

АКУСТОЕЛЕКТРОННІ СЕНСОРИ

ACOUSTOELECTRONIC SENSORS

PACS: 43.60.VX, 68.60.BS

DOI: <https://doi.org/10.18524/1815-7459.2025.1.325651>

ПОШИРЕННЯ ПОВЕРХНЕВИХ АКУСТИЧНИХ ХВИЛЬ В ШАРУВАТІЙ СТРУКТУРІ ТВЕРДЕ ТІЛО – РІДИНА – ТВЕРДЕ ТІЛО

Я. І. Леніх

Міжвідомчий науково-навчальний фізико-технічний центр МОН і НАН України
при ОНУ імені І. І. Мечникова; Одеський національний університет імені І. І. Мечникова,
вул. Всеволода Змієнка, 2, м. Одеса, 65082, Україна.
E-mail: ndl_lepikh@onu.edu.ua

Анотація. Досліджено особливості поширення поверхневих акустичних хвиль (ПАХ) в дискретно шаруватій структурі тверде тіло – рідина – тверде тіло (ТРТ). Встановлені умови трансформації ПАХ Релея в інші типи хвиль, які можуть локалізуватися в рідкому шарі, в пластинах – звукопроводах як хвиля витоку у моді поперечної хвилі маючи характер комплексної величини. Отримано значення для швидкостей поздовжньої і зсувної хвиль, пов'язаних з основними фізичними константами матеріалів пластин, рідини і геометрією шаруватої структури. Вказуються можливі застосування таких структур в системах різного призначення як сенсори чи інші електронні пристрої.

Ключові слова: шарувата структура тверде тіло – рідина – тверде тіло, поверхневі акустичні хвилі

Вступ

З великої різноманітності типів ПАХ найбільш повно в теоретичному та експериментальному плані досліджено хвилі Релея, що пояснюється великими перспективами їх практичного застосування в акустoeлектронних пристроях та у зв'язку з можливістю використання добре розвинених методів їх виготовлення за планарною технологією мікроелектроніки [1-3]. У шаруватих середовищах ПАХ вивчалися переважно у зв'язку із завданнями сейсмоакустики [4]. Причому розглядалися головним чином безперервно-шаруваті структури. І лише за останній час появилася інтерес до таких робіт, здебільшого теоретичних, при-

свячених дослідженню ПАХ у рідких шарах, з обох сторін, що межують із твердими тілами [5-7], тобто, у дискретно шаруватих структурах, у яких властивості середовища змінюються під час переходу межі розділу стрибком. У роботі [8] розглянуто задачу трансформації хвиль Релея у витікаючу хвилю на межі твердого тіла та рідини, і проведено розрахунок параметрів нормальних хвиль у структурі тверде тіло – рідина – тверде тіло (ТРТ). Зроблено припущення про можливе використання ефектів, що виникають при поширенні у структурі ТРТ у біологічних та медичних дослідженнях щільності рідини.

Оскільки в таких системах за деяких умов з'являється можливість перетворення релеївської хвилі в хвилі інших типів, що мають інші характеристики, то, природно, виникла ідея використання цього явища для створення керованих акустoeлектронних пристроїв, що і буде розглянуто в даній статті.

Постановка задачі і дослідження

Геометрія задачі поширення ПАХ у структурі ТРТ представлена схематично на рис. 1.

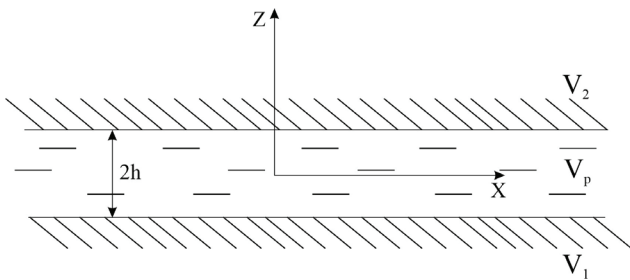


Рис. 1. Геометрія задачі про поширення ПАХ у шаруватій структурі ТРТ. h - половина товщини шару рідини, V_1 - швидкість ПАХ у нижній пластині, V_2 - швидкість ПАХ у верхній пластині, V_p - швидкість акустичної хвилі в рідкому шарі.

У загальному випадку швидкість поширення ПАХ у п'єзоелектричній підкладці має величину V_1 , у рідині – V_p і верхній пластині – V_2 . Теоретично в такій структурі можуть існувати різні типи хвиль, точне визначення яких можна отримати шляхом вирішення досить складних рівнянь. У разі $V_p < V_1$ і V_2 хвилі локалізуються в рідкому шарі (при досить великій його товщині $2h$). Енергія хвилі проникає у середовище із меншою швидкістю, тобто, якщо $V_1 < V_p < V_2$ то буде мати місце витік ПАХ у верхню пластину. Хвиля витіку буде поширюватися у формі поперечної хвилі, тобто V_p у другому випадку і є по суті комплексною величиною, а уявна її частина визначає ступінь витіку акустичної хвилі, що поширюється в рідині, у верхню пластину.

Точні характеристики поширення акустичної хвилі в такій структурі можна отримати, визначивши для кожного середовища фізичні константи: для твердого середовища знизу λ_1 ,

μ_1 і ρ_1 , для рідини λ_p і ρ_p , і для верхньої – λ_2 , μ_2 і ρ_2 , а також враховуючи залежність швидкості акустичної хвилі в рідині від товщини її шару відносно довжини хвилі λ . По суті, задача зводиться до розв'язання дисперсійного рівняння, що описує акустичне поле в дискретношаровій структурі.

Вибравши початок координат у середині рідкого шару, розглядаючи випадок поширення плоскої хвилі в напрямку x , швидкість поширення, яка не залежить від y , але залежить від товщини шару в довжинах хвиль, може бути отримана з дисперсійного рівняння [1], що приймає для нашого випадку вигляд:

$$\left\{ \Psi - \operatorname{ctg} kh \left[\left(\frac{V}{V_p} \right)^2 - 1 \right]^{1/2} \right\} \left\{ \Psi + \operatorname{tg} kh \left[\left(\frac{V}{V_p} \right)^2 - 1 \right]^{1/2} \right\} =$$

$$= (\Psi - \Phi) \left\{ \Psi - \frac{1}{2} \left[\operatorname{ctg} kh \left[\left(\frac{V}{V_p} \right)^2 - 1 \right]^{1/2} - \operatorname{tg} kh \left[\left(\frac{V}{V_p} \right)^2 - 1 \right]^{1/2} \right] \right\}, \quad (1)$$

$$\text{де } \Phi = \frac{\rho_1}{\rho_p} \left(\frac{V_{1t}}{V} \right)^4 \left[\left(\frac{V}{V_p} \right)^2 - 1 \right]^{1/2} \left\{ \frac{2 - \left(\frac{V}{V_{1t}} \right)^2}{\left[1 - \left(\frac{V}{V_{1t}} \right)^2 \right]^{1/2}} - 4 \left[1 - \left(\frac{V}{V_{1t}} \right)^2 \right]^{1/2} \right\};$$

$$\Psi = \frac{\rho_2}{\rho_p} \left(\frac{V_{2t}}{V} \right)^4 \left[\left(\frac{V}{V_p} \right)^2 - 1 \right]^{1/2} \left\{ \frac{2 - \left(\frac{V}{V_{2t}} \right)^2}{\left[1 - \left(\frac{V}{V_{2t}} \right)^2 \right]^{1/2}} - 4 \left[1 - \left(\frac{V}{V_{2t}} \right)^2 \right]^{1/2} \right\};$$

V_{1l} та V_{2l} – швидкості поздовжньої хвилі в першій та другій пластинах;

V_{1t} і V_{2t} – швидкості зсувної хвилі в першій та другій пластинах;

$V_p = (\lambda_p / \rho_p)^{1/2}$ – швидкість хвилі в рідині;

V і k – відповідно фазова швидкість і хвильове число шаруватої системи.

Швидкості поздовжньої V_l та зсувної V_t хвилі у твердих середовищах 1 і 2 можуть бути виражені через основні фізичні константи, як

$$V_l = \left(\frac{\lambda_{1,2} + 2\mu_{1,2}}{\rho_{1,2}} \right)^{1/2}; \quad V_t = \left(\frac{\mu_{1,2}}{\rho_{1,2}} \right)^{1/2}. \quad (2)$$

Щоб дослідити характеристики акустичного поля дискретно-шарової структури необхідно розв'язати рівняння (2) відносно фазової швидкості V , спрямованої по осі x і виразити її через параметр h , що є половиною товщини шару рідини.

Однак задачу можна суттєво спростити, вважаючи величини швидкостей V_1 , V_p і V_2 , а точніше їх співвідношення відомим.

Як тверде тіло верхнього і нижнього напівпросторів приймаємо кварц (п'єзокварцова пластина з зустрічно-штирьовим перетворюва-

чем (ЗШП) і плавлений кварц), а як рідина – воду, що задовольняє більшості практичних задач. Тоді рівняння (1) набуде вигляду

$$\left\{ \Psi - ctg kh \left[\left(\frac{V}{V_p} \right)^2 - 1 \right]^{1/2} \right\} \left\{ \Psi + tg kh \left[\left(\frac{V}{V_p} \right)^2 - 1 \right]^{1/2} \right\} = 0. \quad (3)$$

Результати чисельних розрахунків для структури кварц – вода – кварц, тобто, коли верхній та нижній шари однакові, представлено на рис. 2 суцільними лініями.

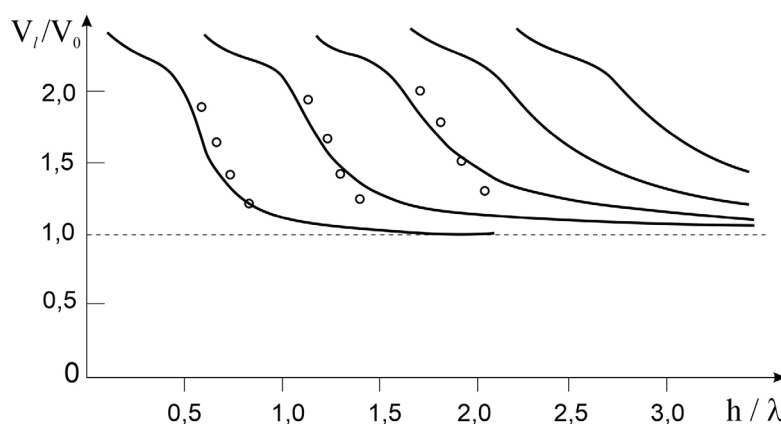


Рис. 2. Дисперсія швидкості акустичної хвилі для різних товщин шару рідини у структурі кварц – вода – кварц.

По осі ординат відкладені значення, нормованої швидкості у воді, а по осі абсцис – нормована по довжині хвилі товщина шару води.

Експериментальні дослідження поширення акустичних хвиль у шаруватій структурі із шаром рідини між двома кварцовими пластинами – звукопроводами проводились за схемою, структурно представленою на рис. 3. Нижня підкладка являла собою кварцовий звукопровід з нанесеними на робочу поверхню тонкоплівковими методами вхідним та вихідним ЗШП.

Для більш чіткого визначення центральної частоти та зручності електричних вимірювань один з ЗШП був аподизований з огинаючою за функцією Хеммінга. Товщина шару рідини задавалася на початку товщиною прокладок між пластинами, а в подальшому – спеціальним пристроєм, що проводить юстування мікро-

переміщення. У процесі досліджень вимірювалися центральна частота ($f = 30$ МГц), рівень сигналу, товщина зазору між пластинами (товщина шару рідини) (рис. 3).

Схема вимірювального стенду структурно представлена рис. 4. Використання вимірювань приладу для дослідження амплітудно-частотних характеристик типу Х1-49 дозволило додатково контролювати ширший спектр сигналів, включаючи сигнали вторинних ефектів, що виникають при поширенні акустичних хвиль в структурі ТРТ.

Було розглянуто кілька якісно відмінних випадків. Насамперед – граничні. Без рідкого шару на вихідному ЗШП фіксувався звичайний сигнал пристрою на ПАХ, визначений топологією ЗШП і властивостями кварцового звукопроводу. При нанесенні шару (краплі) рідини без другої (верхньої) пластини основний сигнал істотно пригнічувався, що зрозумі-

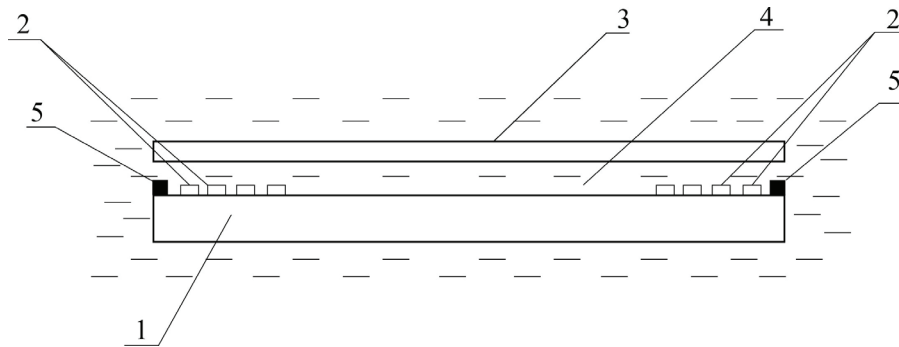


Рис. 3. Схема досліджуваної структури кварц – вода – плавлений кварц. 1 - п'єзокварц, 2 - вхідний та вихідний ЗШП, 3 - плавлений кварц, 4 - вода, 5 - опорна прокладка.

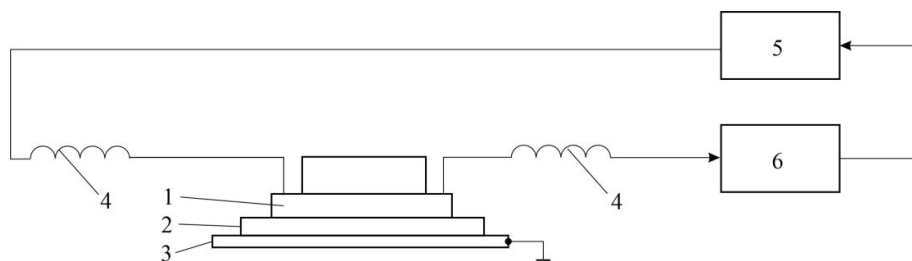


Рис. 4. Вимірний стенд для досліджень поширення ПАХ у структурі ТРТ. 1 - п'єзoeлектричний звукопровідник з ЗШП; 2 - діелектрична пластина; 3 - предметний столик; 4 - узгоджувальні індуктивності; 5 - підсилювач УЗ-38; 6 - вимірювач АЧХ ХІ-49.

міло з фізичних міркувань. При наближенні верхньої пластини до нижньої та утворення шаруватої структури кварц - вода - кварц і подальшій зміні товщини шару спостерігалася відповідна зміна параметрів вихідного сигналу. Якісно результати експерименту поширення акустичних хвиль можна класифікувати трьома ситуаціями.

Хвиля з витоком. Це відповідає випадку, коли $h / \lambda \ll 1$. При цьому швидкість хвилі в рідині V_p близька до швидкості ПАХ у верхній пластині. Напрямок її поширення відносно нормалі до поверхні пластини визначається кутом $\alpha = \arcsin(V_2/V_p)$. Оскільки верхня пластина має паралельні грані, поперечна хвиля, що поширюється в ній, буде відбиватися від верхньої її поверхні і перетворюватися в ПАХ на межі з рідиною. Підтвердженням існування такої моди хвилі є часове запізнення сигналу по відношенню до часу приходу основного сигналу у відсутності шару рідини, а також його залежність від товщини верхньої пластини. Товщина

пластини має бути досить великою, щоб у ній не виникли багаторазові відбиття, або не збуджувалися хвилі Лява.

Локалізована хвиля. Якщо верхня пластина виконана з того ж матеріалу, що і нижня, швидкість в шарі рідини V_p буде менше швидкості зсувної хвилі в обох твердих середовищах.

Витікаюча чи локалізована хвиля. У цьому випадку товщину шару рідини можна порівняти з довжиною хвилі $h = \lambda$. Швидкість у шарі може змінюватись в залежності від його товщини у значних межах – від швидкості звуку у воді до швидкості ПАХ у кварці.

Слід зауважити, що поряд зі зміною часових характеристик локалізованої хвилі спостерігалася і зміна амплітуди сигналу, що може бути обумовлено фазовими співвідношеннями хвилі в рідкому шарі і відбитої від межі верхньої пластини.

Результати експериментальних досліджень локалізованої хвилі показані точками на

рис. 2, звідки видно хорошу їхню узгодженість з теоретичними розрахунками.

Явище перетворення швидкостей акустичних хвиль має істотний характер і може бути використане для практичних цілей. На цьому принципі можуть бути побудовані датчики вимірювання товщини плівкових покриттів, які можуть використовуватися в технології мікроелектроніки, а також при вимірюванні параметрів різних рідин.

У ході експериментів зі створення керованих пристроїв з використанням шаруватої структури було відзначено вплив на ефективність перетворення властивостей рідини. Встановлено, зокрема, що водний розчин етилового спирту ($\approx 10\%$) є кращою робочою рідиною при практичній реалізації керування у виконанні приладу. Однією з причин є краща змочуваність робочих поверхонь пластин, а також розширення робочого діапазону температур пристрою. Крім того, це підтверджує можливість про застосування цього явища для вимірювань щільності рідин.

Висновки

1. В результаті дослідження поширення ПАХ в шаруватій структурі тверде тіло - рідина - тверде тіло встановлені особливості трансформації типів хвиль залежні від фізичних параметрів матеріалів шаруватої структури.

2. Показана можливість впливати на характеристики ПАХ шляхом вибору рідини з різними властивостями і геометрією шаруватої структури.

3. Вказана можливість використання структури ТРТ для створення сенсорів.

Список використаної літератури

[1]. Poverhnostnye akusticheskie volny. Pod red. A.Olinera. Per. s angl. pod red. I. S. Reza.-M.: Mir, 1981.-390 s. (*In Russian*).

[2]. Morgan D. Ustrojstva obrabotki signalov na poverhnostnyh akusticheskikh volnah. Per. s angl. pod red. S. I. Baskakova.-M.: Radio i svyaz', 1990.-416 s. (*In Russian*).

[3]. Lepikh Ya. I., Olikh Ya. M., Bieliaiev O. Ye. Obiemyi metod zbudzhennia kvazipozdovzhnikh akustychnykh khvyl u sharuvatykh strukturakh // Sensor Electronics and Microsystem Technologies. 2021 – Vol. 18, No. 4.-P. 4 – 10. DOI: 10.18524/1815-7459.2021.4.248176. (*In Ukrainian*).

[4]. Lepikh Ya.I., Fastykovsky P.P., Glauberman M.A. Autonomous seismic sensor with a new temporal method of a moving person detection// 2021 IEEE 12th International Conference on Electronics and Information Technologies, ELIT 2021, Proceedings, 2021, pp. 14–17 <https://doi.org/10.1109/ELIT53502.2021.9501092>.

[5]. Plesskij V. P., Ten Yu. A. Sdvigovye poverhnostnye akusticheskie volny na granice povernutogo Y-sreza kvarca s vyazkoj sredoj// Akust. zh-l.-1985.-T.31, № 4.-S.553-554. (*In Russian*).

[6]. Lyppe T., Doucet J. Generation et observation de lynde de Stoneley a l'interface plane eau-metal// Acustica.-1987.-Vol.64.-№ 1.-P.46-49.

[7]. Arikon O., Telatar E., Alatar A. Reflection coefficient null of acoustic waves at a liquid anisotropic-solid interface// J.Acoust. Soc. Amer.-1989.-Vol.85.-№ 1.-P.1-10.

[8]. Arapov A.V., Goncharov V.S. Transformaciya voln Releya v vytekayushchuyu na granice tverdogo tela i zhidkosti// Akusticheskij zh-l.-1989.-T.35, Vyp.3.-S.541.-543. (*In Russian*).

Стаття надійшла до редакції 20.02.2025 р.

PACS: 43.60.VX, 68.60.BS

DOI: <https://doi.org/10.18524/1815-7459.2025.1.325651>

PROPAGATION OF SURFACE ACOUSTIC WAVES IN A LAYERED STRUCTURE SOLID – LIQUID – SOLID

Ya. I. Lepikh

Interdepartmental Scientific-Educational Physics and Technical Center of the MES and NAS of Ukraine
at Odesa I. I. Mechnikov National University; Odesa I. I. Mechnikov National University,

2 Vsevoloda Zmiiienka St, Odesa, 65082, Ukraine.

E-mail: ndl_lepikh@onu.edu.ua

Abstract. The features of the propagation of surface acoustic waves (SAW) in discretely layered structures solid – liquid – solid (SLS) are investigated. The conditions for the transformation of Rayleigh SAV into other types of waves that can be localized in a liquid layer, in sound-conducting plates as a leakage wave in the transverse wave mode having the character of a complex quantity are established. The values for the velocities of longitudinal and shear waves are obtained, related to the basic physical constants of the materials of the plates, liquid and the geometry of the layered structure. Possible applications of such structures in systems for various purposes as sensors or other electronic devices are indicated.

Keywords: layered structure solid – liquid – solid, surface acoustic waves