

нального університета імені Тараса Шевченка; ул. Ванды Василевской, 24, г. Киев, Украина, 02000; e-mail: mysienkoandrey@gmail.com

Ardelyan Victoria – graduate student, Kirovograd Flight Academy of National Aviation University, st. Dobrowolski 1, Kropyvnytskyi, Ukraine, 25005; e-mail: viktorija1801-92@mail.ru

Obidin Dmitry – doctor of technical sciences, professor, Kirovograd Flight Academy of National Aviation University, the deputy head of the Kirovograd Flight Academy of National Aviation University on educational and scientific work; st. Dobrowolski 1, Kropyvnytskyi, Ukraine, 25005; e-mail: d.obidin@mail.ru

Musienko Andrii – candidate of Physics and Mathematics, Taras Shevchenko National University of Kyiv, researcher at the Faculty of Information Technologies of Kiev National Taras Shevchenko University; st. Wanda Wasilewska 24, Kiev, Ukraine, 02000; e-mail: mysienkoandrey@gmail.com

УДК 621.3.082.55, 535.568, 531.713.8

О. О. ОЛІЙНИК, М. Ф. ЖОВНІР, Б. А. ЦИГАНОК

РОЗРАХУНОК МЕХАНІЧНИХ НАПРУЖЕНЬ НА ОСНОВІ ВИМІРЮВАНЬ ДВОПРОМЕНЕЗАЛОМЛЕННЯ У ЗВУКОПРОВОДАХ ПАХ-ПРИСТРОЇВ

В статті приведені результати дослідження внутрішніх механічних напружень в п'єзокристалі $LiNbO_3$ YZ-зрізу, а також приповерхневих механічних напружень, які виникають у звукопроводах після напылення зустрічноштирових перетворювачів (ЗШП) при виготовленні пристроїв на поверхневих акустичних хвилях (ПАХ). Вимірний розподіл величини двоприменезаломлення з використанням методу модуляційної поляриметрії та розрахована на його основі відносна анізотропія механічних напружень у звукопроводі. Результати досліджень фотопружних властивостей звукопроводів демонструють високу чутливість модуляційно-поляризаційного методу вимірювання для контролю якості п'єзокристалів та виявлення залишкових приповерхневих механічних напружень після напылення ЗШП.

Ключові слова: механічні напруження, фотопружність, звукопровід, ПАХ-пристрої, модуляційна поляриметрія, ніобат літію, лінія затримки.

В статье приведены результаты исследования внутренних механических напряжений в пьезокристаллах $LiNbO_3$ YZ-срезы, а также приповерхностных механических напряжений, возникающих в звукопроводе после напыления встречноштировых преобразователей (ВШП) при изготовлении устройств на поверхностных акустических волнах (ПАВ). Измерено распределение величины двулучепреломления с использованием метода модуляционной поляриметрии и рассчитана на его основе относительная анизотропия механических напряжений в звукопроводе. Результаты исследований фотоупругих свойств звукопровода демонстрируют высокую чувствительность модуляционно-поляризационного метода измерения для контроля качества пьезокристаллов и выявления остаточных приповерхностных механических напряжений после напыления ВШП.

Ключевые слова: механические напряжения, фотоупругость, звукопровод, ПАВ-устройства, модуляционная поляриметрия, ниобат лития, линия задержки.

The article presents the study results of internal mechanical stresses in piezoelectric $LiNbO_3$ crystals of YZ-cut, as well as near-surface stress, appeared in sound conductor after deposition of interdigital transducers (IDT) on the surface acoustic wave (SAW) devices during manufacturing. Birefringence distribution was measured by modulation polarimetry method. Mechanical stresses in the sound conductor were calculated on the basis of relative optical anisotropy. Research results of photoelastic properties show a high sensitivity of modulation-polarization measurement method for quality control of piezocrystals and to identify near-surface residual stress after IDT deposition.

Keywords: mechanical stress, photoelasticity, sound conductor, SAW-devices, modulation polarimetry, lithium niobate, delay circuit.

Вступ. При вирощуванні монокристалів ніобату літію в ньому виникають дефекти кристалічної структури, пов'язані з хімічним складом розчинів, параметрами навколишнього середовища тощо. Зокрема, при розділенні монокристалу $LiNbO_3$ на пластини YZ-зрізу виникають поверхневі механічні напруження розтягу та стиснення, що викликані порушенням шаром на поверхнях звукопроводу. Наступне шліфування, полірування та відпалювання вже готових звукопроводів може значно зменшити величину поверхневих механічних напружень. Проблема контролю якості звукопроводів вирішують багатьма способами: поляризаційними, фотоакустичними, ультразвуковими, рентгенівськими, але для досягнення достатньої чутливості згадані методи можуть виявитись або занадто складними у застосуванні або недостатньо чутливими.

На звукопроводах з $LiNbO_3$ виготовляються сучасні прилади акустоелектроніки, зокрема, сенсори на поверхневих акустичних хвилях (ПАХ), які активно конкурують у сфері вимірювання фізичних величин. Застосування ПАХ обумовлене можливістю отриман-

ня хвильових процесів з малою довжиною хвилі, що забезпечує, при використанні частотного або фазового методів вимірювання, велику чутливість і точність перетворення інформації в широкому динамічному діапазоні. Сенсори на ПАХ відносяться до акустоелектронних компонентів, що використовують п'єзоелектричні пластини, на які нанесено систему зустрічно-штирових перетворювачів (ЗШП). Зазвичай, в сенсорах на ПАХ використовується чутливість спеціальних зрізів п'єзоелектричних матеріалів до дестабілізуючих факторів: температури, вологості, механічних напружень, деформації, тощо. Недоліком пристроїв даного типу є низька надійність внаслідок можливого руйнування мембрани через крихкість п'єзоелектричного звукопроводу при перевантаженнях та складність виготовлення мембрани у звукопроводі [1]. Актуальним залишається розробка методів неруйнівного контролю механічних напружень та параметрів деформації в мембранах, виготовлених з п'єзоелектричних матеріалів.

© О. О. Олійник, М. Ф. Жовнір, Б. А. Циганок, 2016

В роботі [2] на основі рівнянь Гріна-Крістофеля проаналізовані процеси поширення ПАХ в приповерхневому шарі звукопроводу під дією зовнішнього електричного поля або механічних напружень у вигляді математичних моделей. При теоретичних розрахунках ПАХ розглядаються у вигляді плоских монохроматичних хвиль, пружні зміщення та електричний потенціал котрих є взаємолінійними залежностями. Зазвичай, для спрощення математичної моделі вибирають граничні умови, які не враховують механічні напруження на поверхні кристалу (звукопроводу). У випадку, коли деформація від механічних напружень є ортогональною до поверхні звукопроводу, виникає можлива трансформація хвиль Релея у хвилі Стоунлі, що є окремою проблемою при роботі ПАХ-приладів. Наступним спрощенням у розрахунках приймається те, що покриття поверхні звукопроводу здійснено ідеальнопровідним шаром металу, достатньо тонким, щоб не викликати зміни механічних властивостей поверхні звукопроводу. Проведена оцінка впливу нелінійних тензорів деформації кристалу третього порядку і статичної деформації у звукопроводі на зміну характеристик ПАХ, що відповідно до величини коефіцієнтів тензору деформацій в межах 10^{-10} - 10^{10} вказує на низьку та високу залежність параметрів ПАХ від числового значення коефіцієнту.

З огляду на згадані обставини, очевидною є проблема моделювання пристроїв на ПАХ, оскільки похибка моделі, яка приймає ряд припущень стосовно ідеальності тензора діелектричних властивостей звукопроводу та достатньо тонких шарів ЗШП, може сягати понад 100%. Ця обставина вимагає розробки методики та інструментарію для контролю фізичних параметрів вихідних матеріалів звукопроводу (кварц, $LiNbO_3$, германат вісмуту та ін.) та пристроїв на їх базі для того, щоб враховувати початкові та граничні параметри в математичних моделях та проектуванні ПАХ-пристроїв.

Завданням даної роботи є застосування методу модуляційної поляриметрії для вимірювань величини двопронезаломлення в монокристалах ніобату літія, яка викликана явищем фотопружності. На основі результатів вимірювань – зробити розрахунки відносної величини приповерхневих механічних напружень та на їх основі сформулювати рекомендації щодо поліпшення існуючих та перспективних математичних моделей [2, 3], які б враховували фізичні параметри дефектів, жорстких включень, пустот, механічно напружених областей, деформацій та інше в матеріалах, в тому числі звукопроводах для ПАХ-пристроїв [1, 3, 4].

Методика та результати вимірювань. Механічні напруження в матеріалі звукопроводу проявляються у вигляді анізотропії показника заломлення в ортогональних напрямках, що добре відомо як фотопружний ефект (ФПЕ), який можна спостерігати фактично у всіх анізотропних середовищах.

Автори роботи [5] представили результати використання методу модуляційної поляриметрії для визначення абсолютних значень механічних напружень у сапфірових оптичних вікнах. Ними відмічено, що провести поляризаційні вимірювання традиційним полярископом-поляриметром ПКС-250 не має можливості, через його недостатню чутливість. Для експе-

риментальних досліджень полірованої пластини звукопроводу з ніобату літію був використаний саме згаданий вище модуляційно-поляризаційний метод, основою якого є реєстрація явища лінійного подвійного променезаломлення.

У якості об'єкту дослідження в даній роботі взято звукопровід у вигляді пластини $LiNbO_3$ YZ-зрізу розмірами $26_x \times 26_y \times 1_z$ мм та лінія затримки (ЛЗ) на ПАХ розмірами $9_x \times 12_y \times 1_z$ мм, яка виготовлена на поверхні звукопроводу шляхом напилення ЗШП товщиною 300 нм, рис. 1.

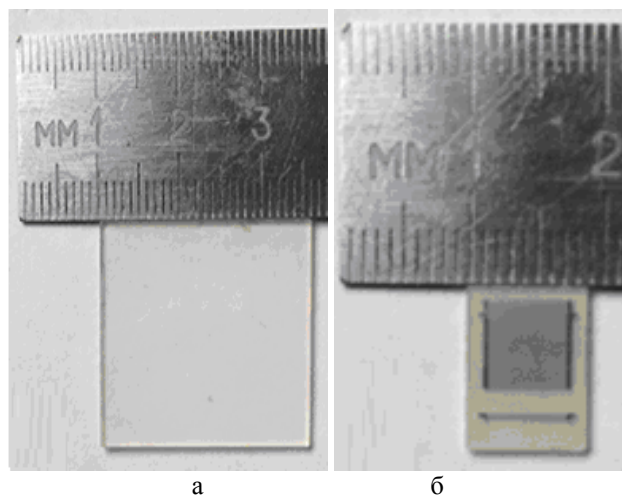


Рис. 1 – Зовнішній вигляд: а – пластини звукопроводу, б – лінії затримки на ПАХ

Полірування робочих поверхонь звукопроводів з ніобату літія здійснювалась на полірувальних станках типу ВІМ3.105.001 з використанням алмазної пасту АСМ 715 та АСМ 5/3 згідно ГОСТ 16877-71, та завершувалось алмазною пастою АСМ 1/10.

Вимірювання механічних напружень у звукопроводі (рис. 1а) виконувалось в режимі на просвіт вздовж кристалографічної осі Z, методика та метрологічні параметри якого докладно описані в роботах [6, 7]. Зв'язок величини двопронезаломлення δ_n з анізотропією показника заломлення $n_{\perp} - n_{\parallel}$, його відповідною різницею головних механічних напружень $\sigma_{\perp} - \sigma_{\parallel}$ та товщиною зразка d_z , при довжині хвилі $\lambda = 630$ нм описується виразами:

$$\delta_n = \frac{2\pi}{\lambda} d_z (n_{\perp} - n_{\parallel}), \quad (1)$$

$$\sigma_{\perp} - \sigma_{\parallel} = \frac{2\pi d_z (n_{\perp} - n_{\parallel})}{\lambda C}. \quad (2)$$

Розрахунок нормованого розподілу механічних напружень на основі результатів вимірювання параметрів Стокса лінійно поляризованого лазерного випромінювання, направленої під кутом 45° до його осей XY в режимі на просвіт представлено на рис. 2. Варто відмітити, що майже вся внутрішня структура звукопроводу має неоднорідні механічні напруження стиснення, а на краях – неоднорідні механічні напруження розтягу. Оскільки сили розтягу і сили стиснен-

ня є врівноваженими, то очевидно з рис. 2, що питома енергія сил розтягу набагато більша та зосереджена здебільшого на краях зразка. Відносна зміна механічних напружень зі знаком мінус відповідає силам розтягування, зі знаком плюс – силам стиснення. Відносна зміна показника заломлення лежить в межах $\Delta n = 10^{-6} \div 4 \cdot 10^{-4}$. Така дисперсія можлива не лише завдяки розподілу механічних напружень, але й через дійсний хімічний склад досліджуваного кристалу ніобату літію та точність кристалографічної орієнтації [8]. В будь-якому випадку, результати дослідження двопронезаломлення дають інформацію про однорідність властивостей звукопроводу в межах кристалу звукопроводу. Для визначення абсолютних значень величини механічного напруження необхідні додаткові дослідження константи фотопружності C та її залежності від геометричних параметрів звукопроводу та кристалографічної орієнтації.

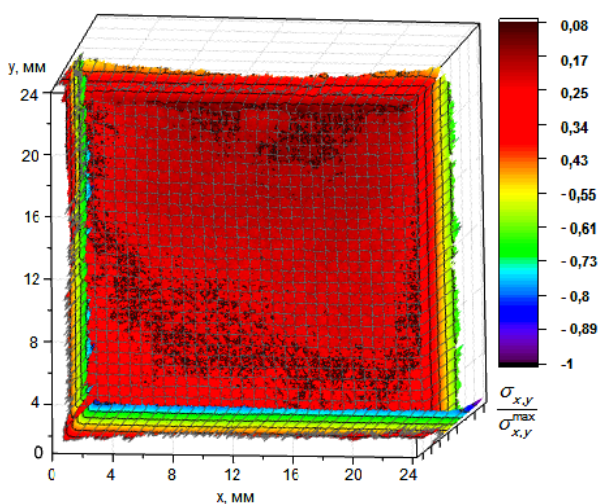


Рис. 2 – Нормований розподіл механічних напружень в пластині LiNbO₃ за нормальних умов ($d_z = 1$ мм), показник заломлення n може приймати значення від 2,29 до 2,2

Прийнявши константу фотопружності для ніобату літію $C=2,77 \cdot 10^{-9}$ Па⁻¹ [9], та підставивши її у рівняння (2) отримаємо абсолютні значення внутрішніх механічних напружень в діапазоні $\sigma_{\perp} - \sigma_{\parallel} = [1,15; -460]$ МПа. Причому, з врахуванням інструментальної похибки $\pm 10\%$ при вимірюваннях синхронно-фазовим вольтметром, методичної $\pm 5\%$ та похибок заокруглення отримаємо похибку розрахунків, яка не перевищує 20%.

Вимірювання величини анізотропії показника заломлення у звукопроводі ЛЗ на ПАХ (рис. 1б) проведено у відбитому від поверхні випромінюванні, оскільки ЗШП утворює оптично непрозору плівку. При великих значеннях показника поглинання та відбиття, відбите лазерне випромінювання формується в шарі, співрозмірному з довжиною поглинання, а при малих – потрібно враховувати двохразовий прохід випромінювання через товщину зразка, а також механізм взаємодії з відбиваючою поверхнею. На основі розв'язку рівнянь Максвелла для речовини з діелектричною проникністю ϵ використовується наступний вираз для

знаходження фази відбитої від анізотропного середовища електромагнітної хвилі [13]:

$$\delta_g = \arctg \left[\frac{2n'_y n''_y}{1 - (n'_y)^2 - (n''_y)^2} \right] - \arctg \left[\frac{2n'_x n''_x}{1 - (n'_x)^2 - (n''_x)^2} \right] \quad (3)$$

n'_y, n''_y – дійсна та уявна частини комплексного показника заломлення вздовж y -координати; n'_x, n''_x – дійсна та уявна частини комплексного показника заломлення вздовж x -координати. Оскільки матеріал звукопроводу LiNbO₃ має тригональну сингонію, ромбоєдричну структуру та набуває анізотропію діелектричних властивостей при одновісній деформації, то можна прийняти як модель – лінійну залежність показників заломлення від одновісного механічного напруження [10], що викликане напленням ЗШП:

$$\begin{aligned} n'_x &= n'_{0x} + C\sigma_x, \\ n''_x &= n''_{0x} + C\sigma_x, \\ n'_y &= n'_{0y} - \nu C\sigma_y, \\ n''_y &= n''_{0y} - \nu C\sigma_y, \\ \sigma_i &= \sqrt{\sigma_x^2 + \sigma_y^2}, \end{aligned} \quad (4)$$

де C – константа фотопружності; ν – коефіцієнт Пуассона (для LiNbO₃ $\nu=0,276$ [10]); σ_x, σ_y – компоненти приповерхневих механічних напружень σ_i вздовж ортогональних координат XY [5, 7].

Оптична схема приладу для знаходження n'_x, n''_x, n'_y, n''_y та вимірювання δ_g побудована за принципом інтерферометра Майкельсона, у якому застосовано фотопружний модулятор стану поляризації, рис. 3.

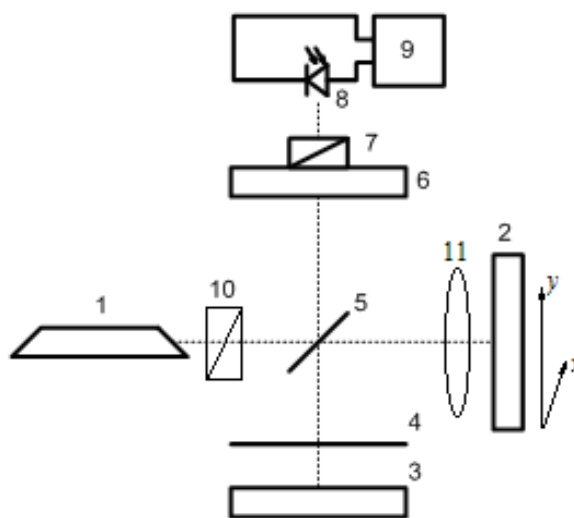


Рис. 3 – Оптична схема приладу для вимірювання механічних напружень у звукопроводі LiNbO₃ в режимі відбиття: 1 – лазер, 2 – звукопровід, 3 – дзеркало, 4 – чвертьхвильова фазова пластинка, 5 – напівпрозоре дзеркало, 6 – фотопружний модулятор, 7 – поляризатор, 8 – фотоприймач, 9 – синхронно-фазовий детектор, 10 – поляризатор, 11 – фокусуюча лінза

Для вимірювання відносно великих механічних напружень (порядку одиниць ГПа) у звукопроводах можливо використати поляризаційний метод реєстрації двопронезаломлення величиною $\Delta n = 10^{-3}$, описаний в [12]. У випадку малих значень механічних напружень $\Delta n = 10^{-12} \div 10^{-3}$, для їх виявлення можуть бути придатні здебільшого диференціальні методики модуляційної поляриметрії [13]. Висока чутливість диференціальних методик до зміни стану поляризації пояснюється тим, що окрім аналізу амплітуди, фази та частоти електромагнітного випромінювання додатково аналізуються параметри комплексного показника заломлення $N = n + ik$, який в анізотропній речовині описується двома компонентами дійсної складової n_{\parallel} , n_{\perp} та двома компонентами уявної складової - показника поглинання k_{\perp} і k_{\parallel} . Різниця складових показника заломлення впливає на різницю швидкостей ортогональних складових падаючого під азимутальним кутом $\theta = \pi/4$ лазерного випромінювання, що в свою чергу призводить до перетворення лінійного стану поляризації в еліптичний. Анізотропія показника поглинання спричиняє, крім еліптичної поляризації, зміну азимуту лазерного випромінювання. Вимірювання різниці між компонентами показника заломлення та поглинання дає додаткові параметри для розрахунку амплітуди та фази механічних напружень в матеріалах електроніки. На сьогодні обмеження чутливості вимірювання двопронезаломлення лежать в межах $\Delta n = 10^{-13} \div 10^{-12}$, що викликано переважно наявністю теплових та квантових шумів у вимірювальних приладах, а також чутливість залежить від часу накопичення корисного сигналу [6].

Для експериментального визначення величини двопронезаломлення у відбитому від анізотропної поверхні звукопроводу випромінюванні використана оптична схема вимірювання циркулярної компоненти вектора Стокса. Для цього в оптичній схемі на рис.3 в початковому стані на зразок падає лінійно поляризоване випромінювання довжиною хвилі $\lambda = 632$ нм та азимутом поля хвилі 45° відносно осей XY, а фотопружний модулятор налаштовано на реєстрацію циркулярно поляризованої компоненти лазерного випромінювання. Описана методика є універсальною, тому що дозволяє вимірювати механічні напруження у відбитті не лише в оптично прозорих матеріалах як то кварц, ніобат літію, але й в оптично непрозорих: кремній, германій, GaAs, CdS, CdTe, тощо [13].

Результати вимірювання двопронезаломлення δ_s в приповерхневій полірованій області ЛЗ на ПАХ одержані шляхом растрового сканування лазерним променем сфокусованим до діаметру 10 мкм. Остаточний розрахунок відносного розподілу механічних напружень методом сіток зроблений згідно виразів (3), (4). Для спрощення розрахунків область поверхні з напиленнями ЗШП вважається квазітонкою суцільною плівкою.

З врахуванням різних коефіцієнтів відбиття алюмінію та ніобату літію, результати розрахунків відносної зміни механічних напружень на рис. 4 демонструють очевидну неоднорідність величини анізотро-

пії механічних напружень на поверхні звукопроводу. Також слід відмітити, що шини ЗШП створюють максимальні механічні напруження розтягу порядку 4,6 ГПа, а ЗШП структура спричиняє напруження розтягу в межах [0,53; 2,65] ГПа.

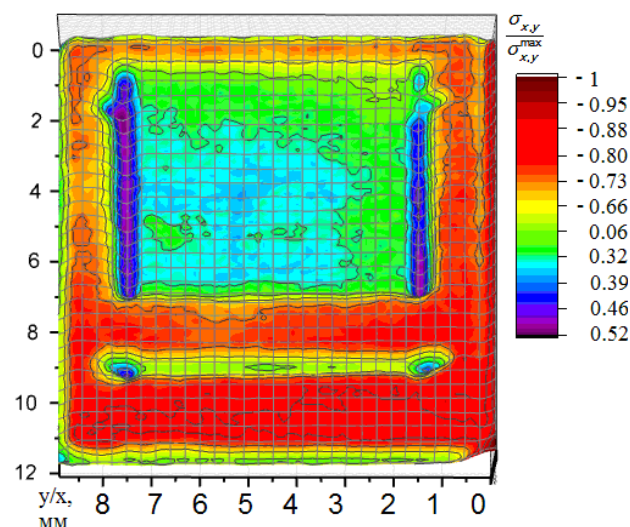


Рис. 4 – Нормований розподіл механічних напружень на поверхні звукопроводу ЛЗ на ПАХ

Для теоретичної оцінки експериментальних результатів використано підхід, представлений в роботі [11]. Механічні напруження, які створюють шини ЗШП (алюмінієві та з проміжним шаром титану), нанесені на кристалічну підкладку ніобату літію, розраховані згідно виразів:

$$\sigma_{Al} = \frac{E(a_0 - a_{Al})}{2\nu a_0} = 65,78 \text{ ГПа},$$

$$\sigma_{Ti} = \frac{E(a_0 - a_{Ti})}{2\nu a_0} = 31,69 \text{ ГПа},$$
(5)

де E – модуль Юнга (170 ГПа); a_0 – період кристалічної ґратки звукопроводу (0,515 нм); a_{Al} – період кристалічної ґратки алюмінію (0,405 нм), a_{Ti} – період кристалічної ґратки титану (0,465 нм), ν – коефіцієнт Пуассона (0,276).

Порівняння теоретичних розрахунків з результатами експериментальних досліджень демонструє розбіжність у 7–14 разів, але підтверджує порядок величини механічних напружень, які виникають після напилення ЗШП. Очевидно, що використовуючи проміжний шар титану 2–10 нм перед напиленням 300 нм алюмінієвих ЗШП, можна зменшити механічні напруження на поверхні звукопроводу удвічі. Наступні операції відпалювання після напилення шарів металізації, які не враховують вирази (5), можуть зменшити поверхневі механічні напруження у 4 і більше разів [6]. Також плівка алюмінію товщиною 300 нм на поверхні звукопроводу не може вважатись абсолютно тонкою, оскільки частина механічних напружень розсіюється в шарі металізації, так само як і в об'ємі підкладки (звукопроводу). Отже можна дійти висновку, що після технологічних операцій напилення металізації на поверхню звукопроводу вдається зменшити по-

верхнєві механічні напруження орієнтовно в 7 разів, але не вдалось позбавитись їх повністю. Залишкові механічні напруження на поверхні ЛЗ на ПАХ лежать в межах $[-8,85; 4,6]$ ГПа.

Висновки. Застосування диференційного методу модуляційної поляриметрії, який полягає у модуляції ортогональних компонент лінійно поляризованого лазерного випромінювання, дозволяє дослідити механічні характеристики звукопроводу та ЛЗ на ПАХ. Отримані результати демонструють, що при проектуванні пристроїв на ПАХ не варто нехтувати анізотропією механічних напружень в приповерхневій області звукопроводу. Необхідно заздалегідь закладати в технологічний процес методи, які не будуть враховувати амплітудну та фазову анізотропію властивостей матеріалів акустоелектроніки. Результати чутливого вимірювання фазового зсуву між ортогональними компонентами лазерного випромінювання отримано з використанням синхронно-фазового детектора UNIPAN 232В, що забезпечує відношення С/Ш на граничній чутливості різниці фаз $\Delta S = 2\pi \cdot 10^{-8}$ рад, не менше 65 дБ. Проведені вимірювання лежать в області $\Delta S = 2\pi \cdot 10^{-5}$ рад, що при часі накопичення сигналу 0,1 с дозволило отримати результати вимірювань з відношенням С/Ш=80 дБ.

Інструментальна та методична похибка проведених вимірювань не перевищують 20 %.

В перспективі описана методика може також використовуватись для досліджень фізичних параметрів не лише звукопроводів, але й оптично непрозорих полікристалічних та аморфних матеріалів (Si, C, CdS, CdTe, кераміка, тощо), в яких виникають механічні напруження внаслідок нанесення струмопровідних чи резистивних паст, напилення провідників, епітаксії, іонної імплантації і т.д.

Список літератури:

- Zhovnir, M. F. Mathematical Models of Pressure and Microdisplacement Sensors Based on Electric Field Perturbation of the Surface Acoustic Waves [Text] / M. F. Zhovnir, O. O. Oliinyk, L. D. Pysarenko // Journal of Nano- and Electronic Physics. – 2016. – № 8 (1). – P. 01024–1–01024–5. doi: [10.21272/jnep.8\(1\).01024](https://doi.org/10.21272/jnep.8(1).01024)
- Бурков, С. И. Влияние внешних статистических воздействий на распространение упругих волн в пьезокристаллах и слоистых структурах [Текст]: дис. докт. физ.-мат. наук: 01.04.03 / С. И. Бурков. – Сибирский федеральный университет. – Красноярск, 2016. – 274 с.
- Гук, Н. А. Идентификация геометрических параметров упругих свойств жестких включений в тонкой пластине [Текст] / Н. А. Гук, Н. И. Степанова // Восточно-Европейский журнал передовых технологий. – 2016. – № 2/7 (80). – С. 4–9. doi: [10.15587/1729-4061.2016.64395](https://doi.org/10.15587/1729-4061.2016.64395)
- Жовнір, М. Ф. Розробка пристроїв на ПАХ для вимірювання лінійних та кутових переміщень. Частина 1 [Текст]: зб. наук. пр / М. Ф. Жовнір, О. О. Олійник // Вісник НТУ "ХПІ". Серія: Механіко-технологічні системи та комплекси. – 2015. – № 52 (1161). – С. 60–65.
- Сердега, Б. К. Поляризаційно-модуляційна методика визначення абсолютних значень механічних напружень у сапфірових оптичних вікнах [Текст] / Б. К. Сердега, І. С. Матяш, В. П. Маслов, Н. В. Качур // Вісник Національного технічного університету України "Київський політехнічний інститут". Серія: Приладобудування. – 2013. – Вип. 45. – С. 82–90.
- Matyash, I. E. Detection of stresses induced by heat flux in a solid by using a photoelastic microscope [Text] / I. E. Matyash, I. A. Minaylova, O. N. Mischuk, O. O. Oliinyk, B. K. Serdega, B. A. Tsyganok // Electronics and communications. – 2014. – Vol. 19, № 2 (79). – P. 9–22.
- Бекетов, Г. В. Фізичні основи поляриметрії високої інформаційної здатності [Текст]: монографія / Г. В. Бекетов, О. С. Климов, І. С. Матяш, Є. А. Оберемок, С. П. Руденко. – Київ: НТУУ «КПІ», 2013. – 249 с.
- Атучин, В. В. Зависимость показателей преломления ниобата лития от химического состава кристалла [Текст] / В. В. Атучин // Весник СибГУТИ. – 2009. – №3. – С. 39–45.
- Cordero-Montalvo, C. Piezo and thermo-optic behavior of LiTaO₃ [Text] / C. Cordero Montalvo, K. Vedam // Journal of Applied Physics. – 1981. – № 52 (2). – P. 944–947. doi: [10.1063/1.328782](https://doi.org/10.1063/1.328782)
- Нарасимхамурти, Т. С. Фотоупругие и электрооптические свойства кристаллов [Текст] / Т. С. Нарасимхамурти. – Москва: Мир, 1984. – 623 с.
- Шановалов, В. А. Спин-волновой резонанс и его поверхностная мода в пленке мангалита [Текст] / В. А. Шановалов // Физика и техника высоких давлений. – 2010. – Т. 20, № 1. – С. 56–61.
- Сусликов, Л. М. Новый метод измерения дисперсии двоякопреломления анизотропных кристаллов [Текст] / Л. М. Сусликов, З. П. Гадьмаши, С. В. Кун, С. Ю. Переш // Научный вестник Ужгородского университета. Серия: Физика. – 1998. – Вип. 2. – С. 134–136.
- Сердега, Б. К. Модуляційна поляриметрія [Текст] / Б. К. Сердега. – Київ: Наукова думка, 2011. – 237 с.

Bibliography (transliterated):

- Zhovnir, M. F., Oliinyk, O. O., Pysarenko, L. D. (2016). Mathematical Models of Pressure and Microdisplacement Sensors Based on Electric Field Perturbation of the Surface Acoustic Waves. Journal of Nano- and Electronic Physics, 8 (1), 01024–1–01024–5. doi: [10.21272/jnep.8\(1\).01024](https://doi.org/10.21272/jnep.8(1).01024)
- Burkov, S. I. (2016). Influence of external statistical effects on the propagation of elastic waves in piezoelectric crystals and layered structures. Siberian Federal University, Krasnoyarsk, 274.
- Guk, N. A., Stepanova, N. I. (2016). Identification of the geometry and elastic properties of rigid inclusions in thin plate. Eastern-European Journal of Enterprise Technologies, 2(7(80)), 4–9. doi: [10.15587/1729-4061.2016.64395](https://doi.org/10.15587/1729-4061.2016.64395)
- Zhovnir, M. F., Oliinyk, O. O. (2015). Development of SAW devices for measuring linear and angular displacements. Part 1. Mechanical engineering systems and complexes, 52 (1161), 60–65.
- Serdega, B. K. (2013). Polarization-modulation method of determining the absolute values of mechanical stresses in sapphire optical windows. Bulletin National Technical University of Ukraine «Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute». Series: Instrument, 45, 82–90.
- Matyash, I. E., Minaylova, I. A., Mischuk, O. N., Oliinyk, O. O., Serdega, B. K., Tsyganok, B. A. (2014). Detection of stresses induced by heat flux in a solid by using a photoelastic microscope. Electronics and communications, 19, 2 (79), 9–22.
- Beketov, H. V., Klymov, O. S., Matyash, I. Ye., Oberemok, Ye. A., Rudenko, S. P. (2013). Fizychni osnovy poliarymetrii vysokoi informatyvnoi zdatnosti. Kiev: NTUU «KPI», 249.
- Atuchyn, V. V. (2009). Zavsymost pokazatelei prelomleniya nyobata lytyia ot khymycheskoho sostava krystalu. Vesnyk SybHUTY, 3, 39–45.
- Cordero-Montalvo, C., Vedam, K. (1981). Piezo- and thermo-optic behavior of LiTaO₃. Journal of Applied Physics, 52 (2), 944–947. doi: [10.1063/1.328782](https://doi.org/10.1063/1.328782)
- Narasimhamurty, T. S. (1984). Photoelastic and electro-optical properties of crystals. Moscow: Myr, 623.
- Shapovalov, V. A. (2010). Spyn-volnovoi rezonans y eho poverkhnostnaia moda v plenke manhalyta. Fyzyka i tekhnika vysokyykh davleniy, 20 (1), 56–61.
- Suslikov, L. M. (1988). New method for measuring dispersion of birefringence in anisotropic crystals. Scientific Bulletin of the Uzhgorod University. Series: Physics, 2, 134–136.
- Serdega, B. K. (2011). Modulation polarimetry. Kiev: Naukova Dumka, 237.

Поступила (received) 18.02.2016

Бібліографічні описи / Библиографические описания / Bibliographic descriptions

Розрахунок механічних напружень на основі вимірювань двопронезаломлення у звукопроводах ПАХ-пристроїв/ О. О. Олійник, М. Ф. Жовнір, Б. А. Цыганок// Вісник НТУ «ХПІ». Серія: Механіко-технологічні системи та комплекси. – Харків : НТУ «ХПІ», 2016. – № 7(1179). – С. 66–71.– Бібліогр.: 13 назв. – ISSN 2079-5459.

Расчет механических напряжений на основе измерений двулучепреломления в звукопроводах ПАВ-устройств/ О. О. Олейник, Н. Ф. Жовнир, Б. А. Цыганок// Вісник НТУ «ХПІ». Серія: Механіко-технологічні системи та комплекси. – Харків : НТУ «ХПІ», 2016. – № 7(1179). – С. 66–71. – Бібліогр.: 13 назв. – ISSN 2079-5459.

Calculation of mechanical stresses based on birefringence measurements in sound conductors of SAW-devices/ О. О. Oliinyk, М. F. Zhovnir, В. А. Tsyganok //Bulletin of NTU “KhPI”. Series: Mechanical-technological systems and complexes. – Kharkov: NTU “KhPI”, 2016. – № 7 (1179).– P. 66–71. – Bibliogr.: 13. – ISSN 2079-5459.

Відомості про авторів / Сведения об авторах / About the Authors

Олійник Остап Олегович – НТУУ «КПІ», асистент Кафедри електронних приладів та пристроїв, адреса: вул. Політехнічна, 16, м. Київ, Україна, 03056. e-mail.: ostap.oliinyk@gmail.com

Олейник Остап Олегович – НТУУ «КПИ», ассистент Кафедры электронных приборов и устройств, адрес: ул. Политехническая, 16, г. Киев, Украина, 03056. e-mail.: ostap.oliinyk@gmail.com

Ostap Oliinyk – NTUU “KPI”, assistant of Electronic Devices and Equipment Department, address: 16 Polytechnic str., Kyiv, Ukraine, 03056. e-mail.: ostap.oliinyk@gmail.com

Жовнір Микола Федорович – кандидат технічних наук, НТУУ «КПІ», доцент Кафедри електронних приладів та пристроїв, адреса: вул. Політехнічна, 16, м. Київ, Україна, 03056

Жовнир Николай Федорович – кандидат технических наук, НТУУ «КПИ», доцент Кафедры электронных приборов и устройств, адрес: ул. Политехническая, 16, г. Киев, Украина, 03056

Mykola Zhovnir – candidate of technical sciences, NTUU “KPI”, associate professor of Electronic Devices and Equipment Department, address: 16 Polytechnic str., Kyiv, Ukraine, 03056

Цыганок Борис Архипович – кандидат технічних наук, НТУУ «КПІ», професор Кафедри електронних приладів та пристроїв, адреса: вул. Політехнічна, 16, м. Київ, Україна, 03056

Цыганок Борис Архипович – кандидат технических наук, НТУУ «КПИ», профессор Кафедры электронных приборов и устройств, адрес: ул. Политехническая, 16, г. Киев, Украина, 03056

Borys Tsyganok – candidate of technical sciences, NTUU “KPI”, professor of Electronic Devices and Equipment Department, address: 16 Polytechnic str., Kyiv, Ukraine, 03056