

Д. М. Винник<sup>1</sup>, Т. І. Вороняк<sup>2</sup>, А. С. Андрущак<sup>1</sup><sup>1</sup> Національний університет “Львівська політехніка”,<sup>2</sup> Фізико-механічний інститут ім. Г. В. Карпенка

## ЗБУДЖЕННЯ ОБ’ЄМНИХ АКУСТИЧНИХ ХВИЛЬ ЗУСТРІЧНО-ШТИРЬОВИМ ПЕРЕТВОРЮВАЧЕМ З ПОВЕРХНІ КРИСТАЛІВ НІОБАТУ ЛІТІЮ

© Винник Д. М., Вороняк Т. І., Андрущак А. С., 2017

Розглянуто збудження об’ємних акустичних хвиль НВЧ діапазону зустрічно-штирєвим перетворювачем з ХУ поверхні кристалів ніобату літію. Експериментальні дослідження здійснено на акустoeлектронних лініях затримки, в яких зустрічно-штирєві перетворювачі використано під час збудження і приймання акустичних хвиль. Встановлено, що сповільнена на зустрічно-штирєвому перетворювачі електромагнітна хвиля збуджує об’ємну акустичну хвилю, структура якої містить набір просторових гармонік.

**Ключові слова:** п’єзоперетворювач, зустрічно-штирєвий перетворювач, об’ємна акустична хвиля, фазова швидкість, час затримки.

D. M. Vynnyk, T. I. Voronyak, A. S. Andrushchak

Lviv Polytechnic National University,

Karpenko Physico-Mechanical institute of the NAS of Ukraine

## EXCITATION OF BULK ACOUSTIC WAVES BY INTERDIGITAL TRANSDUCER FROM THE SURFACE OF LITHIUM NIOBATE CRYSTALS

© Vynnyk D. M., Voronyak T. I., Andrushchak A. S., 2017

The excitation of bulk acoustic waves of the UHF range by interdigital transducer from the XY surface of lithium niobate crystals is considered. Experimental studies were carried out on acoustoelectronic delay lines, in which interdigital transducers were used during excitation and receiving acoustic waves. It is established that the electromagnetic wave delayed on the interdigital transducer causes a bulk acoustic wave, the structure of which contains a set of spatial harmonics.

**Key words:** piezoelectric transducer, interdigital transducer, bulk acoustic wave, phase velocity, delay time.

### Вступ

Акустооптичні пристрої, в яких відбувається взаємодія оптичного випромінювання з акустичними хвилями, широко використовуються в лазерній техніці, спектроскопії та у системах оптичної передачі й обробки інформації. Ці пристрої дають змогу керувати амплітудою, фазою, поляризацією та спектральним складом оптичного випромінювання, а також напрямками поширення оптичних пучків у просторі [1–5]. Основним компонентом таких пристроїв є акустооптична комірка, яка складається зі світлозвукопроводу, де відбувається взаємодія оптичного випромінювання та акустичної хвилі, та випромінювача об’ємних акустичних хвиль, який кріпиться на одній з поверхонь (торці) світлозвукопроводу. Найпоширенішим типом

випромінювачів є п'єзоелектричні перетворювачі [2]. Технологія виготовлення цих перетворювачів доволі складна і високовартісна. Збудження об'ємних акустичних хвиль з поверхні кристалічних матеріалів, що володіють п'єзоелектричним ефектом, дає змогу істотно спростити технологію виготовлення випромінювача об'ємних акустичних хвиль, особливо в акустооптичних пристроях НВЧ діапазону [6].

Ефективним збуджувачем об'ємних акустичних хвиль з поверхонь п'єзоелектричних кристалів є зустрічно-штирковий перетворювач (ЗШП) [7–10]. Однак в цих та інших роботах, у яких розглянуто такий спосіб отримання об'ємних акустичних хвиль, не враховується, що ЗШП є системою, яка сповільнює поверхневу електромагнітну хвилю. В цій роботі досліджено збудження НВЧ об'ємних акустичних хвиль за допомогою ЗШП із поверхні ХУ кристала ніобату літію ( $LiNbO_3$ ) з урахуванням ефекту сповільнення поверхневої електромагнітної хвилі.

### Теоретичні відомості

Розглянемо ЗШП, що нанесений на площину ХУ п'єзоелектричного кристала прямого зрізу. Штирі ЗШП перпендикулярні до осі Х кристала. Прямокутну систему координат  $x, y, z$  пов'яжемо із кристалографічними осями  $X, Y, Z$  кристала. Під час подачі НВЧ сигналу на вхідні контакти ЗШП в площині ХУ поширюватиметься поверхнева сповільнена електромагнітна хвиля. Відбитими від кінця ЗШП електромагнітними хвилями будемо нехтувати. Тоді електричне поле поверхневої електромагнітної хвилі можна подати у вигляді [11]:

$$E = \sum_{p=-\infty}^{+\infty} E_p e^{i(\omega t - b_p x)}, \quad (1)$$

де  $b_p = b_0 + \frac{2pp}{l}$ ;  $p = \pm 1; \pm 2; \pm 3 \dots$ ;  $l$  – період сповільнюючої структури (ЗШП);  $b_0$  – фазова стала нульової гармоніки (основної хвилі).

Для ЗШП  $b_p$  має такий вигляд

$$b_p = b_0 + \frac{2pp}{l} = \frac{2p(2h+l)}{ll} + \frac{2pp}{l}, \quad (2)$$

де  $h$  – довжина штирків,  $l$  – довжина електромагнітної хвилі у вільному просторі.

Із (1) випливає, що електромагнітне поле в ЗШП не можна подати у вигляді однієї біжучої хвилі, необхідно розглядати нескінченну кількість хвиль (просторових гармонік), які біжать по ЗШП в обидвох напрямках вздовж координати  $x$ . Фазова швидкість  $(u_\phi)_p$  просторових гармонік електромагнітної хвилі в ЗШП визначається із співвідношення

$$(u_\phi)_p = \frac{\omega}{b_p}, \quad (3)$$

де  $\omega = 2\pi f$  ( $f$  – частота електромагнітного сигналу).

Згідно з виразами (2) і (3), чим більша абсолютна величина номера гармоніки  $|p|$ , тим менша фазова швидкість просторової гармоніки, яка може бути як завгодно малою. Із цього випливає, що ЗШП володіє властивостями сповільнюючої системи.

Поверхнева сповільнена електромагнітна хвиля в ЗШП, що описується рівнянням (1), поширюючись по поверхні п'єзоелектричних кристалів, призводить до збудження об'ємних акустичних хвиль.

Зміщення (деформації) у цих акустичних хвилях внаслідок лінійності рівняння руху відносно збуджуючого електричного поля містить той самий набір просторових гармонік, що і сповільнена поверхнева електромагнітна хвиля [12]. Отже, поле збудженої НВЧ об'ємних акустичних хвиль має складну структуру, яка характеризується набором просторових гармонік.

### Експериментальна частина

Експериментальну перевірку збудження і поширення НВЧ об'ємних акустичних хвиль за допомогою ЗШП здійснено на кристалах  $LiNbO_3$ . Дослідження проводились в діапазонах частот

500–1 000 МГц та 1–2 ГГц. Зразки для досліджень вирізали із монокристалів  $LiNbO_3$ , вирощених за методом Чохральського в НВП “Караг” (м. Львів). В експериментах використано звукопроводи розміром  $10 \times 10 \times 11,5$  мм<sup>3</sup> вздовж кристалографічних осей  $X, Y, Z$  відповідно. Точність орієнтації зразків становила  $\sim 1^\circ$ . Торцеві поверхні, нормальні до осі  $Z$ , піддавались фінішному поліруванню, а їх непаралельність не перевищувала  $15''$ . На поліровані торці методом магнетронного розпилення наносили плівки  $Cr-Cu$ , з яких за допомогою фотолітографічної технології були сформовані ЗШП з періодом штирів 75 мкм та 20 мкм і висотою штирів 0,2 та 1 мм.

Зовнішній вигляд схеми збудження та приймання ЗШП, що реалізується напилюванням тонких металевих плівок і фотолітографії на  $XY$ -поверхні кристала  $LiNbO_3$ , наведено на рис. 1.

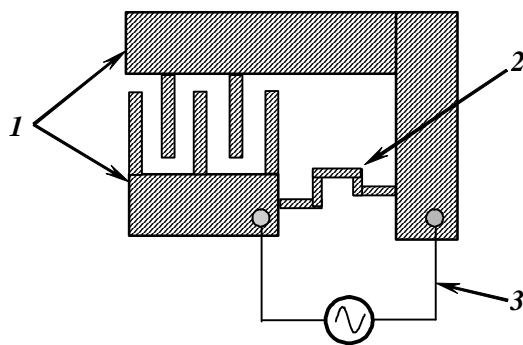


Рис. 1. Типова конструкція багатоеlementного періодичного ЗШП для збудження ОАХ: 1 – ЗШП; 2 – компенсуюча індуктивність; 3 – під’єднувальні провідники

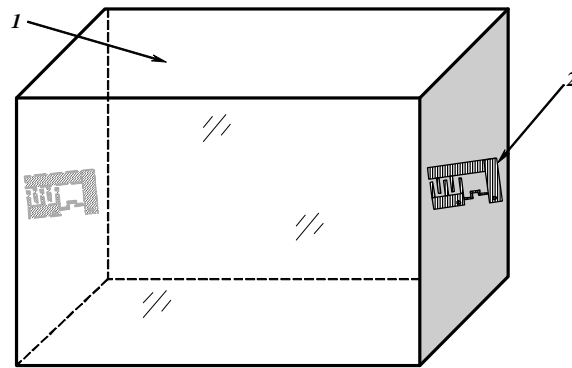


Рис. 2. Схематичне зображення досліджуваних ліній затримки: 1 – звукопровід; 2 – електроди ЗШП

У схему збудження крім ЗШП, який характеризується статичною ємністю  $C_0$ , входить також індуктивність  $L$ .

На окремий звукопровід наносили збуджуючу систему з однакою кількістю і періодом штирів, а також з однаковими компенсуючими індуктивностями  $L$ . Розрахунок електричних параметрів збуджуючої системи виконано згідно із роботою [13]. Таким методом були виготовлені акустoeлектронні лінії затримки НВЧ сигналів, в яких збудження і приймання акустичних сигналів здійснювалось ЗШП. Схематичне зображення виготовлених ліній затримки подано на рис. 2. На цих акустoeлектронних лініях затримки проведено дослідження збудження і реєстрації НВЧ об’ємних акустичних хвиль.

Згідно з наведеними вище міркуваннями, у разі подавання прямокутного імпульсу НВЧ електромагнітного сигналу на вхідний ЗШП акустoeлектронної лінії затримки в цій лінії повинні спостерігатись проходження та фіксація просторових гармонік об’ємних акустичних хвиль з різними фазовими швидкостями (тобто різними часами проходження акустичних імпульсів).

Фазові швидкості поширення збуджених просторових гармонік  $u_{\phi,p}^a$  в акустoeлектронній лінії затримки будуть визначатись зі співвідношення

$$u_{\phi,p}^a = \frac{l_1}{t_{3,p}}, \quad (4)$$

де  $l_1$  – довжина звукопроводу в напрямку поширення акустичної хвилі,  $t_{3,p}$  – час проходження імпульсу  $p$ -ї просторової гармоніки акустичного сигналу.

Експериментальне вимірювання часу проходження просторових гармонік збудженої об’ємної акустичної хвилі у виготовлених акустoeлектронних лініях затримки проводилось на стенді, блок-схему якого подано на рис. 3.

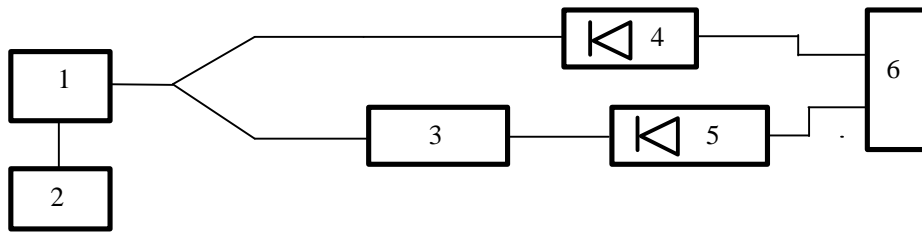


Рис. 3. Блок-схема стенда для вимірювання часу проходження акустичних сигналів:  
 1 – генератор НВЧ сигналів; 2 – генератор імпульсів; 3 – акустоелектронна лінія затримки; 4, 5 – детекторні головки; 6 – осцилограф

Під час вимірювання часу проходження акустичних сигналів завжди спостерігався сигнал “прямого проходження”. Цей сигнал запізнювався щодо збуджуючого електромагнітного імпульсу, сформованого генератором імпульсів (Г5-48), на одиниці наносекунд. Його амплітуда, як правило, значно перевищувала амплітуду, що відповідала збудженим акустичним сигналам. Час проходження акустичних сигналів вимірювали щодо часу проходження імпульсу “прямого проходження”. Зауважимо, що ефективність збудження сигналу “прямого проходження” різко зростає на частотах  $f \geq 1$  ГГц і може становити до 50 % потужності збуджуючих сигналів. Крім того, в більшості зразків досліджуваних акустоелектронних ліній затримки ми спостерігали два акустичні імпульси, що ресструвалися прийомним ЗШП. Час затримки першого акустичного імпульсу відносно сигналу “прямого проходження” був у межах від 3,1 мкс до 3,7 мкс для різних зразків. Час затримки другого акустичного імпульсу щодо першого акустичного імпульсу – в межах від 1,6 мкс до 1,8 мкс. Амплітуди других акустичних імпульсів, що спостерігались під час експериментів, були на порядок меншими за амплітуди перших акустичних імпульсів. В середньому час затримки першого акустичного імпульсу становив 3,4 мкс, а другого – 1,7 мкс. Такий незначний розкид часів проходження акустичних сигналів може бути пов’язаний зі структурною дефективністю використаних кристалів  $LiNbO_3$ . В одній із АЛЗ спостерігались навіть чотири акустичні сигнали з часом затримки між усіма сигналами, зокрема між сигналом “прямого проходження” – 1,7 мкс. Зазначимо, що амплітуди цих акустичних імпульсів були практично однакові.

Оцінивши згідно з (4) швидкості збуджених за допомогою ЗШП об’ємних акустичних хвиль, можна стверджувати, що в кристалах  $LiNbO_3$  збуджуються з поверхні  $XY$  у напрямку осі  $Z$  одночасно акустичні коливання з різними фазовими швидкостями. Це слугує доказом існування просторових гармонік цієї об’ємної акустичної хвилі. Останнє передбачає необхідність проведення подальших досліджень з метою оптимізації збудження об’ємних акустичних хвиль з поверхні кристалів  $LiNbO_3$  за допомогою ЗШП.

### Висновки

На основі аналізу часу проходження імпульсів об’ємних акустичних хвиль в акустоелектронній лінії затримки можна стверджувати, що сповільнена електромагнітна хвиля, яка поширюється по ЗШП, нанесеному на  $XY$  поверхню кристала  $LiNbO_3$ , збуджує об’ємну акустичну хвилю з різними просторовими гармоніками.

Встановлено, що на частотах  $f \geq 1$  ГГц зростає ефективність сигналів “прямого проходження”, тобто сигналів, які досягають приймального ЗШП за декілька наносекунд. Ці сигнали можуть переносити до 50 % потужності збуджуючих електромагнітних полів, що потрібно враховувати у разі збудження акустичних хвиль з поверхні кристалів за допомогою ЗШП, особливо в акустооптичних пристроях НВЧ діапазону.

1. Jochi J. C. *Acousto-Optic Devices and their Defence Applications*. New Delfi – 110011. – 2007. – 253 p. 2. Goutzoulis A. K., Pappe D. R. *Design and Fabrication of Acousto-Optic Devices*. New York: Marcel Dekker. – 1994. – 384 p. 3. Korpel A. *Acousto-Optics*. New York: Marcel Dekker. – 1988. – 296 p.

4. Rhodes W. T. *Acousto-Optic Signal Processing: Convolution and Correlation* // *Proc. IEEE*. – 1981. – vol. 69, № 1. – P. 65–79. 5. Turpin T. M. *Spectrum analysis using optical processing* // *Proc. IEEE*. – 1981. – Vol. 69, № 1. – P. 79–92. 6. Баранский К. Н. Возбуждение в кварце колебаний гиперзвуковых частот // *Доклады Академии наук СССР*. – 1957. – 114 (3). – С. 517–519. 7. Вольк Д. П., Роздобудько В. В. Анализ амплитудно-частотной характеристики акустооптического deflectора с поверхностным аподизированным преобразователем // *ЖТФ*. – 2009. – № 79. – С. 124–128. 8. Robert F. Milsom, N.H. C. Reilly, and Martin Redwood. *Analysis of Generation and Detection of Surface and Bulk Acoustic Waves by Interdigital Transducers* // *IEEE Trans. Sonics and Ultrason.* – 1977. Vol. Su-24. – P. 147–166. 9. Ken'ichiro Yashiro, Naohisa Goto. *Analysis of Generation of Acoustic Waves on the Surface of Semi-Infinite Piezoelectric Solid* // *IEEE Trans. Sonics and Ultrason.* – 1977. Vol. Su-25. – P. 146–153. 10. Muromets A. V., Voloshinov V. B., Kanonin I. A. *Bulk wave from the surface a LiNbO<sub>3</sub> crystal by a system of planar electrodes* // *J. Phys. Conf. Ser.* – 2016. – 690.012035. 11. Лебедев И. В. *Техника и приборы СВЧ*. – М.: Высшая школа, 1970. – 639 с. 12. Гананольский Е. М. *Трансформация электромагнит-ных и гиперзвуковых волн в пьезокристаллах* // *Физика твердого тела*. – 1968. – 10.(6). – С. 982–992. 13. Винник Д. М., Решотка О. Г., Сугак Д. Ю., Ваків М. М. *Розрахунок електричних параметрів зустрічно-штирьового перетворювача для НВЧ акустичного deflectора* // *Вісник Нац. ун-ту “Львівська політехніка”, Електроніка*. – 2014. – № 798. – С. 17–22.