

УДК 534.24

Математична модель пов'язаних ПАХ-хвильоводів

Плешка Т.Є., к.т.н., доц. Жовнір М.Ф.

1. ВСТУП

Тонкоплівкові хвильоводи поверхневих акустичних хвиль (ПАХ) запобігають розширенню пучків ПАХ, що в свою чергу дозволяє більш раціонально використовувати площу підкладки і змінювати напрям поширення хвилі, що обумовлює їх використання для поліпшення параметрів акустоелектронних пристроїв.

Хвильоводи поверхневих акустичних хвиль використовують для створення фільтрів та ліній затримки на тривалий час, пристроїв згортки радіоімпульсів, відгалужувачів, подільників потужності, циркуляторів, сенсорів фізичних та механічних величин [1]. П'єзоелектричні звукопроводи та хвильоводи, в яких поширення ПАХ супроводжується біжучим електричним полем, можуть знайти застосування у вимірювальних перетворювачах (ВП) лінійних та кутових переміщень, кутової швидкості [2-4].

Завданням досліджень є розробка математичної моделі двох п'єзоелектричних ПАХ.

2. Моделювання ПАХ-хвильоводів.

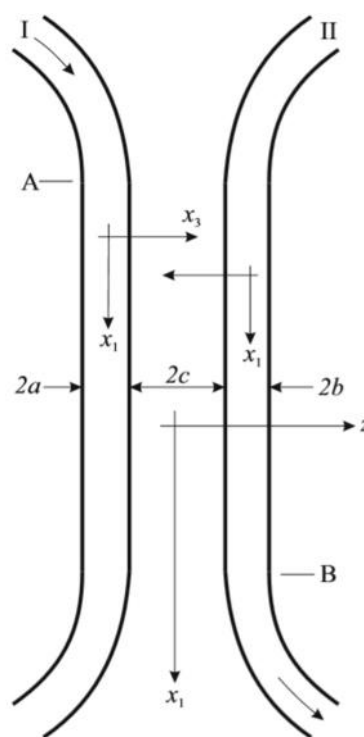


Рис. 1. Схема двох слабо пов'язаних ПАХ хвильоводів на підкладці

ПАХ-хвильоводи представляють собою геометричні структури, що обмежують хвилю в поперечному напрямку на поверхні підкладки. На рис. 1 зображено схему двох слабо пов'язаних ПАХ хвильоводів на підкладці. Зв'язок між ними описується коефіцієнтом розподілу k , який характеризує розподіл енергії сигналу при переході ПАХ з першого хвильоводу в другий. Коефіцієнт розподілу залежить від відстані між хвильоводами ($2c$) [5-6] і ця відстань

має бути меншою або дорівнювати відстані від А до В. Відстань від А до В називається довжиною зв'язку (довжиною муфти).

Для створення ПАХ хвилеводів для ВП доцільно застосувати плівковий хвилевід на базі п'єзоелектричної плівки ZnO на підкладці із плавненого кварцу SiO_{2пл.}, поперечний переріз якого представлений на рис.2 [7].

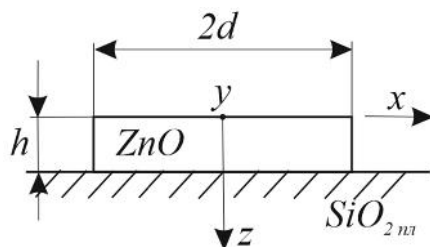


Рис. 2. Поперечний переріз

ПАХ-хвилеводу

Направлене поширення ПАХ в плівковому хвилеводі, на відміну від розповсюдження в необмеженому середовищі, характеризується дисперсією фазової швидкості хвилі, що виникає в результаті багаторазових відбиттів хвилі на границях хвилеводу. При цьому може спостерігатися багатомодовий процес поширення ПАХ, при якому кожна мода має свою фазову швидкість та критичну частоту. Це буде призводити до виникнення додаткових фазових зсувів у вихідному сигналі ПАХ-приймача, що внесе похибку у результати вимірювання. Тому, розробка та дослідження математичних моделей, що дозволяють обґрунтувати конструктивні параметри хвилевідних структур для забезпечення

одномодового режиму, є важливим завданням при створенні пристроїв на ПАХ [8].

Якщо, зв'язок між двома хвилеводами слабкий то зв'язок між ними можна описати через суму нижчих симетричних і антисиметричних мод по відношенню до центральної лінії між двома смужками. У цих умовах ми можемо написати

$$\begin{aligned} w &\approx w^a + w^A, z < 0, \\ w &\approx w^a - w^A, z > 0 \end{aligned} \quad (1)$$

де w^a і w^A є рішення, які, відповідно, симетричні і антисиметричні по відношенню до центральної лінії між смугами.

Очевидно w^a і w^A , відповідно, пропорційні $\cos(h\eta z)$ і $\sin(h\eta z)$ в залежності від області між смугами.

Ми можемо написати:

$$\begin{aligned} w &\approx F(x_3)[\cos \xi_a(x_1 - Vt) + \cos \xi_A(x_1 - Vt)]; \\ w &\approx F(y)[\cos \xi_a(x_1 - Vt) - \cos \xi_A(x_1 - Vt)]; \\ x_3 &< d + c; \\ y &< d + c, \end{aligned} \quad (2)$$

де F представляє собою функціональну залежність по відношенню до центральної лінії кожної смужки обох симетричних і антисиметричних мод по відношенню до центральної лінії між смугами; ξ_A та ξ_a – коефіцієнти зв'язку між хвилеводами. Оскільки коефіцієнти зв'язку малі і $\xi_A \approx \xi_a \approx \xi$, то згідно тригонометричних тотожностей рівняння (2) може бути представлено:

$$w = 2F(x_3) \cos[(\xi_A - \xi_a) / 2](x_1 - Vt) \cdot \cos[(\xi_A + \xi_a) / 2](x_1 - Vt), x_3 < d + c; \quad (3)$$

$$y = 2F(y) \sin[(\xi_A - \xi_a) / 2](x_1 - Vt) \cdot \sin[(\xi_A + \xi_a) / 2](x_1 - Vt), y < d + c.$$

Формули (3) ясно показують, що поширення ПАХ відбувається в напрямку хвилеводів і повне коливання відбувається за довжину λ_c , де

$$\lambda_c = 4\pi / (\xi_A - \xi_a) \quad (4)$$

Рівняння (3) також показує, що фази хвиль в двох хвилеводах відрізняються на $\pi/2$ в кожній точці.

Крім того, як наслідок слабкого зв'язку, ми маємо:

$$\xi_a = \xi - \Delta; \quad \xi_A = \xi + \Delta, \quad (5)$$

де Δ - величина малої зміни хвильового числа від одного з хвилеводів від нижчого симетричного або антисиметричного режимів двох хвилевідних структур з тією ж фазовою швидкістю.

З (4), (5) і відношення між ними знаходимо, що довжина зв'язку L_c дорівнює:

$$L_c = [\xi \pi \exp(2\eta c) / m V_\delta^2 \eta_1 \times \cos^2(\bar{\eta} d)] \{ [m(V^2 - V_\delta^2) / \eta] \times \cos(2\bar{\eta} d) \bar{m}(V^2 - \bar{V}_\delta^2)(d + \sin(2\bar{\eta} d) / 2\bar{\eta}) \}, \quad (6)$$

де

$$\bar{\eta} = \xi \sqrt{[(V^2 / \bar{V}_\delta^2) - 1]}; \quad \eta = \xi \sqrt{[1 - (V^2 / \bar{V}_\delta^2)]}. \quad (7)$$

Вираз для L_c в (6) можна представити в безрозмірному вигляді:

$$L_c / 2h = \pi q_\delta r_m \exp(xs) \times [(q^2 - \bar{q}_\delta^2 / (q_\delta^2 - q^2)^{1/2}] \times [G / \cos^2(\bar{x}G)], \quad (8)$$

де $G = d/h$ - нормована ширина хвилеводу; $q = V / V_\delta$; $q_\delta = V_\delta / V$.

Розрахунки довжини ділянки зв'язку можна записати в дещо іншій і, можливо, більш прозорій формі [9]:

$$L_c / 2h = (\pi / r_m) \exp(\bar{x}s) q_\delta^2 (1 / \psi) \times (x / \bar{x}) [xG / \cos^2(xG)], \quad (9)$$

де $s = c / h$.

Розрахунки довжини ділянки зв'язку $L_c / 2h$ проведені для плівкового хвилеводу на базі п'єзоелектричної плівки ZnO на підкладці із плавленого кварцу SiO_{2пл} при ширині хвилеводу $2d = 200$ мкм, висоті $h = 1$ мкм та швидкості поверхневої акустичної хвилі $V = 3400$ м/с (рис. 3).

Причиною такої поведінки є те, що сила зв'язку між сусідніми хвилеводами з фіксованою відстанню один від одного помітно зменшується зі зменшенням довжини хвилі. Така поведінка може поставити серйозні обмеження на використання двох слабо пов'язаних хвилеводів в практичних пристроях.

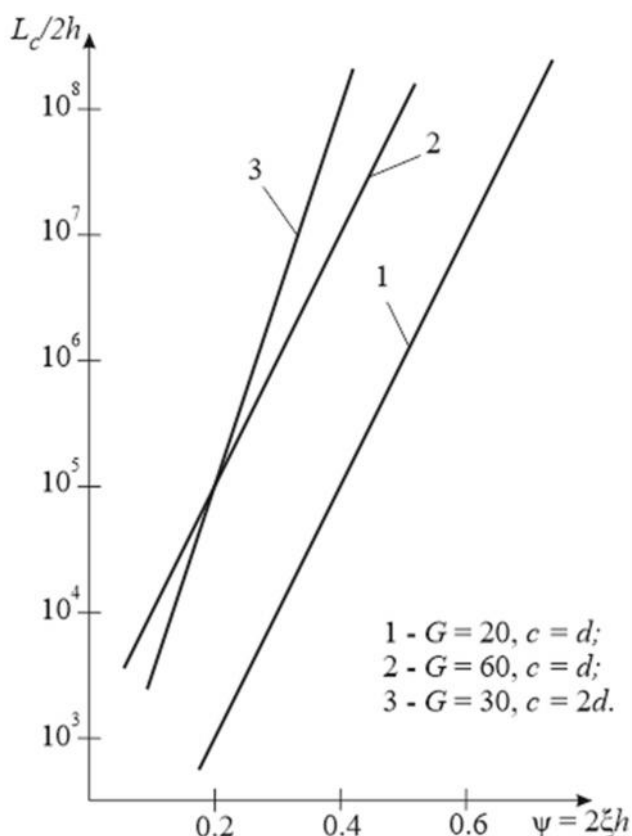


Рис. 3. Залежності довжини ділянки зв'язку двох слабо пов'язаних хвилеводів від хвильового числа

Висновки

Використання отриманих залежностей довжини зв'язку двох слабо пов'язаних хвилеводів від хвильового числа можуть бути використані при розробці пристроїв на ПАХ на базі хвилевідних плівкових структур.

Література

6. Поверхностные акустические волны / Под ред. А.Олинера; пер. с англ.; под ред. И.С.Реза. – М.:Мир, 1981. - 392 с.
7. Жовнір М. Ф. П'єзоелектричні плівкові хвилеводи

поверхневих акустичних хвиль / Журнал нано- та електронної фізики, 2016. Том. 8. № 4(1). С. 04007-1– 04007-7. DOI: 10.21272/jnep.8(4(1)).04007. (Scopus).

8. Жовнір М. Ф. Математична модель первинного перетворювача кутових переміщень з кільцевим п'єзоелектричним хвилеводом поверхневих акустичних хвиль / Вісник НТУ «ХПІ». Сер.: Механіко-технологічні системи та комплекси, 2016. № 49(1221). С. 42–51. (WorldCat, ResearchBib, Scientific Indexing Services, General Impact Factor, Open Academic Journals Index, Directory Indexing of International Research Journals).
9. Жовнір М. Ф. Акустоелектронний перетворювач кутової швидкості / Електроніка та зв'язок, 2017. Том 22. № 4(99). С. 44–50. DOI:10.20535/2312-1807.2017.22.4.103976. (Index Copernicus, Ulrich's Web, ResearchBib, Journals4Free, РИНЦ).
10. Zhovnir M. F., Pleshka T. E. Mathematical Model of Piezoelectric Film Waveguide Surface Acoustic Wave / Electronics and Applied Physics: Proceedings of the XII International Conference. Kyiv, 2016. P. 83–84.

11. Zhovnir M. F., Pysarenko L. D., Pleshka T. E. Comb filter based on SAW-resonator of running wave / Electronics and Applied Physics: Proceedings of the XII International Conference. Kyiv, 2017. P.213–214
12. Лопушенко В.К. Акустоелектронные микроструктуры на основе пленок оксида цинка :Диссертац. на соиск. уч.ст. к.т.н. - К., 1987. - 221 с.
13. Бирюков С.В., Гуляев Ю.В., Крылов В.В., Плесский В.П. Поверхностные акустические волны в неоднородных средах. – М.: Наука, 1991. – 416 с.
14. Tiersten H.F. Elastic Surface Waves Luided by Thin Films, J.Appl. Phys. – 1969. – v.40, № 2. -P. 770-789.