

ДОСЛІДЖЕННЯ ПЕРЕДАЧІ ЕНЕРГІЇ ХВИЛЬ ЛЕМБА В ЕЛЕКТРИЧНО ЗВ'ЯЗАНИХ ПЛАСТИНАХ LiNbO_3

П.В. БУРЛІЙ, В.В. КОЗАЧЕНКО, О.М. ЖАВІТЕНКО

УДК 534.2:539.2
© 2010

Київський національний університет ім. Тараса Шевченка
(Вул. Володимирська, 64, Київ 03127; e-mail: victorc@univ.kiev.ua)

У роботі досліджено передачу енергії між хвилями Лемба в п'єзоелектричній шаруватій структурі без акустичного контакту, в якій зв'язок між окремими шарами відбувається через електричне поле. Дослідження виявили ефективну передачу енергії між прямими модами. Крім того, в діапазоні частот, де можуть існувати зворотні хвилі при передачі енергії з однієї пластини в іншу спостерігалось перетворення прямої моди у зворотню.

Історично склалося так, що першими в акустоелектроніці почали використовуватись об'ємні пружні хвилі. З розвитком технологій, разом з ними, знайшли застосування поверхневі акустичні хвилі. Для неруйнівного дослідження новітніх матеріалів, що мають шарувату структуру, широко застосовуються хвилі Лемба [1, 2]. Однак, якщо шар речовини, в якому поширюється хвиля Лемба, має п'єзоелектричні властивості, то ці хвилі матимуть специфічні особливості. Останнім часом набирають поширення дослідження по використанню унікальних властивостей хвиль у пластинах. Одним з цікавих випадків є так звані зворотні акустичні хвилі (хвилі з протилежно спрямованими фазовою (v_{ph}) і груповою (v_g) швидкостями). На відміну від звичайних – прямих хвиль, для яких v_{ph} і v_g спрямовані в один бік. Існування зворотних хвиль детально розглянуто теоретично і показано експериментально в роботах [3-5].

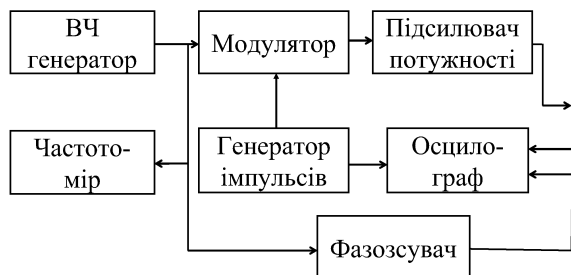


Рис. 1. Блок-схема експериментальної установки

У даній роботі зроблено спробу дослідити передачу енергії в п'єзоелектричній шаруватій структурі без акустичного контакту, в якій зв'язок між окремими шарами відбувається через електричне поле. А саме, дослідити особливості обміну енергією між прямими та між прямою і зворотною акустичними хвилями Лемба. Потоки енергії для зворотних поперечних нормальних хвиль теоретично досліджувались в роботі [6], а для хвиль Лемба такі дослідження не проводились ні теоретично, ні експериментально.

У ролі досліджуваної взято систему, що складається з двох пластин LiNbO_3 YZ-зрізу, вирізаних з одного кристала, з різними товщинами: 640 мкм (пластина №1) та 650 мкм (пластина №2). Пластини мали довжину 4 см і ширину 1 см. Невелика відмінність по товщині зручна тим, що, як буде показано далі, можлива ситуація, коли на одній і тій самій частоті в одній пластині буде збуджуватись пряма мода, а в іншій – зворотна.

Блок-схему експериментальної установки показано на рис. 1. За допомогою генератора імпульсів та генератора високочастотного сигналу (ВЧ-генератора) в модуляторі формувався радіоімпульс тривалістю 2–10 мкс. Після підсилення він подавався на збуджуючий електрод досліджуваної пластини LiNbO_3 (схему досліду наведено на рис.2). У ролі електрода для збудження використовували металічну пластинку шириною 0,5 мм. За рахунок зворотного п'єзо ефекту у пластині збуджувалась акустична хвиля, яка реєструвалась іншим електродом, який можна було зміщувати вздовж пластини за допомогою мікрометричного

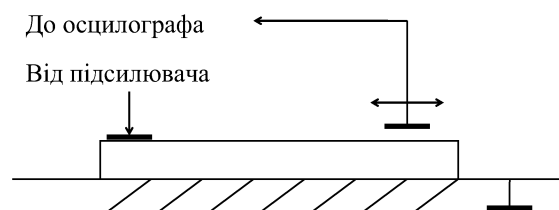


Рис. 2. Схема досліду для вимірювання $v_{ph}(f)$

гвинта. З реєструючого електрода сигнал подавали на один із входів двоканального осцилографа. На інший вхід осцилографа від ВЧ-генератора через калібрований фазозсувач подавали опорний сигнал. У режимі складання опорний та робочий сигнали реєстрували осцилографом. Це давало можливість визначити фазовий зсув робочого сигналу по відношенню до опорного сигналу і завдяки цьому вимірювати довжину акустичної хвилі λ (фіксувались два положення реєструючого електрода на зразку, для яких робочий сигнал був в одній і тій же фазі по відношенню до опорного сигналу). Фазову швидкість визначали як $v_{ph} = \lambda f$, де f – частота акустичних хвиль.

Спочатку було теоретично оцінено частоти народження (критичні частоти $f_{cr.t.}$) хвиль Лемба для окремих пластин по товщинних резонансах. Швидкості поширення відповідних пружних хвиль для цих розрахунків використовували із довідника [7]. Для п'яти перших мод $f_{cr.t.}$ наведено в табл. 1 (для пластини №1) та в табл. 2 (для пластини №2), де через QL і QT позначено хвилі, що народжуються як квазі-поздовжні і квазіпоперечні по товщині пластини відповідно.

Використовуючи теоретичні розрахунки для критичних частот народження було проведено експериментальні дослідження збудження відповідних мод. Кожна мода збуджувалась у певному вузькому діапазоні частот, близькому до $f_{cr.t.}$. Для прив'язки кожної моди до теоретичних розрахунків фіксували експериментальне значення критичної частоти ($f_{cr.e.}$), яке було найбільш наближене до $f_{cr.t.}$ відповідної моди. Експериментальні значення $f_{cr.e.}$ наведено також у табл. 1 і 2.

Як видно з таблиць, в області поблизу 10000 кГц в обох пластинах народжуються дві моди – QL_2 і QT_3 , частоти народження яких, внаслідок збігу ряду параметрів, лежать близько. Як правило, мода з нижчою частотою народження, з цієї пари, може існувати як зворотна [5].

Для дослідження обміну енергією між прямими модами була вибрана мода QT_1 , а між прямою і зворотною акустичними хвилями – моди QL_2 і QT_3 . В першу чергу було досліджено дисперсійні залежності $v_{ph}(f)$ для вибраних мод у кожній із пластин. Використана методика визначення фазової швидкості описа-

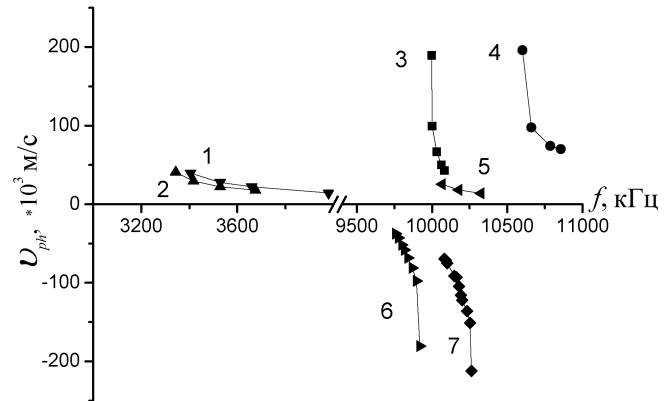


Рис. 3. Дисперсійні залежності – $v_{ph}(f)$ хвиль Лемба у пластинах LiNbO_3 ; 1 – мода QT_1 у пластині №1; 2 – мода QT_1 у пластині №2; 3 – мода QL_2 у пластині №2; 4 – мода QL_2 у пластині №1; 5 – відрізок $v_{ph}(f)$ моди QT_3 у пластині №1, де хвиля Лемба пряма; 6 – відрізок $v_{ph}(f)$ моди QT_3 у пластині №2, де хвиля Лемба зворотна; 7 – відрізок $v_{ph}(f)$ моди QT_3 у пластині №1, де хвиля Лемба зворотна

на в роботі [4]. Крім того, у нашій схемі експерименту (див. рис. 1) використовували калібрований фазозсувач, який дозволяв визначати не тільки величину, а і знак фазової швидкості. Для цього електрод реєстрації сигналу зміщували від збуджуючого електрода не на довжину хвилі, а на одну четверту довжини хвилі, залежно від того, збільшували чи зменшували, за допомогою фазозсувача, зсув фази ϕ на 90° для компенсації фазового зсуву сигналу, спричиненого зміщенням електрода, визначався знак v_{ph} . Двоканальний вхід осцилографа давав змогу порівнювати фази сигналу від зразка та сигналу від фазозсувача. Якщо $\phi = +90^\circ$, то v_{ph} має знак (+), а якщо $\phi = -90^\circ$, то v_{ph} має знак (-). Результати цих дослідів наведено на рис. 3.

Отримані дані остаточно доводять, що поблизу 3600 кГц можемо збуджувати тільки пряму, а поблизу 10000 кГц – як пряму, так і зворотну хвилю в обох пластинах, як і передбачалося. За рахунок відмінності частот народження відповідних мод в окремих пластинах, в частотному діапазоні 9950–10350 кГц, що добре видно з порівняння відповідних графіків на рис. 3, в одній з них може поширюватися мода QT_3 , яка завдяки різній груповій швидкості одночасно спо-

Т а б л и ц я 1. Критичні частоти хвиль Лемба для пластини LiNbO_3 товщиною 640 мкм

	QT_1	QL_1	QT_2	QL_2	QT_3
$f_{cr.t.}$	3508	5375	7016	10750	10524
$f_{cr.e.}$	3750	5420	7630	10600	10270

Т а б л и ц я 2. Критичні частоти хвиль Лемба для пластини LiNbO_3 товщиною 640 мкм

	QT_1	QL_1	QT_2	QL_2	QT_3
$f_{cr.t.}$	3450	5290	6900	10580	10350
$f_{cr.e.}$	3535	5320	7246	9950	9900

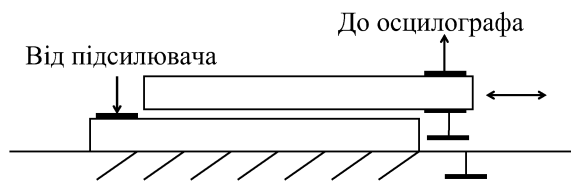


Рис. 4. Схема дослідження по передачі енергії між пластинами LiNbO_3

стерігалась як пряма (крива 5), так і зворотна (крива 7), а в іншій пластині тільки пряма QL_2 мода (крива 3). Це дає змогу без зайвих складностей вивчити наскільки ефективно може здійснюватись передача енергії між прямою та зворотною хвилями.

Далі досліджували систему з двох пластин. Збуджувались хвилі у пластині №1, а знімався сигнал з пластини №2. Схему експерименту наведено на рис. 4.

Дослідження виявили ефективну передачу енергії між прямими модами на частоті 3650 кГц (коефіцієнт передачі $k = 0,65$, $k = A_2/A_1$, де A_1 – амплітуда вихідного сигналу для випадку дослідження однієї пластини, а A_2 – амплітуда вихідного сигналу для випадку двох пластин). Ефективність збудження цієї моди у системі електрично зв'язаних хвилеводів практично така ж, як і в окремих пластинах.

Не так ефективно відбувалась передача енергії на частоті 10230 кГц (коефіцієнт передачі $k = 0,05$). Крім того, на цій частоті, з різною затримкою в часі, чітко спостерігались два окремі сигнали, що могли б відповідати прямій і зворотній хвилям, які одночасно збуджуються у пластині №1. У зв'язку з тим, що для зворотної хвилі групова та фазова швидкості спрямовані протилежно, сигнал, що відповідає зворотній хвилі повинен бути спрямованим до збуджуючого електрода, а сигнал, що відповідає прямій хвилі буде спрямований від збуджуючого електрода.

Для підтвердження того, що один із сигналів відповідає зворотній хвилі, а інший прямій, було проведено додаткові дослідження залежності часу затримки (τ) цих сигналів від відстані (L) між електродами, яка змінювалась зсувом однієї пластини відносно іншої. Результати цих дослідів наведено на рис. 5, де 1 – крива, яка відповідає зворотній, а 2 – прямій хвилі. З рис. 5 добре видно, що затримка сигналу 2 при збільшенні L збільшується, що зрозуміло. А затримка сигналу 1 при збільшенні L трохи зменшується. Така затримка сигналу 1 може бути пояснена складною поведінкою цього сигналу у випадку, якщо у пластині №1 акустична хвиля із прямої перетворюється у зворотну. Тоді, з одного боку, у пластині №2 затримка буде збільшуватись, а в системі з двох пла-

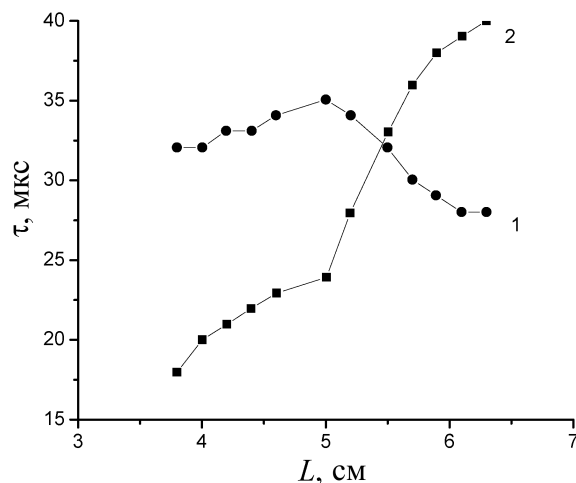


Рис. 5. Залежність часу затримки вихідних сигналів від відстані між електродами збудження і реєстрації хвиль Лемба в системі електрично зв'язаних пластин: 1 – затримка сигналів при передачі енергії між прямими модами; 2 – затримка сигналів при передачі енергії між прямою і зворотною модами

стин затримка буде зменшуватись. Це можна пояснити таким чином. Якщо припустити, що сигнал 1 на рис. 5 відповідає зворотній хвилі у пластині №1, то її групова швидкість буде спрямована у протилежний бік до фазової швидкості. І, якщо при переході з першої пластини у другу v_{ph} зберігає свій напрямок, то v_g буде спрямована у протилежний до реєструючого електрода бік. Це приведе до того, що зворотна хвиля буде реєструватись тільки як відбиття від протилежного (лівого) краю пластини. Тому шлях проходження прямої і зворотної хвиль у системі буде різним. Для випадку однакових по довжині (l) пластин і двох крайніх положень пластин одна на одній: 1) верхня пластина майже повністю накриває нижню пластину, $L \approx l$; 2) верхня пластина зсунута майже на край нижньої, $L \approx 2l$; для часу затримки зворотної хвилі можна записати:

$$t_2 = t_1 - \frac{l}{2} \left(\frac{1}{v_{gb}} - \frac{1}{v_{gd}} \right), \quad (1)$$

де t_1 і t_2 – час затримки зворотної хвилі в першому і другому випадках відповідно, v_{gb} і v_{gd} – групова швидкість зворотної і прямої хвиль відповідно. Як правило, $v_{gb} < v_{gd}$ [3], тому з (1) випливає, що $t_2 < t_1$. Це означає, що при зсуванні верхньої пластини в напрямку збільшення L час затримки сигналу 1 повільно зменшується. Це і спостерігається на експерименті.

1. L. Wang and F.G. Yuan, J. Phys. Chem. **67**, 1370 (2007).

2. B.C. Lee and W.J. Staszewski, *Smart Mater. Struct.* **16**, 249 (2007).
3. Бурлий П.В., Кучеров И.Я., Письма в ЖЭТФ **26**, 644 (1977).
4. П.В. Бурлий, П.П. Ильин, И.Я. Кучеров, *ЖТФ* **51**, 2196 (1981).
5. И.А. Бородина, Б.Д. Зайцева, И.Е. Кузнецова, Письма в ЖТФ **34**, 26 (2008).
6. Д.А. Андрусенко, П.В. Бурлий, И.Я. Кучеров, *УФЖ* **39**, 10 (1994).
7. А.А. Блистанов, В.С. Бондаренко, В.В. Чкалова и др., *Акустические кристаллы. Справочник*, под. ред. М.П. Шаскольской (Наука, Москва, 1982).

Одержано 26.09.09

ИССЛЕДОВАНИЕ ПЕРЕДАЧИ ЭНЕРГИИ ВОЛН ЛЕМБА
В ЭЛЕКТРИЧЕСКИ СВЯЗАННЫХ ПЛАСТИНАХ LiNbO_3

П.В. Бурлий, В.В. Козаченко, О.М. Жабитенко

Резюме

В работе исследовалась передача энергии между волнами Лемба в пьезоэлектрической слоистой структуре без акустического

контакта, в которой связь между отдельными слоями происходит через электрическое поле. Исследования показали эффективную передачу энергии между прямыми модами. Кроме того, в диапазоне частот, где могут существовать обратные волны, при передаче энергии с одной пластины в другую наблюдалось превращение прямой моды в обратную.

ENERGY TRANSFER BETWEEN LAMB WAVES
IN ELECTRICALLY COUPLED LiNbO_3 PLATES

P.V. Burliy, V.V. Kozachenko, O.M. Zhabitenko

Taras Shevchenko National University of Kyiv
(64, Volodymyrska Str., Kyiv 03127, Ukraine)

S u m m a r y

Energy transfer between Lamb waves in a layered piezoelectric structure without acoustic contact, in which separate layers are coupled by means of an electric field, has been studied. An effective energy transfer between direct modes has been found. In addition, a transformation of the direct mode into the backward one was observed at the energy transfer between the plates in the frequency range allowable for backward waves.