

(5 pages). 5. Andrushchak A.S., Mytsyk B. G., Laba H.P., Yurkevych O.V., Solskii I.M., Kityk A.V., Sahraoui B. Complete sets of elastic constants and photoelastic coefficients of pure and MgO-doped lithium niobate crystals at room temperature // *J. Appl. Phys.* – 2009. – Vol. 106. – 073510 (6 pages). 6. Nelson D.F. *Electric, Optic and Acoustic Interaction in Dielectric.* – Wiley, New York, 1979. 7. Korpel A., *Acousto-Optics.* – Marcel Dekker, New York, 1996. 8. Дьелесан Э., Руайе Д., *Упругие волны в твёрдых телах.* – М.: Наука, 1982. 9. Сиротин Ю.И., Шаскольская М.П., *Основы кристаллофизики.* – М.: Наука, 1975. 10. Дубанов А.А. Численно-аналитическое построение линий пересечения поверхностей методом Драгилева // *Прикладная геометрия.* – 2007. – Т. 9. – С. 1–12. 11. Демидов А.Я., Задорин А.С. Исследование аномального акусто-оптического взаимодействия в кристалле ниобата лития // *Изв. вузов МвиСО.* – 1981. – Т. 24. – С. 42–47.

УДК 621.374.55

Д.М. Винник<sup>1</sup>, Д.Ю. Сугак<sup>1,2</sup>, Н.Я. Генега<sup>1</sup>, В.Г. Гайдучок<sup>1</sup>,  
О.В. Юркевич<sup>3</sup>, А.С. Андрущак<sup>3</sup>

<sup>1</sup>Науково-виробниче підприємство “Карат”, Львів, Україна,

<sup>2</sup>Національний університет “Львівська політехніка”, кафедра фотоніки,

<sup>3</sup>Національний університет “Львівська політехніка”, кафедра телекомунікацій,

<sup>4</sup>Національний університет “Львівська політехніка”,  
кафедра напівпровідникової електроніки

## УЗГОДЖЕННЯ АКУСТООПТИЧНОЇ НВЧ КОМІРКИ БРЕГГА У ШИРОКІЙ СМУЗІ РОБОЧИХ ЧАСТОТ

© Винник Д.М., Сугак Д.Ю., Генега Н.Я., Гайдучок В.Г., Юркевич О.В., Андрущак А.С., 2011

D.M. Vynnyk, D.Y. Sugak, N.Ya. Heneha, V.G. Hayduchok,  
O.V. Yurkevych, A.S. Andrushchak

## MATCHING OF THE VHF BRAGG ACOUSTO-OPTIC CELL IN THE WIDE FREQUENCY RANGE

© Vynnyk D.M., Sugak D.Y., Heneha N.Ya., Hayduchok V.G., Yurkevych O.V., Andrushchak A.S., 2011

Розглянуто питання ширококутового узгодження опору надвисокочастотної (НВЧ) акустооптичної комірки Брегга, яка має центральну робочу частоту  $f_0 = 800$  МГц, з опором генератора НВЧ сигналів. Застосований в роботі метод ґрунтується на розрахунку фільтрів з використанням ланцюжків узгодження прототипів нижніх частот. На прикладі комірки, побудованої на основі кристала ніобату літію з використанням зустрічно-штирових п'єзоперетворювачів для збудження об'ємної акустичної хвилі, показано, що за допомогою структури узгодження, розрахованої цим методом, можна досягти задовільного коефіцієнта стоячої хвилі за напругою, який не перевищує значення 3 у робочій смузі частот  $\Delta f = 0,6 f_0$ .

*Ключові слова:* кристали ніобату літію, зустрічно-штировий перетворювач, надвисокочастотна акустооптична комірка, ширококутове узгодження

The impedances matching of the VHF generator and the VHF Bragg acousto-optic cell in the wide frequency range input and central frequency of 800 MHz has been discussed. The method exploited is based on the filter calculation using low-frequency circuit prototypes. It is shown that using lithium niobate and interdigital piezotransducers for bulk acoustic wave

excitation the suggested approach allows to reach the standing wave coefficient which does not exceed 3 for the working bandwidth of  $\Delta f = 0,6 f_0$ .

**Key words:** lithium niobate crystals, interdigital transducers, VHF acoustooptic cell, matching in the wide frequency range

### Вступ

Надвисокочастотні (НВЧ) акустооптичні комірки (АК) Брега широко застосовують [1–3] для синхронізації мод твердотільних лазерів та у спектральних аналізаторах радіосигналів. Одним з основних параметрів цих пристроїв є смуга робочих частот, розширення якої збільшує робочий діапазон відповідних комірок. Тому розроблення НВЧ АК з широкою смугою робочих частот є важливою прикладною задачею.

Однак використання НВЧ АК в широкому діапазоні частот можливе лише у разі узгодження опору навантаження, яким є фазована ґратка п'єзоперетворювача, з опором генератора сигналу. Проблеми узгодження п'єзоперетворювачів НВЧ діапазону розглянуті в роботах [4–6]. Але підхід, який було використано в цих роботах, дає можливість узгоджувати опір навантаження з опором генератора у порівняно невеликому діапазоні робочих частот.

У цій роботі розглянуто питання широкосмужового узгодження НВЧ АК Брега на основі кристала ніобату літію із зустрічно-штировим п'єзоперетворювачем (ЗШП), що ґрунтується на розрахунку фільтрів з використанням узгоджувачих ланцюжків прототипів нижніх частот [7–8].

### Опис методики розрахунку

Розглянуто НВЧ АК на основі звукопроводу з монокристала прямого зрізу  $\text{LiNbO}_3$ , який мав розміри  $10(X) \times 11(Y) \times 12(Z)$  мм<sup>3</sup>. Для збудження об'ємної акустичної хвилі у звукопроводі на грані XY кристала виготовлювався ЗШП, який слугував навантаженням для генератора сигналів. Розрахунок та виготовлення ланцюжка узгодження опорів навантаження та генератора проводили в два етапи:

- визначення параметрів навантаження і прототипу нижніх частот;
- розрахунок і виготовлення схеми узгодження.

### Визначення параметрів навантаження та прототипу нижніх частот

Зустрічно-штировий перетворювач для збудження об'ємних акустичних хвиль на центральній частоті порядку 800 МГц виготовляли на грані XY кристала  $\text{LiNbO}_3$  за допомогою операцій напилення та фотолітографії. Параметри розрахованого і виготовленого ЗШП були:  $d=105$  мкм,

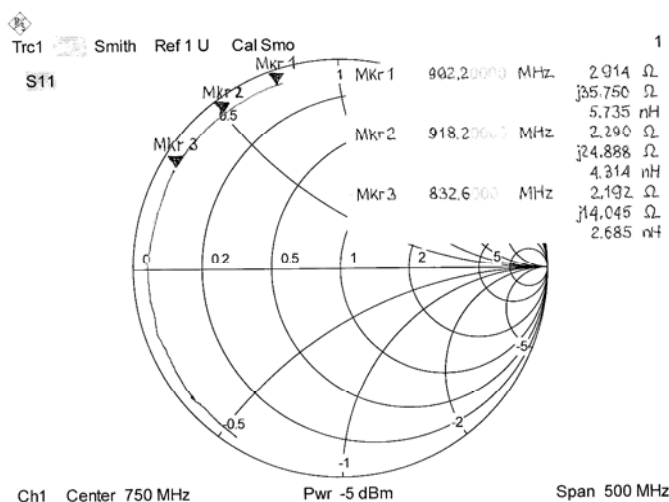


Рис. 1. Типова діаграма Сміта зустрічно-штирового перетворювача

$l_0=75$  мкм,  $l_1=30$  мкм,  $h=200$  мкм,  $N=81$ , де  $d$  – період ЗШП,  $l_0$  – відстань між електродами ЗШП,  $l_1$  – ширина електродів,  $h$  – висота електродів та  $N$  – кількість електродів. Отриманий зразок розпаювали в корпусі з мікросмужковою лінією передачі та хвильовим опором 50 Ом.

За допомогою векторного аналізатора фірми RODE@SHVARZ знімали діаграму Сміта, з використанням якої розраховали статичну ємність  $C_0$  [9]. Зняті типові діаграми Сміта наведені на рис. 1.

Враховуючи відоме [10] співвідношення для схеми з послідовним резонансом:  $2pf_0L = 1/2pf_0C_0$ , де  $f_0$  – цент-

ральна частота робочого діапазону, розраховували компенсуючу індуктивність  $L$ . Далі ЗШП, нанесений на грань ХУ кристала  $\text{LiNbO}_3$  стравлювали і на неї повторно напиляли провідний шар і виготовляли ЗШП з компенсуючою індуктивністю на заданій центральній частоті  $f_0 = 800$  МГц. Компенсуюча індуктивність являла собою смужку шириною 100 мкм і довжиною 10,4 мм. Еквівалентна схема ЗШП перетворювача з компенсуючою індуктивністю наведена на рис. 2.

Зразок ЗШП з компенсуючою індуктивністю розпаювали в корпусі з лінією передачі, яка мала хвильовий опір 50 Ом. Після цього знімали на векторному аналізаторі частотні залежності дійсної і уявної частини опору ЗШП, які наведені на рис. 3 та 4.

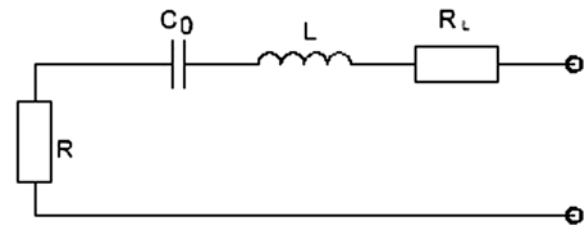


Рис. 2. Еквівалентна схема ЗШП, в якому  $R$  – опір випромінювання ЗШП зі статичною ємністю  $C_0$ ,  $R_L$  – активний опір компенсуючої індуктивності  $L$ ,  $R_0 = R + R_L$  – загальний активний опір

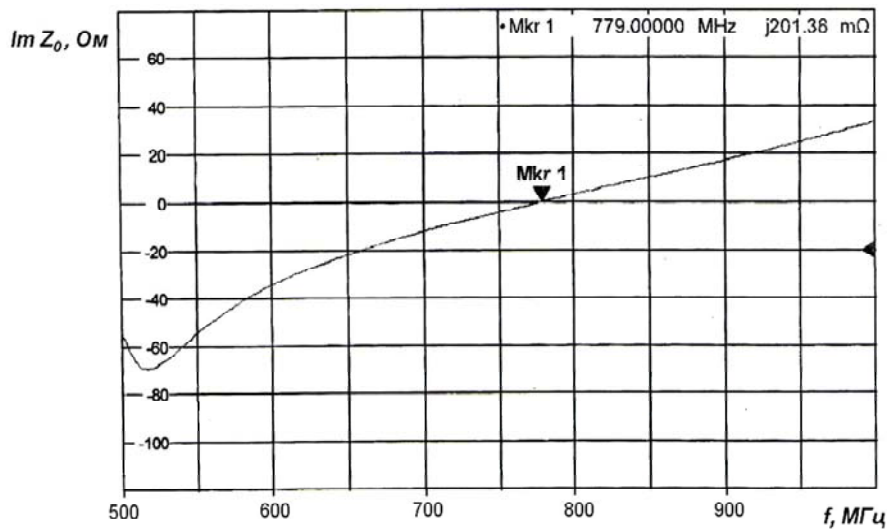


Рис. 3. Залежність уявної частини опору навантаження  $ImZ_0$  ЗШП від частоти

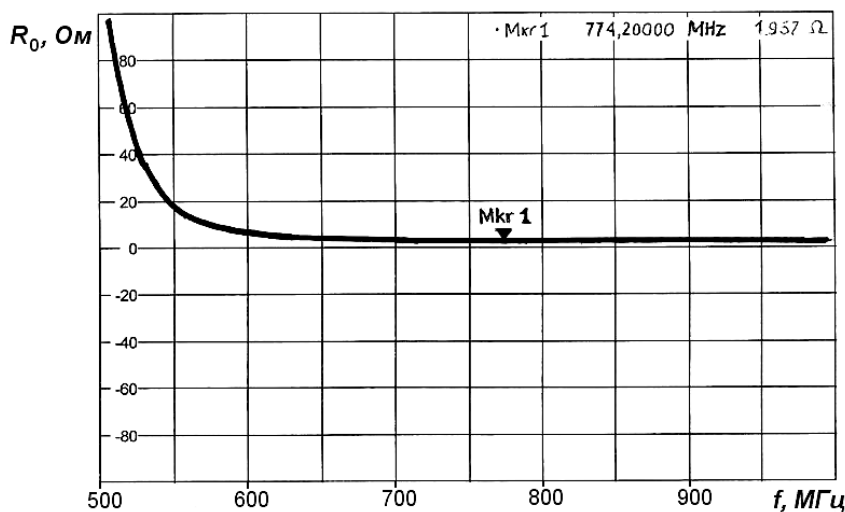


Рис. 4. Залежність загального активного опору  $R_0$  навантаження ЗШП від частоти

Для розрахунку схеми узгодження визначали декремент навантаження. Декремент навантаження  $\delta$  розраховували згідно зі співвідношенням [8]:

$$d = \frac{R_0}{(\operatorname{Im} Z_0)_{f_0}}, \quad (1)$$

де  $R_0$  – дійсна частина комплексного опору  $Z_0$  в точці  $f = f_0$ ,  $\operatorname{Im} Z_0$  – уявна частина цього опору, розрахована за формулою  $(\operatorname{Im} Z_0)_{f_0} = [(\operatorname{Im} Z_0)_{f_1} + (\operatorname{Im} Z_0)_{f_2}] / 2$ , тут  $f_1$  і  $f_2$  – початкова і кінцева частоти робочого діапазону відповідно.

У наших експериментах опір випромінювання ЗШП акустооптичних комірок Бреґга у разі збудження об'ємних акустичних хвиль в діапазоні частот 0,5–2 ГГц не перевищував 2 Ом. Оскільки опір  $(\operatorname{Im} Z_0)_{f_0}$  в діапазоні робочих частот  $\Delta f \geq 0,3 f_0$  змінювався від 20 Ом і вище (це видно з рис. 3), то декремент навантаження в цих робочих діапазонах частот становив  $\delta \leq 0,1$ . Для ефективного узгодження декремент навантаження повинен бути  $\delta > 0,1$ . Збільшення  $\delta$  для випадку широкосмугового узгодження можна досягнути, варіюючи товщину компенсуючої індуктивності, тобто збільшуючи її активний опір  $R_L$  за рахунок зменшення товщини елемента компенсуючої індуктивності. У нашому випадку опір  $R_0$  було збільшено до величини  $R_0 = 6$  Ом, при цьому декремент навантаження становив  $\delta = 0,15$  в діапазоні частот  $\Delta f = 0,6 f_0$ . Збільшення активного опору  $R_L$  призводить до зростання втрат під час генерації об'ємних акустичних хвиль. Значення активного опору  $R_L$  обмежується величинами, за яких ці втрати стають недопустимо великими. Визначивши декремент навантаження  $\delta$ , далі згідно з номограмами, поданими в [7], вибираємо параметри фільтра прототипу. Це спричинило вибір фільтра з кількістю реактивних елементів  $n = 3$  і наступними необхідними (див. [7]) значеннями параметрів фільтра прототипу:  $g_0 = 1$ ,  $g_1 = 6,6$ ,  $g_2 = 0,28$ ,  $g_3 = 4,25$ ,  $g_4 = 0,22$ .

### Розрахунок та виготовлення схеми узгодження

На частотах вище ніж 500 МГц складно реалізувати схему узгодження на елементах із зосередженими параметрами, тому для цих частот використовують елементи з розподіленими параметрами у вигляді смужок. На рис. 5 наведена ланка узгодження з  $n = 3$ , яку потрібно розрахувати. Ланка узгодження утворена двома коротко замкнутими шлейфами і з'єднувальною лінією між ними.

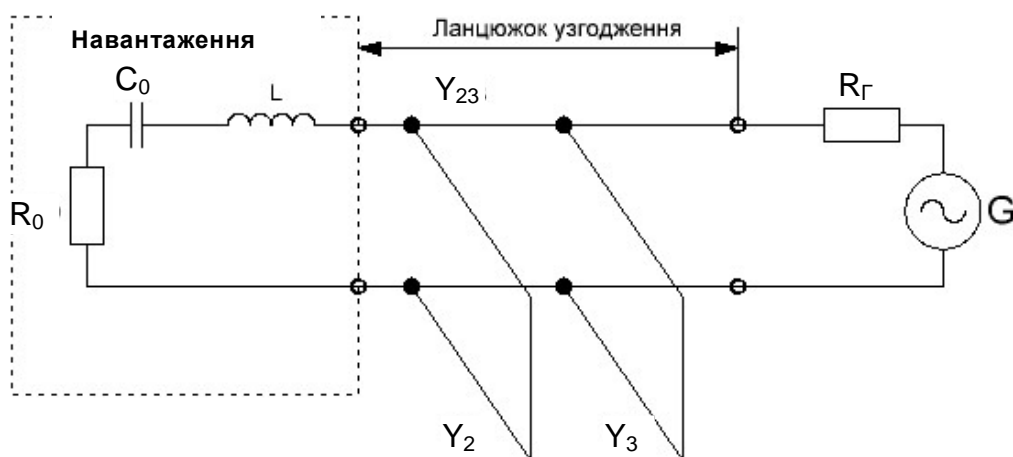


Рис. 5. Ланка узгодження, утворена із двох короткозамкнутих шлейфів з хвильовою провідністю  $Y_2$ ,  $Y_3$  і з'єднувальної лінії з хвильовою провідністю  $Y_{23}$  ( $R_{\Gamma}$  – опір генератора)

Хвильові провідності смужок  $Y_2, Y_3, Y_{23}$ , а відповідно і хвильові опори розраховуємо за формулами із [8]:

$$Y_2 = \frac{G_0}{g_0} w'_1 C'_2 \operatorname{tg} q_1 + G_0 \left( N_{23} - \frac{j_{23}}{G_0} \right) \quad (2)$$

$$Y_3 = \frac{G_0}{g_0} w'_1 C''_3 \operatorname{tg} q_1 + G_0 \left( N_{23} - \frac{j_{23}}{G_0} \right) \quad (3)$$

$$Y_{23} = j_{23}. \quad (4)$$

Для нашого випадку  $w'_1 = 1$ . В останніх формулах введені такі величини:

$$\frac{j_{23}}{G_0} = \frac{1}{g_0} \sqrt{C_2 C_3}; \quad N_{23} = \sqrt{\left(\frac{j_{23}}{G_0}\right)^2 + \left(\frac{C''_2 \operatorname{tg} q_1}{g_0}\right)^2}; \quad q_1 = \frac{p}{2} \left(1 - \frac{w}{2}\right); \quad w = \frac{f_2 - f_1}{f_0}; \quad C_2 = g_2;$$

$$C'_2 = g_2(1-d); \quad C''_2 = dg_2; \quad C_3 = g_0 g_3 g_4 \frac{R_0}{R_T}; \quad C'_3 = C''_2; \quad C''_3 = C_3 - C'_3.$$

Далі вважаємо, що  $d_1 = 1$ , а опір генератора  $R_T = 50$  Ом. В наведених співвідношеннях  $G_0 = \frac{1}{R_0}$  – провідність в точці  $f = f_0$ , а  $f_1$  та  $f_2$  – граничні частоти для робочого діапазону.

Розрахунок ланцюжка узгодження, отже, залежить від знайденої величини  $R_0$ , параметрів прототипу, заданих значень внутрішнього опору генератора, який збуджує навантаження, відносної ширини смуги частот  $\Delta f$  і центральної частоти  $f_0$ .

### Результати розрахунків та досліджень

У таблиці наведені розраховані хвильові провідності смужкових ліній схеми узгодження для досліджених нами НВЧ АК на основі кристала ніобату літію. Параметри ЗШП, центральна частота, робочий діапазон частот і параметри фільтра прототипу були наведені вище.

Результати розрахунку схеми узгодження

$R_0$ , Ом	$R_T$ , Ом	$Y_2$ , См	$Y_{23}$ , См	$Y_3$ , См
6	50	0,12	0,052	0,0258

Смужки короткозамкнутих шлейфів і з'єднувальної лінії реалізовувались на діелектричних підкладках з діелектричною проникністю  $\epsilon = 35$  і товщиною  $d = 1$  мм. Конструювання елементів схем узгодження проводились згідно з принципами, викладеними в роботі [11]. Величину діелектричної сталої підкладки вибирали з умови мінімальних розмірів схем узгодження, враховуючи те, що довжини смужок дорівнюють чверті довжини електромагнітної хвилі, яка відповідає центральній частоті робочого діапазону. Використовуючи розраховані величини хвильових опорів, згідно з [11] були визначені ширина і довжина смужок елементів узгодження. Схеми узгодження на діелектричній підкладці реалізовувались за допомогою операцій напилення та фотолітографії.

Використання підкладок з більшим значенням  $\epsilon$  призводило до істотного зменшення ширини смужок (доріжок), а отже, до значного збільшення активного опору, тобто до збільшення втрат.

Виготовлена комірка Бреґга з розрахованою відповідним методом структурою була узгоджена в діапазоні частот  $\Delta f = 0,6 f_0$ . Величина коефіцієнта стоячої хвилі (КСХ) дорівнювала 3 в цьому діапазоні частот. Сконструйована схема узгодження вмістилася на діелектричній підкладці з  $\epsilon = 35$  розмірами 24x31 мм. При  $\epsilon = 30$  схема узгодження була реалізована на підкладці розмірами 25x33 мм і товщиною 1 мм.

### Висновки

У роботі показана можливість широкосмугового узгодження акустооптичних НВЧ комірок Бреґга з допомогою короткозамкннутих шлейфів довжиною  $\lambda/4$ . Розглянутий метод узгодження для ЗШП, нанесеного на поверхню XY кристала  $\text{LiNbO}_3$ , дозволяє створити акустооптичну комірку Бреґга з смугою робочих частот порядку  $\Delta f = 0,6 f_0$  і дає можливість реалізувати схеми узгодження на порівняно невеликих підкладках з діелектричною проникністю  $\varepsilon = 30$  або  $\varepsilon = 35$ .

1. *Lasers and Electro-Optics / Ed. by William T. Arkin, Binding: Hardcover. – 2007. – 318 с.*
2. *Blistanov A.A. Crystals for Quantum and Nonlinear Optics. Moscow: MISIS. – 2000. – 431 с.*
3. *Alexandre S. Shcherbakova, Alexey M. Bliznetsov, Abraham Luna Castellanos and Daniel Sanchez Luceroa. Acousto-optical spectrum analysis of ultra-high-frequency radio-wave analogue signals with an improved resolution exploiting the collinear acoustic wave heterodyning // Optik – International Journal for Light and Electron Optics. – 2010. – Vol. 121, No.16. – P. 1497–1506.*
4. *Аксенов Е.Т., Есенкина Н.А., Щербаков А.С. Высокочастотные акустооптические дефлекторы на кристаллах // ЖТФ. – 1977. – Т. 47, № 2. – С. 362–364.*
5. *Бондаренко В.С., Зоренко В.П., Чкалова В.В. Акустооптические модуляторы света. – М.: Радио и связь, 1988. – 134 с.*
6. *Григорьев М.А., Толстиков А.В., Навроцкая Ю.М. Взаимодействие света с акустическими волнами возбуждаемыми синфазным многоэлементным преобразователем в деапазоне 1,0–2,5 ГГц // ЖТФ. – 2006. – Т. 76, вып. 5. – С. 88–93.*
7. *Маттей Д.Л., Янг Л., Джонс Е.М.Т. // Фильтры СВЧ, согласующие цепи и цепи связи Т. 1. – М.: Связь, 1971. – 440 с.*
8. *Маттей Д.Л., Янг Л., Джонс Е.М.Т. // Фильтры СВЧ, согласующие цепи и цепи связи Т. 2. – М.: Связь, 1972. – 496 с.*
9. *Винник Д.М., Андрущак А.С., Сугак Д.Ю. Дослідження частотних залежностей ємностей зустрічно-штиркових перетворювачів для збудження об'ємних акустичних хвиль // Тези доповідей тринадцятої науково-технічної конференції Інституту телекомунікацій, радіоелектроніки та електронної техніки Національного університету «Львівська політехніка» з проблем електроніки. – Львів (Україна), 2010. – С. 19.*
10. *Оптическая обработка радиосигнала в реальном времени / Под ред. С.В. Кулакова. – М.: Радио и связь, 1989. – 136 с.*
11. *Справочник по расчету и конструированию СВЧ полосковых устройств / Под ред. В.И. Вольмана. – М.: Радио и связь, 1982. – 328 с.*