

diameter  $d_0 = 0,015$  m, located in 5 rows with a uniform step  $S_1 = 0.035$  m. This configuration of the jet system will provide an increase in the heat transfer coefficients by 40% with a hydraulic resistance increase of no more than 20 %

**Keywords:** *heat-mass exchange, hydraulic resistance, jet blown, nozzle plate*

УДК: 534.2

## **ЗВОРОТНІ ХВИЛІ ЛЕМБА У ПЛАСТИНІ КРИСТАЛУ CDS**

**П. П. ІЛЬІН**, кандидат фізико-математичних наук, доцент  
*E-mail:* p\_ilyin@ukr.net

**Анотація.** *Наведено результати експериментального дослідження частотної залежності фазової швидкості зворотної хвилі Лемба в пластині кристалу Cds. Зворотні хвилі мають протилежні напрями фазової та групової швидкостей. При поширенні хвиль уздовж осі шостого порядку досліджувалася симетрична мода Лемба першого порядку, в якій на критичній частоті по товщині пластини вкладається одна довжина поперечної хвилі. Вимірювалася частотна залежність фазової швидкості зворотних хвиль і також прямих хвиль, в яких напрями фазової та групової швидкостей збігаються.*

*Реєстрація хвиль здійснювалася за рахунок п'єзоелектричних властивостей матеріалу пластини. Зворотні хвилі збуджувалися перетворювачем з п'єзоелектричної кераміки. Визначення величини фазової швидкості хвиль проводилося шляхом вимірювання довжини хвилі Лемба фазовим методом змінної бази. Вимірювання проводилися в пластині завтовшки 0,66 мм на частотах  $\sim 2,7$  МГц. Величина фазової швидкості зворотних хвиль, унаслідок дисперсії, змінювалася в межах  $15 \cdot 10^3 \div 29 \cdot 10^3$  м/с. Доведено існування зворотної пружної хвилі Лемба в пластині Cds. Це може бути використано для реалізації взаємодії зворотних пружних хвиль та пружних хвиль з нульовою груповою швидкістю з носіями електричного заряду у п'єзоелектричному напівпровіднику.*

**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 акустоелектроніці та дефектоскопії, оскільки можуть мати широкий діапазон зміни значень фазової швидкості при незначній дисперсії групової швидкості. Останнім часом робляться спроби використовувати

пружні хвилі з нульовою груповою швидкістю та скінченною фазовою швидкістю. Такі хвилі є перехідними між зворотними хвилями і прямими хвилями (в яких напрями фазової та групової швидкостей збігаються). Їх пропонується використовувати для вирішення різних проблем, зокрема для створення нових акустоелектронних приладів [2].

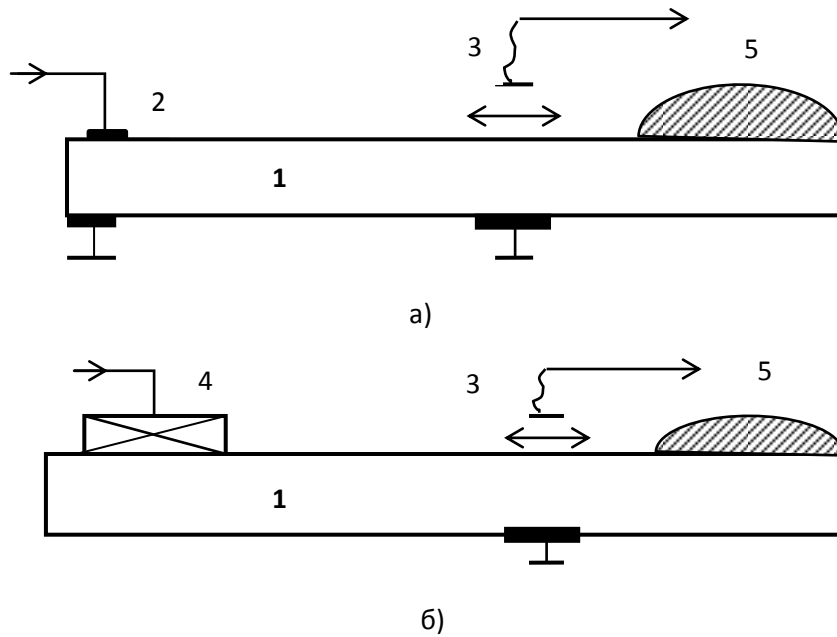
Необхідною і достатньою умовою існування хвилі з нульовою груповою швидкістю є існування зворотної хвилі. На сьогодні існування зворотних хвиль в п'єзоелектричних матеріалах експериментально підтверджено лише для трьох мод Лемба в  $\text{LiNbO}_3$  [3–5] та для однієї моди Лемба в  $\text{Bi}_{12}\text{GeO}_{20}$  [6], які є діелектриками. У п'єзоелектричних напівпровідниках можна використати взаємодію пружних коливань з носіями електричного заряду. Але у таких матеріалах зворотні хвилі досі не спостерігалися.

**Мета дослідження** – встановлення існування зворотних хвиль Лемба та частотної залежності їх фазової швидкості в пластині п'єзоелектричного напівпровідника сульфід кадмію  $\text{CdS}$ . Цей матеріал використовується в акустоелектронних приладах.

**Матеріали і методи дослідження.** Досліджувалося розповсюдження хвиль Лемба в пластині  $\text{CdS}$ . Пластина була орієнтована вздовж осі шостого порядку [001] і мала товщину  $2h=0,66$  мм. Хвилі Лемба поширювалися вздовж осі [001]. Досліджувалася симетрична мода Лемба першого порядку  $s_1$ , в якій на критичній частоті по товщині пластини вкладається одна довжина поперечної хвилі зі зміщеннями в напрямі [001]. Для цієї моди вимірювалися фазові швидкості як зворотних, так і прямих хвиль (в яких напрями фазової та групової швидкостей збігаються). Теоретичні розрахунки, наведені в літературі [7], свідчать про можливість існування зворотних хвиль моди  $s_1$  у пластині  $\text{CdS}$ .

Схема експерименту наведена на рис. 1. Для збудження прямої хвилі Лемба високочастотна напруга прикладалася до металевих електродів 2, нанесених симетрично на протилежні поверхні пластини  $\text{CdS}$  1 (рис. 1, а). Для збудження зворотної хвилі був використаний п'єзокерамічний перетворювач 4 (рис. 1, б) з резонансною частотою 2,75 МГц, виготовлений з кераміки ЦТБС-3, розмірами  $16 \times 4,5 \times 0,38$  мм<sup>3</sup> із напрямом поляризації вздовж середнього розміру. При прикладанні змінної напруги в напрямі найменшого розміру у п'єзоелементі виникали поперечні коливання. На поверхні пластини створювалися зміщення в напрямі [001].

Хвилі у п'єзоелектричному матеріалі супроводжуються високочастотним електричним полем, тому реєстрація хвиль здійснювалася рухомим електродом 3, який міг пересуватися поверхнею пластини за допомогою мікрометричного гвинта; ця методика застосовувалася в працях [3–5]. Поглинач пружних хвиль 5, виготовлений зі стеарину, запобігав виникненню відбитих хвиль. Дослідження проводилися в імпульсному режимі в частотному діапазоні  $2,64 \div 2,80$  МГц при тривалості радіоімпульсів  $\sim 3 \cdot 10^{-4}$  с.



**Рис. 1. Схема збудження та вимірювання швидкості прямих (а) та зворотних (б) пружних хвиль**

Фазова швидкість хвилі  $v$  – це швидкість переміщення фази хвилі у певному напрямі. У випадку гармонічної хвилі  $v = \frac{\omega}{k} = f\lambda$ ,

де  $k = \frac{2\pi}{\lambda}$  – хвильове число;

$\lambda$  – довжина хвилі;

$\omega = 2\pi f$  – циклічна частота;

$f$  – частота хвилі.

З цього випливає, що для вимірювання  $v$  необхідно виміряти  $f$  та  $\lambda$ .

Для вимірювання  $v$  було використано фазовий метод змінної бази [8]. Він ґрунтується на тому, що зміна відстані  $L$  між джерелом хвиль та приймачем викликає зміну часу поширення хвилі та, відповідно, зміну фази коливань на приймачі. Зміні відстані на  $\lambda$  відповідає зміна фази на  $2\pi$ . Як опорний сигнал для фазового детектора використовується вихідний сигнал високочастотного генератора, який збуджує хвилю. Вимірювання зміни фази з точністю до  $1^\circ$  забезпечувала компенсаційна схема, яка містила вимірювальний фазообертач. Як фазовий детектор використовувався двоканальний осцилограф, який працював у режимі додавання сигналів. Відносна похибка визначення довжини хвилі й величини фазової швидкості, не перевищувала 1 %.

В експериментальних дослідженнях хвилі переносять енергію від джерела хвиль і мають додатну групову швидкість. Тоді зворотні хвилі мають від'ємну фазову швидкість, тобто спрямовану до джерела хвиль.

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

**Результати досліджень та їх обговорення.** На рис. 2 наведені експериментальні результати вимірювань частотних залежностей фазових швидкостей прямої та зворотної хвиль симетричної моди Лемба першого порядку  $s_1$ .

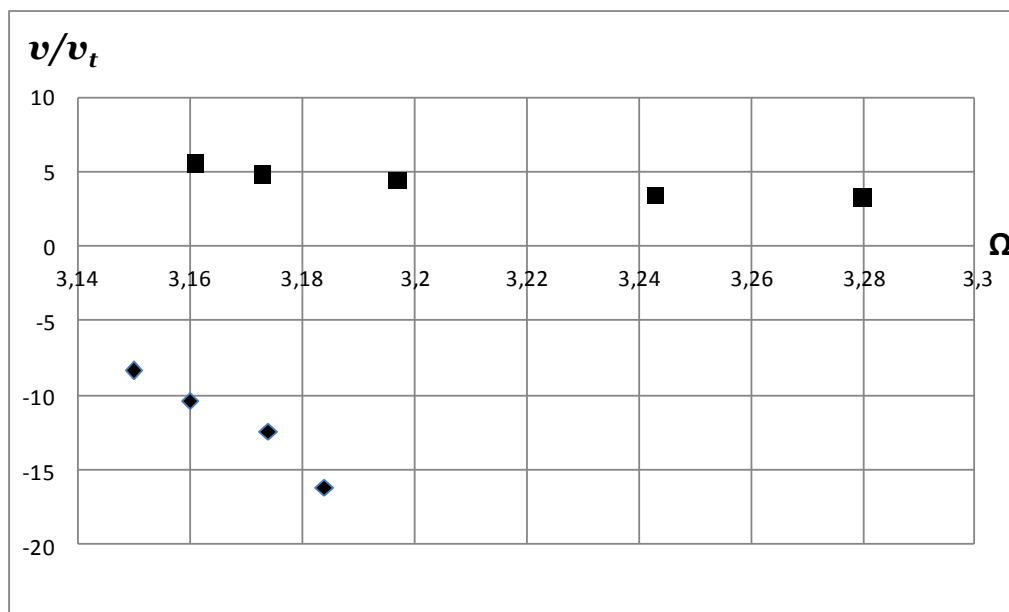
Наведені залежності безрозмірної швидкості  $v/v_t$  від безрозмірної частоти  $\Omega = k_t h = \frac{\omega}{v_t} h = \frac{2\pi f}{v_t} h$ ,

де  $f$  – частота хвилі;

$h$  – половина товщини пластини;

$v_t = 1,76 \cdot 10^3$  м/с – швидкість поперечних хвиль у напрямках, перпендикулярних до осі шостого порядку.

Для зворотної хвилі  $v < 0$ , оскільки її фазова швидкість спрямована до джерела хвиль. Для прямої хвилі  $v > 0$ , оскільки її фазова швидкість спрямована від джерела хвиль. Критична частота  $f_c = 2,68$  МГц відповідала значенню  $\Omega_c = 3,196$  [7]. Величина фазової швидкості зворотних хвиль внаслідок дисперсії змінювалася в межах  $15 \cdot 10^3 \div 29 \cdot 10^3$  м/с. У проведених дослідженнях зворотних хвиль мінімальні втрати на подвійне перетворення становили 75 дБ на частоті 2,66 МГц.



**Рис. 2.** Дисперсійні залежності фазової швидкості  $v$  зворотних та прямих хвиль симетричної моди Лемба першого порядку в пластині CdS

**Висновки і перспективи.** Експериментально підтверджено існування зворотних пружних хвиль Лемба в пластині кристалу CdS. З цього випливає існування пружних хвиль з нульовою груповою швидкістю в таких пластинах. Оскільки CdS є п'єзоелектричним напівпровідником, це робить можливою реалізацію взаємодії зазначених хвиль з носіями електричного заряду та використання цієї взаємодії в акустоелектронних приладах.

### Список літератури

1. Гринченко В. Т. Гармонические колебания и волны в упругих телах / В. Т. Гринченко, В. В. Мелешко. – К. : Наукова думка, 1981. – 284 с.
2. Yantchev, V. Thin-film zero-group-velocity Lamb wave resonator / V. Yantchev, L. Arapan, I. Katardjiev, V. Plessky // *Appl. Phys. Lett.* – 2011. – Vol. 99, issue 3, 033505. doi: 10.1063/1.3614559.
3. Бурлий П. В. Обратные упругие волны в пластинах / П. В. Бурлий, И. Я. Кучеров // *Письма в ЖЭТФ.* – 1977. – Т. 26, вып. 9. – С. 644–647.
4. Одновременное возбуждение и исследование обратных и прямых упругих волн / П. В. Бурлий, Ю. П. Гололобов, И. Я. Кучеров, С. Х. Рожко // *Украинский физический журнал.* – 1979. – Т. 29, № 12. – С. 1905–1907.
5. Ільїн П. П. Експериментальне дослідження зворотних хвиль Лемба у пластині кристалу ніобата літію / П. П. Ільїн // *Енергетика та автоматика.* – 2017. – № 4. – С. 181–189.
6. Бурлий П. В. Обратные волны Лэмба в пьезоэлектриках кубической симметрии / П. В. Бурлий, П. П. Ильин, И. Я. Кучеров // *Украинский физический журнал.* – 1987. – Т. 32, № 3. – С. 440–443.
7. Бурдакова А. В. Влияние пьезоэффекта на распространение волн Лэмба в кристаллах CdS, CdSe и ZnO / А. В. Бурдакова, И. Я. Кучеров, В. М. Перга // *Украинский физический журнал.* – 1973. – Т. 18, № 6. – С. 965–972.
8. Бражников Н. И. Ультразвуковая фазометрия / 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. Yantchev, V., Arapan, L., Katardjiev, I., Plessky V. (2011). Thin-film zero-group-velocity Lamb wave resonator. *Appl. Phys. Lett.* 99 (3), 033505. doi: 10.1063/1.3614559.
3. Burlii, P. V., Kucherov I. Ya. (1977). *Obratnie uprugie volni v plastinah* [Backward elastic waves in plates]. *Letters to Journal of Experimental and Theoretical Physics*, 26 (9), 644–647.
4. Burlii, P. V., Gololobov, Yu. P., Kucherov, I. Ya., Rozhko, S. Kh. (1979). *Odnovremennoe vozvuzhdenie i issledovanie obratnyh i pryamyh uprugih voln* [Simultaneous excitation and investigation of backward and forward elastic waves]. *Ukrainian journal of physics*, 29 (12), 1905–1907.
5. Ільїн, П. П. (2017). *Eksperimental'ne doslidzhennya zvorotnikh khvil' Lemba u plastini kristalu niobata litiju*. [Experimental investigation of backward Lamb waves in plate of lithium niobate crystal]. *Energetics and automatics*, 4, 181–189.
6. Burlii, P. V., Ільїн, П. П., Кучеров, І. Я. (1987). *Obratnye volny Lemba v p'ezoelektrikakh kubicheskoi simmetrii* [Backward Lamb waves in piezoelectric with cubic symmetry]. *Ukrainian journal of physics*, 32 (3), 440–443.

7. Burdakova, A. V., Kucherov, I. Ya., Perga, V. M. (1973). Vliyaniye p'ezoeffekta na rasprostraneniye voln Lemba v kristallakh CdS, CdSe i ZnO [The influence of piezoeffect on Lamb waves propagation in CdS, CdSe and ZnO crystals]. Ukrainian journal of physics, 18 (6), 965–972.

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

## ОБРАТНЫЕ ВОЛНЫ ЛЭМБА В ПЛАСТИНЕ КРИСТАЛЛА CDS

П. П. Ильин

**Аннотация.** Приведены результаты экспериментального исследования частотной зависимости фазовой скорости обратных волн Лэмба в пластине кристалла Cds. Обратные волны имеют противоположные направления фазовой и групповой скоростей. При распространении волн вдоль оси шестого порядка была исследована симметричная мода Лэмба первого порядка, у которой на критической частоте по толщине пластины укладывается одна длина поперечной волны. Измерялась частотная зависимость фазовой скорости обратных волн, а также прямых волн, у которых направления фазовой и групповой скоростей совпадают.

Регистрация волн осуществлялась за счет пьезоэлектрических свойств материала пластины. Обратные волны возбуждались преобразователем из пьезоэлектрической керамики. Определение величины фазовой скорости волн проводилось путем измерения длины волны Лэмба фазовым методом переменной базы. Исследования проводились в пластине толщиной 0,66 мм на частотах ~2,7 МГц. Величина фазовой скорости обратных волн вследствие дисперсии изменялась в пределах  $15 \cdot 10^3 \div 29 \cdot 10^3$  м/с. Доказано существование обратной упругой волны Лэмба в пластине Cds. Это может быть использовано для реализации взаимодействия обратных упругих волн и упругих волн с нулевой групповой скоростью с носителями электрического заряда в пьезоэлектрическом полупроводнике.

**Ключевые слова:** волны Лэмба, обратные волны

## BACKWARD LAMB WAVES IN CDS CRYSTAL PLATE

P. P. Il'in

**Abstract.** The results of the experimental research of frequency dependency of the phase velocity of backward Lamb wave in CdS crystal plate are presented. Those waves have opposite directions of the phase and group velocities. Under wave propagation along axis of sixth order the symmetrical Lamb mode of first order was investigated. The one length of shear wave fit the plate thickness at cutoff frequency of this mode.

For this mode the frequency dependence of phase velocity of backward wave, and also of forward wave (its directions of phase and group velocities

coincide), were measured. Detecting of waves was carried out with using piezoelectric properties of the plate material. Excitation of backward Lamb wave was excited with piezoelectric ceramic transducer. The determination of the phase velocity of the waves was performed by measuring of the wavelength with the phase method of variable base. The measurements were carried out in plate with thickness 0,66 mm at frequencies ~ 2,7 MHz. The observed value of phase velocity of backward wave was varied in region  $15 \cdot 10^3 \div 29 \cdot 10^3$  m/s. The existence of backward Lamb wave in CdS plate is proved. This fact may be used to realize the interaction of charge carriers with backward elastic waves and elastic waves with zero group velocity.

**Keywords:** Lembe wave, reverse waves

УДК 535.372

**КОМПОЗИТИ НА ОСНОВІ МІКРОКРИСТАЛІЧНОЇ ЦЕЛЮЛОЗИ  
ТА ЛЮМІНЕСЦЕНТНИХ ОКСИДІВ:  
ВЛАСТИВОСТІ Й НАПРЯМ ЗАСТОСУВАННЯ**

**В. В. БОЙКО**, кандидат фізико-математичних наук, доцент

**В. П. ЧОРНИЙ**, кандидат фізико-математичних наук

*Національний університет біоресурсів  
і природокористування України*

**В. А. БАРБАШ**, кандидат хімічних наук, доцент

**О. В. ЯЩЕНКО**, аспірант

*Національний університет «Київський  
політехнічний інститут» ім. Ігоря Сікорського*

**О. М. АЛЕКСЄЄВ**, кандидат фізико-математичних наук,  
старший науковий співробітник

**Ю. Є. ГРАБОВСЬКИЙ**, кандидат фізико-математичних наук, доцент

**С. Г. НЕДІЛЬКО**, доктор фізико-математичних наук,  
старший науковий співробітник

**Є. О. РЕЗНИЧЕНКО**, студент

**В. П. ЩЕРБАЦЬКИЙ**, провідний інженер

*Київський національний університет імені Тараса Шевченка*

**М. С. НЕДЄЛЬКО**, провідний інженер

*Інститут електрозварювання ім. О. Є. Патона НАН України*

*E-mail: vchornii@gmail.com*

**Анотація.** Подано результати люмінесцентно-спектроскопічних досліджень композитів, що складаються з мікрокристалічної целюлози та оксидів –  $AgNO_3$ ,  $K_2Eu(PO_4)(MoO_4)$  та  $LaVO_4:Sm$ . Встановлено, що

---

© В. В. Бойко, В. П. Чорний, В. А. Барбаш, О. В. Ященко, О. М. Алексєєв,  
Ю. Є. Грабовський, С. Г. Неділько, Є. О. Резниченко, В. П. Щербацький,  
М. С. Неделько, 2018