

## РОЗРАХУНОК ЕЛЕКТРИЧНИХ ПАРАМЕТРІВ ЗУСТРІЧНО-ШТИРКОВОГО ПЕРЕТВОРЮВАЧА ДЛЯ НВЧ АКУСТИЧНОГО ДЕФЛЕКТОРА

Д. М. Винник<sup>1</sup>, О. Г. Решотка<sup>2</sup>, Д. Ю. Сугак<sup>1,2</sup>, М. М. Ваків<sup>1,2</sup>

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

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

© Винник Д. М., Решотка О. Г., Сугак Д. Ю., Ваків М. М., 2014

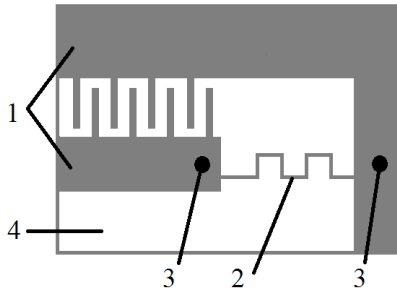
Наведено методику визначення електричних параметрів перетворювача з використанням зустрічно-штиркових перетворювачів, які використовуються для збудження об’ємних акустичних хвиль з поверхні п’єзоелектричного кристала  $\text{LiNbO}_3$ . Розрахунок погонних індуктивностей та ємностей проводиться на основі вимірів за допомогою векторного аналізатора реактивного опору та діаграм Сміта відповідно. Методика дозволяє розраховувати електричні параметри перетворювачів для збудження об’ємних акустичних хвиль з поверхні кристала  $\text{LiNbO}_3$  для ЗШП, що працюватимуть у діапазоні робочих частот до 2 ГГц.

**Ключові слова:** акустооптичні дефлектори, об’ємні хвилі, надвисокі частоти, поточна ємність елемента ЗШП, поточна індуктивність відрізка компенсуючої індуктивності, резонансна частота, зустрічно-періодичний перетворювач.

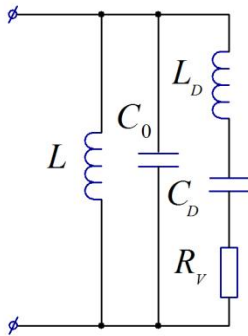
### Вступ

НВЧ акустооптичні дефлектори є основними компонентами цілої низки радіотехнічних пристроїв опрацювання інформації: частотомірів, спектроаналізаторів, кореляторів, демодуляторів частото- і фазомодульованих сигналів [1, 2]. Крім того, НВЧ акустооптичні дефлектори використовують для синхронізації мод твердотільних лазерів [3]. Принцип роботи НВЧ акустооптичних дефлекторів базується на використанні взаємодії світла з об’ємними надвисокочастотними хвилями, що збуджуються і розповсюджуються в світлозвукопроводі. При збудженні об’ємних акустичних хвиль в таких дефлекторах з поверхні п’єзоелектричного кристала світлозвукопроводу значно спрощується технологія їх виготовлення порівняно з традиційним способом виготовлення п’єзоперетворювача з використанням напилених плівок  $\text{ZnO}$ . Проектування схем узгодження зустрічно-штиркових перетворювачів (ЗШП) неможливе без знання їх електричних параметрів [4]. Своєю чергою для визначення цих параметрів слід апроксимувати вхідний комплексний опір ЗШП, який працює в широкому діапазоні частот у вигляді еквівалентного двополюсника з зосередженими  $LCR$ -параметрами. У випадку пластинчастих перетворювачів з великим коефіцієнтом електромеханічного зв’язку ( $K > 0,2$ ) така апроксимація, з урахуванням присвячених цій проблемі робіт, може бути здійснена з достатньою для практики точністю [5]. У випадку збудження об’ємних акустичних хвиль ЗШП з поверхні  $XU$ -кристала  $\text{LiNbO}_3$  роботи з проведення апроксимації вхідного комплексного опору ЗШП за допомогою ланцюжка, що складається з  $LCR$ -елементів, нам невідомі. Надалі, оскільки коефіцієнт електромеханічного зв’язку при збудженні об’ємних акустичних хвиль ЗШП з поверхні  $XU$ -кристала  $\text{LiNbO}_3$   $K > 0,2$ , будемо вважати, що еквівалентна схема навантаженого ЗШП, збігається з еквівалентною схемою навантаженого пластинчастого перетворювача. Справедливість цього припущення буде перевірена результатами практичних розрахунків.

Тому ця робота присвячена визначенню і розрахунку електричних параметрів схеми збудження об’ємних акустичних хвиль з поверхні п’єзоелектричних кристалів  $\text{LiNbO}_3$  з викорис-



**Рис. 1.** Типова конструкція багатоелементного періодичного збуджувача об'ємних акустичних хвиль із ЗШП: 1 – ЗШП; 2 – компенсуюча індуктивність; 3 – під'єднувальні провідники; 4 – поверхня кристала



**Рис. 2.** Еквівалентна схема перетворювача:  $C_0$  – статична ємність ЗШП;  $L$  – компенсуюча індуктивність;  $R_V$  – опір випромінювання;  $L_D$  та  $C_D$  – динамічні індуктивність та ємність

Під час розрахунків перетворювача з ЗШП розв'язується обернена задача, задається центральна частота  $f_0$  а також крок, висота і кількість електродів ЗШП [1], і визначається статистична ємність  $C_0$  та компенсуюча індуктивність  $L$  (довжина відрізка компенсуючої індуктивності). Центральну частоту можна також експериментально визначити з залежності реактивного опору перетворювача від частоти, наведеного на рис. 2. Реактивний опір перетворювача, конструкція якого зображена на рис. 1, вимірювали за допомогою векторного аналізатора фірми ZVL Rohde & Schwartz. Для дослідження було взято два кристали  $\text{LiNbO}_3$  одержаних в різних процесах росту. Кількість штирків в зустрічно-штирковому перетворювачі для обох зразків було  $N = 82$ , висота штирків –  $h = 0,2$  мм. Різниця між ЗШП нанесеними на поверхню кристалів була у різній довжині компенсуючої індуктивності у вигляді смужки довжиною ( $l$ ) та шириною 100 мкм: 10мм та 13,5 мм для першого і другого зразка відповідно. Графік залежності реактивного опору від частоти наведено на рис. 2.

Центральна частота  $f_0$ , визначена з цього графіка, дорівнювала 967 та 989 МГц для першого та другого зразка відповідно. Визначивши  $f_0$ , а також статичну ємність  $C_0$ , з (1) можна знайти величину індуктивності  $L$ , що відповідає відрізка компенсуючої індуктивності. Слід зазначити, що

танням ЗШП, а також визначенню можливості апроксимації вхідного комплексного опору ЗШП еквівалентним двополюсником з  $LCR$ -параметрами.

Зовнішній вигляд схеми збудження з використанням ЗШП, що реалізується шляхом напилювання тонких металічних плівок і фотолітографії на  $XY$ -поверхні кристала  $\text{LiNbO}_3$  наведена на рис. 1.

Видно, що в схему збудження крім ЗШП, що характеризується статичною ємністю  $C_0$ , входить також компенсуюча індуктивність  $L$ . Еквівалентну схему цього збуджувача акустичних хвиль подамо у вигляді (як і у випадку пластинчатого п'єзоперетворювача [5]):

У цій схемі елементи  $L_D$ ,  $C_D$ ,  $R_V$  утворюють послідовний контур, що характеризує процес коливання механічної енергії в системі ЗШП-п'єзоелектрик, причому опір випромінювання  $R_V$  характеризує активні витрати, пов'язані з випромінюванням акустичної хвилі в світлозвукопроводі за відсутності активних втрат в елементах схеми.

Отже, на поверхні кристала  $\text{LiNbO}_3$  реалізується  $LCR$ -контур, що має резонансну частоту [5]:

$$f_0 = \frac{1}{2p\sqrt{LC_0}} \quad (1)$$

Частота  $f_0$ , яка визначається із (1) як правило є центральною частотою робочого діапазону перетворювача (збуджувача). Отже, щоб визначити центральну частоту  $f_0$ , необхідно знати величину статичної ємності ЗШП –  $C_0$  і величину компенсуючої індуктивності  $L$ .

статична ємність ЗШП  $C_0 = (N-1)C_1$ , де  $N$  – кількість штирків, а  $C_1$  – ємність однієї пари штирків ЗШП. Знаючи величини  $C_0$  і  $L$  далі можна визначити погонні ємність  $C_S$  і індуктивність  $L_S$ :

$$\left. \begin{aligned} C_S &= \frac{C_0}{Nh} \\ L_S &= \frac{L}{l} \end{aligned} \right\} \quad (2)$$

де  $h$  і  $l$  – висота штирка в ЗШП і довжина компенсуючої смужки відповідно.

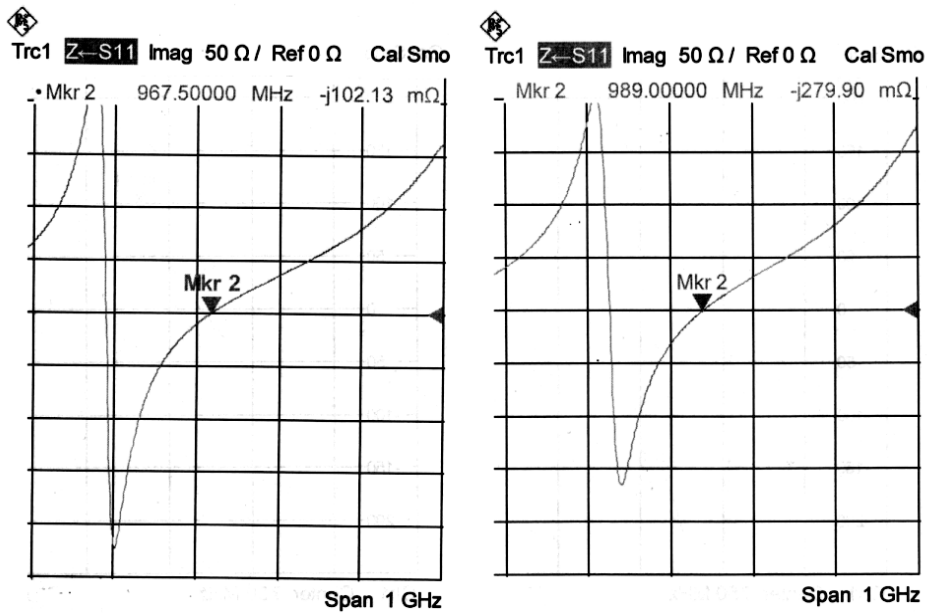


Рис. 3. Графік залежності реактивного опору від частоти для двох зразків ЗШП

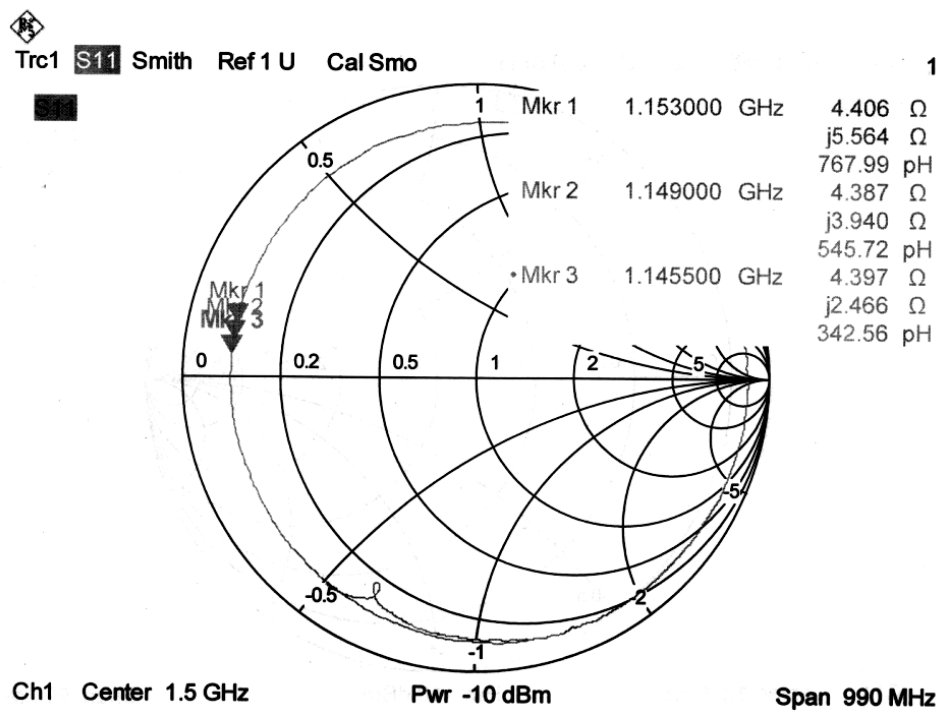


Рис. 4. Типова діаграма Сміта без компенсуючої індуктивності

Отже, в такий спосіб одержуємо можливість розрахувати згідно з (1) будь-який перетворювач з довільною кількістю штирків для заданої центральної частоти.

Для визначення статичної ємності  $C_0$  використовували підхід, запропонований в роботі [6], використовуючи зразки з перетворювачами, наведеними на рис. 1, в яких стравлювали компенсуючу індуктивність. Визначали статистичну ємність  $C_0$  із використанням діаграм Сміта. При цьому було прийнято, що  $C_D \ll C_0$ , а динамічна індуктивність  $L_D \gg L_1$ , де  $L_1$  – індуктивність під'єднувальних провідників при корпусуванні кристала. Кристал розпаювався до плати із хвильовим опором 50 Ом у корпус з роз'ємом СРГ-50. Безпосередньо виміряти статичну ємність ЗШП на векторному аналізаторі фірми ZVL Rohde & Schwartz неможливо, оскільки у вимірюваний комплексний опір робить внесок динамічна індуктивність  $L_D$ , що характеризує коливання енергії. Тому ємність  $C_0$  запропоновано визначати з використанням діаграм Сміта у двох близьких за частотою точках. При цьому вважається, що динамічна індуктивність  $L_D$  і ємність  $C_0$  в цих точках є постійними. Типова діаграма Сміта для ЗШП без компенсуючої індуктивності подана на рис. 4. Розглянемо на діаграмі Сміта близькі точки, які вибираються на ділянках графіка, максимально паралельних до осі  $r$  полярної системи координат. Для цих точок можна записати:

$$\begin{cases} \omega_1 L_D - \frac{1}{\omega_1 C_0} = J_1 \\ \omega_2 L_D - \frac{1}{\omega_2 C_0} = J_2 \\ \omega_3 L_D - \frac{1}{\omega_3 C_0} = J_3 \end{cases} \quad (3)$$

Тут  $\omega_1, \omega_2, \omega_3$  – циклічна частота ( $\omega = 2\pi f$ ),  $L_D$  – динамічна індуктивність,  $C_0$  – статична ємність ЗШП,  $J_1, J_2, J_3$  – реактивний опір відповідно у точках 1, 2 і 3. Частоти  $f_1, f_2, f_3$ , а також опори  $J_1, J_2, J_3$  визначаються в точках 1, 2 і 3 з діаграм Сміта. З перших двох рівнянь (3) визначимо  $L_D$  і  $C_0$ :

$$L_D = \frac{J_2 \omega_2 C_0 + 1}{\omega_2^2 C_0} \quad (4)$$

$$C_0 = \frac{\omega_1^2 - \omega_2^2}{(J_1 \omega_2^2 \omega_1) - (J_2 \omega_1^2 \omega_2)} \quad (5)$$

Третє рівняння системи (3) використовується для перевірки правильності одержаних результатів. Обчислені значення  $L_D$  і  $C_0$  підставляємо в третє рівняння і вираховуємо  $J_3$ , яке порівнюємо із значенням  $J_3$ , одержаним з діаграми Сміта.

Було розглянуто два зразки із нанесеними ЗШП на кристалічні XY-поверхні кристалів  $\text{LiNbO}_3$ , одержаних в різних процесах вирощування.

Результати вимірювань, проведених з використанням діаграм Сміта, подані в табл. 1.

Від'ємні значення  $J$  спостерігаються, коли точки були вибрані на діаграмі Сміта в області ємнісного опору.

**Таблиця 1.** Дані зняті з діаграм Сміта

Зразок №	$f$ , ГГц	$\Delta f$ , ГГц	$f_1$ , ГГц	$J_1$ , Ом	$f_2$ , ГГц	$J_2$ , Ом	$f_3$ , ГГц	$J_3$ , Ом
1	1	0,5	1,0064	11,445	1,01	13,392	1,0142	15,858
	0,75	1	1,02	16,941	1,016	14,207	1,013	12,955
	1	1	1,024	18,924	1,021	17,139	1,019	15,907
2	0,75	1	1,165	11,167	1,161	9,349	1,158	8,034
	1	0,5	1,141	0,89863	1,1364	-1,174	1,131	-3,535
	1,5	1	1,153	5,564	1,149	3,94	1,1455	2,466

Обчислення проводились згідно з (3) і (5) тричі шляхом заміни місцями  $f_1, f_2, f_3$ . Знайдені дані подано в табл. 2. Із цих даних випливає, що величина похибки  $\Delta J$  є мінімальною і дані можна використовувати для подальших розрахунків. Розбіжність величин  $\Delta J$  пояснюється вибором точок на графіку діаграми Сміта, який має нелінійну залежність.

**Таблиця 2.** Обрахунок даних, отриманих з діаграм Сміта

Зразок, №	$f$ , ГГц	$\Delta f$ , ГГц	$f_1$ , ГГц	$f_2$ , ГГц	$f_3$ , ГГц	$C_0$ , пФ	$J_{3T}$ , Ом	$J_3$ , Ом	$\Delta J$ , %
1	1	0,5	1,0064	1,01	1,0142	0,593	15,65	15,86	1,280
			1,01	1,0142	1,0064	0,543	11,27	11,45	1,526
			1,0142	1,0064	1,01	0,565	13,49	13,39	0,701
	0,75	1	1,02	1,016	1,013	0,460	12,15	12,96	6,217
			1,016	1,013	1,02	0,766	15,87	16,94	6,317
			1,013	1,02	1,016	0,556	14,67	14,21	3,235
	1	1	1,024	1,021	1,019	0,528	15,95	15,91	0,246
			1,021	1,019	1,024	0,510	18,98	18,92	0,310
			1,019	1,024	1,021	0,521	17,12	17,14	0,137
2	0,75	1	1,165	1,161	1,158	0,528	7,98	8,03	0,654
			1,161	1,158	1,165	0,550	11,10	11,17	0,625
			1,158	1,165	1,161	0,537	9,38	9,35	0,321
	1	0,5	1,141	1,1364	1,131	0,545	-3,62	-3,54	2,344
			1,1364	1,131	1,141	0,564	0,83	0,90	7,819
			1,131	1,141	1,1364	0,555	-1,14	-1,17	3,238
	1,5	1	1,153	1,149	1,1455	0,598	2,51	2,47	1,963
			1,149	1,1455	1,153	0,578	5,62	5,56	0,991
			1,1455	1,153	1,149	0,589	3,91	3,94	0,654

У таблицях  $f$  – центральна частота вимірюваного діапазону,  $\Delta f$  – смуга вимірюваних частот,  $f_1, f_2, f_3$  – точки на діаграмі Сміта, кожна з яких відповідає вибраній частоті,  $J_{3T}$  – реактивний опір, розрахований з третього рівняння системи (3).

Величини  $C_0$  відрізняються, тому було знайдено середнє арифметичне для кожного із зразків, а результат поданий у вигляді табл. 3.

**Таблиця 3.** Результати обрахунку ємностей

Зразок, №	$C_0$ (сер.), пФ	Кількість штирків	Ємність пари штирків, pF	Погонна ємність $C_s$ , pF/mm
1	0,560	82	0,01366	0,068
2	0,560	82	0,01367	0,068

Визначивши із (2) статичну ємність  $C_0$  для табл. 3, згідно з (1) була розрахована величина компенсуючої індуктивності. За відомої довжини компенсуючої індуктивності визначено погонну індуктивність. Дані подано в табл. 4. Для другого зразка, використовуючи погонну ємність та індуктивність, визначимо резонансну частоту  $f_0$  і порівняємо її із частотою, визначеною експериментально з графіку реактивного опору.

**Таблиця 4.** Результати обрахунку ємностей

Зразок, №	$L$ (сер.), нГн	Довжина мікросмужки, мм	Індуктивність на 1 мм, нГн
1	48,414	13,5	3,5862
2	35,862	10	3,5862

$$f_{0(\text{теор})} = \frac{1}{2\pi \sqrt{0,56 \cdot 10^{-12} \cdot 35,862 \cdot 10^{-9}}} = 1123,64 \text{ МГц}$$

Теоретично розрахована резонансна частота становить 1124 МГц, вміряна експериментально частота – 989 МГц. Похибка становить 13,5 %. Така похибка є допустимою і обумовлена геометрією компенсуючої індуктивності. Слід відзначити, що на частотах > 1 ГГц похибка істотно не впливає на параметри акустооптичного дефлектора.

Визначена погонна ємність ЗШП на двох зразках  $\text{LiNbO}_3$ , одержаних в різних процесах росту, показує, що ці величини є однаковими, тобто технологія вирощування дозволяє отримувати якісні кристали з ідентичними параметрами діелектричної проникливості.

### Висновки

Показано, що еквівалентну схему навантаженого ЗШП при збудженні ним об'ємних акустичних хвиль з поверхні XY-кристала  $\text{LiNbO}_3$  можна з достатньою для практики точністю апроксимувати дво полюсником, що має вигляд паралельного з'єднання статичної ємності ЗШП  $C_0$  і послідовного LCR-контур.

Представлена методика розрахунку електричних параметрів ЗШП дає змогу конструювати перетворювачі на їх основі для збудження об'ємних акустичних хвиль з поверхні п'єзоелектричних кристалів у діапазоні робочих частот до 2 ГГц. Можливість застосування методики за вищих частот слід додатково перевірити експериментально.

- [1] Балакший В. И., Парыгин В. Н., Чирков Л. Е. Физические основы акустооптики. – М.: Радио и связь, 1985.
- [2] Вольк Д.П., Роздобудько В.В. Анализ амплитудно-частотной характеристики акустооптического дефлектора с поверхностным аподизированным преобразователем // ЖТФ, 79 (2009)124–128.
- [3] Lasers and Electro-Optics / Ed. by William T. Arkin / Binding: Hardcover, 2007, pp. 318.
- [4] Винник Д.М., Сугак Д.Ю., Генега Н.Я., Гайдучок В.Г., Юркевич О.В., Андрущак А.С. Узгодження акустооптичної НВЧ комірки Брега у широкій смузі робочих частот // Вісник Нац. ун-ту "Львівська політехніка", Електроніка, 708 (2011) 195.
- [5] Оптическая обработка радиосигнала в реальном времени / Под ред. С.В. Кулакова. – М.: Радио и связь, 1989. – 136 с.
- [6] Винник Д.М., Андрущак А.С., Сугак Д.Ю. Дослідження частотних залежностей ємностей зустрічно-штиркових перетворювачів для збудження об'ємних акустичних хвиль // Тринадцята відкрита науково-технічна конференція Інституту телекомунікацій, радіоелектроніки та електронної техніки Нац. ун-ту "Львівська політехніка", 13–15 квітня, Львів, 2010.

---

## CALCULATION OF ELECTRICAL PARAMETERS OF PHASED ARRAY TRANSDUCER FOR MICROWAVE ACOUSTIC DEFLECTOR

D. M. Vynnyk<sup>1</sup>, O. G. Reshotka<sup>2</sup>, D. Yu. Sugak<sup>1,2</sup>, M. M. Vakiv<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup>Scientific Research Company "Carat",

<sup>2</sup>Lviv Polytechnic National University, Department of Semiconductor Electronics

© Vynnyk D. M., Reshotka O. G., Sugak D. Yu., Vakiv M. M., 2014

Methods of determining of transducer electrical parameters using interdigital transducers which are used for excitation of the bulk acoustic waves from the surface of the piezoelectric crystal  $\text{LiNbO}_3$  are presented. Calculation of running inductance and linear capacitance is conducted using vector analyzer of reactance and Smith diagram. This method is used to calculate the electric parameters of transducers for excitation of bulk acoustic wave from the surface of  $\text{LiNbO}_3$  crystal for phased antenna arrays that operate in the range of operating frequencies up to 2 GHz.

**Key words:** acousto-optics, acousto-optics deflectors, bulk wave, hypersonic frequencies, capacity of array's element, inductance of array's element, multi-element transducer.