

УДК 534.2

ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНЕ ДОСЛІДЖЕННЯ ЗВОРОТНИХ ХВИЛЬ ЛЕМБА В ПЛАСТИНІ КРИСТАЛУ НІОБАТА ЛІТІЮ

П. П. Ільїн, кандидат фізико-математичних наук, доцент

Національний університет біоресурсів і природокористування України

e-mail: p_ilyin@ukr.net

Анотація. *Наведені результати експериментального дослідження частотних залежностей фазових та групових швидкостей зворотних хвиль Лемба, які мають протилежні напрями фазової та групової швидкостей, в пластині кристалу ніобата літію Y-зрізу. При поширенні хвиль вздовж осі Z досліджувалася мода Лемба, в якій на критичній частоті по товщині пластини вкладається півтори довжини поперечної хвилі. Також для цієї моди вимірювалися швидкості прямих хвиль, в яких напрями фазової та групової швидкостей співпадають. Збудження та реєстрація пружних хвиль здійснювалося за рахунок п'єзоелектричних властивостей матеріалу пластини. Визначення величини фазової швидкості хвиль проводилося шляхом вимірювання довжини хвилі Лемба фазовим методом змінної бази. Визначення величини групової швидкості проводилося фазовим методом змінної частоти. Вимірювання проводилися в пластині товщиною 0,75 мм на частотах $8 \div 9$ МГц. Для зворотних хвиль встановлена наявність сильної дисперсії фазової швидкості, величина якої змінювалася в межах $18,5 \cdot 10^3 \div 325 \cdot 10^3$ м/с при незначній дисперсії групової швидкості. Зроблений висновок, що досліджена мода хвиль Лемба повинна при певній частоті мати нульову групову швидкість при скінченній фазовій швидкості.*

Ключові слова: *хвилі Лемба, зворотні хвилі*

Актуальність. *Зворотні пружні хвилі, які мають протилежно спрямовані фазову та групову швидкості, є цікавими об'єктом досліджень через свої дещо незвичайні властивості [1]. Вони також мають перспективи для застосування в акустoeлектроніці та неруйнівному контролі, оскільки можуть мати широкий діапазон зміни значень фазової швидкості при незначній дисперсії групової швидкості.*

Аналіз останніх досліджень та публікацій. Останнім часом значна увага приділяється пружним хвилям, які мають нульову групову швидкість та скінченну фазову швидкість [2-5]. Такі хвилі є перехідними між зворотними хвилями і прямими хвилями (в яких напрями фазової та групової швидкостей співпадають). Хвилі з нульовою груповою швидкістю можуть існувати при частотах, менших за критичні частоти деяких мод. Їх пропонується використовувати для вирішення широкого кола задач, зокрема для вимірювання пружних характеристик матеріалів, неруйнівного контролю, створення нових акустoeлектронних приладів. Необхідною умовою існування хвилі з нульовою груповою швидкістю є існування зворотної хвилі. Тому вивчення зворотних пружних хвиль є необхідним для з'ясування існування та властивостей хвиль з нульовою груповою швидкістю.

Мета дослідження – встановлення існування зворотних хвиль Лемба та частотних залежностей їх фазової та групової швидкостей в пластинах п'єзоелектричного матеріалу ніобата літію LiNbO_3 Y-зрізу. Цей матеріал широко використовується в акустoeлектроніці через сильні п'єзоелектричні властивості.

Матеріали та методи дослідження. Досліджувалося розповсюдження хвиль Лемба в пластині ніобата літію. Пластина була орієнтована перпендикулярно до осі Y і мала товщину $2h=750$ мкм. Хвилі Лемба поширювалися вздовж осі Z. Досліджувалася четверта мода Лемба, в якій на критичній частоті по товщині пластини вкладається півтори довжини поперечної хвилі. Також для цієї моди вимірювалися швидкості прямих хвиль, в яких напрями фазової та групової швидкостей співпадають. Теоретичні розрахунки вказували на можливість існування зворотних хвиль [6].

Збудження та реєстрація пружних хвиль здійснювалися з використанням п'єзоелектричних властивостей матеріалу пластини за методикою, яка застосовувалася в роботі [7]. Високочастотна напруга для збудження хвиль

Лемба прикладалася до металевих електродів, нанесених симетрично на протилежні поверхні пластини. Поширення хвиль Лемба у п'єзоелектричному матеріалі супроводжується високочастотним електричним полем, тому реєстрація хвиль здійснювалася рухомим електродом, який міг пересуватися по поверхні пластини за допомогою мікрометричного гвинта. Дослідження проводилися в імпульсному режимі в частотному діапазоні $8 \div 9$ МГц при тривалості радіоімпульсів $\sim 10^{-5}$ с. На цих частотах використана методика дозволяла збуджувати біжучі хвилі.

Для вимірювань швидкостей використовувалися фазові методи [7, 8].

Фазова швидкість v_{ϕ} – швидкість переміщення фази хвилі у певному напрямі. У випадку гармонічної монохроматичної хвилі $v_{\phi} = \frac{\omega}{k} = f\lambda$, де $k = \frac{2\pi}{\lambda}$ – хвильове число, λ – довжина хвилі, ω – циклічна частота, f – частота хвилі. З цього означення випливає що для вимірювання v_{ϕ} необхідно виміряти f та λ хвилі.

При вимірюванні v_{ϕ} фазовий метод змінної бази ґрунтується на тому, що зміна відстані L між джерелом хвиль та приймачем викликає зміну часу поширення хвилі та фази коливань на приймачі. Зміні відстані на λ відповідає зміна фази на 2π . Як опорний сигнал для фазового детектора використовується вихідний сигнал високочастотного генератора, який збуджує хвилю. Найбільшу точність вимірювання зміни фази забезпечує компенсаційна схема, яка містить вимірювальний фазообертач. Як фазовий детектор використовувався двоканальний осцилограф, який працював у режимі додавання сигналів. Відносна похибка визначення довжини хвилі і, відповідно, величини фазової швидкості, не перевищувала 1 %.

Оскільки напрям перенесення енергії хвилями співпадає з напрямом групової швидкості, насправді в експериментах мають справу з хвилями, які переносять енергію від джерела пружних хвиль і тому мають додатну групову

швидкість. Тоді зворотні хвилі мають від'ємну фазову швидкість, тобто спрямовану до джерела хвиль.

Напряж, тобто знак фазової швидкості, визначався при зміні відстані L між джерелом хвиль та приймачем на величину, напевне меншу половини довжини хвилі. Наприклад, при збільшенні відстані різниця фаз між опорним сигналом та пружною хвилею, що пройшла відстань L , зростає для прямої хвилі і зменшується для зворотної хвилі. Знак фазового зсуву визначався за допомогою фазообертача, який був включений до компенсаційної схеми.

Для визначення величини групової швидкості v_g можна вимірювати час, за який хвильовий пакет (радіоімпульс) проходить відстань L . При наявності дисперсії у середовищі форма імпульсу змінюється і кількісна оцінка його переміщення може стати неоднозначною. Взагалі, групова швидкість визначає швидкість переміщення максимуму радіоімпульсу, але не завжди швидкість переміщення максимуму радіоімпульсу є груповою швидкістю хвилі. Тому відносна похибка цього методу складала у наших вимірюваннях близько 10 %.

Для безпосереднього вимірювання v_g ми використали фазовий метод змінної частоти [8]. Оскільки фаза φ сигналу на приймачі $\varphi = \frac{L}{\lambda} 2\pi = Lk$, то

$$v_g = \frac{\partial \omega}{\partial k} = \frac{\partial \omega}{\partial \varphi} \frac{\partial \varphi}{\partial k} = \frac{\partial \omega}{\partial \varphi} L \approx \frac{\Delta \omega}{\Delta \varphi} L = \frac{2\pi}{\Delta \varphi} \Delta f L$$
 і вимірювання частотної залежності

фази сигналу на приймачі дозволяє виміряти v_g . Точність вимірювання групової швидкості цим методом досягала 1%.

Результати досліджень та їх обговорення. Результати вимірювань частотних залежностей фазових та групових швидкостей зворотної та прямої хвиль четвертої моди Лемба наведені на рис. 1 та 2. У цій моді на критичній частоті f_c по товщині пластини вкладається 1,5 довжини поперечної хвилі. Наведені залежності швидкостей від безрозмірного параметру fh , де f – частота хвилі, h – половина товщини пластини. Фазова швидкість зворотної хвилі має

сильну частотну дисперсію і її величина у дослідженій області частот змінюється в межах $18,5 \cdot 10^3 \div 325 \cdot 10^3$ м/с (рис. 1). Ми вважали, що для зворотної хвилі $v_\phi < 0$, оскільки її фазова швидкість спрямована до джерела хвиль. Критична частота відповідала значенню $f_c h = 3,331 \cdot 10^3$ м/с і була виміряна за товщинним резонансом пластини. Для прямої хвилі $v_\phi > 0$, оскільки її фазова швидкість спрямована від джерела хвиль. Величина фазової швидкості прямої хвилі у дослідженій області частот була в межах $10,0 \cdot 10^3 \div 10,7 \cdot 10^3$ м/с.

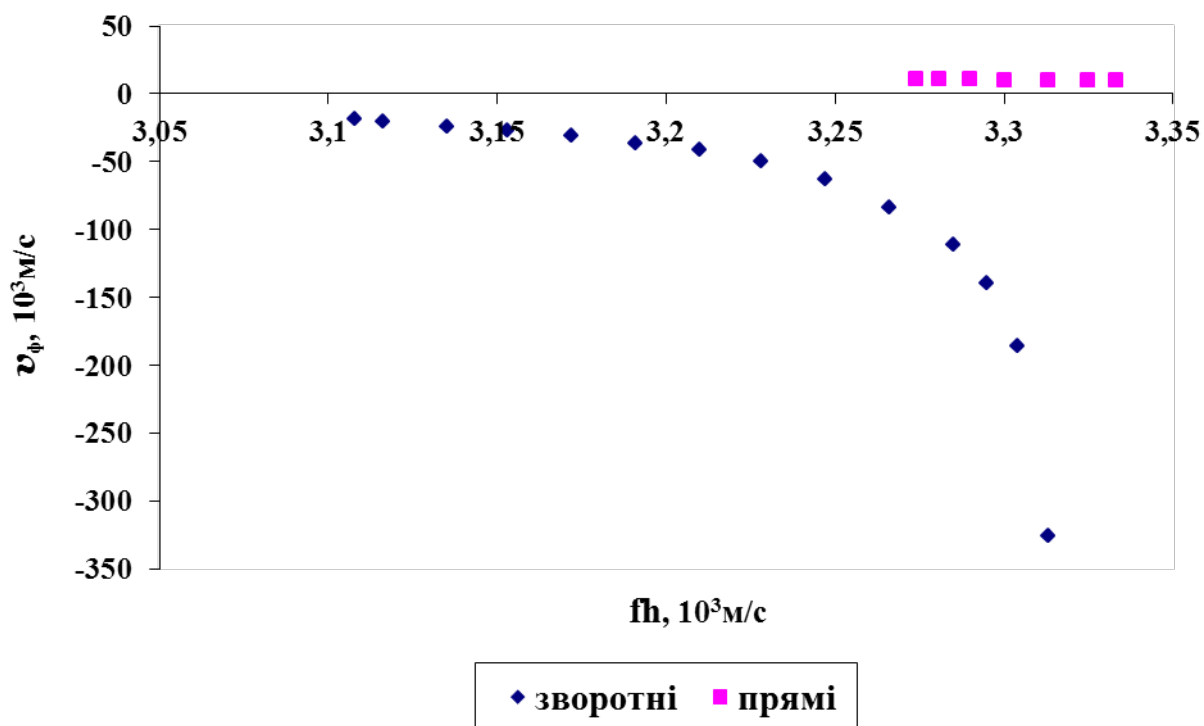


Рис.1. Дисперсійні залежності фазових швидкостей v_ϕ зворотних та прямих хвиль четвертої моди Лемба в пластині ніобата літію

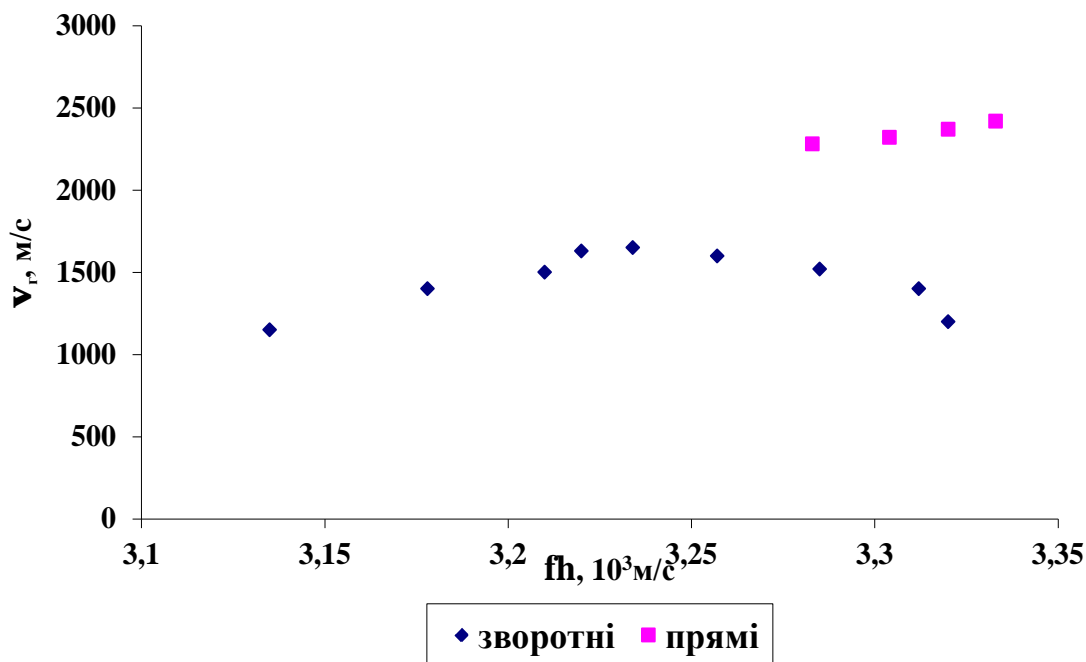


Рис.2. Дисперсійні залежності групових швидкостей v_g зворотних та прямих хвиль четвертої моди Лемба в пластині ніобата літію

Виміряні значення групової швидкості прямих та зворотних хвиль наведені на рис. 2. Для обох типів хвиль групова швидкість $v_g > 0$, оскільки її напрям співпадає з напрямом перенесення енергії від джерела хвиль. Групова швидкість зворотної хвилі має незначну частотну дисперсію. Ця властивість може бути використана для зменшення дисперсійних викривлень при поширенні хвильових пакетів.

Висновки і перспективи. Експериментально підтверджено, що четверта мода Лемба в пластині ніобата літію, в якій на критичній частоті вкладається півтори довжини поперечної хвилі, в певному діапазоні частот є зворотною хвилею, тобто має протилежно спрямовані фазову та групову швидкості. Тому на певній частоті хвилі, які відповідають цій моді, можуть мати нульову групову швидкість при скінченній величині фазової швидкості. Зворотна хвиля має

сильну частотну дисперсію фазової швидкості і незначну дисперсію групової швидкості.

Одержані результати можуть бути корисними для вдосконалення або створення нових акустоелектронних приладів, які використовують зворотні хвилі та хвилі з нульовою груповою швидкістю.

Список використаних джерел

1. Гринченко В. Т. Гармонические колебания и волны в упругих телах [Текст] / В. Т. Гринченко, В. В. Мелешко. – К.: Наукова думка, 1981. – 284 с.
2. Clorennec D. Local and noncontact measurements of bulk acoustic wave velocities in thin isotropic plates and shells using zero group velocity Lamb modes [Text] / D. Clorennec, C. Prada, D. Royer // J. Appl. Phys. – 2007. – Vol. 101, Issue 3, 034908. doi: 10.1063/1.2434824.
3. Grünsteidl C. Inverse characterization of plates using zero group velocity Lamb modes [Text] / C. Grünsteidl, T. W. Murrayb, T. Berera, I. A. Veres // Ultrasonics. – 2016. – Vol. 65, issue 2. – P. 1–4. doi: 10.1016/j.ultras.2015.10.015.
4. Yantchev V. Thin-film zero-group-velocity Lamb wave resonator [Text] / V. Yantchev, L. Arapan, I. Katardjiev, V. Plessky // Appl. Phys. Lett. – 2011.– Vol. 99, issue 3, 033505. doi: 10.1063/1.3614559
5. Кузнецова И. Е. Чисто сдвиговые обратные волны в пьезоэлектрических пластинах ниобата калия X- и Y-срезов [Текст] / И. Е. Кузнецова, В. Г. Можаяев, И. А. Недоспасов // Радиотехника и электроника. – 2016. – Т. 61, №11. – С. 1122 – 1131.
6. Григорьевский В. И. Расчет дисперсионных кривых мод Лэмба в пластинах ниобата лития YZ-среза [Текст] / В. И. Григорьевский, А. И. Козлов, В. П. Плесский, В.П. Терешков // Акустический журнал. –1985. – Т.31, №1. –С. 42-44.
7. Бурлий П. В. Обратные упругие волны в пластинах [Текст]/ П. В. Бурлий, И. Я. Кучеров // Письма в ЖЭТФ. –1977. –Т. 26, вып. 9. –.644–647.
8. Бражников Н. И. Ультразвуковая фазометрия [Текст]/ Н. И. Бражников.– М.: Энергия, 1968.–272 с.

References

1. Grinchenko V. T., Meleshko V.V. (1981). Garmonicheskie kolebaniya i volny v uprugikh telakh [Harmonic vibrations and waves in elastic bodies]. Kiev: Naukova Dumka, 284.
2. Clorennec, D., Prada, C., Royer, D. (2007). Local and noncontact measurements of bulk acoustic wave velocities in thin isotropic plates and shells using

zero group velocity Lamb modes. J. Appl. Phys., 101(3), 034908. doi: 10.1063/1.2434824.

3. Grünsteidl, C., Murray, T. W., Berera, T., Veres, I. A. (2016). Inverse characterization of plates using zero group velocity Lamb modes. Ultrasonics, 65 (2), 1–4. doi: 10.1016/j.ultras.2015.10.015.

4. Yantchev, V., Arapan, L., Katardjiev, I., Plesky V. (2011). Thin-film zero-group-velocity Lamb wave resonator. Appl. Phys. Lett. 99 (3), 033505. doi: 10.1063/1.3614559

5. Kuznetsova, I. E., Mozhaev, V. G., Nedospasov, I., A. (2016). Pure shear backward waves in the X-cut and Y-cut piezoelectric plates of potassium niobate. Radio Engineering and Electronics, 61 (11), 1122–1131.

6. Grigor'evskii, V. I., Kozlov A. I., Plesskii, V. P., Tereshkov, V. P. (1985). Raschet dispersionnih krivih mod Lemba v plastinakh niobata litiya YZ-sreza [Calculation of Lamb mode dispersion curves in YX-cut lithium niobate]. Acoustical Journal, 31 (1), 42–44.

7. Burlii, P. V., Kucherov I. Ya. (1977). Obratnie uprugie volni v plastinakh [Backward elastic waves in plates]. Letters to Journal of Experimental and Theoretical Physics, 26 (9), 644–647.

8. Brazhnikov, N. I. (1968). Ul'trazvukovaya fazometriya [Ultrasonic phaseometry]. Moscow, Russia: Energiya, 228.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ОБРАТНЫХ ВОЛН ЛЕМБА В ПЛАСТИНЕ КРИСТАЛЛА НИОБАТА ЛИТИЯ

П. П. Ильин

Аннотация. Приведены результаты экспериментального исследования частотных зависимостей фазовых и групповых скоростей обратных волн Лэмба в пластине кристалла ниобата лития Y-среза. Обратные волны имеют противоположные направления фазовой и групповой скоростей. При распространении волн вдоль оси Z исследовалась мода Лэмба, в которой на критической частоте по толщине пластины укладывается полторы длины поперечной волны. Также для этой моды измерялись скорости прямых волн, в которых направления фазовой и групповой скоростей совпадают. Возбуждение и регистрация упругих волн осуществлялось за счет пьезоэлектрических свойств материала пластины. Определение величины фазовой скорости волн проводилось путем измерения длины волны Лэмба фазовым методом переменной базы. Определение величины групповой скорости проводилось фазовым методом переменной частоты. Измерения проводились в пластине толщиной 0,75 мм на частотах 8 ÷ 9 МГц. Для обратных волн установлено наличие сильной дисперсии фазовой скорости, величина которой изменялась в пределах $18,5 \cdot 10^3 \div 325 \cdot 10^3$ м/сек при незначительной дисперсии групповой скорости. Сделан вывод, что исследованная мода волн Лэмба должна при

определенной частоте иметь нулевую групповую скорость при конечной фазовой скорости.

Ключевые слова: волны Лэмба, обратные волны

EXPERIMENTAL STUDY OF BACKWARD LAMB WAVES IN LITHIUM NIOBATE CRYSTAL PLATE

P. Ilyin

Abstract. *The results of the experimental research of frequency dependency of the phase and group velocities of backward Lamb waves which have opposite directions of the phase and group velocities in Y-cut plate of lithium niobate crystal are presented. Under wave propagation along the Z axis the fourth Lamb mode was studied. The fourth Lamb mode has the cutoff frequency by which the plate thickness equaled to one and a half of the shear wavelength. Velocities of direct waves for this mode were measured, which directions of phase and group velocities coincided. The excitation and registration of elastic waves were carried out with using piezoelectric properties of the plate material. The determination of the phase velocity of the waves was performed by measuring the length of the Lamb waves with the phase method of variable base. The determination of the group velocity was carried out with the phase method of variable frequency. The measurements were carried out in the plate which had the thickness 0.75 mm for frequencies 8 ÷ 9 MHz. For backward waves the presence of strong dispersion of the phase velocity was found, the value of phase velocity varied $18.5 \cdot 10^3 \div 325 \cdot 10^3$ m/s with a slight dispersion of the group velocity. It is concluded that the studied mode of the Lamb wave at the certain frequency have zero group velocity when the phase velocity is finite.*

Key words: *Lamb waves, backward waves*