

АНОТАЦІЯ

Яхневич У.В. Модифікації кристалів LiNbO_3 шляхом термічних обробок у присутності іонів металів для пристроїв мікро- та наносистемної техніки. – Кваліфікаційна наукова праця на правах рукопису.

Дисертація на здобуття наукового ступеня доктора філософії за спеціальністю 153 «Мікро- та наносистемна техніка». – Національний університет «Львівська політехніка» МОН України, Львів, 2021.

Дисертацію присвячено встановленню закономірностей процесів дифузії іонів металів у кристалах LiNbO_3 та визначення оптимальних умов термохімічних обробок для застосування модифікованих матеріалів у пристроях функціональної електроніки.

В дисертації розв'язано важливі наукові завдання, а саме: досліджено зміни структурних, оптичних, механічних та піроелектричних властивостей LiNbO_3 , спричинені високотемпературними відпалами кристалів у присутності іонів металів; використовуючи методи локального контролю та сканування змін фізичних властивостей зразків ніобату літію, підданих термохімічній обробці, визначено у різних кристалографічних напрямках просторові розподіли концентрацій домішкових іонів, впроваджених у кристали шляхом дифузії; досліджено вплив режимів термохімічних обробок кристалів LiNbO_3 у присутності іонів металів на перебіг процесів дифузії; описано, на основі математичних моделей дифузії, процеси впровадження іонів металів у кристали LiNbO_3 , спричинені термохімічними обробками; виконано моделювання та створено діючий макет актюатора точного позиціонування на основі бідоменної пластини ніобату літію, створеної шляхом дифузії, експериментально досліджено залежності величини зміщення від прикладеної електричної напруги, визначено оптимальні кристалографічні орієнтації пластин, що утворюють біморфну структуру; запропоновано застосування методик

цілеспрямованої термохімічної наноструктурної модифікації кристалів ніобату літію для ефективного використання у пристроях мікро- та наносистемної техніки, приміром, у актюаторах.

У першому розділі подані основні відомості про особливості структури та властивості ніобату літію, необхідні для розуміння наступних розділів. Перший розділ містить огляд літератури за темою дисертації щодо результатів досліджень фазової діаграми та структури кристалів, власних точкових дефектів кристалів та можливостей впливу на дефектну підсистему ніобату літію. В загальному описано механізм дифузійного впровадження домішок до кристала ніобату літію.

Другий розділ дисертації присвячено опису методів дослідження, що використовувалися для виконання даної роботи. Такими методами є: структурний аналіз, що здійснювався за допомогою рентгенівського дифрактометра ДРОН-3М у режимі відбивання; спектрофотометрія додаткового поглинання, індукованого дифузією. Спектри після відпалів реєструвалися за допомогою спектрофотометра ShimadzuUV-3600 у діапазоні 300...1500 нм. Даний метод був модифікований таким чином, щоб сканування проводились у кристалофізичних напрямках X, Y та Z (вздовж напрямку дифузії), тоді як скануючий промінь розповсюджувався перпендикулярно до обраного кристалофізичного напрямку (напрямку дифузії); наноіндентація для визначення змін механічних властивостей, що здійснювалася за допомогою установки наноіндентації з наднизьким навантаженням Nano Indenter (CSM Instruments SA); метод модуляції інтенсивності лазерного випромінювання для визначення змін піроелектричних коефіцієнтів з глибиною. Комплексний піроелектричний струм визначався амплітудно-фазовим аналізатором імпедансу (Solartron 1260,20 Solartron Analytical).

Третій розділ містить результати дослідження змін оптичних, структурних, механічних та піроелектричних властивостей кристала ніобату літію, спричинені високотемпературними відпалами у присутності іонів металів. Отримані результати показують, що структура просторового розподілу іонів металів міді, що впроваджуються до кристала ніобату літію під час відпалу в присутності відповідних іонів, обумовлена складним процесом іонного обміну за участі іонів металів та літію. Описано, на основі математичних моделей дифузії, процеси впровадження іонів металів у кристали LiNbO_3 , спричинені термохімічними обробками. Показано, що величини піроелектричних коефіцієнтів у дифузійних шарах кристалів LiNbO_3 , підданих термообробці у присутності іонів міді та заліза, збільшуються, що є важливим практичним результатом, який відкриває шлях до позитивної модифікації піроелектричних властивостей кристалів ніобату літію. Цей результат може також бути використаний для зменшення спонтанної поляризації поблизу інтерфейсів, що поліпшить характеристики пристроїв.

У четвертому розділі на основі експериментальних досліджень процесів дифузії металів та математичного моделювання створено діючий макет актюатора точного позиціонування на основі бідоменного активного елемента, виготовленого шляхом з'єднання дифузією міді двох кристалічних пластин ніобату літію з антиколінеарними векторами поляризації. Встановлено, що з'єднання за допомогою дифузії міді однойменно заряджених площин двох пластин ніобату літію дає найкращий результат, коли одна з поверхонь покрита плівкою міді товщиною 350 нм, а друга є вільною. За допомогою підходу, що базується на аналізі екстремальних поверхонь п'єзоелектричного ефекту, теоретично встановлено оптимальні кристалофізичні орієнтації з'єднаних пластин ніобату літію для створення активного елемента актюатора точного позиціонування, який забезпечуватиме максимальне переміщення за визначеної електричної напруги.

Ключові слова: ніобат літію, легований іонами металів; дефектна підсистема; легування; дифузія; термохімічні обробки; спектрофотометрія; структурний аналіз; наноіндентація; метод модуляції інтенсивності лазерного випромінювання; структурні, оптичні, механічні та піроелектричні властивості; бідоменна структура; актюатор точного позиціювання.

Список публікацій здобувача:

Наукові праці, в яких опубліковані основні наукові результати дисертації:

1. Buryu O., Syvorotka I. I., **Yakhnevych U.**, Sugak D., Ubizskii S., Fritze H., Suhak Y. Determination of optimal crystallographic orientations for LiNbO₃ and LiTaO₃ bimorph actuators // *Journal of Sensors and Sensor Systems*. – **2021**. – Vol. 10, iss. 1. – P. 121–126.

2. Buryu O., Vasylechko L., Sydorhuk V., Lakhnik A., Wlodarczyk D., Hurskyu S. T., **Yakhnevych U.**, Zhydachevskyy Y., Sugak D., Suchocki A., Fritze H., Suhak Y. Crystal structure, raman spectra and electrical conductivity of LiNb_{1-x}Ta_xO₃ nanopowders obtained with high-energy ball milling // *Журнал нанотехнологічної фізики*. – **2021**. – Vol. 13, № 2. – P. 02038-1–02038-6.

3. Sugak D., Buryu O., Suhak Yu., Zhydachevskyy Ya., Becker K.-d., Martynyuk N., **Yakhnevych U.**, Ubizskii S. Optical in-situ study of the redox processes in LiNbO₃: Fe crystals // *Optical Materials*. – **2020**. – Vol. 99. – P. 109543–109552.

4. **Яхневич У. В.**, Горбунов* О. О., Сиворотка І. І., Бурий О. А., Сугак Д. Ю. Моделювання актюатора точного позиціювання на основі бідоменного кристала ніобату літію // *Вісник Національного університету "Львівська політехніка". Серія "Радіоелектроніка та телекомунікації"*. – **2019**. – № 914. – С. 11–16.

5. **Yakhnevych U.**, Suchanec G., Eydam A., Sugak D., Syvorotka I., Haiduchok V., Buryu O., Ubizskii S., Gerlach G. Investigation of optical and

pyroelectric properties of lithium niobate single crystals caused by metal ions diffusion // *Журнал нано- та електронної фізики*. – 2019. – Vol. 11, iss. 1. – P. 01017-1–010117-5.

6. Sugak D., **Yakhnevych U.**, Syvorotka I., Buryy O., Popov A., Ubizskii S. Optical investigation of the OH⁻ groups in the LiNbO₃ doped by copper // *Integrated Ferroelectrics*. – 2019. – Vol. 196, iss. 1.– P. 32–38.

7. Suchaneck G., **Yakhnevych U.**, Eydam A., Sugak D., Syvorotka I., Haiduchok V., Ubizskii S., Gerlach G. Depth profiling of dopant concentration and pyroelectric properties of LiNbO₃ single crystals treated at high-temperature in the presence of metal ions // *Ferroelectrics*. – 2019. – Vol. 539, iss. 1. – P. 146–152.

8. Sugak D., Syvorotka I., **Yakhnevych U.**, Buryy Oleg, Levintant-zayonts N., Savvitsky H., Bonchuk O., Ubizskii S. Comparative investigations of nanohardness and impurity distribution profiles of lithium niobate single crystals diffusion doped by copper ions // *Crystal Research and Technology*. – 2019. – Vol. 54, iss. 12. – P. 1900117-1–1900117-7.

9. Sugak D., Syvorotka I. I., **Yakhnevych U.**, Buryy O., Vakiv M., Ubizskii S., Włodarczyk D., Zhydachevskyy Y., Pieniążek A., Jakiela R., Suchocki A. Investigation of Co ions diffusion in Gd₃Ga₅O₁₂ single crystals // *Acta Physica Polonica A*. – 2018. – Vol. 133, № 4– P. 959–964.

10. Sugak D., Syvorotka I. I., **Yakhnevych U.**, Buryy O., Martynyuk N., Ubizskii S., Zhydachevskyy Y., Suchocki A., Kumar H., Janyani V., Singh G. Optical investigation of the Cu ions diffusion into bulk lithium niobate // *Acta Physica Polonica A*. – 2018. – Vol. 133, №– P. 965–972.

11. Sugak D., Syvorotka I. I., Buryy O., **Yakhnevych U.**, Martynyuk N., Ubizskii S., Singh G., Janyani V., Kumar H. Optical investigation of Cu diffusion depth in LiNbO₃ crystals under high-temperature treatment // *Lecture Notes in Electrical Engineering*. – 2018. – Vol. 472 – P. 227–23

12. Sugak D., Syvorotka I. I., Buryy O., **Yakhnevych U.**, Solskii I., Sugak Y., Suchocki A., Zhydachevskii Y., Jakiela R., Ubizskii S., Singh G., Janyani V. Spatial

distribution of optical coloration in single crystalline LiNbO_3 after high-temperature H_2 /air treatments // *Optical Materials*. – 2017. – Том 70. – С. 106–115.

13. Sugak D., Syvorotka I., Buryy O., **Yakhnevych U.**, Solskii I., Martynyuk N., Suhak Y., Singh G., Janyani V., Ubizskii S. Spatial distribution of LiNbO_3 single crystals optical properties changes after redox high-temperature treatment // *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. – 2017. – Том 169. – С. 012019–012026.

Наукові праці, які засвідчують апробацію матеріалів дисертації:

14. Vasylechko L., Sydoruk V., Hurskyj S., **Yakhnevych U.**, Lakhnik A., Syvorotka I. I., Luchechko A., Buryy O., Sugak D., Zhydachevskyy Y., Suchocki A., Suhak Y., Fritze H. Obtaining and Investigation of the LiNbO_3 , $\text{LiNbO}_3:\text{Mg}$, LiTaO_3 Nanopowders doped with Pr ions // *Sensor and Measurement Science International Conference SMSI 2021* (Digital Conference, 3 - 6 May 2021). – 2021. – P. 45–46.

15. **Yakhnevych U.**, Buryy O., Sugak D., Ubizskii S., Fritze H., Suhak Y., Syvorotka I. I. Investigations of the Actuator Based on Lithium Niobate Diffuse Bonded Bimorph Structure // *Sensor and Measurement Science International Conference SMSI 2020: proceedings*, June 22–25, 2020, Nuremberg, Germany. – 2020. – P. 55–56.

16. **Yakhnevych U.**, Sugak D., Syvorotka I., Buryy O., Zhydachevskyy Y., Ubizskii S., Suchocki A. The processes of diffusion and drift of copper ions in LiNbO_3 crystal // *Nanotechnology and nanomaterials (NANO-2019)* : international research and practice conference, 27–30 August 2019, Lviv, Ukraine : book of abstracts. – 2019. – P. 124.

17. Vasylechko L., Sugak D., Sydoruk V., Lakhnik A., Syvorotka I., Solskii I., **Yakhnevych U.**, Zhydachevskii Y., Włodarczyk D., Suchocki A., Sugak Y., Fritze H. Properties investigation of $\text{LiNb}_x\text{Ta}_{1-x}\text{O}_3$ nanopowders obtained by mechanosynthesis // *Фізичні явища в твердих тілах : тези доповідей*

XIV Міжнародної наукової конференції (3–5 грудня, 2019) Харків. – 2019. – С. 16.

18. Sugak D., Syvorotka I., Kushlyk M., **Yakhnevych U.**, Zhydachevskyy Y., Buryu O., Kachan S, Popov A.I., Suchocki A. Recharge of complex defect centers formed in $Gd_3Ga_5O_{12}$ single crystals with Co^{2+} ions // *20th International conference on radiation effects in insulators, REI-20 : book of abstract, 19–23 August, 2019, L. N. Gumilyov Eurasian National University, Nur-Sultan (Astana), Kazakhstan. – 2019. – P. 146.*

19. Buryu O., Sugak D., Syvorotka I., **Yakhnevych U.**, Sugak Y., Ubizskii S., Fritze H. Simulation, making and testing of the actuator of precise positioning based on the bimorph plate of lithium niobate // *Перспективні технології і методи проектування МЕМС (MEMSTECH) : матеріали XV Міжнародної науково-технічної конференції (Поляна, 22–26 травня 2019 р.). – 2019. – С. 148–152. IEEE*

20. Sugak D., Syvorotka I., **Yakhnevych U.**, Zhydachevskyy Y., Pieniążek A., Włodarczyk D., Buryu O., Ubizskii S., Suchocki A. Investigation of the Interface of the $Y_3Fe_5O_{12}/Gd_3Ga_5O_{12}$ Structure, Obtained by the Liquid Phase Epitaxy // *XVII Міжнародна Фреїківська конференція з фізики і технології тонких плівок та наносистем : збірник тез, Івано-Франківськ, 20–25 травня, 2019. – 2019. – С. 293.*

21. Sugak D., Syvorotka I., Buryu O., **Yakhnevych U.**, Levintant-zayonts N., Savytskyy H., Bonchuk O. The nanoindentation of Cu diffusion layers in $LiNbO_3$ crystal // *Nanotechnology and nanomaterials (NANO-2019) : international research and practice conference, 27–30 August 2019, Lviv, Ukraine : book of abstracts. – 2019. – P. 463.*

22. Sugak D., Syvorotka I., Kushlyk M., **Yakhnevych U.**, Zhydachevskyy Y., Popov A.I., Buryu O., Kachan S, Suchocki A. Photochromic centers of $Gd_3Ga_5O_{12}:Co$ single crystals // *Nanotechnology and nanomaterials (NANO-2019) :*

international research and practice conference, 27–30 August 2019, Lviv, Ukraine : book of abstracts. – **2019**. – P. 644.

23. Vasylechko L., Sugak D., Sydoruk V., Lakhnik A., Syvorotka I., Solskii I., **Yakhnevych U.**, Zhydachevskyy Y., Wlodarczyk D., Suchocki A., Suhak Yu., Fritze H. Mechanosynthesis and properties investigations of $\text{LiNb}_x\text{Ta}_{1-x}\text{O}_3$ nanopowders // *Nanotechnology and nanomaterials (NANO-2019)* : international research and practice conference, 27–30 August 2019, Lviv, Ukraine : book of abstracts. – **2019**. – P. 390.

24. Sugak D., **Yakhnevych U.**, Buryy O., Syvorotka I.I. The experimental investigations and modeling of copper ions diffusion into LiNbO_3 Crystal // *The Third international conference on information and telecommunication technologies and radio electronics (UkrMiCo'2018)* : conference proceeding, Odessa, Ukraine September 10–14, **2018**. – P. 9047584-1–9047584-4. IEEE

25. **Yakhnevych U.**, Syvorotka I.I., Buryy O., Ubizskii S., Vakiv M., Sugak D., OH- absorption spectra of lithium niobate crystals diffusion-doped by copper // *Proceedings of the 2018 IEEE 8th International Conference on Nanomaterials: Applications & Properties (NAP – 2018)*, Zatoka, Ukraine, **2018**. – Part 2. P. 02PN29-1 – 02PN29-4. IEEE

26. Sugak D., **Yakhnevych U.**, Syvorotka I.I., Buryy O., Popov A., Ubizskii S., Optical investigation of the OH- groups in the layers of LiNbO_3 crystals formed by copper ions diffusion // *Book of Abstracts of 12th International Scientific Conference on Functional Materials and Nanotechnologies (FM&NT – 2018)*, 2–5 October **2018**, Riga, Latvia, p. 160.

27. Suchaneck G., **Yakhnevych U.**, Eydam A., Sugak D., Syvorotka I.I., Haiduchok V., Ubizskii S., Gerlach G. Depth profiling of dopant concentration and pyroelectric properties of LiNbO_3 single crystals high-temperature treated in the presence of metal ions // *14th Russia/CIS/Baltic/Japan Symposium on ferroelectricity and young scientists school on the spectroscopic studies of critical dynamics at*

structural phase transitions : abstract book, May 14–18, **2018**, St. Petersburg, Russia.
- Saint-Petersburg: – C.74 – 75.

28. Sugak D., Syvorotka I.I., **Yakhnevych U.**, Buryy O., Zhydachevskii Y.A., Suchocki A., Vakiv M., Ubizskii S. Optical investigation of Co ions diffusion in $Gd_3Ga_5O_{12}$ single crystals // *International Conference on Oxide Materials for Electronic Engineering – fabrication, properties and applications(OMEE-2017)*, May 29 – June 2, **2017** Lviv, Ukraine – C.158.

29. **Yakhnevych U.**, Sugak D., Syvorotka I.I., Buryy O., Martynyuk N., Ubizskii S. Optical investigation of the Cu-ions diffusion into lithium Niobate crystal // *International Conference on Oxide Materials for Electronic Engineering – fabrication, properties and applications(OMEE-2017)*, May 29 – June 2, **2017** Lviv, Ukraine– C.157.

30. Sugak D., Buryy O., Syvorotka I.I., **Yakhnevych U.**, Becker K., Ubizskii S. Temporal and spatial characteristics of the diffusion processes in $LiNbO_3$ crystals caused by thermo-chemical treatment // *International Conference on Oxide Materials for Electronic Engineering – fabrication, properties and applications(OMEE-2017)*, May 29 – June 2, **2017** Lviv, Ukraine– C.143.

31. **Yakhnevych U.**, Sugak D., Syvorotka I.I., Buryy O., Ubizskii S. Optical investigation of the metal ions diffusion into $LiNbO_3$ // *Nanotechnology and nanomaterials : book of abstracts of International research and practice conference (23–26 August 2017, Chernivtsi, Ukraine)*. - Київ: SME Burlaka. – C.773.

32. Sugak D., Syvorotka I., Buryy O., **Yakhnevych U.**, Sugak Y., Martynyuk N., Solskii I., Suchocki A., Zhydachevskii Y., Jakiela R. Spatial distribution of diffusion coloration of $LiNbO_3$ single crystals under H_2 /air high-temperature annealing // *E-MRS Fall Meeting, Symposium Z: Abstracts(19-22 September, 2016, Warsaw, Poland)* – C.27.

33. Сугак Д.Ю., Сиворотка І., Бурий О.А., **Яхневич У.В.**, Сольський І., Василечко Л.О., Гайдучок В.Г., Убізький С.Б., Ваків М.М. Вплив високотемпературних обробок у присутності іонів міді на просторові зміни

оптичних властивостей кристалів LiNbO_3 // *Матеріали VIII Міжнародної наукової конференції “Релаксаційні, нелінійні й акустооптичні процеси та матеріали, 2016”*. - Луцьк: Вежа-Друк. – С.18 – 20

34. **Yakhnevych U.**, Sugak D., Syvorotka I., Buryy O., Solskii I., Vasylechko L., Haiduchok V., Ubizskii S., Vakiv M. The spatial distribution of metal ions (Cu, Fe, Co) incorporated into LiNbO_3 crystal during high temperature annealing // *Electronics and Applied Physics: Proceedings of the XII International Conference (19-22 October 2016, Kyiv)*. – С.144 – 145.

35. **Yakhnevych U.**, Sugak D., Syvorotka I., Buryy O., Solskii I., Vasylechko L., Haiduchok V., Ubizskii S., Vakiv M. The peculiarities of metal (Cu, Fe, Co) ions incorporation in lithium niobate crystal during high temperature annealing // *Матеріали V Міжнародної науково-практичної конференції “Фізико – технологічні проблеми передавання, обробки та зберігання інформації в інфокомунікаційних системах”*. - Чернівці: Місто. , **2016**,– P.265 – 266.

36. **Yakhnevych U.**, Sugak D., Syvorotka I., Buryy O., Solskii I., Vasylechko L., Haiduchok V., Ubizskii S., Vakiv M. The spatial distribution of copper ions incorporated into LiNbO_3 crystals during high temperature annealing // *International research and practice conference: Nanotechnology and nanomaterials (NANO 2016)*, 24-27 August, **2016**, Lviv, Ukraine. – P.636.

37. **Yakhnevych U.**, Sugak D., Syvorotka I., Buryy O., Martynyuk N., Sugak Y., Yatsenko A., Solskii I., Ubizskii S. Spatial distribution of LiNbO_3 single crystals coloration after redox high-temperature treatment // *International Conference on Defects in Insulating Materials (ICDIM-19): Abstracts (July 10-16, 2016, Lyon, France)*.– P.43.

ABSTRACT

Yakhnevych U.V. Modifications of LiNbO_3 crystals by heat treatment in the presence of metal ions for devices of micro-and nanosystem technology. – Qualifying scientific work on the rights of the manuscript.

Thesis for a scientific degree of the doctor of philosophy on a specialty 153 "Micro- and nanosystem technologies". - Lviv Polytechnic National University, Ministry of Education and Science of Ukraine, Lviv, 2021.

Thesis is devoted to establishing regularities of metal ion diffusion processes in LiNbO_3 crystals and determining optimal conditions of thermochemical treatments for the application of modified materials in functional electronics devices.

In the thesis, important scientific tasks have been solved, namely: changes in the structural, optical, mechanical, and pyroelectric properties of LiNbO_3 caused by high-temperature annealing of crystals in the presence of metal ions were studied; the spatial distributions of the impurity ions concentrations incorporated into the crystals by diffusion were determined in different crystallographic directions, using methods of local control and scanning of changes in the physical properties of lithium niobate samples caused by thermochemical treatments; the influence of the modes of thermochemical treatments of LiNbO_3 crystals in the presence of metal ions on the diffusion processes has been investigated; the processes of incorporation of metal ions into LiNbO_3 crystals caused by thermochemical treatments were described on the basis of mathematical diffusion models; modeling was performed and a working model of precise positioning actuator based on the lithium niobate bimorph plate was created; the dependences of the displacement value on the applied electric voltage were experimentally investigated; the optimal crystallographic orientations of bimorph plates were determined; the application of methods of purposefully thermochemical nanostructural modification of lithium niobate crystals is proposed for practical use in devices of micro- and nanosystem technology, for example, in actuators.

The first chapter briefly describes the structure and the main properties of lithium niobate, necessary for understanding the following chapters. First chapter contains a review of literature on this investigation topic on the results of studies of the phase

diagram and structure of crystals, intrinsic point defects of crystals, and the possibility to influence on the defects subsystem of lithium niobate. General concepts of the mechanism of diffusion incorporation of impurities into a lithium niobate crystal are given.

The second chapter is devoted to the description of the research methods used to perform this work. They were: structural analysis performed using an X-ray diffractometer DRON-3M in the reflection mode; diffusion-induced additional absorption spectrophotometry. The absorption and transmission spectra were measured by UV3600 Shimadzu spectrophotometer in the range of 300... 1500 nm. This method was modified so that the scans were performed in the crystal physics directions X, Y and Z (along the diffusion direction), while the scanning beam propagated perpendicular to the selected crystal physics direction (diffusion direction); nanoindentation to determine changes in mechanical properties, which was carried out by nanoindentation with ultra-low load Nano Indenter (CSM Instruments SA); an approximate laser intensity modulation method to determine changes in pyroelectric coefficients with depth. The complex pyroelectric current was measured by an impedance/gain-phase analyzer.

The third chapter of the thesis contains the study results of changes in the optical, structural, mechanical, and pyroelectric properties of lithium niobate crystal caused by high-temperature annealing in the metal ions presence. The obtained results show that the structure of the spatial distribution of copper metal ions incorporated into the lithium niobate crystal during annealing is due to a complex process of ion exchange involving metal ions and lithium. The processes of incorporation of metal ions into LiNbO_3 crystals caused by thermochemical treatments are described on the basis of mathematical models of diffusion. It is shown that the values of pyroelectric coefficients in the diffusion layers of LiNbO_3 subjected to heat treatment in the presence of iron and copper ions increase. This is an important practical result that paves the way for a positive modification of the pyroelectric properties of lithium

niobate crystals. This can be also used to reduce spontaneous polarization near interfaces, which will improve device performance.

The fourth chapter describes the working prototype of a precise positioning actuator which was created based on experimental studies of metal diffusion processes and mathematical modeling. The current working prototype of the precision positioning actuator was created on the basis of a bidomain active element made by combining two crystalline plates of lithium niobate with anti-collinear polarization vectors by copper diffusion. The optimal crystal-physical orientations of the connected lithium niobate plates ensured maximum displacement at a certain electrical voltage have been theoretically established.

Key words: lithium niobate doped by metal ions; defective subsystem; doping; diffusion; thermochemical treatments; spectrophotometry; structural analysis; nanoindentation; approximate laser intensity modulation method; structural, optical, mechanical, and pyroelectric properties; bidomain structure; precise positioning actuator.

The list of author's publication:

Papers where basic scientific results of thesis were published:

1. Buryy O., Syvorotka I. I., **Yakhnevych U.**, Sugak D., Ubizskii S., Fritze H., Suhak Y. Determination of optimal crystallographic orientations for LiNbO₃ and LiTaO₃ bimorph actuators // *Journal of Sensors and Sensor Systems*. – **2021**. – Vol. 10, iss. 1. – P. 121–126.
2. Buryy O., Vasylechko L., Sydoruk V., Lakhnik A., Wlodarczyk D., Hurskyy S. T., **Yakhnevych U.**, Zhydachevskyy Y., Sugak D., Suchocki A., Fritze H., Suhak Y. Crystal structure, raman spectra and electrical conductivity of

LiNb_{1-x}Ta_xO₃ nanopowders obtained with high-energy ball milling // *Журнал наноматериальной электроники*. – 2021. – Vol. 13, № 2. – P. 02038-1–02038-6.

3. Sugak D., Buryy O., Suhak Yu., Zhydachevskyy Ya., Becker K.-d., Martynyuk N., **Yakhnevych U.**, Ubizskii S. Optical in-situ study of the redox processes in LiNbO₃: Fe crystals // *Optical Materials*. – 2020. – Vol. 99. – P. 109543–109552.

4. **ЯХНЕВИЧ У. В.**, Горбунов* О. О., Сиворотка І. І., Бурий О. А., Сугак Д. Ю. Моделювання актюатора точного позиціонування на основі бідоменного кристала ніобату літію // *Вісник Національного університету "Львівська політехніка". Серія "Радіоелектроніка та телекомунікації"*. – 2019. – № 914. – С. 11–16.

5. **Yakhnevych U.**, Suchaneck G., Eydam A., Sugak D., Syvorotka I., Haiduchok V., Buryy O., Ubizskii S., Gerlach G. Investigation of optical and pyroelectric properties of lithium niobate single crystals caused by metal ions diffusion // *Журнал наноматериальной электроники*. – 2019. – Vol. 11, iss. 1. – P. 01017-1–010117-5.

6. Sugak D., **Yakhnevych U.**, Syvorotka I., Buryy O., Popov A., Ubizskii S. Optical investigation of the OH⁻ groups in the LiNbO₃ doped by copper // *Integrated Ferroelectrics*. – 2019. – Vol. 196, iss. 1.– P. 32–38.

7. Suchaneck G., **Yakhnevych U.**, Eydam A., Sugak D., Syvorotka I., Haiduchok V., Ubizskii S., Gerlach G. Depth profiling of dopant concentration and pyroelectric properties of LiNbO₃ single crystals treated at high-temperature in the presence of metal ions // *Ferroelectrics*. – 2019. – Vol. 539, iss. 1. – P. 146–152.

8. Sugak D., Syvorotka I., **Yakhnevych U.**, Buryy Oleg, Levintant-zayonts N., Savytskyy H., Bonchyk O., Ubizskii S. Comparative investigations of nanohardness and impurity distribution profiles of lithium niobate single crystals diffusion doped by copper ions // *Crystal Research and Technology*. – 2019. – Vol. 54, iss. 12. – P. 1900117-1–1900117-7.

9. Sugak D., Syvorotka I. I., **Yakhnevych U.**, Buryy O., Vakiv M., Ubizskii S., Włodarczyk D., Zhydachevskyy Y., Pieniążek A., Jakiela R., Suchocki A. Investigation of Co ions diffusion in $Gd_3Ga_5O_{12}$ single crystals // *Acta Physica Polonica A.* – **2018.** – Vol. 133, № 4– P. 959–964.
10. Sugak D., Syvorotka I. I., **Yakhnevych U.**, Buryy O., Martynyuk N., Ubizskii S., Zhydachevskyy Y., Suchocki A., Kumar H., Janyani V., Singh G. Optical investigation of the Cu ions diffusion into bulk lithium niobate // *Acta Physica Polonica A.* – **2018.** – Vol. 133, №– P. 965–972.
11. Sugak D., Syvorotka I. I., Buryy O., **Yakhnevych U.**, Martynyuk N., Ubizskii S., Singh G., Janyani V., Kumar H. Optical investigation of Cu diffusion depth in $LiNbO_3$ crystals under high-temperature treatment // *Lecture Notes in Electrical Engineering.* – **2018.** – Vol. 472 – P. 227–23
12. Sugak D., Syvorotka I. I., Buryy O., **Yakhnevych U.**, Solskii I., Sugak Y., Suchocki A., Zhydachevskii Y., Jakiela R., Ubizskii S., Singh G., Janyani V. Spatial distribution of optical coloration in single crystalline $LiNbO_3$ after high-temperature H_2 /air treatments // *Optical Materials.* – **2017.** – Tom 70. – C. 106–115.
13. Sugak D., Syvorotka I., Buryy O., **Yakhnevych U.**, Solskii I., Martynyuk N., Suhak Y., Singh G., Janyani V., Ubizskii S. Spatial distribution of $LiNbO_3$ single crystals optical properties changes after redox high-temperature treatment // *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering.* – **2017.** – Tom 169. – C. 012019–012026.

Scientific works that additionally reflect the scientific results of the thesis:

14. Vasylechko L., Sydoruk V., Hurskyj S., **Yakhnevych U.**, Lakhnik A., Syvorotka I. I., Luchechko A., Buryy O., Sugak D., Zhydachevskyy Y., Suchocki A., Suhak Y., Fritze H. Obtaining and Investigation of the $LiNbO_3$, $LiNbO_3:Mg$, $LiTaO_3$ Nanopowders doped with Pr ions // *Sensor and Measurement Science International Conference SMSI 2021* (Digital Conference, 3 - 6 May 2021). – **2021.** – P. 45–46.

15. **Yakhnevych U.**, Buryy O., Sugak D., Ubizskii S., Fritze H., Suhak Y., Syvorotka I.I. Investigations of the Actuator Based on Lithium Niobate Diffuse Bonded Bimorph Structure // *Sensor and Measurement Science International Conference SMSI 2020: proceedings*, June 22–25, 2020, Nuremberg, Germany. – **2020**. – P. 55–56.
16. **Yakhnevych U.**, Sugak D., Syvorotka I., Buryy O., Zhydachevskyy Y., Ubizskii S., Suchocki A. The processes of diffusion and drift of copper ions in LiNbO₃ crystal // *Nanotechnology and nanomaterials (NANO-2019)* : international research and practice conference, 27–30 August 2019, Lviv, Ukraine : book of abstracts. – **2019**. – P. 124.
17. Vasylechko L., Sugak D., Sydoruk V., Lakhnik A., Syvorotka I., Solskii I., **Yakhnevych U.**, Zhydachevskii Y., Włodarczyk D., Suchocki A., Sugak Y., Fritze H. Properties investigation of LiNb_xTa_{1-x}O₃ nanopowders obtained by mechanosynthesis // *Фізичні явища в твердих тілах : тези доповідей XIV Міжнародної наукової конференції (3–5 грудня, 2019) Харків*. – **2019**. – С. 16.
18. Sugak D., Syvorotka I., Kushlyk M., **Yakhnevych U.**, Zhydachevskyy Y., Buryy O., Kachan S, Popov A.I., Suchocki A. Recharge of complex defect centers formed in Gd₃Ga₅O₁₂ single crystals with Co²⁺ ions // *20th International conference on radiation effects in insulators, REI-20* : book of abstract, 19–23 August, 2019, L. N. Gumilyov Eurasian National University, Nur-Sultan (Astana), Kazakhstan. – **2019**. – P. 146.
19. Buryy O., Sugak D., Syvorotka I., **Yakhnevych U.**, Sugak Y., Ubizskii S., Fritze H. Simulation, making and testing of the actuator of precise positioning based on the bimorph plate of lithium niobate // *Перспективні технології і методи проектування МЕМС (MEMSTECH)* : матеріали XV Міжнародної науково-технічної конференції (Поляна, 22–26 травня 2019 р.). – **2019**. – С. 148–152. IEEE

20. Sugak D., Syvorotka I., **Yakhnevych U.**, Zhydachevskyy Y., Pieniążek A., Włodarczyk D., Buryy O., Ubizskii S., Suchocki A. Investigation of the Interface of the $Y_3Fe_5O_{12}/Gd_3Ga_5O_{12}$ Structure, Obtained by the Liquid Phase Epitaxy // *XVII Міжнародна Фреїківська конференція з фізики і технології тонких плівок та наносистем* : збірник тез, Івано-Франківськ, 20–25 травня, 2019. – **2019**. – С. 293.
21. Sugak D., Syvorotka I., Buryy O., **Yakhnevych U.**, Levintant-zayonts N., Savytskyy H., Bonchuk O. The nanoindentation of Cu diffusion layers in $LiNbO_3$ crystal // *Nanotechnology and nanomaterials (NANO-2019)* : international research and practice conference, 27–30 August 2019, Lviv, Ukraine : book of abstracts. – 2019. – P. 463.
22. Sugak D., Syvorotka I., Kushlyk M., **Yakhnevych U.**, Zhydachevskyy Y., Popov A.I., Buryy O., Kachan S, Suchocki A. Photochromic centers of $Gd_3Ga_5O_{12}:Co$ single crystals // *Nanotechnology and nanomaterials (NANO-2019)* : international research and practice conference, 27–30 August 2019, Lviv, Ukraine : book of abstracts. – **2019**. – P. 644.
23. Vasylechko L., Sugak D., Sydoruk V., Lakhnik A., Syvorotka I., Solskii I., **Yakhnevych U.**, Zhydachevskyy Y., Włodarczyk D., Suchocki A., Suhak Yu., Fritze H. Mechano-synthesis and properties investigations of $LiNb_xTa_{1-x}O_3$ nanopowders // *Nanotechnology and nanomaterials (NANO-2019)* : international research and practice conference, 27–30 August 2019, Lviv, Ukraine : book of abstracts. – **2019**. – P. 390.
24. Sugak D., **Yakhnevych U.**, Buryy O., Syvorotka I.I. The experimental investigations and modeling of copper ions diffusion into $LiNbO_3$ Crystal // *The Third international conference on information and telecommunication technologies and radio electronics (UkrMiCo'2018)* : conference proceeding, Odessa, Ukraine September 10–14, **2018**. – P. 9047584-1–9047584-4. IEEE
25. **Yakhnevych U.**, Syvorotka I.I., Buryy O., Ubizskii S., Vakiv M., Sugak D., OH- absorption spectra of lithium niobate crystals diffusion-doped by copper //

Proceedings of the 2018 IEEE *8th International Conference on Nanomaterials: Applications & Properties (NAP – 2018)*, Zatoka, Ukraine, **2018**. – Part 2. P. 02PN29-1 – 02PN29-4. IEEE

26. Sugak D., **Yakhnevych U.**, Syvorotka I.I., Buryy O., Popov A., Ubizskii S., Optical investigation of the OH- groups in the layers of LiNbO₃ crystals formed by copper ions diffusion // *Book of Abstracts of 12th International Scientific Conference on Functional Materials and Nanotechnologies (FM&NT – 2018)*, 2–5 October **2018**, Riga, Latvia, p. 160.

27. Suchaneck G., **Yakhnevych U.**, Eydam A., Sugak D., Syvorotka I.I., Haiduchok V., Ubizskii S., Gerlach G. Depth profiling of dopant concentration and pyroelectric properties of LiNbO₃ single crystals high-temperature treated in the presence of metal ions // *14th Russia/CIS/Baltic/Japan Symposium on ferroelectricity and young scientists school on the spectroscopic studies of critical dynamics at structural phase transitions* : abstract book, May 14–18, **2018**, St. Petersburg, Russia. - Saint-Petersburg: – C.74 – 75.

28. Sugak D., Syvorotka I.I., **Yakhnevych U.**, Buryy O., Zhydachevskii Y.A., Suchocki A., Vakiv M., Ubizskii S. Optical investigation of Co ions diffusion in Gd₃Ga₅O₁₂ single crystals // *International Conference on Oxide Materials for Electronic Engineering – fabrication, properties and applications(OMEE-2017)*, May 29 – June 2, **2017** Lviv, Ukraine – C.158.

29. **Yakhnevych U.**, Sugak D., Syvorotka I.I., Buryy O., Martynyuk N., Ubizskii S. Optical investigation of the Cu-ions diffusion into lithium Niobate crystal // *International Conference on Oxide Materials for Electronic Engineering – fabrication, properties and applications(OMEE-2017)*, May 29 – June 2, **2017** Lviv, Ukraine– C.157.

30. Sugak D., Buryy O., Syvorotka I.I., **Yakhnevych U.**, Becker K., Ubizskii S. Temporal and spatial characteristics of the diffusion processes in LiNbO₃ crystals caused by thermo-chemical treatment // *International Conference on Oxide*

Materials for Electronic Engineering – fabrication, properties and applications(OMEE-2017), May 29 – June 2, **2017** Lviv, Ukraine– C.143.

31. **Yakhnevych U.**, Sugak D., Syvorotka I.I., Buryy O., Ubizskii S. Optical investigation of the metal ions diffusion into LiNbO₃ // *Nanotechnology and nanomaterials : book of abstracts of International research and practice conference (23–26 August 2017, Chernivtsi, Ukraine)*. - Київ: SME Burlaka. – C.773.

32. Sugak D., Syvorotka I., Buryy O., **Yakhnevych U.**, Sugak Y., Martynyuk N., Solskii I., Suchocki A., Zhydachevskii Y., Jakiela R. Spatial distribution of diffusion coloration of LiNbO₃ single crystals under H₂/air high-temperature annealing // *E-MRS Fall Meeting, Symposium Z: Abstracts(19-22 September, 2016, Warsaw, Poland)* – C.27.

33. Сугак Д.Ю., Сиворотка І., Бурий О.А., **ЯХНЕВИЧ У.В.**, Сольський І., Василечко Л.О., Гайдучок В.Г., Убізьський С.Б., Ваків М.М. Вплив високотемпературних обробок у присутності іонів міді на просторові зміни оптичних властивостей кристалів LiNbO₃ // *Матеріали VIII Міжнародної наукової конференції “Релаксаційні, нелінійні й акустооптичні процеси та матеріали, 2016”*. - Луцьк: Вежа-Друк. – С.18 – 20

34. **Yakhnevych U.**, Sugak D., Syvorotka I., Buryy O., Solskii I., Vasylechko L., Haiduchok V., Ubizskii S., Vakiv M. The spatial distribution of metal ions (Cu, Fe, Co) incorporated into LiNbO₃ crystal during high temperature annealing // *Electronics and Applied Physics: Proceedings of the XII International Conference (19-22 October 2016, Kyiv)*. – C.144 – 145.

35. **Yakhnevych U.**, Sugak D., Syvorotka I., Buryy O., Solskii I., Vasylechko L., Haiduchok V., Ubizskii S., Vakiv M. The peculiarities of metal (Cu, Fe, Co) ions incorporation in lithium niobate crystal during high temperature annealing // *Матеріали V Міжнародної науково-практичної конференції “Фізико – технологічні проблеми передавання, обробки та зберігання інформації в інфокомунікаційних системах”*. - Чернівці: Місто. , **2016**,– P.265 – 266.

36. **Yakhnevych U.**, Sugak D., Syvorotka I., Buryy O., Solskii I., Vasylechko L., Haiduchok V., Ubizskii S., Vakiv M. The spatial distribution of copper ions incorporated into LiNbO₃ crystals during high temperature annealing // *International research and practice conference: Nanotechnology and nanomaterials (NANO 2016)*, 24-27 August, **2016**, Lviv, Ukraine. – P.636.
37. **Yakhnevych U.**, Sugak D., Syvorotka I., Buryy O., Martynyuk N., Sugak Y., Yatsenko A., Solskii I., Ubizskii S. Spatial distribution of LiNbO₃ single crystals coloration after redox high-temperature treatment // *International Conference on Defects in Insulating Materials (ICDIM-19): Abstracts* (July 10-16, **2016**, Lyon, France).– P.43.