

У. В. Яхневич<sup>1</sup>, О. О. Горбунов<sup>1</sup>, І. І. Сиворотка<sup>2</sup>, О. А. Бурій<sup>1</sup>, Д. Ю. Сугак<sup>1,2</sup><sup>1</sup>Національний університет “Львівська політехніка”,<sup>2</sup>Науково-виробниче підприємство “Електрон–Карат”

## МОДЕЛЮВАННЯ АКТЮАТОРА ТОЧНОГО ПОЗИЦІЮВАННЯ НА ОСНОВІ БІДОМЕННОГО КРИСТАЛА НІОБАТУ ЛІТІЮ

© Яхневич У. В., Горбунов О. О., Сиворотка І. І., Бурій О. А., Сугак Д. Ю., 2019

Проведено моделювання актюатора на основі бідоменної структури ніобату літію. Встановлено залежності величини зміщень актюатора від його геометричних розмірів та прикладеної різниці потенціалів. Зокрема показано, що залежність величини зміщення від прикладеної напруги має лінійний характер в усьому дослідженому діапазоні (–300–300 В). Результати розрахунків добре узгоджуються з відомими експериментальними даними.

**Ключові слова:** пристрої позиціонування, бідоменна структура, ніобат літію.

U. Yakhnevych, O. Gorbunov, I. Syvorotka, O. Buryy, D. Sugak  
Lviv Polytechnic National University

## SIMULATION OF THE ACTUATOR OF PRECISE POSITIONING BASED ON THE LITHIUM NIOBATE BIDOMAIN CRYSTAL

© Yachnevych U., Gorbunov O., Syvorotka I., Buryy O., Sugak D., 2019

The simulation of the actuator based on lithium niobate bidomain structure was carried out. The dependencies of the values of actuator displacements on its geometrical dimensions and the applied voltages were determined. Particularly, it is shown that the dependence of the displacement on the applied voltage is linear in the whole investigated range (–300–300 V). The results of the calculations are in the good agreement with known experimental data.

**Key words:** positioning devices, bidomain structure, lithium niobate.

### Вступ

Актюатори точного позиціонування, тобто пристрої, призначені для приведення в дію малорозмірних механізмів, систем або керування ними завдяки генерованому руху або силі, використовують у мікроскопах, мікродиспенсерах, мікромоторах для хірургії, скануючих дзеркалах, скануючих мікроскопах, пристроях юстування лазерів, п'єзоприводах систем регулювання автомобільних підвісок та фар тощо [1–3]. Широкого застосування вони набули у скануючій зондовій мікроскопії, яка дає змогу маніпулювати об'єктами на нанорозмірному рівні, досліджувати поверхню наноструктур, отримувати їх зображення з високим, зокрема молекулярним, розділенням.

Для створення таких актюаторів у більшості випадків застосовують п'єзокераміку, а саме цирконат-титанат свинцю (ЦТС). Використання цієї кераміки пояснюється великими значеннями поздовжніх і поперечних п'єзоелектричних модулів, що дає змогу здійснювати позиціонування за відносно низьких керуючих напруг. Проте п'єзокераміка має суттєві недоліки: значний гістерезис (~20 %), невисоку температуру Кюрі (250...300 °С), ЦТС виявляє ефект старіння та суттєву залежність величини п'єзоелектричних модулів від температури [4]. Також важливим є той факт, що у Європейському Союзі ухвалено рішення про заборону використання свинцю у техніці [5]. Як альтернативу можна використовувати п'єзоелектричний монокристал ніобату літію  $\text{LiNbO}_3$ , який хоча й характеризується меншими величинами п'єзоелектричних модулів, проте має високу температуру Кюрі (~ 1160 °С), не виявляє гістерезису і повзучості та є повністю безпечним для людини і довкілля. Елементом розроблення такого актюатора є моделювання його роботи і оцінка можливих величин зміщень, які забезпечуються за різних прикладених напруг та геометричних розмірів бідоменної структури. Проведення такого аналізу і є основною метою цієї роботи.

## Створення бідоменної структури на основі кристала $\text{LiNbO}_3$

Як відомо, бідоменна структура на основі кристала  $\text{LiNbO}_3$  може бути отримана в різний спосіб. Так, у [6–8] інверсію вектора поляризації в частині пластини  $\text{LiNbO}_3$  забезпечували за методом дифузійного відпалу, який полягає у витримці пластини за температури, дещо нижчої за температуру Кюрі у повітрі або в потоці  $\text{Ar}$ . Зміну напрямку вектора поляризації при цьому пов'язують із втратою  $\text{Li}_2\text{O}$  з однієї із поверхонь пластини під час відпалу [6].

Інший метод відпалу, який використовується, зокрема у [9–11], базується на нагріванні пластини ніобату літію світлом. Відповідно до електротермічного методу, доменна структура виникає внаслідок прикладання періодично змінного електричного поля до кристала під час його руху крізь теплову зону [4].

Можливим є і з'єднання шляхом високотемпературного відпалу пластин  $\text{LiNbO}_3$  з різною орієнтацією векторів поляризації у них. Реалізація подібного з'єднання склеюванням вважається неефективним методом отримання бідоменної структури, оскільки значна в'язкість клейового шару негативно позначається на властивостях отримуваної структури [4].

Разом із тим, досліджено можливість створення бідоменної структури з двох окремих пластин ніобату літію шляхом їх дифузійного з'єднання. Для цього використовувалась дифузія міді з тонкої плівки, розташованої між двома пластинами  $\text{LiNbO}_3$ . Товщина мідного шару, який виступав джерелом дифузії  $\text{Cu}$  до  $\text{LiNbO}_3$ , становила 600 нм, відпал проводили протягом 24 годин за температури  $800^\circ\text{C}$  із навантаженням на з'єднувані поверхні порядку  $3\text{ кг/см}^2$ . Пластини кристала мали товщину 2 мм вздовж кристалографічної осі  $Z$ , та площу з'єднаних  $XY$  граней  $1\times 2\text{ см}^2$ ; грані перед нанесенням плівки міді були механічно оброблені до високого ступеня площинності ( $\lambda/8$  для  $\lambda = 633\text{ нм}$ ). Орієнтація пластин була такою, що вектори поляризації  $\vec{P}$  у з'єднаних кристалічних елементах були розташовані антипаралельно (і спрямовані від границі). Фотографії отриманої в такий спосіб межі з'єднання пластин наведено на рис. 1. Дифузійно з'єднана структура відрізняється більшою механічною міцністю, ніж отримувана шляхом температурного з'єднання пластин і разом із тим позбавлена недоліків, зумовлених наявністю клейового прошарку.

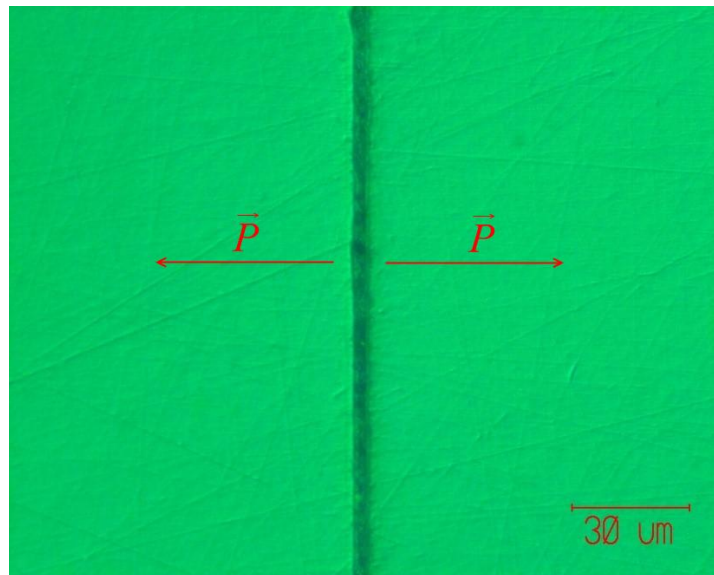


Рис. 1. Зображення межі дифузійно з'єднаних пластин  $\text{LiNbO}_3$

Для створення актюатора точного позиціонування на основі подібної структури, яке передбачається надалі, доцільно провести моделювання роботи пристрою, використавши широкий набір таких параметрів, як його геометричні розміри та величини робочої електричної напруги.

Крім того, оскільки прошарок міді може бути використаний для дифузійного з'єднання структури, подібне моделювання слід реалізувати і для випадку, коли між пластинами актюатора знаходиться плівка  $\text{Cu}$  товщиною порядку  $0,1\text{ мм}$ .

## Модель актюатора: побудова та верифікація

Розрахунок можливих зміщень актюатора проводився за допомогою метода скінченних елементів у програмному пакеті COMSOL Multiphysics. Характеристики кристала  $\text{LiNbO}_3$ , що використовувалися в розрахунку, наведено у табл. 1 (за даними [12]). Верифікували побудовану модель на основі характеристик актюатора, представлених у [13]. Цей актюатор був реалізований на основі пластини  $Y + 127^\circ$  зрізу, при цьому вектори поляризації в обох частинах є антипаралельними один відносно до іншого та складали кут  $37^\circ$  з поверхнею пластин. Геометричні розміри актюатора були наступними: ширина 15 мм, довжина 70 мм, товщина 1,6 мм. Бідоменна структура у пластині формувалася за методом стаціонарного зовнішнього нагрівання (світлового відпалу). Зазначимо, що оскільки приблизно 5 мм довжини актюатора припадало на кріплення, його реальна робоча довжина становила 65 мм. Різниця потенціалів, що прикладалися між великими поверхнями актюатора (перпендикулярними до осі  $Z$  глобальної системи координат, див. рис. 2) становила від  $-300$  до  $300$  В. Актюатор жорстко закріплювався з одного із боків (рис. 2).

Таблиця 1

Параметри кристала  $\text{LiNbO}_3$ , що використовувалися для розрахунку

Параметр	Величина
Густина, $\text{кг/м}^3$	4700
Діелектрична проникність	$\epsilon_{11} = \epsilon_{22} = 43,6; \epsilon_{33} = 29,16$
Коефіцієнти пружності, $10^{10}$ Па	$C_{11} = C_{22} = 20,3; C_{33} = 24,3; C_{44} = C_{55} = 6,0; C_{66} = 7,5; C_{12} = 5,3;$ $C_{13} = C_{23} = 7,5; C_{14} = -C_{24} = C_{56} = 0,9$
П'єзоелектричні постійні, $\text{Кл/м}^2$	$e_{15} = e_{24} = 3,7; e_{22} = -e_{16} = -e_{21} = 2,5; e_{31} = e_{32} = 0,2; e_{33} = 1,3$

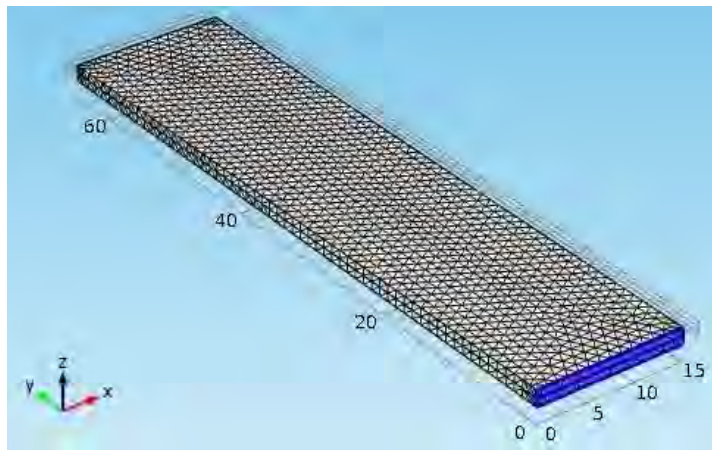


Рис. 2. Геометрична модель актюатора з побудованою сіткою скінченних елементів. Актюатор жорстко закріплено з торця, розташованого на передньому плані рисунку

Результати моделювання виявили добре узгодження з експериментальними даними роботи [13] у всьому діапазоні зміни напруги. Зокрема, відповідно до експериментальних даних зміщення актюатора (точніше, проекції зміщення на вісь  $Z$  глобальної системи координат, яка за довжиною практично дорівнює загальному зміщенню) за прикладеної напруги у 300 В становить близько 17 мкм. Величина зміщення, розрахована за методом скінченних елементів за тих самих параметрів актюатора та напруги у 300 В, становить 17,8 мкм, тобто є близькою до експериментального значення. Загальний характер деформації актюатора за прикладеної напруги у 300 В представлено на рис. 3.

## Результати та обговорення

На відміну від орієнтації векторів поляризації, які мали місце у [13], у структурі, отриманій у даній роботі (рис. 1), ці вектори, як зазначалося, були антипаралельними, але складали прямий кут з поверхнями, що з'єднувались. Щодо розрахунку, це зумовлює рівність тензорів парних рангів

(діелектричної проникності та коефіцієнтів пружності) в обох доменах, та протилежність за знаками тензорів п'єзоелектричних постійних, які є тензорами 3-го рангу.

Як і у роботі [13], прикладена постійна напруга змінювалася у діапазоні від  $-300$  до  $300$  В. З метою дослідження характеристик актюатора, зокрема величини можливих зміщень, параметри конструкції вар'ювалися в таких межах: довжина від  $10$  до  $80$  мм, товщина від  $0,4$  до  $2,4$  мм. Як можна очікувати із загальних міркувань, зміна ширини пластини не повинна призводити до зміни величини зміщення за постійної різниці потенціалів між поверхнями структури. Дійсно, відсутність такої залежності підтвердили і результати числових експериментів.

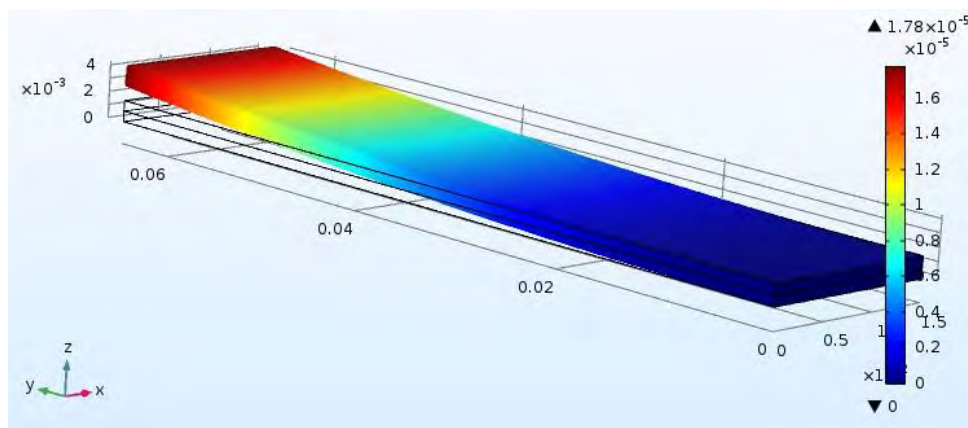


Рис. 3. Деформація актюатора з параметрами, поданими у роботі [13], за прикладеної напруги  $300$  В

Залежність зміщення актюатора для його різних довжин представлено на рис. 4. Очевидно, що зі збільшенням довжини  $L$  актюатора збільшується величина зміщення, яке виникає внаслідок прикладання заданої напруги: зокрема за напруги  $300$  В і довжині актюатора у  $10$  мм зміщення становить близько  $15$  нм, тоді як за довжини  $80$  мм – майже  $1,1$  мкм.

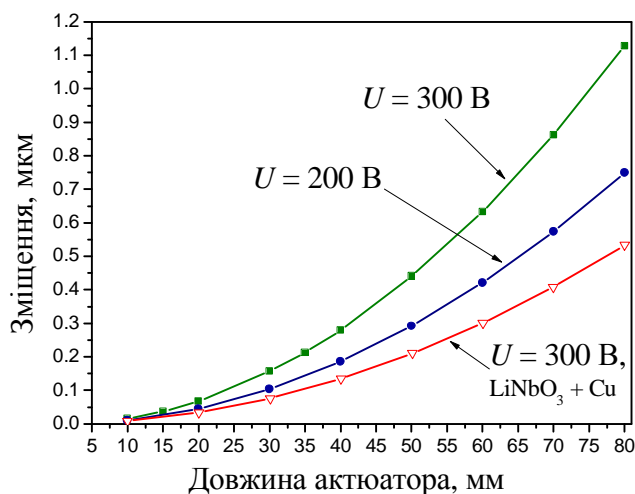


Рис. 4. Залежність зміщення актюатора від його довжини за товщини  $1,6$  мм і прикладеної напруги  $200$  та  $300$  В, а також актюатора товщиною  $1,7$  мм з мідною плівкою товщиною  $0,1$  мм між пластинами за напруги  $300$  В

Оскільки за однакових прикладеної напруги та товщини актюаторів електрична напруженість всередині пластин є однаковою, то зміщення в точках з певною координатою у (яка відраховується вздовж найбільшої сторони актюатора) не залежить від загальної довжини актюатора. Так,

зазначене зміщення у 15 нм, яке спостерігається для актюатора довжиною 10 мм, має місце і для актюаторів більшої довжини на віддалі у 10 мм від області кріплення.

Аналізувалися також можливі зміщення бідоменної структури, між пластинами якої присутня плівка  $\text{Cu}$  товщиною 0,1 мм. Результати розрахунків можливих зміщень залежно від довжини актюатора також представлено на рис. 4. Як випливає з розрахунків, наявність мідного прошарку зменшує можливі зміщення актюатора, що зумовлено не стільки незначним (приблизно на 6 %) збільшенням його загальної товщини, скільки відносно малим значенням модуля Юнга міді – приблизно вдвічі меншим за величини коефіцієнтів  $C_{11}$ ,  $C_{22}$ ,  $C_{33}$  ніобату літію, що зумовлює менші деформації мідних елементів конструкції за тих самих механічних напружень.

Залежність зміщення актюатора від його товщини  $t$  наведено на рис. 5. Як видно з рисунка, ця залежність має виразно нелінійний характер і демонструє сильне зростання можливих зміщень зі зменшенням товщини актюатора. Зокрема, зі зменшенням товщини актюатора від 2,4 до 0,4 мм можливе його зміщення зростає від 0,3 до 12 мкм за різниці потенціалів у 300 В між поверхнями актюатора, та від 0,2 до 8 мкм за різниці потенціалів у 200 В. Зміщення актюатора із мідним прошарком (постійної для всіх точок графіка товщини 0,1 мм) є меншими за зміщення актюатора без прошарку за однакової прикладеної напруги та геометричних характеристик.

Залежності зміщення актюатора від прикладеної напруги для бідоменних пластин різних геометричних розмірів наведено на рис. 6. У досліджених межах зміни напруги (-300...300 В) ці залежності є лінійними, що вказує на переваги актюаторів такого типу порівняно із актюаторами на цирконаті-титанаті свинцю, яким властивий помітний гістерезис. Разом із тим, порівняння результатів, представлених на рис. 4–6, стосовно можливих зміщень, які забезпечуються у випадку анти-паралельних векторів поляризації доменів, із аналогічними даними, отриманими для кристала  $Y + 127^\circ$  зрізу, вказує на необхідність оптимізації бідоменної структури щодо можливих орієнтацій пластин кристала. Крім того, з технологічного погляду цікавою є можливість створення актюатора на основі бідоменного кристала  $\text{LiNbO}_3$ , що містить природну двійникову границю [14, 15], з огляду на практично ідеальну площинність такої межі, а отже, і незначущість похибок у величині зміщень, які вносяться внаслідок неідеальності границі між доменами. Розв'язання цих задач передбачається авторами в подальшому.

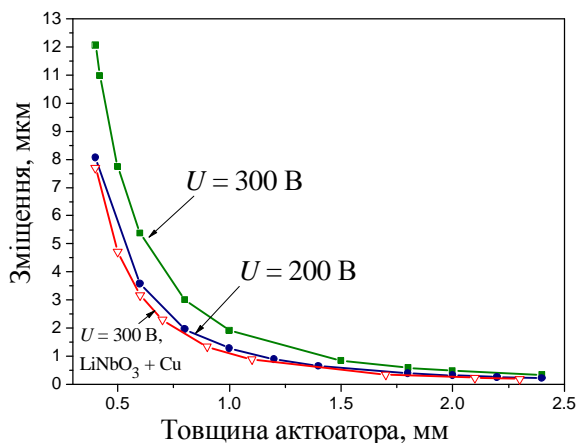


Рис. 5. Залежність зміщення актюатора від його товщини за довжини 65 мм та прикладених напруг 200 та 300 В

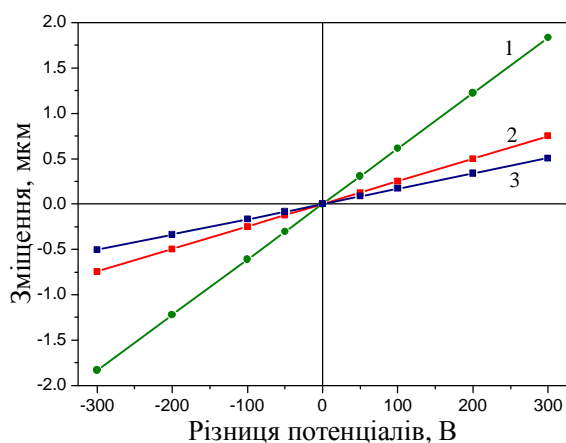


Рис. 6. Залежність зміщення актюатора від прикладеної напруги при  $L = 50$  мм,  $t = 0,8$  мм (1),  $L = 65$  мм,  $t = 1,6$  мм (2),  $L = 80$  мм,  $t = 2,4$  мм (3)

## Висновки

Проведено моделювання роботи актюатора точного зміщення на основі бідоменного кристала ніобату літію, утвореного пластинами  $\text{LiNbO}_3$  з протилежними напрямками вектора поляризації. Встановлено залежності можливих величин зміщень актюатора від його геометричних розмірів та прикладеної різниці потенціалів. Показано, що залежність величини зміщення від прикладеної

напруги в межах  $-300-300$  В є лінійною, що вказує на перспективність застосування актюаторів на основі бідоменних структур з кристала ніобату літію в системах точного позиціонування та фотоніки.

Проаналізовано також можливі зміщення бідоменної структури, між пластинами якої присутня плівка Си субміліметрової товщини. Показано, що наявність мідного шару зменшує зміщення актюатора, що зумовлено відносно малим значенням модуля Юнга міді.

На основі представлених в роботі результатів сформульовано задачі подальших досліджень, до яких віднесено оптимізацію бідоменної структури щодо можливих орієнтацій пластин кристала, а також створення актюатора на основі бідоменного кристала  $\text{LiNbO}_3$ , що містить природну двійникову границю.

*Робота виконана в рамках проекту ДБ/МЕЖА Міністерства освіти і науки України (реєстраційний номер 0118U000273).*

1. Segel J. E. (2012), *Piezoelectric Actuators*, New York, USA, Nova Science Publishers Inc.
2. Uchino K. (2017), *Ferroelectric Devices & Piezoelectric Actuators. Research Misconceptions and Rectifications*, Lancaster, Pennsylvania, USA, DeStech Publications, Inc.
3. Vijaya M. S. (2017), *Piezoelectric Materials and Devices. Applications in Engineering and Medical Science*, CRC Press.
4. Antipov V. V., Bykov A. S., Malinkovich M. D. and Parkhomenko Y. N. (2008), "Formation of bidomain structure in lithium niobate single crystals by electrothermal method", *Ferroelectrics*, vol. 374, no. 1, pp. 65–72.
5. Panda P.K. (2009), "Review: environmental friendly lead-free piezoelectric materials", *Journal of Material Science*, vol. 44, no. 19, pp. 5049 – 5062.
6. Nakamura K., Ando H. and Shimizu H. (1987), "Ferroelectric domain inversion caused in  $\text{LiNbO}_3$  plates by heat treatment", *Appl. Phys. Lett.*, vol. 50, no. 20, pp. 1413–1414.
7. Kugel V. D., Rosenman G., Shur D. (1995), "Piezoelectric properties of bidomain  $\text{LiNbO}_3$  crystals", *J. Appl. Phys.*, vol. 78, no. 9, pp. 5592–5596.
8. Turutin A. V., Vidal J. V., Kubasov I. V., Kislyuk A. M., Malinkovich M. D., Parkhomenko Yu. N., Kobeleva S. P., Pakhomov O. V., Kholkin A. L., Sobolev N. A. (2018), "Magnetolectric metglas/bidomain  $y + 140^\circ$ -cut lithium niobate composite for sensing fT magnetic fields", *Appl. Phys. Lett.*, vol. 112, 262906 (5 pages).
9. Kubasov I. V., Timshina M. S., Kiselev D. A., Malinkovich M. D., Bykov A. S. and Parkhomenko Yu. N. (2015), "Interdomain region in single-crystal lithium niobate bimorph actuators produced by light annealing", *Cryst. Reports*, vol. 60, no. 5, pp. 700–705.
10. Kubasov I. V., Kislyuk A. M., Bykov A. S., Malinkovich M. D., Zhukov R. N., Kiselev D. A., Ksenich S. V., Temirov A. A., Timushkin N. G. and Parkhomenko Yu. N. (2016), "Bidomain structures formed in lithium niobate and lithium tantalite single crystals by light annealing", *Cryst. Reports*, vol. 61, no. 2, pp. 258–262.
11. Vidal J. V., Turutin A. V., Kubasov I. V., Malinkovich M. D., Parkhomenko Yu. N., Kobeleva S.P., Kholkin A.L., Sobolev N.A. (2017), "Equivalent magnetic noise in magnetolectric laminates comprising bidomain  $\text{LiNbO}_3$  crystals", *IEEE Transactions on ultrasonic, ferroelectric, and frequency control*, vol. 64, no. 7, pp. 1102–1119.
12. Акустические кристаллы, под ред. М. П. Шаскольской, М.: Наука, 1982.
13. Кубасов И. В., Малинкович М. Д., Жуков Р. Н., Киселев Д. А., Ксенич С. В., Быков А. С., Тимушкин Н. Г., Темиров А. А., Пархоменко Ю. Н. Прецизионные безгистерезисные актюаторы микро- и нанодиапазона перемещений на основе ниобата лития, *Материалы Международной научно-технической конференции INTERMATIC – 2014, 1 – 5 декабря 2014 г., Ч. 4. С. 45–48.*
14. Savytskii D., Buryu O., Bismayer U., Solskii I., Sugak D., Zhegraj R., Shopa Y., "LiNbO<sub>3</sub> two-beam polarization prism", *International workshop "Lithium Niobate from material to device, from device to system": Book of Abstracts – Metz, France, 23–25 May 2014, pp. 129–130.*
15. Савицький Д. І., Сугак Д. Ю., Сольський І. М., Бурій О. А., Іжнін О. І., Василечко Л. О., Жеграй Р. Т., Кухарук С. В., Шопя Я. І. Двопроменева поляризаційна призма на основі кристала ніобату літію з двійниковою границею // *Вісник Нац. ун-ту "Львівська політехніка". Серія "Електроніка". 2005. № 532. С. 74–80.*