

# ФІЗИЧНІ, ХІМІЧНІ ТА ІНШІ ЯВИЩА, НА ОСНОВІ ЯКИХ МОЖУТЬ БУТИ СТОРОНИ

---

## PHYSICAL, CHEMICAL AND OTHER PHENOMENA, AS THE BASES OF SENSORS

---

---

UDC: 541.183+548.571

DOI: 10.18524/1815-7459.2021.4.248176

### МЕТОД ЗБУДЖЕННЯ КВАЗИПОЗДОВЖНИХ АКУСТИЧНИХ ХВИЛЬ У ШАРУВАТИХ СТРУКТУРАХ

*Я. М. Оліх<sup>1</sup>, О. Є. Беляєв<sup>1</sup>, Я. І. Лепіх<sup>2</sup>*

<sup>1</sup>Інститут фізики напівпровідників ім. В. Є. Лашкарьова НАН України,  
пр. Науки 41, 03028 Київ, Україна; e-mail: jaroluk3@ukr.net

<sup>2</sup>Міжвідомчий науково-навчальний фізико-технічний центр МОН і НАН України при ОНУ  
імені І. І. Мечникова, ndl\_lepikh@onu.edu.ua

### МЕТОД ЗБУДЖЕННЯ КВАЗИПОЗДОВЖНИХ АКУСТИЧНИХ ХВИЛЬ У ШАРУВАТИХ СТРУКТУРАХ

*Я. М. Оліх, О. Є. Беляєв, Я. І. Лепіх*

**Анотація.** Досліджено і проведено аналіз методичних можливостей збудження квазіпоздовжних (QL) акустичних хвиль мегагерцового частотного діапазону у шаруватих структурах GaN-on-sapphire. Для генерації і детектування QL-хвиль використано перетворювачі об'ємного типу поляризовані по товщині пластинки. Зроблено висновок, що таким методом можуть бути збуджені квазіпоздовжні хвилі (QL, quasilongitudinal modes) – так звані хвилі Анісімікіна (AN), площа зміщень для яких локалізується в площині плівки, а напрям зміщення направлений вздовж хвильового вектора.

**Ключові слова:** квазіпоздовжні поверхневі акустичні хвилі, хвилі Анісімікіна, шаруваті структури

### METHOD OF EXCITATION OF QUASI LONGITUDINAL ACOUSTIC WAVES IN LAYERED STRUCTURES

*Ya. M. Olikh, O. E. Belyaev, Ya. I. Lepikh*

**Abstract.** The analysis of methodological possibilities of excitation of quasi-longitudinal (QL) acoustic waves of the megahertz frequency range in layered structures GaN-on-sapphire is studied and carried out. Volume-type transducers polarized by plate thickness are used to generate and detect

© Я. М. Оліх, О. Є. Беляєв, Я. І. Лепіх, 2021

QL waves. It is concluded that quasilongitudinal modes (QL) can be excited by this method – the so-called Anisimkin (AN) waves, for which the displacement plane is localized in the film plane and the displacement direction is directed along the wave vector.

**Keywords:** quasi-longitudinal surface acoustic waves, Anisimkin waves, layered structures

## МЕТОД ВОЗБУЖДЕНИЯ КВАЗИПРОДОЛЬНЫХ АКУСТИЧЕСКИХ ВОЛН В СЛОИСТЫХ СТРУКТУРАХ

*Я. М. Олих, А. Е. Беляев, Я. И. Лепих*

**Аннотация.** Исследован и проведен анализ методических возможностей возбуждения квазипродольных (QL) акустических волн мегагерцового частотного диапазона в слоистых структурах GaN-on-sapphire. Для генерации и детектирования QL-волн использованы преобразователи объемного типа, поляризованные по толщине пластинки. Сделано заключение, что таким методом могут быть возбуждены квазипродольные волны (QL, quasilongitudinal modes) – так называемые волны Анисимкина (AN), плоскость смещений для которых локализуется в плоскости пленки, а направление смещения направлено вдоль волнового вектора.

**Ключевые слова:** квазипродольные поверхностные акустические волны, волны Анисимкина, слоистые структуры

### Вступ

При виготовленні акустoeлектронних (АЕ) пристроїв на поверхневих акустичних хвилях (ПАХ) (фільтри, резонатори, лінії затримки тощо) застосовують п'єзоелектричні підкладки кварцу, ніобату літію, танталата літію та інш. При цьому для збудження і приймання ПАХ, як правило, використовують зустрічно-штирєві перетворювачі (ЗШП).

В шаруватих структурах (наприклад, нітрідні плівки AlN, GaN, AlGaN – на сапфірі Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, кремнії Si) можливе поширення інших АХ (типу хвилі Стоунлі). Причому, допустиме використання і неп'єзоелектричних плівок, якщо для збудження АХ використовують інші методи. Також можлива заміна в акустичному резонаторі плівки п'єзоелектрика (AlN, GaN, ZnO) на плівку матеріалу, який виявляє наведений п'єзоэффект під дією постійного електричного поля, наприклад, титанату барію-стронцію, що знаходиться в параелектричній фазі.

Відкриття хвиль Анісімікіна (AN) та квазіпоздовжніх хвиль (QL) мод значно розширило можливість вибору нових матеріалів для сенсорних пристроїв та структур. При цьому постає проблема пошуку ефективних криста-

лографічних зрізів матеріалів, для яких режими AN та QL реалізуються, і простої методики збудження цих хвиль. В даній роботі розглядається метод збудження і детектування QL акустичних мод за допомогою п'єзоелектричних перетворювачів для об'ємних АХ в шаруватих структурах.

### Характеристики AN і QL акустичних мод

До теперішнього часу в якості акустичних хвиль для дослідження властивостей рідин використовувалися головним чином зсувні хвилі або квазізсувної поляризації, чи нормальні хвилі Лемба перших номерів, які не випромінюють свою енергію з твердого тіла в рідину, що досліджується, через повільні швидкості поширення. У 2004 р. в літературі з'явилося повідомлення про відкриття нового типу нормальних хвиль з домінуючим поздовжніми зміщенням  $U_1 \gg U_2, U_3$  [1]. Було показано, що існує дві модифікації таких хвиль – одна AN з практично постійним профілем зміщення по глибині пластини, інша QL – зі слабо мінливим профілем. Обидві модифікації можуть існувати в кристалах різних сингоній (від орторомбічної до кубічної і ізотропної),

що не залежать від п'єзоелектричних і анізотропних властивостей цих кристалів і можуть розглядатися як трансформація нормальних хвиль Лемба за виконання 2-х умов: 1) швидкості нормальних хвиль  $v_n$  повинні бути близькі до швидкості поздовжньої об'ємної хвилі  $v_L$  в тому ж напрямку; 2) довжина хвилі  $\lambda_n$  у порівнянні з товщиною пластини  $d$  повинна бути мала ( $\lambda_n/d \leq 2$ ). Ці нові нормальні моди  $v_n$  характеризуються надзвичайно слабкою дисперсією при фіксованому напрямку поширення.

Ці моди дослідженні лише у високосиметричних напрямках (вздовж осі 2-го порядку) для тригональних кристалів. Зокрема, Гуляєв та Анісімкін старший шляхом числового моделювання провели пошук аналогічних режимів у монокристалах кварцу [2],  $\text{LiNbO}_3$  та  $\text{Te}$  [3]. Вони знайшли режими QL в хвилях, що поширюються уздовж осі  $Z'$ , у дуже тонких повернутих  $Y$ -зрізах пластин  $\text{LiNbO}_3$ . У випадку  $\text{Te}$  режими QL були знайдені для хвиль, що поширюються вздовж осі  $X$  для повернутих  $Y$ -зрізів пластин, з широким діапазоном товщин. Анісімкін старший продовжив пошук QL-мод для інших матеріалів. Його пошук був обмежений певним скороченням площин, можливо, через великі обчислювальні навантаження.

### Акустoeлектронні сенсори

Дослідження фізичних властивостей твердих і рідких речовин при різних зовнішніх впливах дозволяє глибше зрозуміти природу цих речовин і застосувати отримані дані в сенсориці. За останні роки чутливість сенсорів стала вищою, розміри менші, вибірковість кращою, вартість нижчою. При цьому один з найбільш відчутних стрибків стався з сенсорами акустoeлектронного типу, ринок яких зростає приблизно на 18% щорічно [4]. Питання дослідження сенсорних властивостей маловивчених і недавно відкритих акустичних хвиль в анізотропних структурах, включаючи новий тип акустичних коливань, які отримали назву квазіпоздовжніх мод AN [5–10], є актуальним завданням на сучасному етапі. Наступне використання акустичних хвиль в сенсорах

на основі тих же пристроїв поставило вимогу забезпечити умови, при яких вплив зовнішніх факторів потрібно зробити максимальним, селекційним і стабільним. Тепер такі сенсори створені для вимірювання широкого спектра чинників – температури, тиску, прискорення, електричного і магнітного полів, концентрації газів та ін. При цьому особливе місце в ряду акустoeлектронних сенсорів займають детектори рідини, потреба в яких особливо зросла у зв'язку з екологічною, хімічною та біологічною безпекою, а також в медичній, фармацевтичній, харчовій і інших галузях промисловості. Прогресу акустoeлектронних сенсорів різних типів, в тому числі і рідинних, в значній мірі сприяла наявність досліджень в уже відпрацьованих на акустoeлектронних лініях затримки, резонаторах і генераторах, промисловий випуск освоєних п'єзоелектричних кристалів, сумісність технології виготовлення акустoeлектронних сенсорів з технологіями мікроелектроніки. Цьому ж сприяло використання різних типів хвиль, які можуть існувати в твердих тілах і шаруватих структурах.

Застосування акустичних перетворювачів в якості первинних датчиків контролю властивостей рідин виявляється досить ефективним. Фізичною основою застосування акустичних методів для вимірювання характеристик рідких середовищ є функціональна залежність параметрів акустичних хвиль, що поширюються в рідинах (швидкість поширення, коефіцієнт загасання, поздовжній і зсувний акустичні імпеданси), від властивостей рідини.

В даний час застосовуються в основному вимірювання швидкості  $A_X$  в рідинах. Технічні складності вимірювань зсувної в'язкості і щільності за допомогою існуючих акустичних методів викликані дуже малими чисельними значеннями зсувних і поздовжніх імпедансів рідини порівняно з твердими тілами, що призводить до великих похибок вимірів. Тому проблема дослідження і розробки методів і засобів контролю в'язкості і щільності рідких середовищ із застосуванням  $A_X$  хвиль є актуальною.

Зокрема, з метою розробки високочастотних акустoeлектронних пристроїв, придатних

для роботи в рідинному середовищі вивчаються акустичні моди поляризовані по довжині уздовж тонких п'єзоелектричних пластин. Такий режим має певні особливості, які важливі для використання в АЕ сенсорах.

### Метод збудження AN і QL хвиль в шаруватих структурах і результати досліджень

У даній роботі запропоновано і реалізовано метод збудження і детектування QL акустичних мод за допомогою п'єзоелектричних перетворювачів об'ємного типу поздовжніх акустичних хвиль (АХ) в діапазоні частот (9–50) МГц – способом прямого введення через поперечну поверхню (торець) структури GaN-on-sapphire (товщина  $d_{\text{GaN}} \approx 5$  мкм,  $d_{\text{Al}_2\text{O}_3} \approx 400$  мкм, площа (111)) (рис. 1) [11].

На рис. 2 показано фото вимірювального стенду, на якому реалізована схема експерименту – рисунок 1.

Оцінка ефективності реалізації QL-режиму проводилася шляхом вимірювання часу поширення збуджених імпульсів АХ (тривалість  $t_{\text{имп}} \approx 0,5$  мкс) за допомогою прийомного ПП-2 на протилежній стороні пластини (на відстані  $\approx 50$  мм).

Отримані осцилограми імпульсів АХ наведені на рис. 3. Відповідність розрахованих з експерименту значень швидкості поширення

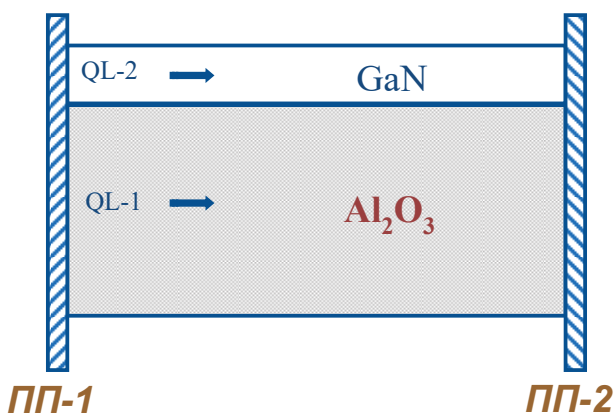


Рис. 1. Схема експерименту (бокова проекція паралельно напрямку поширення АХ).

ПП-1 і ПП-2 – п'єзоперетворювачі,  $\text{Al}_2\text{O}_3$  – підкладка, GaN – плівка на сапфірі.

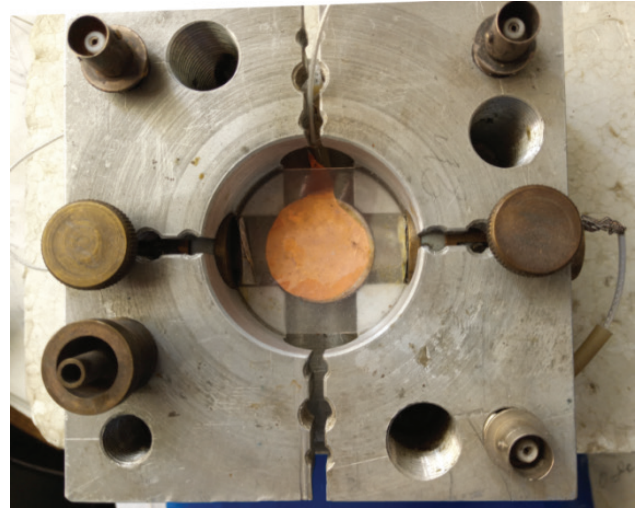


Рис. 2. Фото вимірювального стенду для дослідження AN і QL хвиль в плівках. ПП-1 і ПП-2 – п'єзоперетворювачі,  $\text{Al}_2\text{O}_3$  – підкладка, GaN – плівка на сапфірі.

АХ в GaN (QL-2) та у  $\text{Al}_2\text{O}_3$  (QL-1) з літературними даними для відповідних об'ємних поздовжніх АХ підтверджує достовірність збуджуваних квазіпоздовжніх АХ.

Як показали дослідження метод дає можливість працювати в широкому діапазоні частот. Гармоніки основної частоти ПП-1,2 на 10 МГц дієві на частотах 200–1200 МГц. Причому, в реалізованому конструктивному методі фактично не потрібна будь-яка функціональна реконструкція при зміні частоти при збудженні

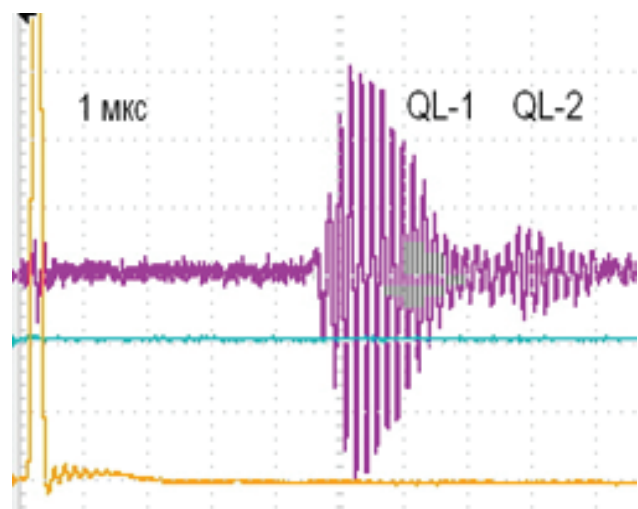


Рис. 3. Осцилограми імпульсів АХ  $t_{\text{имп}} \approx 0,5$  мкс. QL-1 – в підкладці  $v_{\text{Al}_2\text{O}_3} \approx 12,2 \cdot 10^3$  м/с; QL-2 – в плівці  $v_{\text{GaN}} \approx 7,8 \cdot 10^3$  м/с.

АХ як синусоїдальним сигналом, так і однополярним ударним імпульсом.

Генерована АХ не розходитьсЯ (в поперечній площині зберігається діаграма направленості в процесі поширення), не трансформується в інші типи нормальних хвиль, відсутні дисперсія і збудження хвиль з вертикальною поляризацією, що важливо для цілей вимірювання параметрів рідин.

### Висновки

Дослідження показали можливість збудження квазіпоздовжніх поверхневих акустичних хвиль мегагерцового частотного діапазону у шаруватих плівкових структурах за допомогою перетворювачів об'ємного типу з поляризацією по товщині. Найбільш ефективними можуть бути квазіпоздовжні хвилі (quasilongitudinal modes) – так звані хвилі Анісімікіна, площина зміщень в яких локалізується в площині плівки, а напрям зміщення направлений вздовж хвильового вектора.

Дослідження підтверджують можливість практичної реалізації відповідних п'єзоелектричних хвилеводів в інтегрально-схемних акустоелектронних пристроях для роботи в рідкому середовищі.

Робота виконувалася в рамках науково-технічного проекту № 605, що фінансується Міністерством освіти і науки України.

### Список використаної літератури

[1]. Anisimkin I. V. New type of an acoustic plate modes: quasilongitudinal normal wave. *Ultrasonics*, **42**, pp. 1095–1099 (2004).

[2]. Gulyaev Y. V. Properties of the Anisimkin Jr. modes in quartz plates. *IEEE Trans. Ultrason. Ferroelectr. Freq. Control*, **54**, pp. 1382–1385 (2007).

[3]. Gulyaev Y. V. Peculiarities of the Anisimkin Jr. plate modes in  $\text{LiNbO}_3$  and Te single crystals. *IEEE Trans. Ultrason. Ferroelectr. Freq. Control*, **56**, pp. 1042–1045 (2009).

[4]. O. L. Balysheva. «Akustoelektronnaya komponentnaya baza», *Zhurnal Radioelektroniki* № 6 (<http://www.cplire.ru>), (2014) (*in Russian*).

[5]. Anisimkin V. I. General properties of the Anisimkin Jr. plate modes. *Proc IEEE Ultrasonic Symp*, pp. 2580–2583 (2009).

[6]. Anisimkin V. I. General properties of the Anisimkin Jr. plate modes. *IEEE Trans Ultrason Ferroelectr Freq Control*, **57**, pp. 2028–2034(2010).

[7]. Onoe M, Kaga S. Analysis of Anisimkin's (qua-silongitudinal) modes in piezoelectric plate. *Proc Ul-trasonic Electronics Symp*, **30**, pp. 397–398 (2009).

[8]. Onoe M, Kaga S. Analysis of Anisimkin's (qua-silongitudinal) modes in piezoelectric plate. *Jpn J Appl Phys*, **49**, p.07HD01 (2010).

[9]. Acoustic Properties of the Film/Plate Layered Structure V Anisimkin et al. *IEEE Trans Ultrason Ferroelectr Freq Control*, **58** (3), pp. 578–584(2011).

[10]. Propagation of the Anisimkin Jr.' and Quasi-Longitudinal Acoustic Plate Modes in Low-Symmetry Crystals of Arbitrary Orientation VI Anisimkin et al. *IEEE Trans Ultrason Ferroelectr Freq Control* **59** (4), pp. 806–810(2012).

[11]. Olikh Ya. M., Belyaev O. Ye, Lepikh Ya. I. Doslidzhennia kvazipodovzhnikh QL akustychnykh khvyl dlia sensoriv na strukturakh GaN-on-sapphire. *Tezy dopovidei 9-oi Mizhnarodnoi naukovo-tekhnichnoi konferentsii "Sensorna elektronika ta mikrosystemni tekhnolohii"* (SEMST-9) Ukraine, Odesa, 20–24 veresnia, 2021, S. 64 (*in Ukrainian*).

Стаття надійшла до редакції 24.11.2021 р.

UDC: 541.183.+548.571

DOI: 10.18524/1815-7459.2021.4.248176

## METHOD OF EXCITATION OF QUASI LONGITUDINAL ACOUSTIC WAVES IN LAYERED STRUCTURES

*Ya. M. Olikh<sup>1</sup>, O. E. Belyaev<sup>1</sup>, Ya. I. Lepikh<sup>2</sup>*

<sup>1</sup>V. Ye. Lashkarev Institute of Semiconductor Physics. National Academy of Sciences of Ukraine, 41 Nauki Ave., 03028 Kyiv, Ukraine; e-mail: jaroluk3@ukr.net

<sup>2</sup>Interdepartmental scientific-educational physics and technical center of MES and NAS of Ukraine at the Odesa I. I. Mechnikov National University, ndl\_lepikh@onu.edu.ua

### Summary

The characteristics of SAW devices, in which SAW conversion is performed by interdigital transducers (IDT) applied to the surface of the piezoelectric acoustic duct, are determined mainly by the electrophysical parameters (EPhP) of the piezoacoustic duct and the design of the IDT. Conditions on the working surface of the acoustic duct are limiting at solving of the wave equation for SAW.

It follows that theoretically it is always necessary to take into account the components of the mechanical intensity and shear on the surface of the acoustic duct.

In practice, this means that in some cases the presence of tension on the surface of the acoustic duct, ie when the surface can not be considered free, leads to a change in the characteristics of SAW and, consequently, the operating characteristic of the device on SAW, or degeneration of one type of SAW in another.

However, such transformation of wave types becomes noticeable only at certain proportion of geometric (layer thickness  $h$  and wavelength  $\lambda$ ) and mechanical (acoustic) parameters. In particular, at  $h / \lambda \ll 1$  the effect of degeneration of one type of SAW (in this case the Lev wave) is absent.

In order to improve the basic characteristics of SAW devices and increase their reliability, we investigated a new type of quasi-elongated waves called Anisimkin waves in layered GaN-on sapphire structures.

The analysis of methodological possibilities of excitation of quasi-longitudinal (QL) acoustic waves of the megahertz frequency range in layered structures GaN-on-sapphire is studied and carried out. Volume-type transducers polarized by plate thickness are used to generate and detect QL waves. It is concluded that quasilongitudinal modes (QL) can be excited by this method – the so-called Anisimkin (AN) waves, for which the displacement plane is localized in the film plane and the displacement direction is directed along the wave vector.

**Keywords:** quasi-longitudinal surface acoustic waves, Anisimkin waves, layered structures

## МЕТОД ЗБУДЖЕННЯ КВАЗИПОЗДОВЖНИХ АКУСТИЧНИХ ХВИЛЬ У ШАРУВАТИХ СТРУКТУРАХ

*Я. М. Оліх<sup>1</sup>, О. Є. Беляєв<sup>1</sup>, Я. І. Лепіх<sup>2</sup>*

<sup>1</sup>Інститут фізики напівпровідників ім. В. Є. Лашкарьова НАН України,  
пр. Науки 41, 03028 Київ, Україна; e-mail: jaroluk3@ukr.net

<sup>2</sup>Міжвідомчий науково-навчальний фізико-технічний центр МОН і НАН України при ОНУ  
імені І. І. Мечникова, ndl\_lepikh@onu.edu.ua

### Реферат

Характеристики пристроїв на ПАХ, у яких перетворення ПАХ здійснюється зустрічно-штирьовими перетворювачами (ЗШП) нанесеними на поверхню п'єзоелектричного звукопроводу, визначаються в основному електрофізичними параметрами (ЕФП) п'єзозвукопроводу і конструкцією ЗШП.

Умови на робочій поверхні звукопроводу є граничними при вирішенні хвильового рівняння для ПАХ. З цього випливає, що теоретично завжди варто враховувати компоненти механічної напруженості і зсуву на поверхні звукопроводу.

Практично ж це означає, що в деяких випадках наявність напруженості на поверхні звукопроводу, тобто коли поверхня не може вважатися вільною, призводить або до зміни характеристик ПАХ і, як наслідок, робочих характеристик пристрою на ПАХ, або до виродження одного типу ПАХ в інший.

Однак таке перетворення типів хвиль стає помітним тільки при визначених співвідношеннях геометричних (товщини шару  $h$  і довжини хвилі  $\lambda$ ) і механічних (акустичних) параметрів. Зокрема, при  $h/\lambda \ll 1$  ефект виродження одного типу ПАХ (у даному випадку хвилі Лява) відсутній.

З метою поліпшення основних характеристик пристроїв на ПАХ і підвищення їхньої надійності нами досліджувався новий тип квазіпоздовжніх хвиль названих хвилями Анісімікіна в шаруватих структурах GaN-on-sapphire.

Досліджено і проведено аналіз методичних можливостей збудження квазіпоздовжніх (QL) акустичних хвиль мегагерцового частотного діапазону у шаруватих структурах GaN-on-sapphire. Для генерації і детектування QL-хвиль використано перетворювачі об'ємного типу поляризовані на товщині пластинки. Зроблено висновок, що таким методом можуть бути збуджені квазіпоздовжні хвилі (QL, quasilongitudinal modes) – так звані хвилі Анісімікіна (AN), площина зміщень в яких локалізується в площині плівки, а напрям зміщення направлений вздовж хвильового вектора.

**Ключові слова:** квазіпоздовжні поверхневі акустичні хвилі, хвилі Анісімікіна, шаруваті структури