

ВІДГУК

офіційного опонента – д. т. н., проф., зав. кафедри комп'ютерної інженерії та електроніки Прикарпатського національного університету імені Василя Стефаника Когута Ігоря Тимофійовича на дисертаційну роботу **Гайдучка Володимира Григоровича «Формування тонкоплівкових структур на полярних гранях кристалів LiNbO₃»**, поданої на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук за спеціальністю 05.27.01 – твердотільна електроніка.

Актуальність теми дисертації.

Важливим напрямом сучасної твердотільної електроніки є створення нових сенсорних пристроїв, елементів мікросистем-на-кристалі, елементів приладів керування сигналами акусто- та оптоелектроніки. Створення цього типу пристроїв вимагає застосування нових матеріалів і відповідного вивчення та дослідження їх властивостей для оцінки можливостей створення цих пристроїв. Одним із перспективних матеріалів для цієї мети, **як активне середовище є монокристал ніобату літію LiNbO₃**, який можна вважати другим за важливістю кремнієм для оптоелектроніки. На основі монокристалу ніобату літію можна створювати ефективні мікроелектронні прилади, принцип дії яких ґрунтується на оптичних, сегнето- та піроелектричних властивостях цього матеріалу.

Окрім цього, відкриваються можливості для інтеграції цього типу оптоелектронних та акустоелектронних пристроїв в кремнієві технології та інтегровані приладні структури як в гібридному, так і твердотільному виконанні для побудови інтелектуальних сенсорів та мікросистем-на-кристалі сенсорного типу за принципом: чутливий елемент на ніобаті літію – схеми обробки сигналів на кремнієвих технологіях.

На сьогодні добре відомі особливості отримання тонкоплівкових структур на електрично нейтральних підкладках, а також вплив електричного поля та обробки поверхні підкладки електронним пучком на процеси росту плівок на різних поверхнях. Проте наявність електричного заряду на поверхні сегнетоелектрика змінює умови формування шарів на його поверхні, що відповідно змінює їх властивості. Тому для реалізації приладів на основі ніобату літію LiNbO₃ обов'язково потрібно враховувати знак заряду на його поверхні і напрям вектора електричної поляризації активного середовища, щоб мати прогнозовані властивості робочої поверхні з нанесеними тонкоплівковими структурами.

Тому комплексні дослідження починаючи з технології формування тонкоплівкових приладних структур на поверхні ніобату літію LiNbO₃, а також відповідно і до проектування та виготовлення опто-, акустоелектронних та піролітичних приладів є актуальною науковою та практично-прикладною проблемою, і її вирішення стане ключем для створення цього типу мікроелектронних приладів. І представлена дисертація здобувача Гайдучка В.Г., яка присвячена дослідженням впливу стану і типу зарядів на поверхні ніобату натрію на властивості тонкоплівкових структур на їх властивості і майбуніх приладів є сучасною та

актуальною. Дослідницькі роботи в даному напрямку є необхідними, перспективними, сучасними та актуальними. Тому й дисертація **Гайдучка В.Г.**, яка присв'ячена дослідженням впливу стану і типу зарядів на поверхні ніобату літію на властивості тонкоплівкових структур на їх властивості і майбутніх приладів є сучасною та **актуальною науково-прикладною задачею.**

Актуальність роботи підтверджується зокрема й тим, що дисертація тісно пов'язана з науковими ДБ темами і планами НДР і виконувалася відповідно до напрямку наукових досліджень НВП «ЕЛЕКТРОН-КАРАТ» (ДП ПрАТ «Концерн-Електрон»), кафедри напівпровідникових приладів НУ «Львівська політехніка» за договорами з Інститутом фізики напівпровідників ім. В.Є.Лашкарьова НАНУ, Інститутом фізики НАНУ, а також міжнародних проєктів RISE - MSCA програми «Горизонт», у яких автор був виконавцем НДР, зокрема:

- ДКР «Мета» (2007-2010 рр.) (замовник Концерн «Електрон»);
- НДР «Виготовлення експериментальних зразків двох типів модулів активних елементів широкосмугових реєстраторів 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 НУ «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.);
- «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, 2020-2023 рр.);
- «TeraHertz» «Нові технології та матеріали для контролю терагерцового випромінювання» (№ 101086493, 2023-2026 рр.).

Структура та зміст дисертації. Дисертація містить вступ, п'ять розділів, висновки, список використаних джерел. Зміст дисертації належним чином відображає мету роботи, основні завдання, проведені теоретичні й експериментальні дослідження та отримані науково-теоретичні та практично-прикладні результати досліджень. За змістом дисертації усі розділи викладені послідовно і логічно розкривають її суть. Коротка характеристика.

Так, у **вступі** подані усі необхідні дані щодо актуальності поставленої в дисертації задачі, достатньо чітко подано мету і задачі дослідження та дані про наукову новизну і практично-прикладну цінність отриманих результатів.

У першому розділі проаналізовано проблему дисертаційної роботи. Значну увагу приділено внутрішнім напруженням, 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, наведено механізми переносу в них носіїв заряду. Визначено важливість процесів відпалу в технології формування прозорих діелектричних багат шарових покриттів для оптичних елементів оптоелектронних та електрооптичних приладних структур та активних елементів твердотільних лазерів з метою отримання як ефективного просвітлюючого покриття для оптичних сигналів або, навпаки, створення ефективних діелектричних поглинаючих покриттів для заданого діапазону довжин хвиль.

Наведено дані про оптичні властивості тонких металевих плівок, ефекти еліптичної поляризації світла при відбиванні та пропусканні, поверхневі плазмонні резонанси, а також про вплив структури тонких плівок на їхні оптичні властивості.

У другому розділі наведено експериментальні методики та обладнання для одержання й дослідження тонкоплівкових приладних 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 порівняльні характеристики. Представлено методики дослідження електрофізичних та оптичних характеристик та інших параметрів металевих плівок. Показано, що оптичні властивості плівок суттєво визначають умови їх отримання, а саме: температура підкладки, швидкість та метод напилювання, умови відпалу та ін.

У третьому розділі проаналізовано вплив поверхневого заряду кристала LiNbO_3 на структуру металевих та діелектричних плівок, нанесених на його полярні грані.

Оскільки кристал ніобату літію є піро-, п'єзо- та сегнетоелектриком, тому відповідно до особливостей його кристалічної структури центри ваги електричних зарядів різнойменних іонів в елементарній комірці цього кристала не збігаються один з одним. І 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 цього на його протилежних гранях виникають поверхневі заряди з протилежними знаками. Максимально цей ефект присутній на гранях кристала, перпендикулярних кристалографічній осі Z , меншою мірою на гранях, перпендикулярних осі Y , і практично відсутній на гранях, перпендикулярних осі X .

Враховуючи ці властивості кристалу 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, що становить суть дисертації, було проведено низку досліджень

металевих та діелектричних тонких плівок, нанесених термічним, електронно-променевим та магнетронним методами вакуумного розпилення.

Четвертий розділ присвячений дослідженням особливостей поверхневого плазмонного резонансу на поверхнях тонких металевих плівок, нанесених на підкладки з LiNbO_3 з присутнім поверхневим зарядом. З'ясовано, що тонкі плівки металів на поверхні ніобату літію на початкових стадіях росту можна розглядати як сукупність наночасток металу і діелектричних проміжків у вигляді нанорозмірних метал-діелектричних композитів із фрактальною структурою, що містять локалізовані плаزمони. Розміри металевих наночастинок є значно меншими аніж довжини світлових хвиль. Тому їх оптичний відгук під впливом світла пов'язаний із збудженням плазмонних резонансів. І такі локалізовані поверхневі плаزمони, які виникають завдяки вільним носіям, є в свою чергу основою для створення сенсорних пристроїв, пристроїв сонячної енергетики та ін.

У **п'ятому розділі** подано результати практичних прикладних використань тонких металевих та діелектричних плівок, нанесених на полярні грані активних елементів із монокристала ніобату літію зі створення зразків мікроелектронних пристроїв, а саме пристроїв акусто-, електрооптики, високочутливих піроелектричних приймачів лазерного випромінювання. Наведено приклади реальних зразків вказаних пристроїв та їх параметри. Базовим елементом цих пристроїв є металізовані контакти до поверхні кристалу ніобату літію для подачі електричного потенціалу, що керує світловим потоком крізь акустооптичний чи електрооптичний елемент, і таким чином, виконує функцію оптичного затвору. Показано, що створюючи відповідну топологію на поверхні кристалу ніобату літію і завдяки п'єзоелектричним властивостям можна створювати елементи ліній затримки радіосигналів, фільтри радіочастот у мікроелектронному виконанні.

Достовірність та обґрунтованість отриманих дисертантом наукових результатів та висновків забезпечується використанням сучасних експериментальних методик і методів, зокрема, фізичних і математичних методів дослідження, які підтверджені результатами експериментальних перевірок. Так, було використано сучасне технологічне обладнання. Тонкі металеві та діелектричні покриття одержувалися методами термічного, електронно-променевого та магнетронного напилювання з використанням обладнання фірми «TORR» (США). Дослідження морфології поверхонь плівок проводили методом АСМ з використанням мікроскопа SolverP4. Дослідження мікроструктур плівок проводили 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 спектрофотометрії за допомогою спектрофотометра UV-VIS-NIR Shimadzu UV3600 (Японія).

Результати дисертації були отримані в процесі виконання НДР, апробовані на провідних конференціях, опубліковані у відомих виданнях.

В дисертації Гайдучка В.Г. основну увагу зосереджено на дослідженнях особливостей формування металевих та діелектричних тонких плівок на поверхнях монокристалів LiNbO_3 , на яких присутній некомпенсований електростатичний заряд, і дослідженнях можливостей їх застосування у створенні пристроїв функціональної електроніки.

До найсуттєвіших наукових результати роботи слід віднести наступні:

У дисертації вперше вирішене науково-технічне завдання створення технологічних засад формування функціональних металевих та діелектричних тонких плівок методами вакуумного осадження на полярних гранях кристалів LiNbO_3 як активних елементів приладів акусто- та оптоелектроніки, а електро-оптичних модуляторів та широкосмугових піроприймачів.

Досліджено вплив різнойменного статичного заряду на поверхнях кристалу LiNbO_3 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.

На основі досліджень особливостей використання тонких металевих та діелектричних плівок на полярних гранях активних елементів із монокристалів LiNbO_3 , запропоновано конструктивно-технологічні рішення щодо виготовлення активних елементів для акустооптичних модуляторів на стоячій акустичній хвилі, електрооптичних затворів, акустичних ліній затримки та піроприймачів.

Основне практично-прикладне значення результатів дисертації полягає в тому, що вона має чітку прикладну спрямованість, і на основі проведених досліджень встановлено особливості нанесення тонкоплівкових покриттів на полярні грані кристалу LiNbO_3 , що дало змогу створювати активні елементи електрооптичних затворів з променевою стійкістю не менше $0,3 \text{ ГВт/см}^2$ для імпульсів лазерного випромінювання тривалістю 20 нс; а також встановлено, що оптимальною орієнтацією вектора поляризації плоскопаралельного активного елемента є напрямок протилежний до напрямку світлового променя, це дозволяє підвищити тривалість надійної роботи електрооптичних модуляторів; а оптимальною поверхнею для електродів зустрічно смужкових перетворювачів акустоелектронних ліній затримки на поверхневих акустичних хвилях та піроприймачів є негативно заряджена грань LiNbO .

Виготовленні експериментальні партії акустооптичних модуляторів, електрооптичних затворів, акустоелектронних ліній затримки сигналів та піроприймачів, що відкриває можливості в розробці та заміні застарілих фотоприймачів на широкосмугові одно- та багатокомпонентні піроелектричні приймальні модулі на основі монокристалів ніобату

літію та танталату літію з високою чутливістю.

Як результат проведених досліджень, розроблено нормативні технологічні інструкції для промислового використання з технологій виготовлення: акустооптичних модуляторів добротності лазерного випромінювання; електрооптичних затворів та ліній затримки; піроелектричних сенсорів вимірювачів потужності оптичного випромінювання на основі монокристалів ніобату і танталату літію.

Запропонований новий спосіб формування багатошарових інтерференційних покриттів на поверхні активних елементів захищено Патентом України на винахід.

Значна частина експериментальних результатів може послужити основою для подальшого розвитку даного напрямку, а суть висновків, отриманих в результаті виконаних досліджень, робить їх перспективними як для подальших наукових досліджень, так і використання в НДР зі створення реальних мікроелектронних пристроїв на тонкоплівкових структурах сформованих на полярних поверхнях кристалу ніобату літію. Розроблені піроелектричні пристрої для виявлення активного лазерного випромінювання можуть знайти ефективне використання у системах для виявлення активного лазерного випромінювання. Що є надзвичайно актуальним для України в умовах війни.

Однак, як і кожна наукова робота, розглянута дисертація та автореферат не позбавлені певних недоліків і рекомендацій. Серед них відзначаю наступні:

1. У дисертації досліджено отримання тонких діелектричних та металевих плівок методом термічного випаровування, електронно-променевим методом, іонно-плазмовим та магнетронним методами напилювання у вакуумі. Проте, було б доцільним, окрім досліджених у роботі методів осадження тонких плівок на поверхню ніобату літію розглянути можливість використання методу шарового осадження плівок, відомого як ALD (atomic layer deposition) з комп'ютерним керуванням параметрів осаджуваних шарів.
2. Мають місце окремі орфографічні неточності, напр., - стр.,11 («плавок» -замість «плівок»), температура плавлення, стор.106, окремі неточності в посиланнях у тексті на рисунки, напр. на Рис.5.13 замість Рис.5.20, 5.21 стор. 157. Рис.5.14 у тексті (стор.150) описується як 5.15. На рис.5.14, а - стік транзистора чомусь закорочено із витоком.
3. Доволі обмежено подано інформацію про виготовлення пластин (підкладок) із зливків кристалу ніобату (Рис.3.1), кристалографічної орієнтацію їх робочої поверхні, особливостей травлення для формування об'ємних елементів типу «ямок» травлення із заданими кристалографічними площинами. Не зовсім зрозумілий взаємозв'язок між кристалографічною орієнтацією поверхні кристалу ніобату літію із типом і величиною поверхневого заряду.

4. На стор.151 вказано, що «кожен окремих елемент приймача становить собою так званий піксель-мінімальний елемент зображення». Проте не вказано, за якою технологією та схемотехнікою він реалізований, та відсутня електрична схема, що дозволило б краще розуміння та можливість комп'ютерного моделювання її функціонування.
5. Було б доцільним проводити технологічне комп'ютерне моделювання операцій формування плівок на поверхнях кристалу ніобату літію, напр. в системі TCAD.

Однак вказані зауваження і недоліки суттєво не впливають на цінність дисертації в цілому. 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. Результати дисертації опубліковані у 22 наукових працях, з них 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. Що підтверджує **повноту висвітлення результатів у наукових працях та особистий внесок здобувача. Автореферат дисертації в лаконічній формі повністю відповідає її змісту та опублікованим роботам, основним положенням дисертації. В ньому подано коротку інформацію про кожний з розділів дисертації, а також інші необхідні дані.**

Висновок На підставі вищевикладеного вважаю, що дисертація **Гайдучка В.Г. «Формування тонкоплівкових структур на полярних гранях кристалів LiNbO₃»**, є завершеною науково-дослідницькою працею, у якій розв'язано актуальне наукове завдання у якій вперше вирішено науково-технічне завдання створення технологічних основ формування функціональних металевих та діелектричних тонких плівок методами вакуумного осадження та активних приладних структур на полярних гранях кристалів LiNbO₃.

За науково-прикладним рівнем виконання дисертації, актуальністю теми, обґрунтованістю і достовірністю наукових досліджень і висновків, науковою новизною, обсягом дисертація відповідає паспорту спеціальності 05.27.01 – твердотільна електроніка і вимогам МОН України, які ставляться до робіт на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук, а її автор, Гайдучок Володимир Григорович, заслуговує присудження наукового ступеня кандидата технічних за спеціальністю 05.27.01 – твердотільна електроніка.

Офіційний опонент - д.т.н., проф., зав. кафедри комп'ютерної інженерії та електроніки, Прикарпатського національного університету імені Василя Стефаника, Когут І.Т.

підпис *І.Т. Когут*

ЗАСВІДЧУЮ

Начальник відділу кадрів

Орест СМІШКО

« 08 » *04* 20*24* р.

