

**МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ  
НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ «ЛЬВІВСЬКА ПОЛІТЕХНІКА»**

**ГАЙДУЧОК ВОЛОДИМИР ГРИГОРОВИЧ**



УДК 539.23:544.22:535.341

**ФОРМУВАННЯ ТОНКОПЛІВКОВИХ СТРУКТУР  
НА ПОЛЯРНИХ ГРАНЯХ КРИСТАЛІВ  $\text{LiNbO}_3$**

05.27.01 – твердотільна електроніка

**АВТОРЕФЕРАТ**  
дисертації на здобуття наукового ступеня  
кандидата технічних наук

Львів – 2024

## Дисертацією є рукопис

Робота виконана на кафедрі напівпровідникової електроніки Національного університету «Львівська політехніка» Міністерства освіти і науки України та у Науково-виробничому підприємстві «ЕЛЕКТРОН-КАРАТ» ДП ПрАТ «Концерн-Електрон», м. Львів

**Науковий керівник:** доктор технічних наук, професор  
**Ваків Микола Михайлович,**  
Науково-виробниче підприємство «ЕЛЕКТРОН-КАРАТ»  
ДП ПрАТ «Концерн-Електрон»,  
генеральний директор

**Офіційні опоненти:** доктор технічних наук, професор  
**Вербицький Володимир Григорович,**  
Національний технічний університет України  
«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»,  
професор кафедри мікроелектроніки

доктор технічних наук, професор  
**Когут Ігор Тимофійович,**  
Прикарпатський національний університет  
імені Василя Стефаника,  
завідувач кафедри комп'ютерної інженерії та електроніки

Захист відбудеться «25» квітня 2024 р. о 14<sup>00</sup> годині на засіданні спеціалізованої вченої ради Д 35.052.13 у Національному університеті «Львівська політехніка» за адресою: 79013, м. Львів, вул. Степана Бандери, 12, ауд. 226 головного корпусу.

З дисертацією можна ознайомитися у науковій бібліотеці Національного університету «Львівська політехніка» за адресою: 79013, м. Львів, вул. Професорська, 1.

Автореферат розісланий «25» березня 2024 року.

Вчений секретар  
спеціалізованої вченої ради Д 35.052.13  
доктор технічних наук, професор



Г. І. Клим

## ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

**Актуальність теми.** Створення сучасних пристроїв твердотільної електроніки, зокрема приладів керування сигналами акусто- та оптоелектроніки, акусто-, електрооптики, є неможливим без урахування особливостей фізичних явищ в елементах будови приладів, властивостей матеріалів, з яких вони виготовляються, а також технологічних факторів при виготовленні, що на них впливають. Одним із найуживаніших активних середовищ згаданих приладів є монокристал ніобату літію  $\text{LiNbO}_3$ , який через це називають «кремнієм оптоелектроніки». Побудова на його основі ефективних приладів, що використовують оптичні, сегнето- та піроелектричні властивості цього матеріалу, не може обійтися як без урахування нецентросиметричності його кристалічної будови, наслідком якої є явище спонтанної електричної поляризації, так і без нанесення на його поверхні металевих електродів для створення надійних контактів чи діелектричних покриттів, які виконують функції просвітлення активних елементів для зниження втрат потужності оптичних сигналів. На сьогодні добре відомі особливості одержання тонкоплівкових структур на електрично нейтральних підкладках, а також вплив електричного поля та обробки електронним пучком на процеси росту плівок на кристалічних поверхнях. Натомість, специфіка одержання таких структур на статично заряджених поверхнях не бралась до уваги. Проте, наявність електричного заряду на поверхні сегнетоелектрика змінює умови осадження шарів, що призводить до зміни їхніх властивостей. Якщо при виготовленні пристроїв не врахувати знаку заряду поверхні чи напрямку вектора електричної поляризації активного середовища, можна помилитись у виборі оптимальної робочої поверхні для нанесення тонкоплівкових структур.

Відомо, що найбільш виражений електростатичний ефект спостерігається на гранях  $\text{LiNbO}_3$ , перпендикулярних кристалографічній осі  $Z$ , менший – на гранях, що перпендикулярні до осі  $Y$ , а на гранях, перпендикулярних до осі  $X$ , цей ефект практично відсутній. Найчастіше в приладах функціональної електроніки використовуються грані монокристалічних активних елементів, перпендикулярні до кристалографічної осі  $Z$ , та відповідні покриття на них: для електрооптичних модуляторів це просвітлювальні й металізовані покриття, для акустооптичних пристроїв та ліній затримки – металеві плівкові структури, для піроприймачів – напівпоглинаючі покриття. Отже, врахування явища електростатичності поверхні активних елементів із кристалів ніобату літію є важливим з погляду якості тонкоплівкових структур, що формуються на них, для забезпечення функціональності приладів. Однак особливості формування тонкоплівкових металевих та діелектричних шарів на полярних гранях  $\text{LiNbO}_3$  досліджені мало. Тому актуальним є встановлення особливостей формування на полярних гранях монокристалу ніобату літію як металевих плівок хрому, срібла, золота, нікелю, міді, так і діелектричних покриттів із двоокисів кремнію, гафнію, цирконію, титану та інших, а також вибір орієнтації напрямку електричної поляризації активних елементів кристалів  $\text{LiNbO}_3$  у конструкції твердотільних пристроїв на їх основі.

**Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами.** Дисертаційні дослідження виконувалися в межах науково-дослідних робіт НВП «ЕЛЕКТРОН-КАРАТ» ДП ПрАТ «Концерн-Електрон»:

- ДКР «Мета» (2007-2010 рр.) на замовлення Концерну «Електрон»;
- НДР «Виготовлення експериментальних зразків двох типів модулів активних елементів широкосмугових ресстраторів лазерного випромінювання протитанкових систем ураження з використанням надтонких пластин кристалів танталату літію на керамічній комутаційній платі» за договором з Інститутом фізики НАНУ (№ 07/1620 від 01.06.2016 р.);
- НДР «Розроблення нових плівкових та об'ємних монокристалічних матеріалів для

створення на їх основі активних та пасивних елементів далекометричних систем та систем цілеспрямування, що працюють в імпульсних режимах у спектральному діапазоні, безпечному для ока людини (1,3...1,5 мкм) за договором з Інститутом фізики напівпровідників ім. В.Є. Лашкарьова НАНУ (№ 75/18-16 від 01.08.2016 р.);

- НТР «Розроблення технологій виготовлення елементів з монокристалів танталату літію для акустооптичних пристроїв» за договором з МОН України ДЗ/161-2016 від 21.10.2016 р. (№ 0117U000951, 2016-2018 рр.);
- НТР «Розроблення пристроїв функціональної електроніки на основі монокристалів групи перовськіту» за договором з МОН України ДЗ/57–2018 від 05.10.2018 р. (№ 0118U005284, 2018-2020 рр.);

кафедри напівпровідникової електроніки Національного університету «Львівська політехніка»:

- НДР ДБ/ЕМШ «Модифікація та оптимізація функціональних властивостей активних елементів пристроїв на основі складних оксидних кристалів для лазерних систем діапазону 1,3...1,5 мкм» (№ 0116U004134, 2016-2017 рр.);
- НДР ДБ/Межа «Роль дефектів, дифузійних процесів та зовнішніх впливів у формуванні оксидних гетерогенних систем для функціональної електроніки» (№ 0118U000273, 2018-2020 рр.);

а також міжнародних проєктів RISE - MSCA програми «Горизонт»:

- «IMAGE» «Інноваційні оптичні/квазіоптичні технології та наноінженерія анізотропних матеріалів для створення активних елементів з істотно підвищеною енергоефективністю» (№ 778156 , 2018-2024 рр.) ;
- «MEGA» «Випромінювачі без важких металів для джерел світла нового покоління» (№ 823720, 2020-2023рр.);
- «TeraHertz» «Нові технології та матеріали для контролю терагерцового випромінювання» (№ 101086493, 2023-2026 рр.).

#### **Мета і завдання дослідження.**

**Метою** роботи є створення технологічних основ формування функціональних металевих та діелектричних тонких плівок методами вакуумного осадження на полярних гранях кристалів  $\text{LiNbO}_3$  як активних елементів приладів акусто- та оптоелектроніки, електрооптичних модуляторів та широкосмугових піроприймачів.

Для досягнення поставленої мети необхідно було вирішити такі *завдання*:

- одержати металеві та діелектричні функціональні шари на нейтральних, негативно та позитивно заряджених гранях кристала  $\text{LiNbO}_3$  методами термічного, електронно-променевого, магнетронного наплення у вакуумі;
- дослідити механізми зародкоутворення, росту, формування металевих та діелектричних плівок залежно від полярності грані  $\text{LiNbO}_3$ , умов одержання та товщини;
- дослідити мікроструктуру, морфологію поверхні, адгезію, оптичні властивості, променеву стійкість одержання металевих та діелектричних шарів;
- встановити особливості поверхневого плазмонного резонансу (ППР) у тонких плівках хрому, золота та срібла, нанесених на полярні грані монокристала ніобату літію;
- встановити умови формування функціональних шарів на гранях різної полярності для досягнення оптимальних характеристик досліджуваних приладів;
- встановити оптимальну орієнтацію вектора електричної поляризації плоскопаралельних активних елементів у конструкції досліджуваних приладів;
- випробувати встановлені закономірності при виготовленні активних елементів для акустооптичного модулятора на стоячій акустичній хвилі, електрооптичного затвора, акустичних ліній затримки, широкосмугового піроприймача.

**Об'єкт дослідження** – тонкі металеві та діелектричні покриття на поверхнях монокристала ніобату літію  $\text{LiNbO}_3$  з різнойменним електростатичним зарядом.

**Предмет дослідження** – закономірності зміни характеристик тонкоплівкових металевих та діелектричних покриттів, сформованих на полярних гранях активних елементів із монокристала ніобату літію  $\text{LiNbO}_3$  методами вакуумного осадження, для приладів функціональної електроніки.

**Методи дослідження.** Тонкі металеві та діелектричні покриття одержувалися методами термічного, електронно-променевого та магнетронного напилювання з використанням обладнання фірми «TORR» (США). Дослідження морфології поверхонь металевих плівок проводилися методом атомно-силової мікроскопії (АСМ) з використанням мікроскопа SolverP4 у Науково-технічному і навчальному центрі низькотемпературних досліджень Львівського національного університету імені Івана Франка. Дослідження мікроструктури плівок проводилося методом електронної сканувальної мікроскопії в НВП «ЕЛЕКТРОН-КАРАТ» ДП ПрАТ «Концерн-Електрон» та дослідницькому центрі Forschungszentrum Jülich (м. Юліх, Німеччина). Дослідження оптичних властивостей металевих та діелектричних покриттів проводилися методом спектروفотометрії за допомогою спектروفотометра UV-VIS-NIR Shimadzu UV3600 (Японія).

**Наукова новизна одержаних результатів.** У дисертації вперше вирішено науково-технічне завдання створення технологічних основ формування функціональних металевих та діелектричних тонких плівок методами вакуумного осадження на полярних гранях кристалів  $\text{LiNbO}_3$ , зокрема вперше:

- встановлено на основі дослідження особливостей зародкоутворення плівок на різнойменно-заряджених гранях, що плівки, нанесені на негативно-заряджену поверхню ніобату літію, перпендикулярну кристалографічній осі Z, володіють вищою густиною, міцністю та адгезією;
- встановлено, що металеві і діелектричні плівки, нанесені на негативно заряджену поверхню  $\text{LiNbO}_3$  володіють зменшеним оптичним пропусканням в інтервалі довжин хвиль 500-2500 нм у порівнянні з плівками на позитивно зарядженій поверхні, одержані у таких самих умовах, що пов'язано з особливостями їх мікроструктури і морфології поверхні;
- встановлено, що метод магнетронного осадження у вакуумі дозволяє одержати плівки металів з вищою однорідністю на негативно заряджених поверхнях кристалу ніобату літію  $\text{LiNbO}_3$  за рахунок збільшення частки позитивно заряджених іонів в потоці перенесення матеріалу мішені на підкладку, що дозволяє одержати суцільні шари вже за товщини 2 нм;
- у спектрах поглинання плівок Ag, осаджених на позитивно заряджену поверхню монокристала  $\text{LiNbO}_3$ , спостерігається максимум, який із ростом товщини плівки зміщується від 520 до 610 нм
- встановлено, що положення максимуму смуги поглинання поверхневого плазмонного резонансу у тонких плівках срібла, осаджених на полярних гранях  $\text{LiNbO}_3$ , залежить від їх електричного заряду;
- визначено, що на негативно зарядженій поверхні  $\text{LiNbO}_3$ , максимум поверхневого плазмонного резонансу зміщується у довгохвильову область спектру відносно максимуму на негативно зарядженій чи нейтральній поверхнях;
- обґрунтовано механізм зміщення максимуму поверхневого плазмонного резонансу у плівці металу на негативно зарядженій поверхні  $\text{LiNbO}_3$  у довгохвильову область унаслідок збільшення концентрації вільних носіїв заряду у порівнянні з такою ж плівкою на позитивно зарядженій грані.

### **Практичне значення одержаних результатів.**

Встановлені особливості нанесення тонкоплівкових покриттів на полярні грані кристала ніобату літію дозволили:

- створити активний елемент електрооптичного затвора з променевою стійкістю не менше  $0,3 \text{ ГВт/см}^2$  для імпульсів лазерного випромінювання тривалістю 20 нс;
- встановити, що орієнтація вектора поляризації плоскопаралельного активного елемента в напрямку, протилежному до напрямку світлового променя, дозволяє підвищити тривалість надійної роботи електрооптичних модуляторів;
- встановити, що оптимальною поверхнею для нанесення електродів зустрічно смужкових перетворювачів акустоелектронних ліній затримки на поверхневих акустичних хвилях є негативно заряджена грань  $\text{LiNbO}_3$ ;
- встановити, що металевий електрод піроприймача на основі  $\text{LiNbO}_3$  слід наносити на негативно заряджену грань, а напівпоглинаюче покриття, відповідно, – на позитивно заряджену грань.

Ці технологічні рішення ввійшли в нормативні документи, а саме:

- «Технологію виготовлення акустооптичних модуляторів (АОМ) добротності лазерного випромінювання» за технологічною інструкцією ТІ 008-1610/01;
- «Технологію виготовлення електрооптичних затворів (ЕОЗ) та ліній затримки (ЛЗ)» за технологічними інструкціями ТІ 009-1610/02 та ТІ 009-1610/03, відповідно;
- «Технологію виготовлення піроелектричних сенсорів – вимірювачів потужності оптичного випромінювання на основі монокристалів ніобату і танталату літію» за технологічними інструкціями ТІ 009-1610/04, ТІ 009-1610/05.

Спосіб формування багатошарових інтерференційних покриттів на поверхні активних елементів захищено Патентом України на винахід.

**Особистий внесок здобувача.** Сформульовані в дисертації наукові положення, узагальнення, висновки, рекомендації та пропозиції обґрунтовані автором на підставі особистих досліджень та експериментів, а також у результаті опрацювання й аналізу доступних наукових і технічних джерел. Автором особисто підготовлено всі зразки для експериментальних досліджень, проведені дослідження оптичних властивостей металевих та діелектричних тонких плівок на полярних гранях кристала ніобату літію та проведено аналіз отриманих результатів. У роботах [1, 10, 13] автору належить ідея експерименту при дослідженні особливостей формування нанорозмірних плівок хрому на поверхнях кристала  $\text{LiNbO}_3$  з різнойменним електричним зарядом. У роботах [2, 3] автор брав участь у дослідженнях плазмонного поглинання наночасток срібла на поверхнях  $\text{LiNbO}_3$ , а також оптичних властивостей нанокompatитів  $\text{LiNbO}_3\text{-Ag}$ . У роботах [4, 5] автор виконав нанесення шарів металів для дослідження дифузії з поверхні вглиб монокристала ніобату літію. В роботах [14-16, 22] автор брав участь у розробленні експериментальних зразків акустооптичних та електрооптичних приладів на основі монокристалів ніобату літію. В роботах [12, 20] автор розробив та виготовив напівпоглинальні покриття із заданими параметрами на основі плівок  $\text{SiO-Cr}$  для створення модулів активних елементів широкосмугових реєстраторів лазерного випромінювання, а в роботі [17] розробив концепцію виготовлення активного елемента піроелектричного вимірювача енергії лазерного випромінювання прохідного типу. Автор особисто представляв результати на конференціях [10-12, 15-21].

**Апробація результатів дисертаційної роботи.** Результати досліджень, викладені у дисертації, доповідались на 12 українських та міжнародних конференціях, серед яких: X міжнародна науково-практична конференція «Сучасні інформаційні і електронні технології» (Одеса, Україна, травень 2009), XII відкрита науково-технічна конференція професорсько-викладацького складу Інституту телекомунікацій, радіоелектроніки та електронної техніки НУ «Львівська політехніка» з проблем електроніки (Львів, Україна, 7-9 квітня 2009 р.), XIII міжнародна науково-практична конференція «Сучасні інформаційні

та електронні технології»: тези доп. (Одеса, Україна, 4–8 червня 2012), International Conference on Electronics and Information Technology (Odesa, Ukraine; 2016), Друга українська науково-технічна конференція «Спеціальне приладобудування: стан та перспективи» (Київ, Україна; 6-7 грудня 2016), International Research and Practice Conference “Nanotechnology and nanomaterials” NANO-2016 (Lviv, Ukraine; 24-27 Aug. 2016), науково-практична конференція «Застосування сухопутних військ збройних сил України у конфліктах сучасності» (Львів, Україна; Національна академія сухопутних військ, 16 листопада 2017 р.), 1-st International Conference on Innovative Materials and Nanoengineering (IMNE'2019) (Brenna, Poland; 27-29 Aug. 2019); Міжнародна науково-практична конференція «Сучасні інформаційні та електронні технології» (Одеса, Україна, 27-31 травня 2019 р.).

**Публікації.** Основні результати дисертації опубліковані у 22 наукових працях, з яких 6 статей – у виданнях, що індексуються в міжнародних наукометричних базах даних Scopus, 2 статті – у наукових фахових виданнях України, один патент України на винахід, 13 публікацій – у матеріалах міжнародних і українських наукових конференцій.

**Структура і об'єм дисертації.** Дисертація складається з анотації, списку опублікованих праць за темою дисертації, змісту, вступу, п'яти розділів, загальних висновків, списку використаної літератури та додатків. Загальний обсяг дисертації становить 189 сторінок, із них 176 сторінок основного тексту, 58 рисунків та 4 таблиці.

## ОСНОВНИЙ ЗМІСТ РОБОТИ

**У вступі** обґрунтовано актуальність теми дисертаційної роботи та її зв'язок із науковими програмами, планами й темами досліджень, сформульовано мету роботи та завдання, які потрібно вирішити задля досягнення поставленої мети. Представлено інформацію про об'єкт і предмет досліджень, а також експериментальні методики, використані для вирішення поставлених завдань. Наведено інформацію про наукову новизну та практичне застосування отриманих результатів. Подано дані про апробацію результатів дисертаційної роботи та особистий внесок здобувача.

**У першому розділі** проаналізовано дані з літературних джерел щодо особливостей конденсації, зародкоутворення та росту тонкоплівкових структур на різного типу підкладках, а саме про ріст та морфологію тонких шарів металів, утворених методом розпилення у вакуумі. Розглянуто зародкоутворення тонких металевих плівок під впливом зовнішніх чинників та в залежності від властивостей конденсованого матеріалу. Розглянуто конденсатно-острівкову модель утворення кластерів при формуванні тонкоплівкових структур. Описано механічні властивості тонкоплівкових структур, а також особливості механічної стійкості та ступеня адгезії тонких металевих плівок, нанесених на різні типи підкладок.

Розглянуто внутрішні напруження, що виникають у процесі конденсації у вакуумі тонкоплівкових структур. Проаналізовано вплив температурних чинників на зміну опору тонких плівок металів, а також залежність питомого опору плівок від їх товщини. Розглянуто провідність нанорозмірних диспергованих плівок, та описано ряд механізмів можливого переносу в них носіїв заряду. Визначено важливість процесу відпалу, присутнього при застосовуванні в технології виготовлення прозорих діелектричних багат шарових покриттів на оптичних елементах різних оптоелектронних та електрооптичних пристроїв, а також активних елементах твердотільних лазерів з метою збільшити пропускання оптичного сигналу через елементи або, навпаки, створити діелектричне дзеркальне покриття в певному діапазоні довжин хвиль.

Наведені дані щодо оптичних властивостей тонких металевих плівок, про ефекти еліптичної поляризації світла при відбиванні та пропусканні, поверхневі плазмонні

резонанси в тонких плівках, а також про вплив структури тонких плівок на їхні оптичні властивості.

**Другий розділ** містить опис низки експериментальних методик та обладнання для одержання й дослідження тонкоплівкових структур. Особливу увагу приділено технології одержання тонких металевих та діелектричних плівок методом вакуумного розпилення. Розглянуто різні методи розпилення, а саме: термічний, електронно-променевий та магнетронний, оцінено їхні переваги і недоліки. Представлено методики дослідження механічних, електрофізичних та оптичних характеристик металевих плівок. Показано, що оптичні властивості плівок великою мірою залежать від умов їх одержання, а саме: температури підкладки, швидкості та методу напилювання, відпалу та ін.

**У третьому розділі** проаналізовано вплив поверхневого заряду кристала  $\text{LiNbO}_3$  на структуру металевих та діелектричних плівок, нанесених на полярні його грані.

Кристал ніобату літію є піро-, п'єзо- та сегнетоелектриком. Це означає, що, в силу особливостей кристалічної структури, центри ваги електричних зарядів різнойменних іонів в елементарній комірці цього кристала не збігаються один з одним. Тому кожна елементарна комірка має відмінний від нуля електричний дипольний момент  $m_s$  навіть за відсутності зовнішніх електричних і механічних впливів. А спонтанна поляризація  $P_s$  є сумою всіх дипольних моментів елементарних комірок, що містяться в одиниці об'єму кристала, внаслідок чого на його протилежних гранях виникає поверхневий заряд із різним знаком. Максимально цей ефект спостерігається на гранях кристала, які перпендикулярні кристалографічній осі  $Z$ , меншою мірою він стосується граней, які перпендикулярні осі  $Y$ , а на гранях, перпендикулярних осі  $X$ , такий ефект практично відсутній.

Враховуючи ці властивості кристала ніобату літію, можна припустити, що процес нанесення тонких металевих чи діелектричних шарів на полярні грані буде протікати по-різному а ці шари матимуть різну кристалічну структуру, електричні та оптичні властивості. Для перевірки цього припущення було проведено низку досліджень металевих та діелектричних тонких плівок, нанесених термічним, електронно-променевим та магнетронним методами вакуумного розпилення.

Як видно з рис. 1, плівки, нанесені на позитивно заряджену поверхню кристала ніобату літію, мають іншу структуру поверхні порівняно з аналогічними плівками, нанесеними на негативно заряджену поверхню. Це можна пояснити впливом позитивно зарядженої поверхні кристала на процес формування плівки. Потік парів матеріалу, що прямує до підкладки, складається не тільки з нейтральних атомів, але й з іонів, які в основному є позитивно заряджені, тому процес зародкоутворення плівки на позитивно зарядженій поверхні проходить складніше, оскільки участь у ньому можуть брати тільки нейтральні атоми чи молекули й невелика частка негативно заряджених іонів матеріалу. Відповідно, структура такої плівки неоднорідніша, з великою кількістю окремих кластерів, які в процесі росту плівки збільшуються в розмірах і заповнюють всю поверхню.

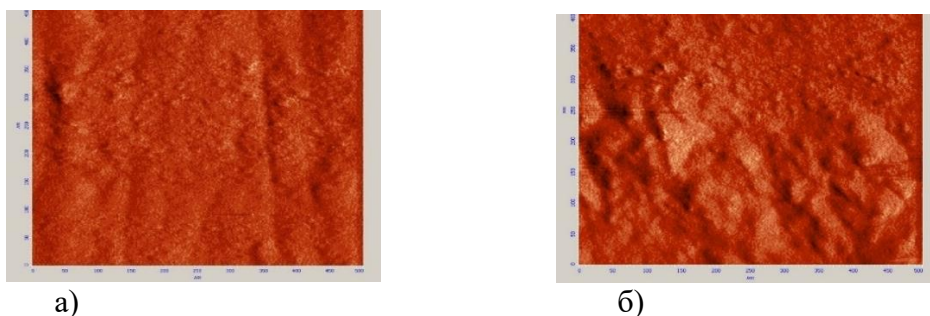


Рис. 1. Покриття  $\text{Sr}$  масовою товщиною 2 нм, нанесене методом термічного випаровування у вакуумі на негативно (а) та позитивно (б) заряджену поверхню кристалу  $\text{LiNbO}_3$ . Зображення площадки розм.  $500 \times 500$  нм одержано за допомогою атомно-силового мікроскопа SolverP4.



Плівка хрому в системі Cr-Cu напильється безпосередньо на грань кристала  $\text{LiNbO}_3$  та призначена перш за все для підвищення адгезії всієї системи покриття до її поверхні. Товщина плівки хрому, яка коливається в межах 2÷50 нм залежно від функціональних потреб покриття, значно менша, ніж мідної, і в той же час плівка хрому має бути максимально однорідною. Початок процесу росту плівки на поверхні кристала визначається енергетичним бар'єром зародкоутворення, тобто необхідністю формування критичного зародка з високою позитивною вільною енергією, що забезпечить його подальший ріст і – як кінцевий варіант – утворення суцільного покриття. Наявність електростатичних зарядів на поверхні підкладки призводить до зміни енергії зародкоутворення, що впливає в кінцевому рахунку на якість тонкоплівкового покриття.

Додатковим підтвердженням відмінностей у кристалічній структурі плівок хрому, нанесених на полярні грані кристала ніобату літію, можуть слугувати спектри пропускання цих плівок в діапазоні довжин хвиль 300-2500 нм (рис. 2).

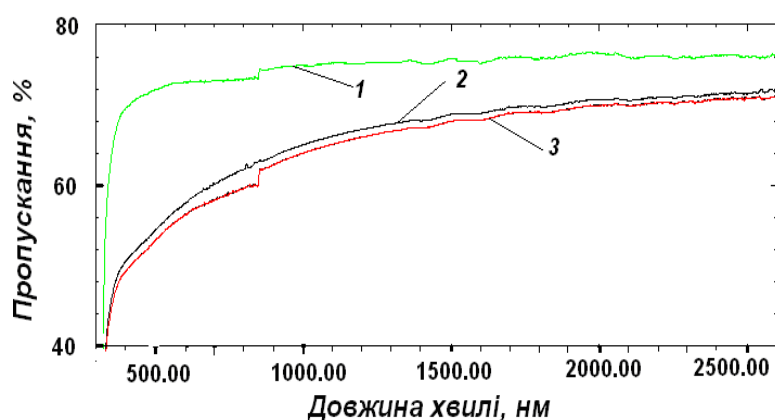


Рис. 2. Спектри оптичного пропускання пластины ніобату літію  $\text{LiNbO}_3$  (1), а також плівки хрому масовою товщиною 2 нм, нанесеною на позитивно (2) та негативно заряджену (3) грані пластин.

На рис. 2 видно чітку, хоч і незначну різницю пропускання плівок хрому залежно від знака заряду поверхні, на яку проводилося напильвання. Зменшення величини пропускання плівки хрому, нанесеної на негативно заряджену грань кристала  $\text{LiNbO}_3$ , свідчить про її щільнішу та одноріднішу поверхню. Це може бути пов'язане з більш щільною компоновкою критичних зародків (острівців) на цій грані в порівнянні з такою ж плівкою, нанесеною на позитивно заряджену поверхню. Слід зазначити, що нанесення обох плівок проводилося в одному технологічному циклі напильвання в абсолютно однакових умовах.

Розглянуто також залежність структурних змін у процесі конденсації тонких плівок на полярні грані від методів розпилення. У процесі осадження плівок у вакуумі в потоці пари, яка конденсується на поверхні підкладки, незалежно від методу напильвання завжди більшою чи меншою мірою присутні різні компоненти. У випадку конденсації хрому в потоці пари присутні іони  $\text{Cr}^+$ , а також його сполуки  $\text{CrO}^+$ ,  $\text{CrN}^+$ . При попаданні на негативно заряджену грань кристалу  $\text{LiNbO}_3$  позитивно заряджені іони щільно закріплюються на її поверхні, стаючи множинними центрами зародкоутворення (рис. 3,а), на відміну від позитивно зарядженої грані, де центри зародкоутворення мають локальний характер. Це пов'язано в першу чергу з процесом відштовхування позитивно заряджених іонів матеріалу, що напильється на позитивно заряджену підкладку. Іони, поряд з атомами напильованого матеріалу, завжди присутні в осаджуваному потоці тією чи іншою мірою. В даному випадку вони практично виключаються з процесу зародкоутворення, а крім того перешкоджають потраплянню атомів розпилюваного матеріалу на поверхню підкладки. В результаті такої взаємодії відбувається суттєве збільшення критичного розміру зародкоутворення та зменшення кількості зародків на одиницю площі. Це продемонстровано

на схематичному зображенні осадження плівки хрому на позитивно заряджену сторону підкладки  $\text{LiNbO}_3$  (рис.3б).

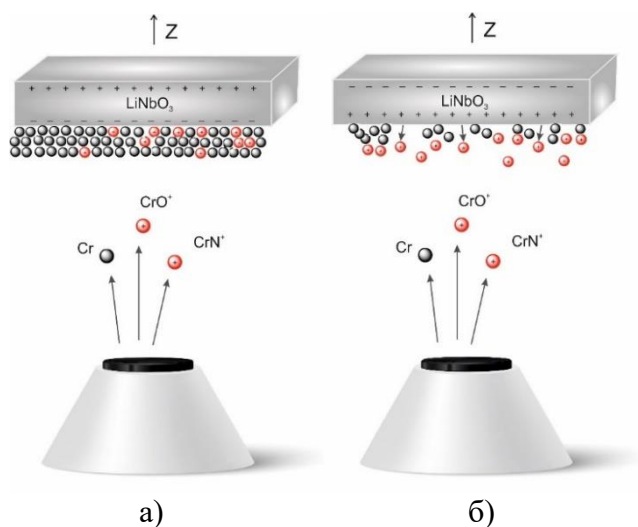


Рис. 3 Схематичне зображення процесу конденсації  $\text{Cr}$  на негативно (а) та позитивно (б) заряджені поверхні кристала ніобату літію.

В результаті на негативно зарядженій поверхні  $\text{LiNbO}_3$  однорідна плівка хрому без видимих острівців утворюється вже при товщині 2 нм (рис. 4). У порівнянні з термічним методом, при магнетронному розпиленні концентрація іонів у потоці матеріалу значно зростає через специфіку методу, який передбачає бомбардування іонами аргону  $\text{Ar}^+$  хромової мішені, що перебуває в зоні впливу електричних та магнітних полів. За допомогою цього методу розпилення вдалося добитися відносної однорідності плівок хрому, що наносились як на негативно, так і на позитивно заряджені грані кристала  $\text{LiNbO}_3$ , навіть при товщині шару в 2 нм (Рис. 4), хоча відмінність у структурі все ж присутня.

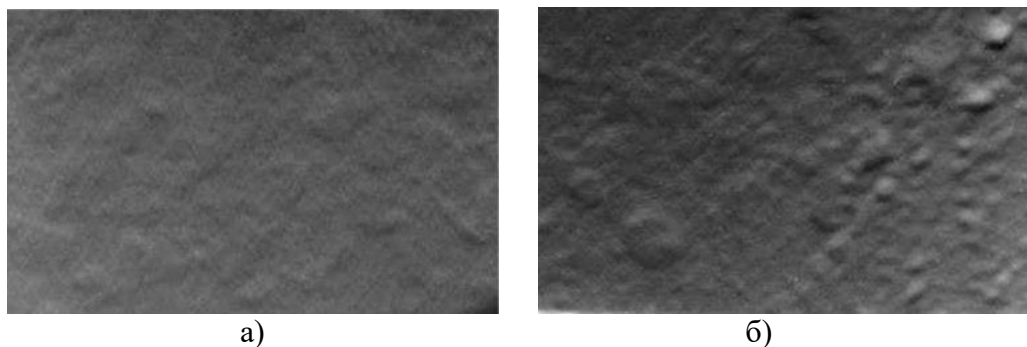


Рис. 4. Зображення плівок хрому масовою товщиною 2 нм, осаджених магнетронним методом у вакуумі на негативно (а) та позитивно (б) заряджену поверхню кристала ніобату літію. Зображення одержано за допомогою електронного мікроскопа Akashi DS130C, x5000 крат).

При електронно-променевому напилюванні сфокусований магнітним полем пучок електронів, який розганяється прискорюючою напругою, починає бомбардувати напилюваний матеріал, передаючи свою кінетичну енергію матеріалу і тим самим розігрівуючи його до температури випаровування. При бомбардуванні електронами є висока вірогідність випаровування, крім нейтральних атомів, ще й іонізованих часток матеріалу. Тому, якщо підкладка матиме поверхневий заряд, осадження буде протікати по-різному, залежно від знака заряду. Як правило, переважна більшість іонізованих часток позитивно заряджена, тому за умови позитивно зарядженої підкладки однорідність та

щільність осадженої плівки може бути гіршою, ніж у випадку попадання матеріалу на негативно заряджену поверхню. Менш щільна плівка матиме нижчий показник заломлення в порівнянні з плівкою, напиленою на нейтральну чи негативно заряджену підкладку. В результаті оптичні властивості такої плівки будуть відрізнятися від розрахункових показників. Це наочно продемонстровано на рис. 5, де зображено спектри пропускання плівки  $\text{HfO}_2$ , нанесеної одночасно на позитивно і негативно заряджені поверхні кристала ніобату літію. В діапазоні спектру 300-3000 нм пропускання цієї плівки є вищим, ніж плівки, нанесеної на негативно заряджену поверхню. Це підтверджує тезу про гіршу морфологію такої плівки та нижчий показник заломлення в порівнянні з плівкою нанесеною на негативно заряджену поверхню.

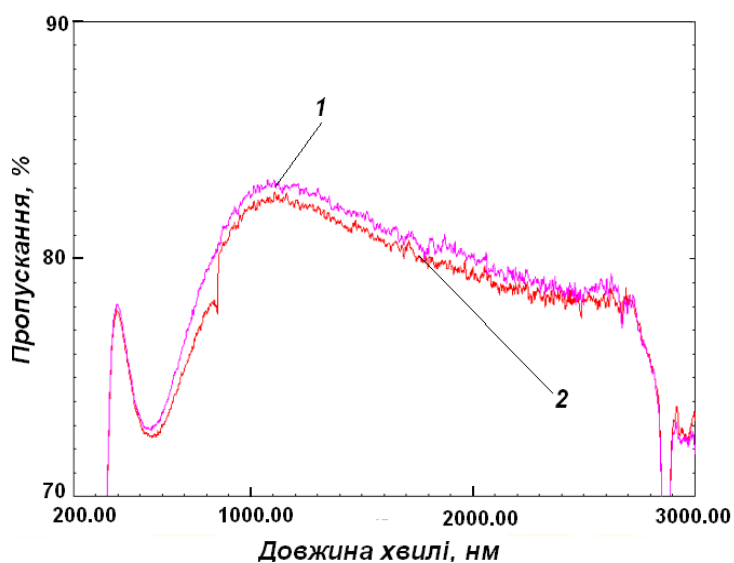


Рис. 5. Спектр оптичного пропускання плівки  $\text{HfO}_2$  масовою товщиною 160 нм, напиленої на позитивно (1) та негативно (2) заряджені поверхні кристала  $\text{LiNbO}_3$ , при температурі  $150^\circ\text{C}$ .

Важливе значення для подолання негативного впливу поверхневого заряду на ріст металевих та діелектричних плівок має так зване іонне асистування. Воно полягає у використанні в процесі напилювання додаткового пучка іонів від так званої іонної гармати, яка за допомогою прискорюючої напруги та фокусуєчих магнітних лінз створює пучок іонів, що прискорюються в напрямку до підкладки. У випадку створення пучка негативно заряджених іонів та електронів вони, досягнувши підкладки, нейтралізують позитивний заряд на її поверхні в процесі напилювання і тим самим зменшують енергію бар'єра зародкоутворення та покращують структуру плівки. Крім того, іонне асистування підвищує щільність напилених плівок завдяки зменшенню проміжків між кластерами та шарами плівки у процесі їх осадження.

**У четвертому розділі** розглянуто особливості поверхневого плазмонного резонансу на поверхнях тонких металевих плівок, нанесених на підкладки з ніобату літію з присутнім поверхневим зарядом.

Тонкі плівки металів на початкових стадіях росту можна розглядати як сукупність наночасток металу і діелектричних проміжків у вигляді нанорозмірних метал-діелектричних композитів із фрактальною структурою, в яких існують локалізовані плазмони. Оптичний відгук під дією світла металевих наночасток, розміри яких є набагато меншими від довжини світлової хвилі, пов'язаний із збудженням плазмонних резонансів. Локалізовані поверхневі плазмони, які виникають завдяки вільним носіям відіграють важливу роль у пристроях сучасної сенсорної електроніки, сонячній енергетиці, матеріалознавстві тощо.

У спектрах поглинання плівок Ag, осаджених на позитивно заряджену поверхню монокристала  $\text{LiNbO}_3$ , спостерігається максимум, який із ростом товщини плівки зміщується від 520 до 610 нм (рис. 6).

Причиною довгохвильового зміщення оптичного поглинання з ростом товщини плівок є збільшення розмірів кластерів, в які об'єднуються наночастки металу, та взаємодія між ними. Асиметричність кривих поглинання металевих плівок різної товщини пов'язана зі збільшенням розмірів острівців, в які об'єднуються наночастки металу в процесі збільшення товщини плівки, та збільшенні її власного поглинання.

На рис. 7 показано спектри оптичного пропускання та поглинання плівок срібла, напилених одночасно на скляну підкладку та негативно і позитивно заряджені поверхні кристала ніобату літію. Спостерігається довгохвильове зміщення максимумів ППР в залежності від знака заряду підкладки  $\text{LiNbO}_3$  (564 нм для позитивно зарядженої підкладки та 587 нм для негативно зарядженої) відносно максимуму ППР на скляній підкладці (532 нм).

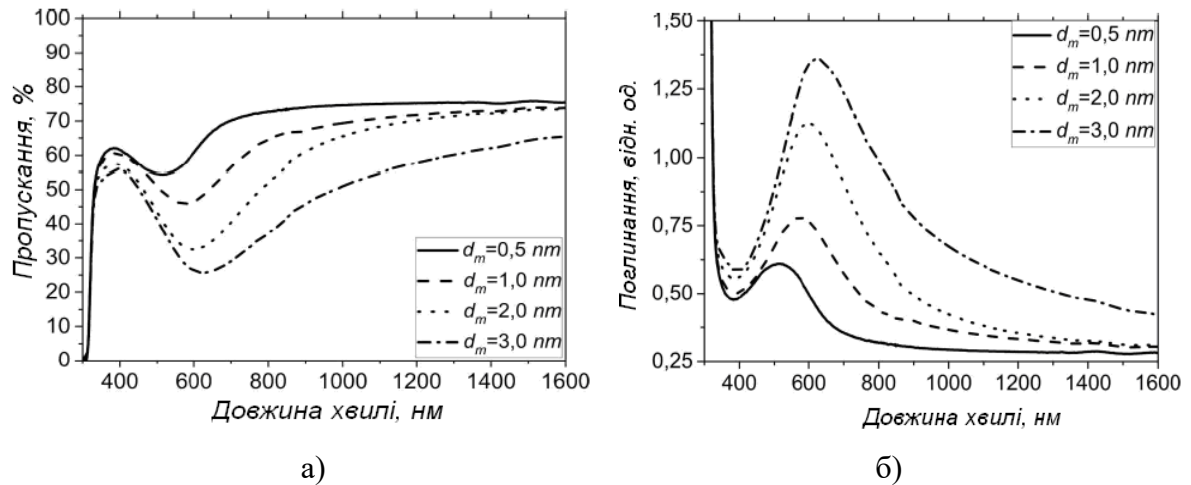


Рис. 6. Спектри пропускання (а) та поглинання (б) плівок срібла різної товщини, осаджених магнетронним методом на позитивно заряджену поверхню кристала  $\text{LiNbO}_3$ .

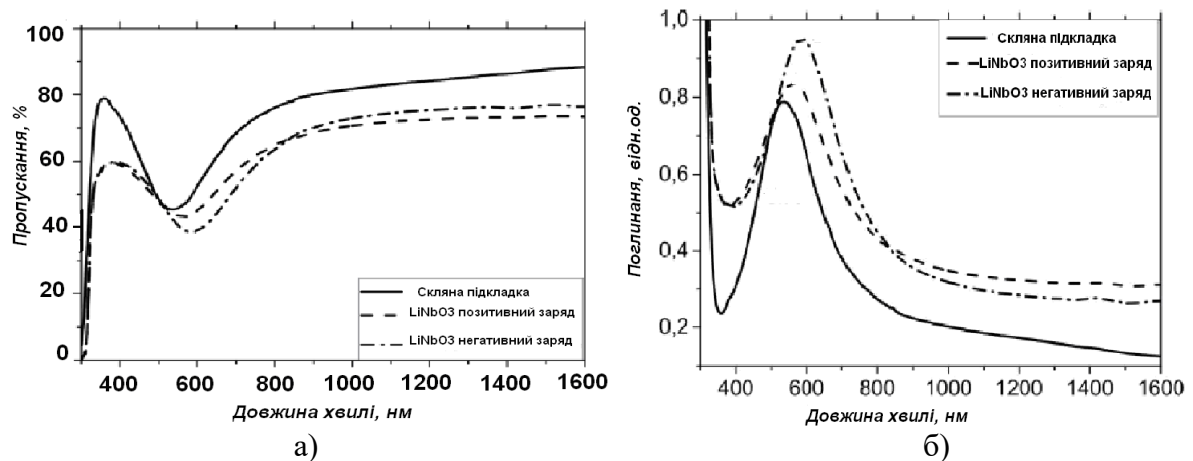


Рис. 7. Спектри пропускання (а) та поглинання (б) плівок срібла ( $10\text{\AA}$ ), осаджених на скляну підкладку, позитивно та негативно заряджену поверхню кристаланіобату літію.

Довгохвильове зміщення максимуму ППР можна пояснити впливом на рух вільних носіїв на поверхні підкладки  $\text{LiNbO}_3$  двох типів полів, а саме: суперпозицією поля світлової хвилі та поля статичного поверхневого заряду. Слід очікувати, що на поверхні скляної підкладки і на поверхні кристала ніобату літію наночастки срібла мають різну форму та різну відстань між собою. З топології поверхнь плівок отриманих методом атомно-силової

мікроскопії (АСМ) (рис. 8) можна розрахувати методом вододілу розподіл наночастинок за еквівалентними радіусами, висотою та відстанню до найближчого сусіда.

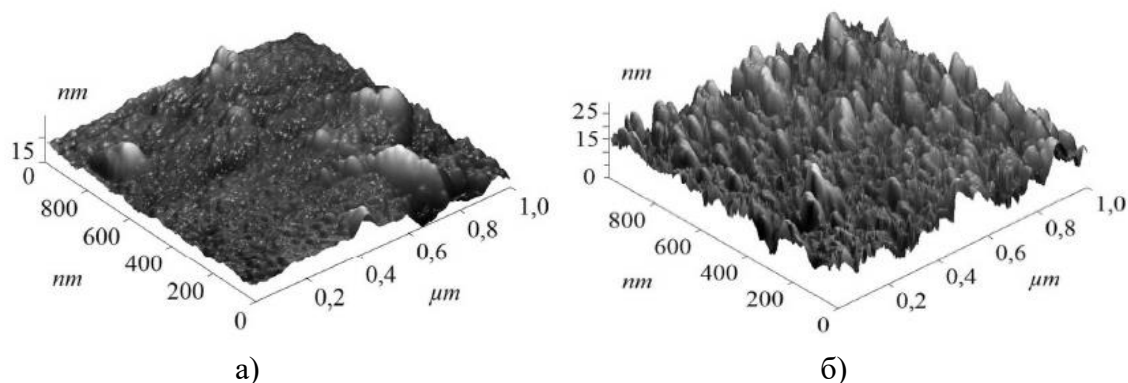


Рис. 8. Профіль поверхні тонкої плівки Ag (1 нм), напильної на позитивно заряджену поверхню кристала  $\text{LiNbO}_3$  (а) і скляну підкладку (б), отриманий методом АСМ.

Оскільки плівки металу напильно як на поверхню скла, так і на полярну поверхню  $\text{LiNbO}_3$  при однакових умовах, можна припустити, що зміна максимумів ППР пов'язана з різною формою металевих часток та відстанню між ними. З аналізу даних розподілу, представлених на Рис. 9, випливає, що плівка срібла масовою товщиною 1 нм складається в основному з наночастинок у вигляді сплюснутих сфероїдів із середнім радіусом 7 нм та висотою близько 1,2 нм. Тоді відношення головних осей визначатиметься як відношення радіуса до висоти  $r/h = a/c = 5,83$ . У таких наночастинок існують повздовжні та поперечні моди, які пов'язані з коливаннями вільних носіїв заряду. Довгохвильове зміщення максимуму смуги ППР можна пояснити відсутністю поперечних мод у сфероїдів срібла на позитивно зарядженій поверхні  $\text{LiNbO}_3$ .

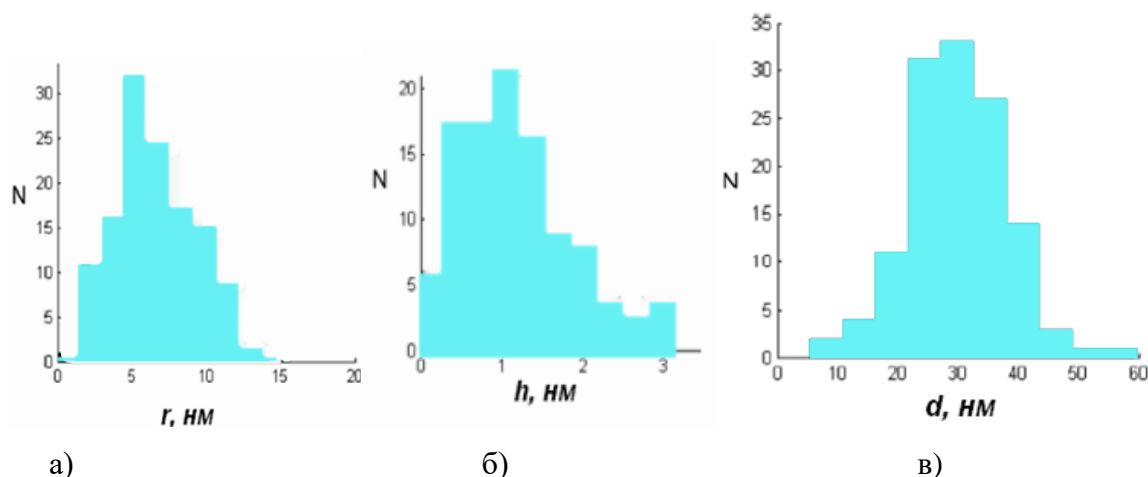


Рис. 9 Гістограми розподілу наночастинок срібла масовою товщиною 1 нм, напильних на позитивно заряджену поверхню  $\text{LiNbO}_3$ , за радіусами (а), висотами (б) та відстанями між ними (в)

Спектральне положення максимуму ППР наночастинок срібла на поверхні кристала  $\text{LiNbO}_3$  зміщується – залежно від знака поверхневого заряду: 587 нм для негативно зарядженої поверхні та 564 нм для позитивно зарядженої – в порівнянні з плівкою срібла, нанесеною на скляну електрично нейтральну поверхню. Різницю  $\Delta\lambda=23$  нм можна пояснити зміною концентрації вільних носіїв заряду на полярних гранях кристала. Оскільки, з певних причин, на позитивно зарядженій поверхні  $\text{LiNbO}_3$  щільність наночастинок срібла є нижчою, ніж на негативно зарядженій, то, відповідно, і концентрація вільних носіїв на одиницю площі буде меншою. Розраховано, що при зміщенні максимуму смуги ППР на 23 нм



концентрація вільних носіїв срібла на позитивно зарядженій поверхні  $\text{LiNbO}_3$  становитиме 0,93 від концентрації вільних носіїв на поверхні з негативним зарядом. Додатковим фактором є вплив заряду поверхні на зміну концентрації вільних носіїв, які беруть участь у плазмонному резонансі. Електричне поле від'ємних зарядів взаємодіє з вільними носіями наночасток срібла, виштовхуючи їх на поверхню. Внаслідок цього в такому випадку на вільні носії, поряд із полем світлової хвилі, буде діяти постійне поле статичного заряду. Результуюче поле спричинятиме зміщення під певним кутом до  $a$ - осі сфероїда, що призведе до зменшення числа носіїв, які дають внесок у поздовжню плазмонну моду сфероїдів. У випадку позитивно зарядженої поверхні поле  $E^+$  статичного заряду притягуватиме вільні носії, спрямовуючи їх до границі розділу плівка – підкладка й нівелюючи тим самим їхню участь у поверхневому плазмонному резонансі.

У п'ятому розділі розглянуто прикладні аспекти використання тонких металевих та діелектричних плівок, нанесених на полярні грані активних елементів із монокристала ніобату літію  $\text{LiNbO}_3$ , у пристроях акусто-, електрооптики та піроелектричних приймачів лазерного випромінювання.

Виготовлення активних елементів оптоелектроніки передбачає, що до кристалів ніобату літію за посередництвом металізованих контактів має прикладатись електрична напруга, за допомогою якої можна керувати світловим потоком, який проходить крізь акустооптичний або електрооптичний елемент. Крім того, завдяки п'єзоелектричним властивостям кристала, створюючи певну топологію на поверхні кристала, можна виготовляти лінії затримки радіосигналів або фільтри радіочастот.

У зв'язку з цим процес створення активних елементів на основі кристалів ніобату літію ( $\text{LiNbO}_3$ ) містить технологічні операції нанесення металевих плівок на поверхні цих кристалів. Для акустооптичних пристроїв на стоячій акустичній хвилі або електрооптичних пристроїв нанесені контакти можуть бути суцільними (рис. 10а); у випадку створення акустооптичних пристроїв на біжній акустичній хвилі чи акустоелектронних або піроелектричних пристроїв контакти мають топологічний малюнок (рис. 10,б, 16,б), який створюється за допомогою масок чи фотолітографії.

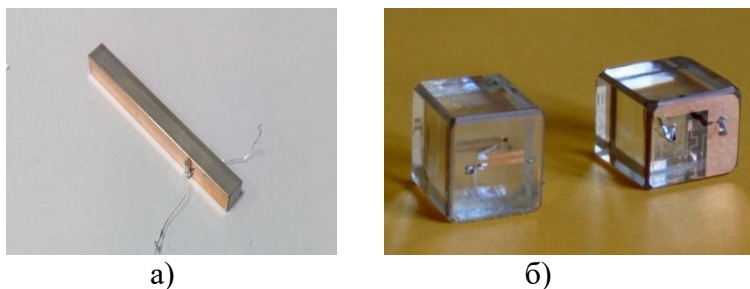


Рис. 10 Активні елементи акустооптичного модулятора (АОМ) на стоячій акустичній хвилі (а) та на біжній акустичній хвилі (б) на основі монокристалів  $\text{LiNbO}_3$ .

Виготовлені активні елементи акустооптичної комірки на стоячих акустичних хвилях мають розміри  $3 \times 4 \times 24$  мм вздовж кристалографічних осей X, Y, Z відповідно. На поліровані грані у площині YZ напилено плівки Cr-Cu або Cr-Ag, які служили електродами. Для створення високої добротності акустооптичних резонаторів паралельність граней у площині YZ витримувалася з точністю  $\leq 10''$ . Паралельність граней активного елемента, на які падає світловий потік, у площині XY витримувалася також із точністю  $\leq 10''$ .

На грані XY наносилися просвітлюючі покриття для довжин хвиль лазерного випромінювання  $\lambda = 0,63$  мкм та  $\lambda = 1,06$  мкм. До напилених електродів припаювалися контакти. Оскільки акустична комірка монтується в корпусі, було розроблено креслення корпусу АОМ. Згідно з цим кресленням виготовлено корпус із вмонтованою платою схеми узгодження, представлений на рис. 11.

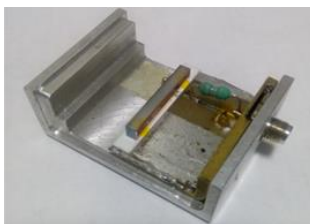


Рис. 11 Активний елемент модулятора на основі монокристалу  $\text{LiNbO}_3$  зі збудженням стоячої хвилі завдяки власному п'єзоэффекту зі схемою узгодження в корпусі.

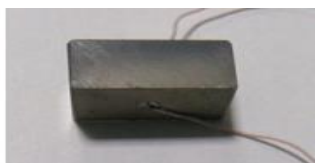
Для створення контактів на поверхнях кристалів ніобату літію була застосована конструкція із двох послідовно нанесених плівок металів – підшару хрому і власне контактної плівки міді. Для нанесення металевих провідних плівок використовувалася комбінована установка термічного та магнетронного напилювання фірми «Torr International» (США). Виконані експерименти дозволили встановити, що оптимальна товщина шару хрому, напилюваного безпосередньо на очищену поверхню елемента з монокристала ніобату літію, становить 15 нм, а товщина шару міді, що наноситься після шару хрому, має становити близько 250 нм. Контроль товщини напилюваних плівок здійснювався за допомогою кварцового датчика типу SQC-330. Для створення певної топології електродів на поверхні кристала ніобату літію застосовувався метод фотолітографії. Процес розпочинається з ретельного очищення поверхні кристала з напиленою плівкою Cu-Cr та подальшого скрупульозного огляду поверхні плівки під мікроскопом типу МБС-9 для виявлення можливих її ушкоджень.

Якщо плівка неушкоджена, то на зразок кристала з металевим покриттям типу Cu-Cr наноситься методом центрифугування фільтрований фоторезист ФП-РН-7С з подальшим проведенням циклу фотолітографії та хімічного травлення.

Технологічний процес виготовлення електрооптичних затворів (ЕОЗ) на основі монокристалів  $\text{LiNbO}_3$  складається з ряду етапів, а саме:

- Виготовлення заготовок оптичних елементів електрооптичних комірок.
- Відпал заготовок в атмосфері водню.
- Механічна обробка (шліфування та полірування) робочих граней заготовок, а також прецизійне полірування оптичних поверхонь активного елемента, перпендикулярних осі Z, із високим ступенем площинності, плоскопаралельності та чистоти поверхні.
- Напилювання металевих провідних покриттів.
- Напилювання просвітлюючих покриттів.
- Розробка корпусу ЕОЗ та його виготовлення.
- Монтаж активного елемента ЕОЗ в корпус.
- Визначення статичної та динамічної півхвильової напруги.
- Розроблення принципової схеми блоку керування (драйвера).
- Розроблення та виготовлення блоку керування ЕОЗ.
- Дослідження технічних характеристик ЕОЗ.

Активні елементи електрооптичних затворів було виготовлено двох типів. Один із них – паралелепіпед, видовжений по оптичній осі Z (Рис. 12,а), а інший має робочі грані, нахилені до напрямку оптичної осі під кутом Брюстера (Рис. 12,б).



а)



б)

Рис. 12. Два типи елементів електрооптичних затворів із монокристалів  $\text{LiNbO}_3$ :

(а) – активний елемент прямокутної форми; (б) – активний елемент з оптичними гранями, виготовленими під кутом Брюстера.

Вхідна лінійна апертура затворів становила 5-9 мм, а довжину підбирали такою, щоб статична півхвильова напруга для довжини хвилі променя 1064 нм не перевищувала 3,2 кВ.

На робочі грані, перпендикулярні осі X, методом вакуумного напилювання наносилися металеві покриття Cr-Cu або Cr-Ag, які служать електродами. Грані, що перпендикулярні оптичній осі Z, виконувалися з високим ступенем точності, а саме: непаралельність площин становила  $\leq 10''$ , площинність – не гірше  $\lambda/8$ . На ці грані методом вакуумного напилювання наносилися просвітлюючі покриття на довжину хвилі  $\lambda = 1064$  нм. Як активний елемент електрооптичного модулятора використано монокристал ніобату літію. Променева стійкість активних елементів з монокристалів  $\text{LiNbO}_3$  для імпульсів лазерного випромінювання тривалістю 20 нс складала не менше  $0,3 \text{ ГВт/см}^2$ . При енергії випромінювання 0,1 Дж та тривалості імпульсу 10 нс може бути досягнута густина потужності, що майже на порядок менша від порогової, а тому електрооптичний затвор такого типу знаходить практичне застосування, зокрема, в дальнометрії. Активний елемент монтується в корпус, який був виготовлений згідно розробленої нами конструкції. Конструкція електрооптичного затвора складається з корпусу, де розміщений електрооптичний активний елемент, який за допомогою пайки монтується на базову поверхню латунної основи. По краях корпусу, зі сторони круглих вікон з плавленого кварцу, крізь які проходить оптичний промінь, встановлюються також поляризаційні елементи, які відповідним чином юстуються відносно електрооптичного елемента. Для захисту оптичних елементів зверху передбачена кришка, яка кріпиться на чотирьох гвинтах. На кришці розміщені два електричні виводи, через які на активний елемент подається напруга. Електрична міцність ізоляції при виборі відповідних матеріалів дозволяє подавати на кристал активного елемента напругу в межах 10 кВ. Електрична ємність забезпечується діелектричними властивостями кристала ніобату літію та параметрами електродів. При вибраних параметрах конструкції ЕОЗ ємність не перевищує 50 Пф. На Рис. 14 представлено загальний вигляд електрооптичного затвора.

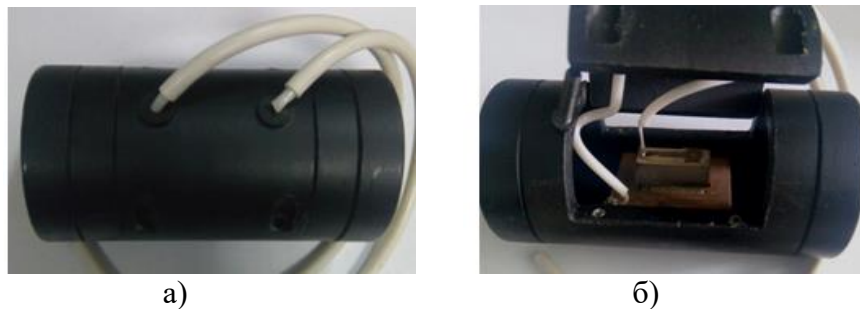


Рис. 14. Загальний вигляд електрооптичного затвора (а); з активним елементом із монокристала  $\text{LiNbO}_3$  прямокутної форми (б).

Променева стійкість ніобату літію дозволяє забезпечити роботу ЕОЗ з енергією не менше 0,1 Дж при частоті слідування імпульсів не менше 5 Гц.

Найпростіший і найпоширеніший метод обробки сигналів – проста їх затримка. Лінії затримки є пасивними лінійними пристроями, функціональне призначення яких – затримка електричних сигналів у часі з мінімальним спотворенням їхніх форм. Лінії затримки використовують там, де необхідно мати час затримки від декількох десятих мікросекунд до значень понад 10 мкс. В акустичних лініях затримки (АЛЗ) сигналів вона досягається шляхом поширення у пружних середовищах акустичних сигналів, у які перетворюються вхідні електричні сигнали. На виході такої лінії затримки відбувається зворотне перетворення акустичних сигналів в електричні. Відповідно до цього час затримки ( $t_z$ ) сигналів у такій лінії затримки визначається довжиною шляху пройденого акустичною



хвилею між вхідним випромінюючим і вихідним приймаючим перетворювачами, а також швидкістю поширення акустичної хвилі:

$$t_3 = S/V,$$

де  $t_3$  – час затримки,  $S$  – довжина шляху,  $V$  – швидкість акустичної хвилі.

У порівнянні з електричними затримуючими колами (коаксіальними кабелями, хвилеводами, лініями затримки на LC-елементах) при однаковій інформаційній ємкості акустичні пристрої мають значно менші габарити. А оскільки поверхневі акустичні хвилі (ПАХ) є найповільнішими пружними хвилями, можна одержувати великі часи затримки при відносно найменших розмірах пристроїв. У найпростішому випадку лінія затримки на поверхневих акустичних хвилях із постійним часом затримки сигналів – це звукопровід із п'єзоелектричного матеріалу, на робочій поверхні якого розміщено ідентичні багатоелементні еквідистантні зустрічно-штиркові перетворювачі, що служать для збудження і приймання акустичних поверхневих хвиль. Відстань між перетворювачами визначає величину часу затримки.

Розрізняють акустичні лінії затримки (АЛЗ) з одним і двома перетворювачами (Рис. 15).

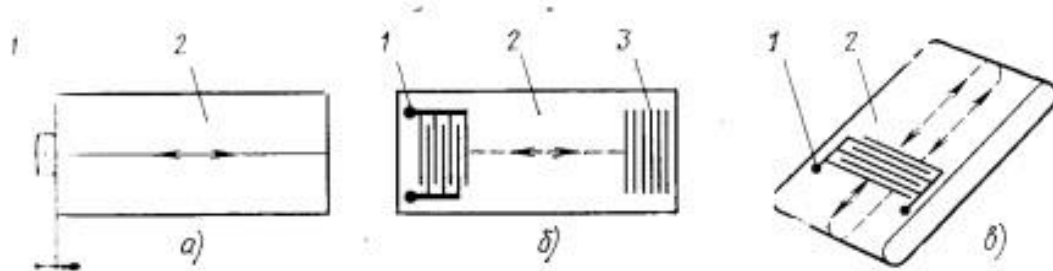


Рис. 15. Акустична лінія затримки з одним перетворювачем: (а) на об'ємних хвилях; (б) на поверхневих акустичних хвилях (ПАХ); (в) циклічна на ПАХ. 1 – зустрічно-штиркові перетворювачі, 2 – підкладка з монокристалу  $\text{LiNbO}_3$ , 3 – бар'єр для відбитого сигналу.

У першому випадку один і той перетворювач послідовно перетворює електричний сигнал в акустичний, який поширюється по звукопроводу, а потім приймає відбитий сигнал, що затриманий у часі, та перетворює його у вихідний електричний сигнал. В АЛЗ з одним перетворювачем на одних і тих самих вхідних клеммах перетворювача існують розділені в часі вхідний і вихідний електричні сигнали. Ці сигнали, в міру величини втрат, розрізняються по амплітуді. При цьому вихідних електричних сигналів може бути декілька, якщо акустичний сигнал до повного загасання декілька разів пройшов по звукопроводу. Така властивість не дозволяє використовувати АЛЗ з одним перетворювачем у радіоелектронних системах із широким динамічним діапазоном зміни вхідних сигналів. В основному ці АЛЗ застосовують у калібраторах різного призначення, включно з калібраторами дальності радіолокаційних станцій і висотомірів. Значно більшу величину динамічного діапазону мають АЛЗ з двома роздільними випромінюючими і приймаючими перетворювачами.

Робота піроелектричних детекторів ґрунтується на виникненні електричних сигналів, зумовлених зміною температури чутливого елемента. Чутливість таких датчиків практично не залежить від довжини хвилі випромінювання, і вони можуть працювати в широкому спектральному діапазоні – від сантиметрових хвиль до рентгенівських і навіть  $\gamma$ -променів. На відміну від напівпровідникових приймачів, піроелектричні детектори мають низький рівень шумів і порівняно високу чутливість при кімнатній температурі. При роботі в далекому інфрачервоному діапазоні вони не потребують спеціального охолодження. Піроелектричні детектори характеризуються високою стійкістю до механічних, кліматичних і радіаційних впливів, проявляють високу стійкість до лазерного випромінювання. Вони нечутливі до постійного теплового випромінювання, а реагують лише на змінну складову випромінювання. Частота модуляції випромінювання може

змінюватись від декількох Гц до приблизно 10 МГц. Такі детектори можуть вимірювати параметри потужних лазерних імпульсів тривалістю  $10^{-5} \div 10^{-11}$  с і потужністю від  $10^{-9}$  до  $10^9$  Вт. Особливо широке застосування піроелектричні детектори мають в інфрачервоному діапазоні  $3 \div 5$  мкм і  $8 \div 14$  мкм, де містяться вікна прозорості атмосфери.

Завдяки своїм технічним характеристикам піроелектричні приймачі знаходять широке застосування для вимірювання енергетичних параметрів лазерного випромінювання. На базі піроелектричного чутливого елемента нами створено ряд компактних приладів для вимірювання потужності та енергії лазерного випромінювання.

У Табл. 1 наведені основні характеристики піроелектричних приймачів лазерного випромінювання.

Таблиця 1. Основні характеристики піроелектричних приймачів лазерного випромінювання

Параметр	Значення
Поглинач енергії	Покриття Cr-SiO
Спектральний діапазон, мкм	0,2 ÷ 12
Динамічний діапазон, Вт	0,001 ÷ 100
Частота модуляції чи слідування імпульсів, Гц	0,2 ÷ 20 000
Тривалість імпульсів, мс	$5 \cdot 10^{-9} \div 50$
Похибка вимірювання, %	$\pm (5 \div 15)$

Для створення активних елементів піроелектричних сенсорів (Рис. 16) на підкладку з монокристала ніобату літію розміром  $5 \times 10 \times 0,03$  мм методом вакуумного напилювання з однієї сторони, яка має негативний потенціал, наноситься шар Ni, а з іншої – напівпоглинаючого покриття Cr-SiO у вигляді восьми сегментів, до яких додатково напилюються мідні контакти (Рис. 16,б). Вся конструкція кріпиться на керамічній платі з розведеними провідними доріжками.

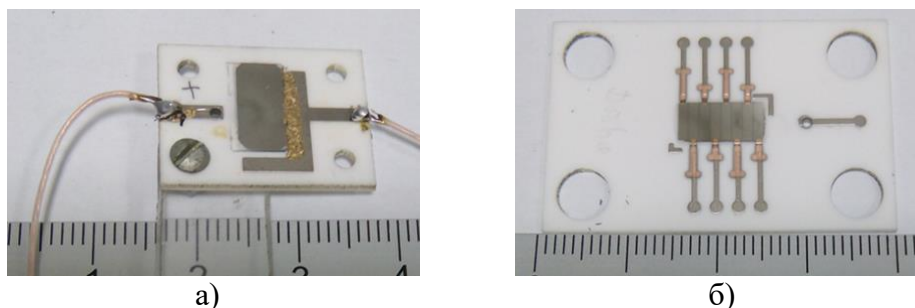


Рис. 16. Змонтовані елементи піроелектричних сенсорів на керамічних платах із нанесеними контактами: (а) односекційний модуль; (б) восьмисекційний модуль.

Виготовлення активних елементів акустoeлектронних та електрооптичних модуляторів лазерного випромінювання передбачає, з метою зменшення втрат, нанесення на грані активного елемента з кристала ніобату літію  $\text{LiNbO}_3$ , крізь які проходить лазерний промінь, просвітлюючих діелектричних покриттів. Нанесення відбувається вакуумним напилюванням – як правило, електронно-променевим методом. Для цієї цілі застосовують тонкі плівки оксидів металів і напівпровідників, а саме:  $\text{HfO}_2$ ,  $\text{TiO}_2$ ,  $\text{ZrO}_2$ ,  $\text{SiO}_2$  та деяких фторидів. Задля одержання ефективних покриттів із високим ступенем просвітлення використовують багат шарові покриття з високим і низьким показниками заломлення, нанесені почергово. Однак ці покриття наносяться на грані кристала  $\text{LiNbO}_3$ , які мають некомпенсований статичний заряд, тож вони відрізнятимуться між собою якістю й, відповідно, показником заломлення та величиною пропускання. Тому важливим є навіть розміщення активних елементів у пристрої, з точки зору черговості проходження лазерного променя крізь грані кристала  $\text{LiNbO}_3$ , з якого виготовляють ці елементи.

Оскільки просвітлюючі покриття на негативно зарядженій поверхні кристалу є якіснішими, ніж на позитивно зарядженій, доцільно розміщати активний елемент у пристрої таким чином, щоб лазерний промінь проходив крізь нього спочатку через негативно заряджену поверхню, а виходив через позитивно заряджену. У цьому випадку якініше (а відповідно, і більш стійке) просвітлююче покриття на негативно зарядженій поверхні зустрінатиме лазерний промінь, а на виході з кристала частково ослаблений промінь буде покидати кристал через позитивно заряджену просвітлену поверхню. Таке розміщення активних елементів у пристроях дозволяє покращити їхню стабільність та довговічність у процесі використання.

### ОСНОВНІ РЕЗУЛЬТАТИ ТА ВИСНОВКИ

У дисертації вперше вирішено науково-технічне завдання створення технологічних основ формування функціональних металевих та діелектричних тонких плівок методами вакуумного осадження на полярних гранях кристалів  $\text{LiNbO}_3$  як активних елементів приладів акусто- та оптоелектроніки, електрооптичних модуляторів та ширококутових піроприймачів.

До найважливіших результатів роботи належать такі:

1. Досліджено вплив різнойменного статичного заряду поверхонь кристала ніобату літію на морфологію тонких металевих та діелектричних плівок, нанесених на ці поверхні. Встановлено, що величина і знак поверхневого заряду мають суттєвий вплив на структуру цих плівок і, відповідно, їхні електрофізичні, оптичні та механічні властивості, а саме: плівки, нанесені на позитивно заряджену поверхню, відзначаються гіршою адгезією, щільністю та однорідністю в порівнянні з плівками, нанесеними на негативно заряджену поверхню.
2. Встановлено, що металеві і діелектричні плівки, нанесені в одному технологічному циклі, на негативно та позитивно заряджені поверхні  $\text{LiNbO}_3$  мають різницю пропускання в середньому 2 % при товщині металевих плівок 2-3 нм, та діелектричних плівок 150-160 нм в інтервалі довжин хвиль 500-2500 нм.
3. Встановлено, що структура металевих та діелектричних плівок, одержаних на полярних поверхнях монокристала ніобату літію, суттєво залежить від методів осадження, особливостей поверхні підкладки та температури і швидкості осадження. На основі аналізу різних методів вакуумного осадження металевих та діелектричних плівок показано, що якіснішими є плівки, одержані методом магнетронного розпилення у вакуумі.
4. Проведено розрахунок розподілу наночасток срібла, осаджених термічним напиленням на позитивно заряджену поверхню  $\text{LiNbO}_3$ , за радіусами, висотами та відстанями між ними. Встановлено, що плівка срібла товщиною 10 Å складається в основному з наночасток у вигляді сплюснутих сфероїдів із середнім радіусом 7 нм та висотою близько 1,2 нм.
5. Визначено величину зміщення максимуму поглинання ППР у тонких плівках металів на полярних гранях кристала ніобату літію залежно від товщини плівки та знака поверхневого електричного заряду. Показано, що в спектрах поглинання плівок Ag, нанесених на позитивно заряджену поверхню монокристала  $\text{LiNbO}_3$ , спостерігається максимум, який зміщується від 520 нм до 610 нм із ростом товщини осадженої плівки від 0,5 нм до 3,0 нм.
6. Встановлено, що максимум поглинання ППР у плівках Ag, осаджених на електрично нейтральній скляній підкладці, відповідає 532 нм, тоді як максимум поглинання ППР у плівках Ag, осаджених на позитивно зарядженій підкладці кристала ніобату літію, відповідає 564 нм, а на негативно зарядженій підкладці – 587 нм. Довгохвильове зміщення максимуму смуги ППР у тонких плівках срібла на 23 нм зумовлене відносним

збільшенням концентрації вільних носіїв на негативно зарядженій поверхні підкладки з кристалів ніобату літію на 8 %.

7. На основі проведених досліджень особливостей використання тонких металевих та діелектричних плівок, нанесених на полярні грані активних елементів із монокристалів ніобату літію, запропоновано конструктивно-технологічні рішення щодо виготовлення активних елементів для акустооптичного модулятора на стоячій акустичній хвилі, електрооптичного затвора, акустичних ліній затримки та піроприймачів.

### ОСНОВНІ ПУБЛІКАЦІЇ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ

Статті у наукових періодичних виданнях інших держав, що індексуються в наукометричних базах даних Scopus

1. **V. Haiduchok**, M. Vakiv, I.V. Kityk, D.Yu. Sugak, G. Lakshminarayana. Formation of nano-size Cr layers on LiNbO<sub>3</sub> crystal surfaces by dissimilar electric charges. *Optik*. – 2019. – V. 180. – P. 91-95. <https://doi.org/10.1016/j.ijleo.2018.11.088> (Q2, Scopus).
2. M. Kushlyk, V. Tsiumra, Y. Zhydachevskyy, **V. Haiduchok**, I.I. Syvorotka, D. Sugak, A. Peniażek, M. Aleszkiewicz, A. Suchocki. Preparation and properties of Ag plasmonic structures on garnet substrates. *Applied Nanoscience* – 2021 – №12. – P.317-334. DOI: 10.1007/s13204-020-01624-3 (Q2, Scopus).
3. I. Bolesta, M. Vakiv, **V. Haiduchok**, O. Kushnir, A. Demchuk, S. Nastyshyn, R. Gamernyk. Optical Properties of LiNbO<sub>3</sub>-Ag Nanocomposites. *Acta Physica Polonica* – 2018. – V. 133. № 4 – P. 860-863. <http://doi.org/10.12693/APhysPolA.133.860> (Q3, Scopus).
4. U.V. Yakhnevych, G. Suchaneck, A. Eydam, D.Yu. Sugak, I.I. Syvorotka, **V.G. Haiduchok**, O.A. Buryy, S.B. Ubizskii, G. Gerlach. Investigation of optical and pyroelectric properties of lithium niobate single crystals caused by metal ions diffusion. *Journal of Nano- and Electronic Physics* – 2019, Vol. 11. №1-P.01017-1-5. <http://essuir.sumdu.edu.ua/handle/123456789/72581> (Q3, Scopus).
5. G. Suchaneck, U. V. Yakhnevych, A. Eydam, D. Yu. Sugak, I.I. Syvorotka, **V.G. Haiduchok**, S. B. Ubizskii, G. Gerlach. Depth profiling of dopant concentration and pyroelectric properties of LiNbO<sub>3</sub> single crystals treated at high-temperature in the presence of metal. *Ferroelectrics* – 2019. – Vol. 539 – P. 151–157. <http://dx.doi.org/10.1080/00150193.2019.1570003> (Q3, Scopus).
6. A.B. Danylov, H.A. Pchuk, R.Yu. Petrus, **V.G. Haiduchok**. Influence of annealing on the structure of ultrathin gold films on the surface of glass and CdS substrates. *Journal of Nano and Electronic Physics* – 2018. – V. 10 N. 1 – P.05011 – 1-6. [https://doi.org/10.21272/jnep.10\(5\).0501](https://doi.org/10.21272/jnep.10(5).0501) (Q3, Scopus).

### Статті у наукових фахових виданнях України

7. І.М. Болеста, М.М. Ваків, **В.Г. Гайдучок**, І.І. Колич, О.О. Кушнір, І.М. Ровецький, Ю.М. Фургала. Плазмонне поглинання наночастинок срібла на поверхні LiNbO<sub>3</sub> – Український Фізичний Журнал – 2017 – Т.62 – №1 – С. 39 – 45. [http://nbuv.gov.ua/UJRN/UPhJ\\_2017\\_62\\_1\\_7](http://nbuv.gov.ua/UJRN/UPhJ_2017_62_1_7) (Категорія А).
8. Д.М. Винник, Д.Ю. Сугак, Н.Я. Генега, **В.Г. Гайдучок**, А.С. Андрущак, М.М. Ваків. Узгодження акустооптичної НВЧ комірки Брегга у широкій смузі робочих частот – Вісник Національного університету “Львівська політехніка” Серія „Електроніка” – 2011. – № 708. – С. 195-200. <http://lp.edu.ua/index.php?id=3073> (Категорія Б).

### Патент на винахід

9. **В.Г. Гайдучок**, Б.М. Копко, Р.М. Кузьмак, Д.Ю. Сугак, В.П. Маслов, А.В. Самойлов, Н.В. Качур. Спосіб нанесення багат шарового інтерференційного покриття на оптичні елементи. Патент на винахід № 111931. С23С 14/08, С23С 14/35, G02В 1/10, G02В 5/28. Україна. Опубл. 24.06.2016. Бюл. №12.

### Публікації у матеріалах міжнародних і українських наукових конференцій

10. М.М. Ваків, Д.М. Винник, **В.Г. Гайдучок**, Р.М. Кузьмак, А.Г. Кузьмик, Д.Ю. Сугак, І.М. Сиворотка. Особливості напилювання тонкопліткових металевих шарів на полярні

поверхні кристалів LiNbO<sub>3</sub>. X міжнародна науково-практична конференція «Сучасні інформаційні і електронні технології»: тези доп. – Україна, Одеса, травень 2009 р. – С.134.

11. **В.Г. Гайдучок**, Р.М. Кузьмак, О.М. Крунич, О.С. Ільїна, Д.Ю. Сугак, І.М. Сиворотка, М.М. Ваків. Залежність показників заломлення плівок оксидів металів від тиску кисню в процесі електронно-променевого розпилювання. Дванадцята відкрита науково-технічна конференція професорсько-викладацького складу Інституту телекомунікацій, радіоелектроніки та електронної техніки НУ «Львівська політехніка» з проблем електроніки: тези доп. – Львів 7-9 квітня – 2009 р. – С.65.

12. **В.Г. Гайдучок**, Д.Ю. Сугак, М.М. Ваків. Отримання напівпоглинаючих покриттів зі заданими параметрами на основі плівок SiO-Sr. XIII міжнародна науково-практична конференція «Сучасні інформаційні та електронні технології»: тези доп. – Україна, Одеса, 4–8 червня 2012 р.– С. 302.

13. Д.М. Винник, М.О. Мельник, Д.Ю. Сугак, **В.Г. Гайдучок**, Б.М. Копко, Р.М. Мельник. Акустооптичний модулятор світла на кристалах ніобату літію для формування піко секундних імпульсів VIII Українсько-польська науково-практична конференція «Електроніка та інформаційні технології: Еліт-2016»: тези доп. – Україна, Львів – Чинадієво, 27-30 серпня 2016 р. – С. 34.

14. Д.М. Винник, О.Г. Решотка, **В.Г. Гайдучок**, Д.Ю. Сугак, М.М. Ваків. Акустооптичні дефлектори НВЧ діапазону із збудженням об'ємних хвиль з поверхні п'єзоелектричних кристалів Праці сімнадцятої міжнародної науково-практичної конференції «Сучасні інформаційні та електронні технології» Україна, Одеса, 23-27 травня 2016 р. – С. 46.

15. М.М. Ваків, Д.М. Винник, **В.Г. Гайдучок**, І.І. Іжнін, Б.М. Копко, Л.В. Леваш, В.П. Маслов, І.І. Сиворотка, І.М. Сиворотка, І.М. Сольський, Д.Ю. Сугак. Технології отримання монокристалічних та скляних активних і пасивних елементів оптоелектронних лазерних і НВЧ систем для спеціальних застосувань. Матеріали 2-ої Української науково-технічної конференції «Спеціальне приладобудування: стан та перспективи»: тези доп. – Україна, Київ – 6-7 грудня 2016 р. – С. 78.

16. Л.В. Леваш, В.Б. Самойлов, О.А. Росновський, М.Ю. Ведула, **В.Г. Гайдучок**. Піроелектричний вимірювач енергії лазерного випромінювання прохідного типу Українська науково-технічна конференція “Спеціальне приладобудування: стан та перспективи”, тези доп. – Україна, Київ – 6-7 грудня 2016 р. – С. 36.

17. A.V. Danylov, R.Yu. Petrus, **V.G. Haiduchok**, M.M. Vakiv. Optical properties of ultrathin Au films on lithium niobate substrate. International Conference on Electronics and Information Technology (EIT'16): Abstr. of Int. Conf. – Ukraine, Odessa, 23-27 May, 2016. – P. 43-45.

18. I. Solskii, D. Sugak, I. Groshovij, Ye. Kapeliuh, **V. Hajduchok**, B. Kopko, M. Vakiv, V. Gaba, S. Ubizskii. Growth and investigation of colorless lithium tantalate single crystals for optoelectronics. Збірник тез Міжнародної наукової конференції “Оксидні матеріали електронної техніки – отримання, властивості, застосування” (OMEE-2017) – Львів, Україна – 2017. – 1 електрон. опт. диск (CD-ROM) – С.32.

19. М.М. Ваків, **В.Г. Гайдучок**, Б.М. Копко, Л.В. Леваш. Виготовлення модулів активних елементів широкосмугових реєстраторів лазерного випромінювання протитанкових систем ураження. Науково-практична конференція «Застосування сухопутних військ збройних сил України у конфліктах сучасності»: тези доп. – Національна Академія Сухопутних Військ – Україна, Львів – 16 листопада 2017 р. – С. 14.

20. D. Vynnyk, **V. Haiduchok**, B. Kopko, I. Solskii, M. Vakiv. Acousto-optical modulators of light on standing acoustic waves using their own piezoelectric effect of lithium tantalate single crystals. 1st international conference on innovative materials and nanoengineering. (IMNE'2019) Brenna, Poland 27-29 August 2019: Book of Abstracts. – P. 23.

21. Д.М. Винник, **В.Г. Гайдучок**, Б.М. Копко, І.М. Сольський, М.М. Ваків. Акустооптичні модулятори світла на стоячих акустичних хвилях з використанням власного п'єзо ефекту монокристалів танталату літію. Міжнародна науково-практична конференція

«Сучасні інформаційні та електронні технології»: Тези доп. – Україна, Одеса. 27-31 травня 2019 р. – С. 78.

22. M. Kushlyk, V. Tsiumra, L.-I. Bulyk, Ya. Zhydachevskyy, V. Haiduchok, I.I. Syvorotka, D. Sugak, A. Suchocki. Effect of technological parameters on properties of Ag plasmonic structures prepared on garnet substrates. The International research and practice conference “Nanotechnology and nanomaterials” (NANO-2020). Abstract Book of participants of the International research and practice conference – Ukraine Lviv, 26-29 August 2020. – P. 451.

## АНОТАЦІЯ

**Гайдучок В.Г. Формування тонкоплівкових структур на полярних гранях кристалів LiNbO<sub>3</sub>.** – На правах рукопису.

Дисертація на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук за спеціальністю 05.27.01 – твердотільна електроніка – Національний університет «Львівська політехніка» Міністерства освіти і науки України, Львів, 2024.

Дисертація присвячена дослідженню особливостей формування металевих та діелектричних тонких плівок на поверхнях монокристалів LiNbO<sub>3</sub>, на яких присутній некомпенсований електростатичний заряд, при застосуванні їх у пристроях функціональної електроніки.

Вперше досліджено вплив некомпенсованого електростатичного заряду на характер зародкоутворення при осадженні тонкоплівкових металевих та діелектричних покриттів на поверхнях монокристала ніобату літію LiNbO<sub>3</sub>. Встановлено, що плівки, нанесені на негативно заряджену поверхню, відзначаються кращою однорідністю та адгезією порівняно з плівками, нанесеними на позитивно заряджену поверхню. Показано, що структура металевих і діелектричних плівок, отриманих на полярних поверхнях монокристала ніобату літію, суттєво залежить від методів осадження, характеристик поверхні підкладки, температури і швидкості осадження.

На основі аналізу різних методів вакуумного осадження металевих і діелектричних плівок показано, що плівки, отримані магнетронним методом на негативно зарядженій поверхні кристала ніобату літію LiNbO<sub>3</sub>, мають вищу однорідність за рахунок збільшення частки позитивно заряджених іонів у потоці переносу матеріалу мішені на підкладку, що дозволяє отримувати суцільні шари вже при товщині 2 нм;

Встановлено, що найкращі за експлуатаційними властивостями структурно однорідні тонкі плівки отримуються на полярно заряджених поверхнях кристалів ніобату літію за допомогою методу магнетронного розпилення у вакуумі.

Проведено розрахунок розподілу наночасток срібла осаджених термічним напиленням на позитивно заряджену поверхню LiNbO<sub>3</sub> за радіусами, висотами та відстанями між ними. Встановлено, що плівка срібла масовою товщиною приблизно 10 Å складається в основному з наночасток у вигляді сплюснутих сфероїдів з середнім радіусом 7 нм та висотою близько 1,2 нм.

Встановлено, що спектральне положення максимуму ППР у нанорозмірних плівках металів, осаджених на полярних гранях монокристалів ніобату літію, суттєво визначається концентрацією вільних носіїв на електрично зарядженій поверхні та товщиною плівки.

Виявлено довгохвильове зміщення максимуму смуги ППР в наноплівках Ag, нанесених на полярних гранях LiNbO<sub>3</sub>. Максимум поглинання ППР в плівках Ag осаджених на позитивно зарядженій підкладці кристалу ніобату літію відповідає 564 нм, а на негативно зарядженій підкладці – 587 нм. Спостережуване довгохвильове зміщення максимуму смуги ППР в наноплівках срібла на 23 нм зумовлено відносним збільшенням концентрації вільних носіїв на негативно зарядженій поверхні підкладки з кристалу ніобату літію на 8 %.

**Ключові слова:** ніобат літію, полярні грані, вакуумне напилювання, тонкі металеві та діелектричні покриття, поверхневий плазмонний резонанс.

**ABSTRACT**

**Haiduchok V.G. Formation of Thin Film Structures on the Polar Faces of LiNbO<sub>3</sub> Crystals.** – On the rights of manuscript.

Thesis for the degree of Candidate of Technical Sciences in the specialty 05.27.01 – Solid-State Electronics – Lviv Polytechnic National University of Ministry of Education and Science of Ukraine, Lviv, 2024.

Thesis is devoted to the study of the peculiarities of the formation of metallic and dielectric thin films on the surfaces of LiNbO<sub>3</sub> single crystal with uncompensated electrostatic charge.

The influence of an uncompensated electrostatic charge on the nature of nucleation during the deposition of thin-film metal and dielectric coatings on the surfaces of a single crystal of lithium niobate LiNbO<sub>3</sub> was first investigated.

It is shown that the films deposited on a negatively charged surface are characterized by better homogeneity and adhesion as compared to the films deposited on a positively charged surface.

It was found that structurally homogeneous thin films with the best performance properties are obtained on polarly charged surfaces of lithium niobate crystal using the method of magnetron sputtering in vacuum.

It has been found that the spectral position of the surface plasmon resonance maximum in nanoscale metal films deposited on the polar faces of a lithium niobate single crystal is significantly determined by the concentration of free carriers on the electrically charged surface and the film thickness.

The distribution of silver nanoparticles deposited by thermal sputtering on a positively charged LiNbO<sub>3</sub> surface has been calculated in terms of radii, heights, and distances between them. It was found that the silver film with a thickness of about 10 Å consists mainly of nanoparticles in the form of flattened spheroids with an average radius of 7 nm and a height of about 1.2 nm.

It is shown that the structure of metal and dielectric films obtained on the polar surfaces of a lithium niobate single crystal depends significantly on the deposition methods, the characteristics of the substrate surface, the temperature and the deposition rate. Based on the analysis of different methods of vacuum deposition of metallic and dielectric films, it is shown that the films obtained by the magnetron method on negatively charged surfaces of lithium niobate crystal LiNbO<sub>3</sub> have a higher uniformity due to an increase in the proportion of positively charged ions in the flux of transfer of target material to the substrate, which allows obtaining continuous layers already at a thickness of 2 nm;

It was found that the maximum absorption of the surface plasmon resonance (SPR) in Ag films deposited on an electrically neutral glass substrate corresponds to 532 nm, while the maximum absorption of the SPR in Ag films deposited on a positively charged lithium niobate crystal substrate corresponds to 564 nm and on a negatively charged substrate to 587 nm. The observed 23 nm long wavelength shift of the maximum of the TEM band in silver nanofilms is due to a relative increase of 8% in the concentration of free carriers on the negatively charged surface of the lithium niobate crystal substrate.

Based on the study of the peculiarities of the use of thin metallic and dielectric films deposited on the polar surfaces of active elements made of lithium niobate single crystals, constructive and technological solutions are proposed for the manufacture of active elements for an acousto-optic modulator on a standing acoustic wave, an electro-optical shutter, and acoustic delay lines.

**Keywords:** lithium niobate, polar faces, vacuum sputtering, thin metal and dielectric coatings, surface plasmon resonance.