

Затверджую

Проректор з наукової роботи
Національного університету
«Львівська політехніка»

д.т.н. Демидов І.В.
_____ 2021 р.

ВИТЯГ

з протоколу № 1 фахового семінару кафедри напівпровідникової електроніки,
Навчально-наукового інституту телекомунікацій, радіоелектроніки та електронної техніки,
Національного університету «Львівська політехніка» від 27 серпня 2021 р.

1. ПРИСУТНІ: 13 із 18 науково-педагогічних працівників та 1 науковий працівник кафедри напівпровідникової електроніки, а саме:

1. Дружинін Анатолій Олександрович, завідувач кафедри, д.т.н., професор.
2. Ховерко Юрій Миколайович, професор кафедри, д.т.н., професор.
3. Лях-Кагуй Наталія Степанівна, доцент кафедри, д.т.н., доцент.
4. Бурий Олег Анатолійович, професор кафедри, д.т.н., професор.
5. Малик Орест Петрович, професор кафедри, д.ф.-м.н., професор.
6. Островський Ігор Петрович, професор кафедри, д.т.н., професор.
7. Василечко Леонід Орестович, професор кафедри, д.х.н., професор.
8. Сиротюк Степан Васильович, доцент кафедри, к.ф.-м.н., доцент.
9. Єрохов Валерій Юрійович, професор кафедри, д.т.н., професор.
10. Убізький Сергій Борисович, професор кафедри, д.ф.-м.н., професор.
11. Нічкало Степан Ігорович, доцент кафедри, к.т.н., доцент.
12. Губа Сергій Костянтинівич, доцент кафедри, к.т.н., доцент.
13. Логуш Олег Іларійович, старший викладач кафедри.
14. Сугак Дмитро Юрійович, старший науковий співробітник кафедри, к.ф.-м.н.

На фаховому семінарі присутні аспіранти кафедри:

1. Кліско Юрій Володимирович,
2. Греб Василь Миколайович.

На фаховий семінар запрошені:

1. Стахіра Павло Йосипович, Національний університет «Львівська політехніка», Навчально-науковий інститут телекомунікацій, радіоелектроніки та електронної техніки, професор кафедри електронних приладів, д.т.н., професор;
2. Фечан Андрій Васильович, Національний університет «Львівська політехніка», Навчально-науковий інститут комп'ютерних наук та інформаційних технологій, професор кафедри програмного забезпечення, д.т.н., професор;
3. Клим Галина Іванівна, Національний університет «Львівська політехніка», Навчально-науковий інститут комп'ютерних технологій, автоматики та метрології, професор кафедри спеціалізованих комп'ютерних систем, д.т.н., професор;
4. Сиворотка Ігор Ігорович, провідний науковий співробітник, Науково-виробниче підприємство "Електрон-Карат".

З присутніх – 12 докторів наук та 4 кандидати наук – фахівці за профілем представленої дисертації.

Голова засідання – д.т.н., професор, завідувач кафедри напівпровідникової електроніки Дружинін А.О.

2. СЛУХАЛИ: доповідь аспірантки кафедри напівпровідникової електроніки Яхневич Уляни Володимирівни за матеріалами дисертації «Модифікація кристалів LiNbO_3 шляхом термохімічних обробок у присутності іонів металів для пристроїв мікро- та наносистемної техніки», представленої на здобуття наукового ступеня доктора філософії за спеціальністю 153 Мікро- та наносистемна техник» (галузь знань 15 Автоматизація та приладобудування).

Науковий керівник – д.т.н., професор Бурий О.А.

Тему дисертації затверджено 27 жовтня 2017 р. на засіданні Вченої ради Навчально-наукового інституту телекомунікацій, радіоелектроніки та електронної техніки Національного університету «Львівська політехніка», протокол № 5. Тему дисертації уточнено 22 червня 2021 на засіданні Вченої ради Навчально-наукового інституту телекомунікацій, радіоелектроніки та електронної техніки Національного університету «Львівська політехніка», протокол № 10.

По доповіді було задано 10 запитань, на які доповідачка дала правильні та ґрунтовні відповіді. Питання задавали:

- завідувач кафедри напівпровідникової електроніки, д.т.н., професор Дружинін Анатолій Олександрович;
- доцент кафедри напівпровідникової електроніки, к.ф.-м.н, доцент Сиротюк Степан Васильович;
- професор кафедри програмного забезпечення, д.т.н., професор Фечан Андрій Васильович;
- професор кафедри спеціалізованих комп'ютерних систем, д.т.н., професор Клим Галина Іванівна;
- старший науковий співробітник кафедри напівпровідникової електроніки, к.ф.-м.н. Сугак Дмитро Юрійович.

3. Виступи присутніх.

З оцінкою дисертації Яхневич Уляни Володимирівни виступили рецензенти:

- професор кафедри спеціалізованих комп'ютерних систем, д.т.н., професор Клим Галина Іванівна;
- професор кафедри програмного забезпечення, д.т.н., професор Фечан Андрій Васильович;

які зазначили актуальність дослідження Яхневич Уляни Володимирівни, повноту викладу результатів та їх важливе практичне значення. Дисертаційна робота є завершеною науковою працею, яка містить встановленні закономірності процесів дифузії іонів металів у кристалах LiNbO_3 та визначені оптимальні умови термохімічних обробок для застосування модифікованих матеріалів у пристроях мікро- та наносистемної техніки. Дисертаційна робота відповідає вимогам наказу МОН України № 40 від 12.01.2017р. «Про затвердження вимог до оформлення дисертації» та Тимчасовому порядку присудження ступеня доктора філософії (Постанова Кабінету Міністрів України від 6 березня 2019 р. № 167) і може бути представлена до захисту у спеціалізованій вченій раді.

З оцінкою дисертації також виступили присутні на фаховому семінарі кафедри напівпровідникової електроніки:

- завідувач кафедри напівпровідникової електроніки, д.т.н, професор Дружинін Анатолій Олександрович, який відзначив наукову новизну дисертаційного дослідження, а також його актуальність з огляду на перспективність напрямку створення матеріалів для застосування в мікроелектромеханічних системах

(MEMC), пристроях нанoeлектроніки, інтегральної оптики, плазмоніки тощо та рекомендував роботу до розгляду у спеціалізовану вчену раду;

- професор кафедри напівпровідникової електроніки, д.ф.-м.н., професор Убізький Сергій Борисович, який відзначив великий обсяг проведених досліджень та особистий внесок здобувача, рекомендував дисертаційну роботу для подання до розгляду у спеціалізовану вчену раду.

З характеристикою наукової зрілості здобувачки виступив науковий керівник – д.т.н, професор Бурий Олег Анатолійович, який відзначив, що Яхневич Уляна Володимирівна за час навчання в аспірантурі (2017 – 2021 рр.) проявила себе як ініціативна та наполеглива дослідниця, яка самостійно і успішно вирішує складні науково-прикладні завдання. Добре працює в колективі, на високому рівні володіє англійською мовою. Протягом навчання брала участь у виконанні міжнародних проектів, неодноразово виступала на міжнародних наукових конференціях, проводила наукові дослідження за кордоном, зокрема, у Технічному університеті Клаусталь (м. Гослар, Німеччина).

На високому науковому та професійному рівнях виконала значний обсяг досліджень, досконало оволоділа сучасними методами теоретичних та експериментальних досліджень. За темою дисертації опублікувала 37 наукових праць, з яких 11 статей (10 – у міжнародних наукових виданнях, що входять до наукометричних баз, 2 – у українських наукових виданнях, що входять до наукометричних баз, 1 – у науковому фаховому виданні України) та 24 публікації у вигляді матеріалів та тез конференцій. H-індекс Яхневич У.В. становить 4 у відповідності до даних науково-метричної бази Scopus. Успішно виконала освітньо-наукову програму.

Дисертаційна робота Яхневич У.В. є завершеною науковою працею і може бути представлена до захисту у разовій спеціалізованій вченій раді на здобуття наукового ступеня доктора філософії за спеціальністю 153 Мікро- та наносистемна техніка.

4. Заслухавши та обговоривши доповідь Яхневич Уляни Володимирівни, а також за результатами попередньої експертизи представленої дисертації на фаховому семінарі кафедри напівпровідникової електроніки, прийнято такі висновки щодо дисертаційної роботи «Модифікація кристалів LiNbO_3 шляхом термохімічних обробок у присутності іонів металів для пристроїв мікро- та наносистемної техніки»:

Висновок

фахового семінару кафедри напівпровідникової електроніки про наукову новизну, теоретичне та практичне значення результатів дисертації «Модифікація кристалів LiNbO_3 шляхом термохімічних обробок у присутності іонів металів для пристроїв мікро- та наносистемної техніки»

здобувачки вищої освіти ступеня доктора філософії

Яхневич Уляни Володимирівни

за спеціальністю 153 Мікро- та наносистемна техніка

(галузь знань 15 Автоматизація та приладобудування)

4.1. Актуальність теми дисертації

Впродовж останніх років створення матеріалів для застосування в мікроелектромеханічних системах (MEMS), пристроях нанoeлектроніки, інтегральної оптики, плазмоніки тощо є одним із найперспективніших напрямків у сучасному матеріалознавстві. Для використання в таких системах властивості матеріалів повинні задовольняти широкому спектру вимог. Серед іншого, важливою є можливість керованої модифікації характеристик матеріалу для забезпечення потрібного відгуку до зовнішнього впливу. Пошук шляхів такої модифікації є актуальним завданням, зокрема,

для оксидних кристалів, які є одними з найбільш перспективних матеріалів для використання у мікро- на наноелектронних системах. Як відомо, оксидні кристали складають важливу частину елементів сучасної електронної техніки, зокрема пристроїв електрооптики та акустооптики, де за рахунок своїх властивостей найширшого використання набув ніобат літію (LiNbO_3 , НЛ). Через комплекс унікальних електрооптичних, акустооптичних, п'єзоелектричних, піроелектричних та нелінійно-оптичних властивостей НЛ часто називають «кремнієм нелінійної оптики» або «кремнієм фотоніки».

Однак, не зважаючи на практичну важливість і велику кількість досліджень, присвячених дифузійному легуванню LiNbO_3 , вплив дифузійного легування на властивості цього кристала залишається далеким від повного розуміння. Зокрема, не були встановлені умови, при яких вплив на дефектну систему ніобату літію буде оптимальним, а також контрольованим з точки зору направленої модифікації властивостей кристалу. Таким чином, дисертаційна робота здобувачки, яка зосереджена на встановленні механізму дифузійного впровадження іонів металів у ніобат літію на основі вивчення профілів змін властивостей монокристалів НЛ є особливо привабливим для вирішення практичних задач і дозволяє суттєво розширити перспективи, а також можливості застосувань LiNbO_3 . Такі дослідження, крім того, дають можливість виявити особливості дефектної підсистеми кристалів ніобату літію, складний характер якої і на сьогодні є об'єктом наукових дискусій.

4.2. Зв'язок теми дисертації з державними програмами, науковими напрямами університету та кафедри

Тема дисертації відповідає науковому напрямку кафедри «Фізико-хімічні процеси синтезу та контрольованої модифікації властивостей матеріалів функціональної, мікро- та наноелектроніки». Дисертаційні дослідження проведені в межах виконання держбюджетних науково-дослідних робіт «Модифікація та оптимізація функціональних властивостей активних елементів пристроїв на основі складних оксидних кристалів для лазерних систем діапазону 1,3...1,5 мкм» (ДБ/ЕМШ) у 2016-2017рр., № державної реєстрації 0116U004134; «Роль дефектів, дифузійних процесів та зовнішніх впливів у формуванні оксидних гетерогенних систем для функціональної електроніки» (ДБ/МЕЖА) у 2018-2020рр., № державної реєстрації 0118U000273; «Керування властивостями халькогенідних і оксидних сенсорних матеріалів шляхом термохімічної наноструктурної модифікації» (ДБ/МОДУС) у 2021р., № державної реєстрації 0121U107736; а також проектів двостороннього українсько-німецького науково-технічного співробітництва «Нанокристалічні п'єзоелектричні сполуки $\text{LiNb}_{1-x}\text{Ta}_x\text{O}_3$ для високотемпературних застосувань» (М/137-2019) у 2019р., № державної реєстрації 0119U103054 та (М/48-2020) у 2020 р. № державної реєстрації 0120U103658; українсько-індійського науково-технічного співробітництва «Моделювання та дослідження характеристик планарних оптичних пристроїв на основі кристала ніобату літію (LiNbO_3) для застосування в інтегральних оптичних схемах (ІОС)» (М/201-2017) у 2017 р. № державної реєстрації 0117U003791.

4.3. Особистий внесок здобувачки в отриманні наукових результатів

Здобувачкою разом із науковим керівником було вибрано напрямок та методи дослідження, а також сформульовано саму мету та завдання, що будуть вирішуватися у роботі. Проведено особисто автором експериментальні та теоретичні дослідження, тоді як аналіз результатів та формулювання відповідних висновків було проведено разом із науковим керівником.

4.4. Достовірність та обґрунтованість отриманих результатів та запропонованих автором рішень, висновків, рекомендацій

Результати, отримані в дисертаційній роботі, ґрунтуються на проведених теоретичних та експериментальних дослідженнях. Із використанням широкого комплексу методик – спектрофотометрію, визначення піроелектричних коефіцієнтів, оптичну металографію, рентгенівську дифракцію, вимірювання нанотвердості, отримані результати є науково обґрунтованими. Достовірність результатів підтверджується їх апробацією на 24 наукових конференціях, а також впровадженні у навчальний процес кафедри напівпровідникової електроніки, використанні при виконанні науково-дослідної роботи ДБ/МОДУС та у науково-виробничому підприємстві “Електрон-Карат”.

4.5. Ступінь новизни основних результатів дисертації порівняно з відомими дослідженнями аналогічного характеру

Отримані нові результати, базуючись на виконаних теоретичних та експериментальних дослідженнях, а саме:

– Методом рентгенівської дифракції встановлено, що на поверхнях кристала LiNbO_3 , які у процесі термообробки безпосередньо контактували з оточуючим середовищем, що містило іони Cu , утворюється шар, сформований сполуками CuO , CuNb_2O_6 та CuNbO_3 . На дифрактограмах поверхонь рефлексії від кристалографічних площин X , Y , Z спостерігаються на тлі гало. Форма та розташування гало дозволили розрахувати розміри наночастинок, які спричиняють його виникнення: $1.3(X)$, $0.6(Y)$ та $1.1(Z)$ нм.

– У випадку дифузії іонів міді до кристалів ніобату літію методом спектрофотометрії показано, що додаткове поглинання, викликане відпалом, обумовлюється входженням у кристал міді у вигляді як іонів Cu^+ (смуга околі 400 нм), так і Cu^{2+} (смуга в околі 1000 нм). Визначено концентраційні профілі іонів Cu^+ та Cu^{2+} у кристалі LiNbO_3 залежно від умов термообробки. Показано, що процес інкорпорації іонів Cu є анізотропним, глибина проникнення міді є найбільшою у кристалографічному напрямку Z , найменшою – у напрямку X .

– Виявлено, що зміни механічних властивостей (нанотвердість) у дифузійно-модифікованому шарі ніобату літію корелюють із розподілом домішкових іонів міді. Величина твердості є мінімальною у поверхневому полікристалічному шарі і зростає з глибиною, досягаючи значень, притаманних нелегованому кристалу на відстанях близько 600 мкм.

– Показано, що структура просторового розподілу іонів міді, що впроваджуються до кристала ніобату літію під час відпалу в присутності іонів Cu , обумовлена складним процесом іонного обміну за участі іонів міді та літію. Отримані експериментально просторові розподіли концентрацій іонів Cu^+ та Cu^{2+} в різних кристалофізичних напрямках добре апроксимуються теоретичними кривими, розрахованими у рамках математичної моделі, що враховує дифузію та дрейф іонів. Коефіцієнти дифузії, визначені з апроксимацій, становлять від 1.2×10^{-10} до 8.4×10^{-10} cm^2/s для іонів Cu^+ та від 4.6×10^{-10} до 8.03×10^{-10} cm^2/s для іонів Cu^{2+} в залежності від температури відпалу.

– 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 забезпечує максимальне переміщення за визначеної електричної напруги.

4.6. Перелік наукових праць, які відображають основні результати дисертації

Основні результати досліджень опубліковано у 37 наукових працях, зокрема у 13 статтях, серед яких 1 – у наукових фахових виданнях України, 2 – у періодичних

виданнях України, що включені до міжнародних наукометричних баз Scopus та/або Web of Science, 10 – у наукових виданнях інших держав, що теж включені до баз Scopus та/або Web of Science; варто окремо відзначити, що є 3 публікації у матеріалах конференцій, що були індексовані у наукометричних базах Scopus та/або Web of Science, 24 публікації у матеріалах та тезах доповідей на міжнародних конференціях.

Стаття у науковому фаховому виданні України

1. 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 "Радіoeлектроніка та телекомунікації". – 2019. – № 914. – С. 11–16. *Особистий внесок здобувача: виконано експерименти з математичного моделювання працездатності та вибору технологічних підходів до створення активних елементів пристроїв на основі кристалів ніобату літію з дифузійними шарами.*

Статті у виданнях України, що включені до міжнародних наукометричних баз

2. Buryu O., Vasylechko L., Sydoruk V., Lakhnik A., Wlodarczyk D., Hurskyi S. T., **Yakhnevych U.**, Zhydachevskyy Y., Sugak D., Suchocki A., Fritze H., Suhak Y. Crystal structure, raman spectra and electrical conductivity of $\text{LiNb}_{1-x}\text{Ta}_x\text{O}_3$ nanopowders obtained with high-energy ball milling // Журнал нано- та електронної фізики. – 2021. – Vol. 13, № 2. – P. 02038-1–02038-6. *Особистий внесок здобувача: проведено математичне оброблення експериментальних даних та підготовано публікацію.*
3. **Yakhnevych U.**, Suchaneck 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. *Особистий внесок здобувача: проведено експериментальні дослідження щодо визначення піроелектричних властивостей досліджуваних зразків та математичне оброблення експериментальних даних.*

Статті у наукових періодичних виданнях інших держав, що включені до міжнародних наукометричних баз:

4. Buryu O., Syvorotka I. I., **Yakhnevych U.**, Sugak D., Ubizskii S., Fritze H., Suhak Y. Determination of optimal crystallographic orientations for LiNbO_3 and LiTaO_3 bimorph actuators // Journal of Sensors and Sensor Systems. – 2021. – Vol. 10, iss. 1. – P. 121–126. *Особистий внесок здобувача: за допомогою методу екстремальних поверхонь визначено оптимальні кристалографічні орієнтації пластин актюатора, за яких забезпечується його найбільше зміщення*
5. 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 LiNbO_3 : Fe crystals // Optical Materials. – 2020. – Vol. 99. – P. 109543–109552. *Особистий внесок здобувача: проведено математичне оброблення експериментальних даних.*
6. Sugak D., **Yakhnevych U.**, Syvorotka I., Buryu O., Popov A., Ubizskii S. Optical investigation of the OH groups in the LiNbO_3 doped by copper // Integrated Ferroelectrics. – 2019. – Vol. 196, iss. 1. – P. 32–38. *Особистий внесок здобувача: проведено експериментальні дослідження щодо визначення оптичного поглинання досліджуваних зразків та математичне оброблення експериментальних даних, підготовано публікацію.*
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 LiNbO_3 single crystals treated at high-temperature in the presence of metal ions // Ferroelectrics. – 2019. – Vol. 539, iss. 1. – P. 146–152. *Особистий внесок здобувача: проведено*

експериментальні дослідження щодо визначення піроелектричних властивостей досліджуваних зразків та математичне оброблення експериментальних даних, підготовано публікацію.

8. Sugak D., Syvorotka I., **Yakhnevych U.**, Buryu Oleg, Levintant-zayonts N., Savytskyu 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. *Особистий внесок здобувача: проведено експериментальні дослідження щодо визначення оптичних та механічних властивостей досліджуваних зразків та математичне оброблення експериментальних даних, підготовано публікацію.*
9. Sugak D., Syvorotka I. I., **Yakhnevych U.**, Buryu 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. *Особистий внесок здобувача: відпрацювання методології, у основі якої лежить підхід до вивчення просторових змін фізико-хімічних властивостей матеріалів за допомогою оптичного (спектрофотометрія) зондування вздовж ліній, перпендикулярних до міжфазних меж, і в напрямку, перпендикулярному до напрямку дифузії, а також проведено математичне оброблення експериментальних даних.*
10. Sugak D., Syvorotka I. I., **Yakhnevych U.**, Buryu 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. *Особистий внесок здобувача: відпрацювання методології, у основі якої лежить підхід до вивчення просторових змін фізико-хімічних властивостей матеріалів за допомогою оптичного (спектрофотометрія) зондування вздовж ліній, перпендикулярних до міжфазних меж, і в напрямку, перпендикулярному до напрямку дифузії, проведено експериментальні дослідження щодо визначення оптичних властивостей досліджуваних зразків, а також проведено математичне оброблення експериментальних даних*
11. Sugak D., Syvorotka I. I., Buryu 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. 227–233 *Особистий внесок здобувача: проведено експериментальні дослідження щодо визначення оптичних властивостей досліджуваних зразків, а також проведено математичне оброблення експериментальних даних.*
12. Sugak D., Syvorotka I. I., Buryu 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. *Особистий внесок здобувача: проведено математичне оброблення експериментальних даних.*
13. Sugak D., Syvorotka I., Buryu 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. *Особистий внесок здобувача: проведено оброблення експериментальних даних.*

Опубліковані праці, які засвідчують апробацію матеріалів дисертації

14. Vasylechko L., Sydorhuk V., Hurskyj S., **Yakhnevych U.**, Lakhnik A., Syvorotka I. I., Luchechko A., Buryu 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. *Особистий внесок здобувача: проаналізовано літературні дані та підготовка досліджуваних зразків.*
15. **Yakhnevych U., Buryu 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. *Особистий внесок здобувача: виконано експерименти з математичного моделювання вибору технологічних підходів до створення активних елементів для актюаторів на основі кристалів ніобату літію з дифузійними шарами міді.*
 16. **Yakhnevych U., Sugak D., Syvorotka I., Buryu 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. *Особистий внесок здобувача: проведено експериментальні дослідження щодо визначення оптичних властивостей LiNbO_3 , легованих іонами міді, а також проведено математичне оброблення експериментальних даних.*
 17. **Vasylechko L., Sugak D., Sydorchuk 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. *Особистий внесок здобувача: проаналізовано літературні дані та підготовка досліджуваних нанопорошків $\text{LiNb}_x\text{Ta}_{1-x}\text{O}_3$.*
 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 $\text{Gd}_3\text{Ga}_5\text{O}_{12}$ 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. *Особистий внесок здобувача: проведено експериментальні дослідження щодо визначення оптичних властивостей досліджуваних кристалів $\text{Gd}_3\text{Ga}_5\text{O}_{12}$ легованих іонами Co .*
 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 Особистий внесок здобувача: виконано експерименти з математичного моделювання вибору технологічних підходів до створення активних елементів для актюаторів на основі кристалів ніобату літію з дифузійними шарами Cu .*
 20. **Sugak D., Syvorotka I., Yakhnevych U., Zhydachevskyy Y., Pieniżek A., Włodarczyk D., Buryu O., Ubizskii S., Suchocki A.** Investigation of the Interface of the $\text{Y}_3\text{Fe}_5\text{O}_{12}/\text{Gd}_3\text{Ga}_5\text{O}_{12}$ 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. *Особистий внесок здобувача: проведено експериментальні дослідження щодо визначення оптичних властивостей досліджуваних $\text{Y}_3\text{Fe}_5\text{O}_{12}/\text{Gd}_3\text{Ga}_5\text{O}_{12}$.*
 21. **Sugak D., Syvorotka I., Buryu O., Yakhnevych U., Levintant-zayonts N., Savytskyu 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. *Особистий внесок*

- здобувача: проведено експериментальні дослідження щодо визначення механічних властивостей досліджуваних кристалів $\text{LiNbO}_3:\text{Cu}$
22. Sugak D., Syvorotka I., Kushlyk M., **Yakhnevych U.**, Zhydachevskyy Y., Popov A.I., Buryu O., Kachan S., Suchocki A. Photochromic centers of $\text{Gd}_3\text{Ga}_5\text{O}_{12}:\text{Co}$ single crystals // Nanotechnology and nanomaterials (NANO-2019) : international research and practice conference, 27–30 August 2019, Lviv, Ukraine : book of abstracts. – 2019. – P. 644. *Особистий внесок здобувача: проаналізовано літературні дані та проведено експериментальні дослідження щодо визначення оптичних властивостей досліджуваних кристалів $\text{Gd}_3\text{Ga}_5\text{O}_{12}:\text{Co}$.*
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. Mechano-synthesis 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. *Особистий внесок здобувача: проаналізовано літературні дані та підготовка досліджуваних нанопорошків $\text{LiNb}_x\text{Ta}_{1-x}\text{O}_3$.*
24. Sugak D., **Yakhnevych U.**, Buryu 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 *Особистий внесок здобувача: проведено експериментальні дослідження щодо визначення оптичних властивостей досліджуваних кристалів $\text{LiNbO}_3:\text{Cu}$ та проведено математичне оброблення експериментальних даних.*
25. **Yakhnevych U.**, Syvorotka I.I., Buryu 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 *Особистий внесок здобувача: проведено експериментальні дослідження щодо визначення оптичних властивостей досліджуваних кристалів $\text{LiNbO}_3:\text{Cu}$, визначення оптичного поглинання груп OH та проведено математичне оброблення експериментальних даних.*
26. Sugak D., **Yakhnevych U.**, Syvorotka I.I., Buryu 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. *Особистий внесок здобувача: проаналізовано літературні дані, проведено експериментальні дослідження щодо визначення оптичних властивостей досліджуваних кристалів $\text{LiNbO}_3:\text{Cu}$ та проведено дослідження оптичного поглинання груп OH*
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: – С.74 – 75. *Особистий внесок здобувача: проведено експериментальні дослідження щодо визначення оптичних та піроелектричних властивостей кристалів LiNbO_3 легованих іонами металів.*
28. Sugak D., Syvorotka I.I., **Yakhnevych U.**, Buryu O., Zhydachevskii Y.A., Suchocki A., Vakiv M., Ubizskii S. Optical investigation of Co ions diffusion in $\text{Gd}_3\text{Ga}_5\text{O}_{12}$ 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. *Особистий внесок здобувача: проведено експериментальні дослідження щодо визначення оптичних властивостей гранатів $Gd_3Ga_5O_{12}$*
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. *Особистий внесок здобувача: проведено експериментальні дослідження щодо визначення оптичних властивостей ніобату літію, легованого іонами міді.*
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. *Особистий внесок здобувача: проведено експериментальні дослідження щодо визначення оптичних властивостей ніобату літію, які були піддані високотемпературним відпалам у різних атмосферах.*
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. – С.773. *Особистий внесок здобувача: проведено експериментальні дослідження щодо визначення оптичних властивостей кристалів ніобату літію, легованих іонами металів.*
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. *Особистий внесок здобувача: проведено математичне оброблення експериментальних даних досліджуваних зразків ніобату літію, які були піддані високотемпературним відпалам у різних атмосферах.*
33. Суґак 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. *Особистий внесок здобувача: проведено експериментальні дослідження щодо впливу високотемпературних обробок у присутності іонів міді на просторові зміни оптичних властивостей кристалів $LiNbO_3$*
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. *Особистий внесок здобувача: проведено експериментальні дослідження щодо впливу високотемпературних обробок у присутності іонів Cu, Fe, Co на просторові зміни оптичних властивостей кристалів $LiNbO_3$*
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. *Особистий внесок здобувача: проведено експериментальні дослідження*

щодо визначення оптичних властивостей кристалів ніобату літію, легованих іонами *Si*, *Fe*, *Co*.

36. **Yakhnevych U.**, Sugak D., Syvorotka I., Buryu O., Solskii I., Vasylechko L., Haiduchok V., Ubizskii S., Vakiv M. The spatial distribution of couper 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. *Особистий внесок здобувача: проведено математичне оброблення експериментальних даних досліджуваних зразків ніобату літію, які були піддані високотемпературним відпалам у різних атмосферах.*
37. **Yakhnevych U.**, Sugak D., Syvorotka I., Buryu 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. *Особистий внесок здобувача: проведено експериментальні дослідження щодо визначення оптичних властивостей кристалів LiNbO_3 , що пройшли високотемпературний відпал у різних атмосферах.*

4.7. Апробація основних результатів дослідження на конференціях, симпозіумах, семінарах тощо

Основні результати наукових досліджень представлялися та обговорювалися на міжнародних наукових конференціях та семінарах в Україні, а також і за кордоном: VIII Міжнародна наукова конференція "Релаксаційні, нелінійні й акустооптичні процеси та матеріали" (VIII International Workshop "Relaxed, nonlinear and acoustic optical processes and materials", 01.06.2016-04.06.2016, Lutsk-Lake "Svityaz"); 4th International research and practice conference: Nanotechnology and nanomaterials (NANO 2016, 24-27 August, 2016, Lviv, Ukraine); V Міжнародна науково-практична конференція "Фізико – технологічні проблеми передавання, обробки та зберігання інформації в інфокомунікаційних системах" (03.11.2016-05.11.2016, Чернівці, Україна); International Conference on Defects in Insulating Materials (ICDIM-19, 10.07.2016-16.07.2016, Lyon France); E-MRS Fall Meeting, Symposium Z (19.09.2016-22.09.2016, Warszawa, Poland); XII International Conference «Electronics and Applied Physics» (19-22 October 2016, Kyiv, Ukraine); Міжнародна наукова конференція «Оксидні матеріали електронної техніки – отримання, властивості, застосування» (OMEE-2017, International Conference «Oxide materials for electronic engineering – fabrication, properties and application», 29.05.2017-02.06.2017, Lviv, Ukraine); 5th International research and practice conference: Nanotechnology and nanomaterials (NANO 2017, 23–26 August 2017, Chernivtsi, Ukraine); 14-th Russia/CIS/Baltic/Japan symposium on ferroelectricity young scientists school on the spectroscopic studies of critical dynamics at structural phase transitions (14.05.2018-18.05.2018, Saint-Petersburg, Russia); 12th International conference on functional materials and nanotechnologies (FM&NT-2018, 02.10.2018-05.10.2018, Riga, Latvia); IEEE 8th International Conference on Nanomaterials: Applications & Properties, NAP-2018 (Zatoka, Ukraine, 09.09. – 14.09.2018); IEEE The Third international conference on information and telecommunication technologies and radio electronics (UkrMiCo'2018, September 10–14, Odessa, Ukraine); XVII Міжнародна Фреїківська конференція з фізики і технології тонких плівок та наносистем (20.05.2019-25.05.2019, Івано-Франківськ, Україна); IEEE XV Міжнародна науково-технічна конференція "Перспективні технології і методи проектування MEMC (XVth International conference on the perspective technologies and methods in MEMS design, MEMSTECH, 22.05.2019-26.05.2019, Поляна, Україна); 7th International research and practice conference: Nanotechnology and nanomaterials (NANO 2019, 27–30 August 2017, Lviv, Ukraine); 20th International conference on radiation effects in insulators (REI-20 19–23 August, 2019, Astana, Kazakhstan); XIV Міжнародна наукова конференція «Фізичні явища в твердих тілах» (3–5

грудня, 2019, Харків, Україна); Sensor and measurement science international conference (SMSI 2020, June 22–25, Nuremberg, Germany); Sensor and Measurement Science International Conference (SMSI 2021, Digital Conference, 3 - 6 May 2021, Nuremberg, Germany).

Основні положення і результати дисертаційного дослідження обговорювались та отримали позитивну оцінку на засіданнях і наукових семінарах кафедри напівпровідникової електроніки Національного університету «Львівська політехніка» (2017-2021 рр.).

4.8. Наукове значення виконаного дослідження із зазначенням можливих наукових галузей та розділів програм навчальних курсів, де можуть бути застосовані отримані результати

Результати дисертаційної роботи можуть бути використанні при вдосконаленні та виготовленні елементів та пристроїв мікро- та наносистемної техніки, зокрема сенсорної електроніки та актюаторів.

Окремі результати дисертаційних досліджень використовувалися при виконанні науково-дослідної роботи «Керування властивостями халькогенідних і оксидних сенсорних матеріалів шляхом термохімічної наноструктурної модифікації» (ДБ/МОДУС № 0121U107736); у навчальному процесі для підготовки здобувачів спеціальності 153 Мікро- та наносистемна техніка, зокрема у дисципліні «Електронні системи», що підтверджено відповідними актами.

4.9. Практична цінність результатів дослідження із зазначенням конкретного підприємства або галузі народного господарства, де вони можуть бути застосовані

Результати дисертаційної роботи мають важливе значення для низки прикладних застосувань у технологіях та засобах мікро- та наносистемної техніки. А саме:

- відпрацьована методологія, в основі якої лежить підхід до вивчення просторових змін фізико-хімічних властивостей матеріалів за допомогою оптичного (спектрофотометрія, мікрораманівське розсіювання) зондування вздовж ліній, перпендикулярних до міжфазних меж, і в напрямку, перпендикулярному до напрямку дифузії. Ця методологія може бути застосована в подальшому для вивчення просторових змін фізико-хімічних властивостей інших матеріалів.
- показано, що величини піроелектричних коефіцієнтів у дифузійних шарах кристалів LiNbO_3 , підданих термообробці у присутності іонів міді та заліза, збільшуються, що відкриває шлях до позитивної модифікації піроелектричних властивостей кристалів ніобату літію. Цей результат також може бути використаний для зменшення спонтанної поляризації поблизу інтерфейсів, що поліпшить характеристики пристроїв.
- на основі експериментальних досліджень процесів дифузії металів та математичного моделювання п'єзоелектричних властивостей 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.

Результати досліджень, отримані в дисертаційній роботі, використовуються у Науково-виробничому підприємстві «Електрон-Карат», що підтверджено відповідним актом використання.

4.10. Оцінка структури дисертації, її мови та стилю викладення

Загальний обсяг дисертаційної роботи становить 158 сторінок, у яких вміщено анотацію, вступ, чотири розділи, висновки, список використаної літератури та два додатки. У роботі налічується 57 рисунків та 7 таблиць, а також 132 найменування у списку використаних джерел. За структурою, мовою та стилем дисертаційна робота відповідає вимогам МОН України.

Під час обговорення дисертації до неї не було висунуто жодних зауважень щодо самої суті роботи.

5. З урахуванням зазначеного,

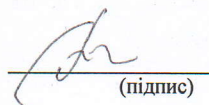
на фаховому семінарі кафедри напівпровідникової електроніки ухвалили:

- 5.1. Дисертація Яхневич Уляни Володимирівни «Модифікація кристалів LiNbO_3 шляхом термохімічних обробок у присутності іонів металів для пристроїв мікро- та наносистемної техніки» є завершеною науковою працею, у якій розв'язано конкретне науково-прикладне завдання встановлення закономірності процесів дифузії іонів металів у кристалах LiNbO_3 та визначення оптимальних умови термохімічних обробок для застосування модифікованих матеріалів у пристроях функціональної електроніки, що має важливе значення для галузі 15 Автоматизація та приладобудування.
- 5.2. У 37 наукових публікаціях повністю відображені основні результати дисертації, з них 1 стаття у науковому фаховому виданні України, 2 статті у виданнях України, що включені до міжнародних наукометричних баз та 10 статей у наукових періодичних виданнях інших держав, що включені до міжнародних науково-метричних баз, а також 24 матеріалів та тез доповідей на міжнародних конференціях.
- 5.3. Дисертація відповідає вимогам наказу МОН України № 40 від 12.01.2017р. «Про затвердження вимог до оформлення дисертації», Тимчасовому порядку присудження ступеня доктора філософії (Постанова Кабінету Міністрів України від 6 березня 2019 р. № 167).
- 5.4. З урахуванням наукової зрілості та професійних якостей Яхневич Уляни Володимирівни дисертація «Модифікація кристалів LiNbO_3 шляхом термохімічних обробок у присутності іонів металів для пристроїв мікро- та наносистемної техніки» рекомендується для подання до розгляду та захисту у спеціалізованій вченій раді.

За затвердження висновку проголосували:

за	–	17 (сімнадцять) осіб
проти	–	немає
утримались	–	немає

Голова засідання
фахового семінару, зав. кафедри
напівпровідникової електроніки,
д.т.н., професор



(підпис)

Дружинін А.О.

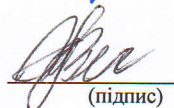
Рецензенти:
д.т.н., професор, професор
спеціалізованих комп'ютерних систем



(підпис)

Клим Г.І.

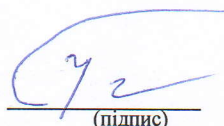
д.т.н., професор, професор
кафедри програмного забезпечення



(підпис)

Фечан А.В.

Відповідальний у ІТРЕ за
атестацію PhD
д.т.н., професор кафедри
напівпровідникової електроніки



(підпис)

Островський І.П.

«27» серпня 2021 р.