати

$$\Gamma = \frac{e^{2N_p \Delta z} - 1}{e^{2N_p \Delta z} + 1},$$

де Δz – коефіцієнт розузгодження акустичного імпедансу, N_p – кількість елементів ВР.

Оскільки для АІ-смужок $\Delta z = k(h/\lambda)$, де k – коефіцієнт пропорційності, h – товщина плівки, тоді можна вивести залежність Γ від N_p при $\Delta z = \text{const}$:

$$\Gamma = \frac{e^{kN_p} - 1}{e^{kN_p} + 1}.$$

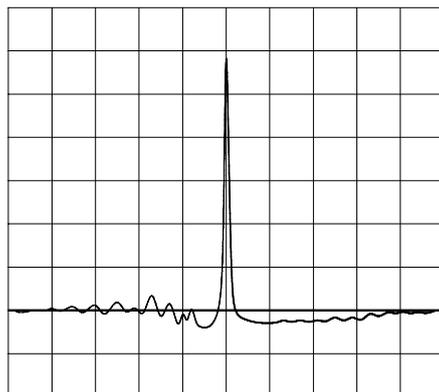


Рис. 2. АЧХ резонатора на ПАХ на частоту 100 МГц.
(Добротність 23000, втрати 6 дб)

Експериментальні дослідження показали, що добротність резонатора залежить від N_p і що існує верхня границя N_{pmax} , вище якої збільшення кількості N_p не приводить до збільшення коефіцієнта відбивання решітки Γ і відповідно добротності резонатора, тобто існує насичена кількість елементів ВР (рис. 3).

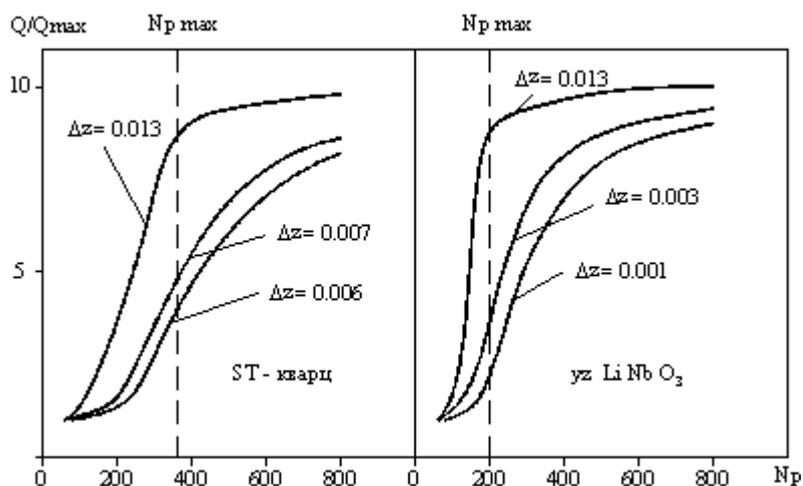


Рис. 3. Графік залежності добротності резонатора від кількості елементів ВР

Для товщини плівок Al 0,1...0,4 мкм і для резонатора на частоту 100 МГц коефіцієнт Δz на ST-кварці знаходиться в межах $2 \cdot 10^{-3} \dots 10^{-2}$, що відповідає граничній насиченій кількості елементів решітки N_{pmax} від 350 для $\Delta z = 10^{-2}$ і до 700 для $\Delta z = 2 \cdot 10^{-3}$.

Мінімальна кількість елементів ВР визначається відстанню від початку решітки до ефективного центру відбивання. В періодах решітки $N_p = 1 / \Delta z$ і для резонатора на частоті 100 МГц з $\Delta z = 7,2 \cdot 10^{-2}$; $N_p \approx 140$, тобто резонатор може працювати з $N_{pmin} = 140$ смужок.

Суттєвий вплив на максимальну добротність, крім конструктивних і топологічних характеристик, вносить питомий опір плівки, із якої сформований рисунок резонатора. Досліджено залежність добротності резонатора на ПАХ від провідності металічної плівки. Зменшення питомого опору Al-плівки з $4 \cdot 10^{-6}$ Ом·см до $3 \cdot 10^{-6}$ Ом·см забезпечило збільшення добротності з 8000...10000 до 20000... 23000. Добротність резонаторів на ПАХ з питомим опором плівки $(2,8 \pm 0,2) \cdot 10^{-6}$ Ом·см максимальна і наближається до розрахункової.

Для практичного застосування резонаторів на ПАХ велике значення має точність встановлення центральної частоти. Досліджено точність встановлення центральної частоти

від технологічної точності виготовлення. Відхилення нормованої товщини плівки h/λ на 0,1 % змінює частоту резонатора на 0,017 %. Відхилення величини коефіцієнта металізації від заданого ($k_m = 0,5$) змінює центральну частоту резонатора за законом $\cos\pi k_m$, де k_m – коефіцієнт металізації, або відношення ширини елемента ВР до періоду решітки. При $k_m < 0,5$ частота резонатора збільшується, а при $k_m > 0,5$ зменшується. Зміна k_m на 10 % приводить до відхилення частоти на 0,04 %. При точності контролю товщини металізації $h \pm 0,02$ мкм і $k_m = 0,5 \pm 0,01$ точність встановлення центральної частоти резонатора на ПАХ становить $\pm 10^{-4}$, що для багатьох випадків практичного застосування явно недостатньо.

При таких технологічних точностях необхідна підстройка частоти резонатора, яка може здійснюватися методом хімічного травлення. Кінцева підстройка центральної частоти резонатора на ПАХ методом хімічного травлення дає відхилення частоти не більше $\pm 10^{-5}$.

Для автоматизованого проектування і виготовлення високоефективних резонаторів на ПАХ розроблений пакет програм на ПЕОМ ІВМ РС. Пакет програм призначений для моделювання та розрахунку електричних і топологічних параметрів, а також для підготовки інформації для виготовлення фотошаблонів на фотонабірній установці.

1. Хорунжий В.А., Долбня Є.В., Богатов П.Н. *Акустoeлектроніка*. К, 1984. 2. *Интегральные пьезоэлектрические устройства фильтрации и обработки сигналов / Под ред. Б.Ф. Высоцкого и В.В. Дмитриева: "Радио и связь", 1985.* 3. Смеркло Л.М., Шкоропад В.Ф. *Полосовые фильтры и резонаторы на ПАВ для систем приема программ спутникового телевизионного вещания. Тези доповідей 6-ої Міжнародної Кримської конференції "СВЧ-техніка і телекомунікаційні технології", 1996.*

УДК 621.315.592.4

Д.В. Романова

Корпорація «Енергоресурс-інвест»

ЗАЛЕЖНІСТЬ СТРУКТУРИ МІДНО-КАЛЬЦІЄВО-ФОСФАТНИХ СТЕКОЛ ВІД КООРДИНАЦІЙНОГО СТАНУ ІОНІВ МІДІ

© Романова Д.В., 2001

Досліджено вплив електромагнітного випромінювання (частотою 1 ГГц) і температури на формування структури мідно-кальцієво-фосфатних стекел. У випадку, коли концентрація оксиду міді нижча за 10 %, кожний іон міді має тетраедричне оточення і являє собою незалежний парамагнітний центр. Збільшення концентрації CuO вище за 10 % приводить до об'єднання іонів міді в асоціації.

Effect of heating and electromagnetic radiation (frequency-1GHz) on the state of the copper ions in the copper-calsium-phosphate glasses structure was investigated. In case when the concentration of copper oxide is lower 10 % every copper ion has tetrahedric environment and presents in the interaction paramagnetic centers. Increasing concentration of the CuO under 10 % results copper ions combine in the association.

Як відомо [1-3], мідно-кальцієво-фосфатні стекла (МКФС) мають унікальні оптичні і напівпровідникові властивості, які обумовлені існуванням в їх структурі іонів міді в різному валентному і координаційному стані.