

67-72-14/1
в.г. 10.04.2024р.

ВІДГУК

Офіційного опонента – д.т.н., проф. кафедри мікроелектроніки Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського» Вербицького Володимира Григоровича на дисертаційну роботу **Гайдучка Володимира Григорович за темою «Формування тонкоплівкових структур на полярних гранях кристалів LiNbO_3 »**, подану на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук за спеціальністю 05.27.01 – твердотільна електроніка.

Актуальність теми дисертації.

При створенні сучасних пристроїв керування сигналами в електрооптиці акусто – та оптоелектроніці, необхідно враховувати особливості поведінки монокристалічних матеріалів в процесі виготовлення з них активних елементів, а також технологічних факторів що на це впливають. Одним із найуживаніших активних середовищ згаданих приладів є монокристал ніобату літію LiNbO_3 , який має виражені сегнето- та піроелектричні властивості. Явище спонтанної електричної поляризації, що присутнє в цьому кристалі, створює додаткові труднощі в процесі нанесення на його поверхні металевих електродів для виготовлення надійних металевих контактів чи діелектричних покриттів, які виконують функції просвітлення активних елементів для зниження втрат потужності оптичних сигналів. Тому вивчення особливостей формування тонкоплівкових структур на полярних гранях кристалів LiNbO_3 , є надзвичайно важливим з точки зору підвищення якості таких покриттів та довговічності самих приладів.

Дослідницькі роботи, що проведені здобувачем в цьому напрямку, дозволяють зрозуміти механізми формування тонкоплівкових структур за умови присутності на поверхні кристалу статичного заряду, та залежності якості металевих та діелектричних покриттів від типу зарядів.

Тому дисертація Гайдучка В.Г. є актуальною з точки зору вирішення наукових та прикладних завдань.

Актуальність роботи підтверджується цілим рядом науково – дослідних, науково- технічних робіт та прямих договорів з замовниками що виконувались здобувачем в рамках наукових досліджень НВП «ЕЛЕКТРОН-КАРАТ» та кафедри напівпровідникової електроніки НУ «Львівська політехніка», а також міжнародних проєктів RISE-MSCA в рамках програми «Горизонт», зокрема:

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

Структура та зміст дисертації.

Дисертація складається з анотації, списку опублікованих праць за темою дисертації, змісту, вступу, п'яти розділів, загальних висновків, списку використаної літератури та додатків. Зміст дисертації належним чином відображає мету, актуальність роботи, наукову новизну, та прикладний характер отриманих результатів.

У першому розділі розглянуто процеси зародкоутворення тонких металевих плівок під впливом зовнішніх чинників та в залежності від властивостей конденсованого матеріалу. Описано конденсатно-острівкову модель утворення кластерів при формуванні тонкопліткових структур. Проаналізовано механічні, електрофізичні та оптичні властивості тонкопліткових структур, а також особливості металевих та діелектричних плівок нанесених на різні типи підкладок в тому числі із поверхневим статичним зарядом.

Другий розділ містить опис низки експериментальних методик та обладнання для одержання й дослідження тонкопліткових 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. Показано, що 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 LiNbO_3 на структуру металевих та діелектричних плівок, нанесених на полярні грані. Враховуючи ці особливості кристала ніобату літію, досліджувався процес нанесення тонких металевих та діелектричних шарів на полярні грані з точки зору відмінностей кристалічної структури, електричних та оптичних властивостей. Було проведено низку досліджень металевих та діелектричних тонких плівок, нанесених термічним, електронно-променевим та магнетронним методами вакуумного розпилення та наведені їх результати.

Четвертий розділ містить розгляд особливостей поверхневого плазмонного резонансу на поверхнях тонких металевих плівок, нанесених на підкладки з ніобату літію за присутності поверхневого заряду. У спектрах поглинання плівок Ag , осаджених на позитивно заряджену поверхню монокристала LiNbO_3 , спостерігається максимум, який із ростом товщини плівки зміщується від 520 до 610 нм. Показано, що 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. Показано також, що існує довгохвильове зміщення максимумів ППР в залежності від знака заряду підкладки LiNbO_3 (564 нм для позитивно зарядженої підкладки та 587 нм для негативно зарядженої) відносно максимуму ППР на скляній підкладці (532 нм), що пояснюється різною формою металевих часток у вигляді сфероїдів та відстанню між ними.

У п'ятому розділі розглянуто прикладні аспекти використання тонких металевих та діелектричних плівок, нанесених на полярні грані активних елементів із монокристала ніобату літію LiNbO_3 , у пристроях акусто-, електрооптики та піроелектричних приймачів лазерного випромінювання. Оскільки ці покриття наносяться на грані кристала LiNbO_3 , які мають нескомпенсований статичний заряд, то вони відрізнятимуться між собою якістю й, відповідно, показником заломлення та величиною пропускання. Тому важливим є розміщення активних елементів у пристрої, з точки зору черговості проходження лазерного променя крізь грані кристала LiNbO_3 , з якого виготовляють ці елементи.

Достовірність та обґрунтованість результатів досліджень здобувача перевірено експериментально на сучасному обладнанні, та має практичне застосування при виготовленні модулів активних елементів твердотільних приладів: широкосмугових реєстраторів лазерного випромінювання, електрооптичних затворів, ліній затримки, акустооптичних модуляторів на стоячій та біжній акустичних хвилях. Результати дисертації були апробовані при виконанні науково-технічних робіт та висвітлені на вітчизняних та міжнародних коференціях, а також опубліковані у виданнях, що індексуються в наукометричних базах даних Scopus.

Найсуттєвіші наукові результати полягають у наступному:

Вперше досліджено вплив нескомпенсованого електростатичного заряду на характер зародкоутворення при осадженні тонкоплівкових металевих та діелектричних покриттів на поверхнях монокристала ніобату літію LiNbO_3 . 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_3 , 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. Виявлено довгохвильове зміщення максимуму смуги ППР в наноплівках Ag, нанесених на полярних гранях LiNbO_3 . На основі цих досліджень, запропоновано технічні рішення в процесі виготовлення активних елементів акусто- та електрооптичних пристроїв, ліній затримки та піроприймачів з метою покращення якості та їх надійності.

Практично-прикладне значення результатів дисертаційних досліджень полягає у встановленні залежності властивостей тонких металевих і діелектричних плівок від знаку поверхневого заряду на гранях активних елементів з монокристалів ніобату літію, що дозволило 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 LiNbO_3 . Встановити, що металевий електрод піроприймача на основі LiNbO_3 слід наносити на негативно заряджену грань, а напівпоглинаюче покриття, відповідно, – на позитивно заряджену грань.

Отримані результати можуть слугувати початком більш системних досліджень впливу електростатичного заряду на поверхнях активних елементів з монокристалів ніобату літію на технічні та експлуатаційні характеристики пристроїв функціональної електроніки.

Однак, дисертація, як і кожна наукова робота не позбавлена **певних недоліків**, серед них можна відзначити наступні:

1. У дисертації більшою мірою досліджені структурні та морфологічні особливості тонких металевих та діелектричних плівок на полярних гранях кристалів ніобату літію, однак меншою мірою представлені дослідження механічних та електрофізичних властивостей цих плівок.
2. Є певні неточності у варіантах схем підключення пірочутливого елемента (стор.150).
3. Було б доцільним автоматизувати певні пакети досліджень із залученням сучасних комп'ютерних програм та новітніх алгоритмів.
4. Присутні окремі граматичні та стилістичні розбіжності у п'ятому розділі роботи.

Однак, критичні зауваження та недоліки не знижують наукової та прикладної цінності дисертації.

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. **Це підтверджує повноту висвітлення результатів дисертаційної роботи та особистий внесок здобувача.** Автореферат дисертації в лаконічній формі відображає основні положення роботи та подає стислі висновки по кожному з розділів.

Висновок. Враховуючи вищенаведене, вважаю, що дисертація здобувача Гайдучка В.Г. «Формування тонкопліткових структур на полярних гранях кристалів LiNbO_3 » є завершеною науковою працею, у якій вперше розглянуте завдання формування якісних металевих та діелектричних структур на

поверхнях активних елементів з монокристалів ніобату літію, за наявності на їх поверхні некомпенсованого електростатичного заряду.

За всіма критеріями дисертація відповідає паспорту спеціальності і вимогам МОН України до кандидатських дисертацій, а її автор Гайдучок Володимир Григорович, заслуговує присудження наукового ступеня кандидата технічних наук за спеціальністю 05.27.01. – твердотільна електроніка.

Офіційний опонент – д.т.н., проф. кафедри
мікроелектроніки НТУУ «КПІ»
імені Ігоря Сікорського»



В.Г. Вербицький
Вербицький В.Г.