



УКРАЇНА

(19) UA

(11) 55549

(13) C2

(51) 7 G01N29/00

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ  
І НАУКИ УКРАЇНИДЕРЖАВНИЙ ДЕПАРТАМЕНТ  
ІНТЕЛЕКТУАЛЬНОЇ  
ВЛАСНОСТІОПИС  
ДО ПАТЕНТУ НА ВИНАХІД

(54) УЛЬТРАЗВУКОВИЙ СПОСІБ ВИЗНАЧЕННЯ ХАРАКТЕРИСТИК ПРУЖНОСТІ

1

2

(21) 2001010030

(22) 03 01 2001

(24) 15 04 2003

(46) 15 04 2003, Бюл. № 4, 2003 р.

(72) Безимянний Юрій Георгійович, Яковкін Володимир Миколайович

(73) ІНСТИТУТ ПРОБЛЕМ МАТЕРІАЛОЗНАВСТВА ІМ ІМ ФРАНЦЕВИЧА НАЦІОНАЛЬНОЇ АКАДЕМІЇ НАУК УКРАЇНИ

(56) а с СРСР №815614, МПК G01N 29/00, 23 03 1981

SU, 1245989, МПК G01N 29/00, 23 07 1986

SU, 808930, МПК G01N 29/00, 28 02 1981

(57) Ультразвуковий спосіб визначення характеристик пружності матеріалів, який полягає у тому, що в зразок матеріалу, виготовлений у вигляді стрижня, випромінюють імпульс поздовжніх ультразвукових коливань, вимірюють час його розповсюдження в матеріалі вздовж стрижня, вимірюють час розповсюдження

імпульсу, який утворено при відбитті від бокових граней зразка і розповсюджується з першою поперечною швидкістю, і по його значенню розраховують характеристики пружності, який відрізняється тим, що зразок виготовляють із кристала кубічної симетрії у вигляді стрижня прямокутного перерізу, товщина якого обмежується площинами орієнтації  $(1\bar{1}0)$ , а ширина - площинами орієнтації  $(001)$ , відношення ширини зразка до товщини вибирають від 1,0 до 1,5, імпульс поздовжніх коливань випромінюють у напрямку  $[110]$ , окремо спостерігають імпульси, що пройшли товщину і ширину зразка, додатково вимірюють час затримки вторинного імпульсу, що пройшов ширину зразка з другою поперечною швидкістю, відносно первинного імпульсу і враховують його при розрахунку характеристик пружності

Винахід відноситься до способів визначення характеристик пружності твердих тіл по швидкостям ультразвукових пружних хвиль різних типів і може бути використано в лабораторіях, що займаються вивченням пружних властивостей монокристалів різних твердих тіл, які мають кристалічну решітку кубічної симетрії, а також при дослідженні їх змін під дією зовнішніх факторів, наприклад, температури, тиску

Відомий спосіб визначення модулів пружності кристалів кубічної симетрії (Дьелесан Э И др "Упругие волны в твердых телах" М Наука, 1982, с 159-164), при якому роблять два зразки певної різної орієнтації, в першому зразку визначають швидкості поздовжньої і поперечної пружних хвиль по співпадаючому напрямку, в другому зразку визначають швидкість квазіпоперечної хвилі і по результатам вимірів, використовуючи попередньо визначені розміри зразків і щільності матеріалу, розраховують три модулі пружності  $C_{11}$ ,  $C_{44}$  та  $C_{12}$

Недолік відомого способу полягає в тому, що необхідність використання двох зразків збільшує

похибку визначення модулів і суттєво стає на перешкоді вивчення впливу зовнішніх впливів на характеристики пружності

Найбільш близьким по технічній суті до даного винаходу є ультразвуковий метод вимірювання модуля Юнга (Авторське свідоцтво СРСР № 815614, кл G01N29/00, 1980 р (прототип)), при якому в циліндричний зразок ізотропного матеріалу випромінюють первинний імпульс поздовжніх коливань, формують вторинний імпульс за рахунок відбиття частини первинного імпульсу від бокової поверхні зразка, який проходить частину зразка зі швидкістю поперечних пружних хвиль, вимірюють час затримки первинного і вторинного імпульсів і по результатам вимірів розраховують модуль Юнга. Перевага цього способу полягає в використанні тієї ж пари датчиків поздовжніх коливань для випромінювання і приймання сигналів, що містять інформацію про швидкості поперечних і поздовжніх пружних хвиль. Це дозволяє випромінювати та приймати сигнали за допомогою рідинного контакту

(13) C2

(11) 55549

(19) UA

Недолік відомого способу полягає в тому, що його неможливо використовувати для анізотропних матеріалів, в тому числі для монокристалів, оскільки вторинний імпульс, що утворюється при трансформації на циліндричній боковій поверхні, формується з багатьох компонентів, що розповсюджуються по різних напрямках поперечних пружних хвиль, тобто розповсюджуються з різними швидкостями, що в остаточному результаті приводить до розмиття фронту вторинного імпульсу і робить марним спостереження вторинного імпульсу. Крім того, в кристалах кубічної симетрії необхідно визначати додатково швидкість розповсюдження третьої пружної хвилі, що за допомогою вказаного способу неможливо зробити. Відомий спосіб не дозволяє визначити дві швидкості поперечних пружних хвиль, навіть, у випадку заміни стрижня круглого перетину стрижнем прямокутного перетину та довільної орієнтації.

В основу винаходу "Ультразвуковий спосіб визначення характеристик пружності матеріалів" поставлено задачу розширення області використання при забезпеченні можливості визначення характеристик пружності матеріалів на кристалах кубічної симетрії, яка вирішується шляхом того, що в зразок матеріалу, виготовлений у вигляді стрижня, випромінюють імпульс поздовжніх ультразвукових коливань, вимірюють час його розповсюдження в матеріалі вздовж стрижня, вимірюють час розповсюдження імпульсу, який утворено при відбитті від бокових граней зразка і розповсюджується з першою поперечною швидкістю, і по позначенню розраховують пружні характеристики, згідно винаходу зразок виготовляють із кристала кубічної симетрії у вигляді стрижня прямокутного перетину, товщина якого обмежується площинами орієнтації

( $1\bar{1}0$ ), а ширина - площинами орієнтації (001), відношення ширини зразка до товщини вибирають від 1,0 до 1,5, імпульс поздовжніх коливань випромінюють у напрямку  $[110]$ , окремо спостерігають імпульси, що пройшли товщину і ширину зразка, додатково вимірюють час затримки вторинного імпульсу, що пройшов ширину зразка з другою поперечною швидкістю, відносно первинного імпульсу і враховують його при розрахунку пружних характеристик.

Опис процесу визначення модулів пружності у відповідності з пропонованим способом ілюструється малюнком, який пояснює вибір орієнтації зразка та трансформацію поздовжніх пружних хвиль в поперечні та навпаки, - фіг 1, схемою електроакустичного тракту - фіг 2 та осцилограмами ультразвукових імпульсів - фіг 3.

На фіг 1 зображено зразок, вирізаний із кристалу кубічної симетрії. Товщина  $b$  обмежується площинами ( $1\bar{1}0$ ), які проходять під кутом  $45^\circ$  до осей  $OX$  та  $OY$ . Ширину  $a$  обмежують площинами (001), тобто паралельні площині  $XOY$ . Довжину  $l$  обмежують площини ( $110$ ), позначені буквами  $P$  та  $Q$ , розташовані перпендикулярно бісектрисі кута  $XOY$ . Вісь зразка направлена вздовж  $[110]$ .

Для проведення вимірів в центрі грані  $P$

орієнтації ( $110$ ) прижимають випромінювач поздовжніх пружних хвиль, в центрі грані  $Q$  прижимають приймач поздовжніх пружних хвиль. Між випромінювачем і зразком, а також між зразком та приймачем наносять контактну рідину. Випромінювач крізь грань  $P$  (площина (ПО)) ультразвукова пружна хвиля розповсюджується вздовж осі зразка злегка розбігаючись. Для процесу розповсюдження в даному випадку характерна наявність як компонент пружної хвилі, які приходять до дальньої грані зразка після трансформації поздовжніх пружних хвиль в поперечні на бокових гранях, так і компонент без трансформації. Пояснення проводяться з використанням умовно виділених із пружних хвиль трьох променів, що виходять із точок  $A$ ,  $B$ ,  $C$ , передньої грані  $P$ .

Промінь  $AA_1$  відповідає розповсюдженню квазіпоздовжньої хвилі вздовж осі зразка з найбільшою швидкістю  $V_1$ . Реально в складі ультразвукового імпульсу, що відповідає даній хвилі, наявні компоненти квазіпоздовжніх пружних хвиль, які відбилися від бокових граней та розповсюджуються під малими кутами до осі стрижня.

Промені  $BB_1$ ,  $B_2B_3$  і  $CC_1$ ,  $C_2C_3$  відображають процеси формування вторинних імпульсів. Спочатку, на ділянках  $BB_1$  і  $CC_1$  розповсюджується первинний ультразвуковий імпульс квазіпоздовжніх пружних хвиль. Після відбиття від бокових граней проходить розщеплення первинної хвилі - частина її продовжує розповсюджуватися під малим кутом до площин бокових граней як квазіпоздовжня хвиля (ця компонента на малюнку не показана), друга частина - трансформується в квазіпоперечну, що розповсюджується під великими кутами до бокових граней. Промінь  $B_1B_2$  відповідає розповсюдженню квазіпоперечної хвилі, поляризованої в горизонтальній площині (001) та перетинає товщину зразка з першою поперечною швидкістю  $V_2$ . Промінь  $C_1C_2$  відповідає розповсюдженню квазіпоперечної хвилі, поляризованої в вертикальній площині та перетинає ширину зразка з другою поперечною швидкістю  $V_3$ . Кут відбиття для променя  $B_1B_2$  дорівнює  $\varphi$ , а для променя  $C_1C_2$  дорівнює  $\theta$ . Оскільки промені  $B_1B_2$  та  $C_1C_2$  лежать в різних площинах, то швидкості відповідних пружних хвиль відрізняються ( $V_2 > V_3$ ), тому і кути відбиття відрізняються ( $\varphi > \theta$ ). Крім того будуть відрізнятися рівняння, що пов'язують значення характеристик пружності зі швидкостями  $V_2$  та  $V_3$ . Промені  $B_2B_3$  та  $C_2C_3$  утворюються в результаті вторинної трансформації квазіпоперечної хвилі в квазіпоздовжню при нахильному падінні на відповідні бокові грані. Без такої вторинної трансформації прийомний п'єзоперетворювач не зареєструє квазіпоперечної хвилі.

Представлена на фіг 2 схема електроакустичного тракту має генератор 1 електричних імпульсів, зразок 2, до торців якого закріплені п'єзоелектричні перетворювачі 3 (випромінюючий) та 4 (приймачий), вимірювач часових інтервалів 5, в склад якого також входить осцилограф.

Осцилограма ультразвукових імпульсів фіг 3

включає декілька ультразвукових імпульсів, затриманих відносно зондуючого імпульсу ЗІ на різний час. Первинний імпульс А з'являється в момент досягнення квазіпоздовжньою хвилею перетворювача 4. По часу його затримки 11 розраховують швидкість  $V_1$ . Імпульс  $B_1$  з'являється в момент приходу вторинного імпульсу, який відповідає траєкторії  $BB_1$ ,  $B_2B_3$ , а імпульс  $C_1$  – траєкторії  $CC_1$ ,  $C_2C_3$ . Відповідний час затримки відносно моменту приходу первинного імпульсу дорівнює  $t_2$  та  $t_3$ . Імпульс  $B_2$  утворюється в результаті двох проходжень товщини зразка зі швидкістю поперечної хвилі. Затримка його відносно первинного імпульсу дорівнює  $2t_2$ . Співвідношення ширини та товщини зразка вибирають таким, щоб якнайдалі рознести імпульси  $B_1$  та  $C_1$ , але не допустити перекриття  $C_1$  та  $B_2$ .

Виготовлення зразка вказаної орієнтації забезпечує рознесення імпульсів ВІ та С І, коли товщина та ширина рівні ( $a=b$ ). Верхня границя відношення ширини до товщини, тобто 1,5 визначена із розрахунку, в основу якого закладено співвідношення  $t_3 < 2t_2$ .

Порядок проведення операцій при визначенні характеристик пружності кристалу кубічної симетрії розглянемо на конкретному прикладі монокристала кремнію. Із монокристала кремнію вирізають зразок товщиною  $b=10$  мм, шириною  $a=13$  мм, довжиною 50 мм, таким чином, щоб

товщина обмежувалась площинами  $(1\bar{1}0)$ , а ширина обмежувалась площинами  $(001)$ . По середині граней  $(110)$ , обмежуючих розмір зразка по довжині, через контактну рідину прижимають випромінювач та приймач ультразвукових пружних хвиль, вздовж довжини зразка, тобто у напрямку  $[110]$  випромінюють імпульс поздовжніх пружних хвиль на частоті 10 МГц. Вимірюють час проходження первинного імпульсу  $t_1$  вздовж довжини зразка  $l=50$  мм, а також часи затримки вторинних імпульсів  $t_2$  та  $t_3$ , які утворилися при трансформації первинного імпульсу на бокових

гранях  $(1\bar{1}0)$  та  $(001)$ , відповідно, в поперечні імпульси зі швидкостями  $V_2$  та  $V_3$  і наступною трансформацією в імпульси поздовжніх пружних хвиль. Значення цих затримок при температурі 20°C дорівнює  $t_1=5,474$  мкс,  $t_2=1,345$  мкс,  $t_3=2,136$  мкс. На основі цих даних одразу можна розрахувати швидкість квазіпоздовжніх пружних хвиль  $V_1=1/t_1=9134$  м/с, а також швидкості розповсюдження квазіпоперечних пружних хвиль, використовуючи співвідношення

$$V_2^{-2} = V_1^{-2} + \frac{t_2^2}{b^2}, \quad V_3^{-2} = V_1^{-2} + \frac{t_3^2}{a^2}.$$

Знаючи ці швидкості, можна розрахувати кути, під якими розповсюджуються імпульси

квазіпоперечних пружних хвиль,  $\varphi$ , та  $\theta$ , відраховані від нормалі до відповідних граней

$$\varphi = \arcsin \frac{V_2}{V_1}, \quad \theta = \arcsin \frac{V_3}{V_1},$$

Для вказаного зразка кремнію

$$V_2 = 5767,5 \text{ м/с}, \varphi = 39,178^\circ \quad V_3 = 5063,6 \text{ м/с}, \theta = 33,684^\circ$$

Для розрахунку характеристик пружності  $C_{11}$ ,  $C_{12}$ ,  $C_{44}$  розв'язують систему трьох рівнянь з трьома невідомими

$$2\rho r_1^2 = C_{11} + C_{12} + 2C_{44}, \quad (1)$$

$$2\rho V_2^2 = C_{11} + C_{44} - \sqrt{(C_{11} - C_{44})^2 \sin^2 2\varphi + (C_{12} + C_{44})^2 \cos^2 2\varphi}, \quad (2)$$

$$2\rho r_3^2 = C_{44} + \left( C_{44} + \frac{C_{11} + C_{12}}{2} \right) \sin^2 \theta + C_{11} \cos^2 \theta - \sqrt{\left( \frac{C_{11} + C_{12}}{2} \sin^2 \theta + (C_{44} - C_{11}) \cos^2 \theta \right)^2 + (C_{12} + C_{44})^2 \sin^2 2\theta} \quad (3)$$

Для густини використано значення  $\rho = 2328 \text{ кг/м}^3$

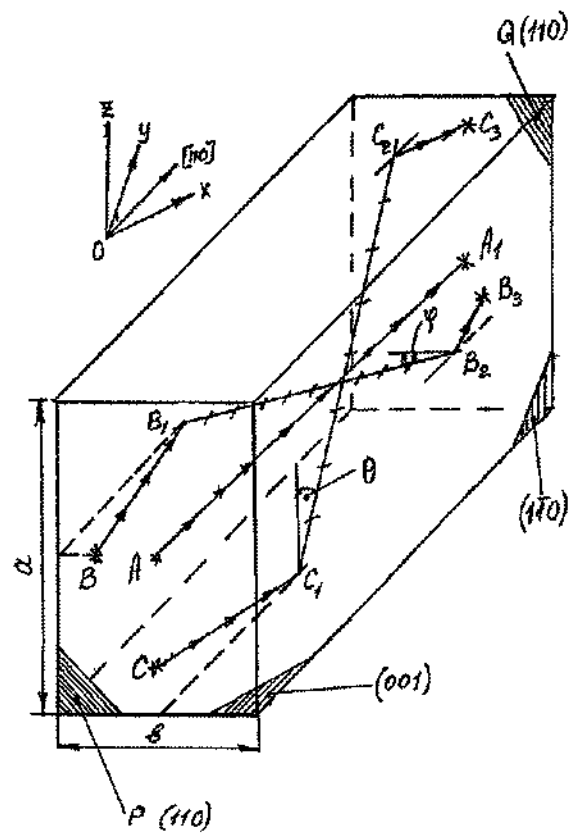
Рівняння (1) записано для розповсюдження квазіпоздовжніх пружних хвиль вздовж напрямку  $[110]$  – вздовж осі зразка

Рівняння (2) описує розповсюдження квазіпоперечної хвилі поляризованої в площині  $(001)$ , що розповсюджується в цій же площині. На фіг. 1 це ділянка  $B_1B_2$  траєкторії променів  $BB_1$ ,  $B_2B_3$ . Реальний сигнал містить в собі ще й хвилю дзеркально симетричну  $BB_1$ ,  $B_2B_3$ , але в обох хвилях швидкості квазіпоперечних пружних хвиль співпадають, що спричиняє синхронний прихід відповідних вторинних імпульсів до приймача.

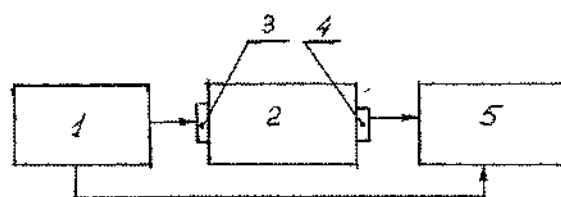
Рівняння (3) описує розповсюдження квазіпоперечної хвилі поляризованої в площині  $(1\bar{1}0)$  на ділянці  $C_1C_2$  траєкторії  $CC_1$ ,  $C_2C_3$  (фіг. 1). В результаті розв'язання системи рівнянь (1) – (3) отримуємо  $C_{11}=165,6 \text{ ГПа}$ ,  $C_{12}=63,9 \text{ ГПа}$ ,  $C_{44}=79,5 \text{ ГПа}$ .

Запропонований спосіб дозволяє визначити три модулі пружності кристалу кубічної симетрії в одному вимірі, використовуючи лише перетворювачі поздовжніх пружних хвиль. Отримані дані повністю описують пружні властивості кристалів кубічної симетрії. Це дозволяє синхронно вивчати зміни всіх характеристик пружності під дією зовнішніх факторів таких, як температурні та силові поля.

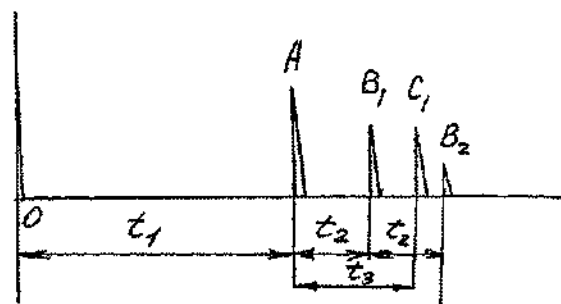
Позитивний ефект від використання запропонованого способу полягає не тільки в розширенні області використання відомого способу, але і в суттєвому спрощенні конструкції акустичного тракту.



Фиг. 1



Фиг. 2



Фиг. 3