

**Голові разової спеціалізованої вченої ради
Національного університету «Львівська політехніка»
доктору технічних наук, професорці
КЛИМ Галині Іванівні**

ВІДГУК

офіційного опонента

доктора технічних наук, професора

ЦІЖА Богдана Романовича

на дисертаційну роботу

ЧЕМЕРИСА Дмитра Вікторовича

на тему «**Електрофізичні та магнітотранспортні характеристики
ниткоподібних кристалів GaAs для сенсорної електроніки**»,
представлену на здобуття наукового ступеня доктора філософії
за спеціальністю 153 «Мікро- та наносистемна техніка»
в галузі знань 15 «Автоматизація та приладобудування»

Актуальність теми дисертації

Для створення ефективних сенсорів фізичних величин, які можуть працювати у складних умовах експлуатації необхідно детально вивчити особливості змін їх активних елементів за дії різних факторів, зокрема, встановити закономірності змін магнітотранспортних та електротранспортних характеристик ниткоподібних кристалів арсеніду галію. Для цього слід провести комплексні дослідження електро- та магнітотранспортних властивостей ниткоподібних кристалів арсеніду галію у широкому інтервалі температур та магнітних полів.

Незважаючи на те, що в сучасній сенсоріці наявний широкий клас різнопланових активних елементів, на сьогодні не існує універсальних пристроїв, які можна було б застосовувати для створення чутливих елементів сенсорів механічних, теплових і магнітних величин під впливом зовнішніх полів. Тому дослідження нових матеріалів і технологій, які розширюють діапазон функціональних властивостей сенсорів фізичних величин, зокрема, розроблення концепції та створення пристроїв сенсорної електроніки на основі легованих ниткоподібних кристалів GaAs, що будуть дієздатні у

складних умовах експлуатації, таких, як криогенні температури та сильні магнітні поля, чому і присвячена дисертаційна робота Чемериса Д. В. є **актуальними** як в теоретичному, так і в прикладному відношеннях.

Актуальність дисертації підтверджується також її зв'язком з бюджетними і госпдоговірними темами та міжнародними проектами.

Поставлена в дисертації **мета** – встановлення електро- та магнітотранспортних властивостей ниткоподібних кристалів GaAs, при різних рівнях домішкового легування поблизу переходу метал-діелектрик під ефективним впливом зовнішніх полів (магнітного поля, температури та деформації) для створення сенсорів фізичних величин, що будуть дієздатні у складних експлуатаційних умовах – досягнута в результаті застосування сучасних експериментальних методів, зокрема, методів атомно-силової та електронної мікроскопії, модифікованих методів дослідження електрофізичних властивостей, прецизійних методів вимірювання магнітоопору з використанням біттерівського та надпровідного магнітів та ін.

Найсуттєвіші наукові результати дисертаційного дослідження та їх новизна

До **найвагоміших наукових результатів** автора дисертаційної роботи слід віднести наступні:

1. Встановлено двоскладову залежність магнітоопору ниткоподібних кристалів GaAs, легованих телуrom, від поля, а саме, наявність аномально позитивного магнітоопору кристалів при 4,2 К, викликану явищем спін-орбітальної взаємодії носіїв заряду, що походить від домішкової провідності, а також лінійної поведінки магнітоопору в магнітних полях, яка пов'язана з електрон-електронною взаємодією.

2. Встановлено слабку залежність електроопору ниткоподібних кристалів GaAs, легованих телуrom від температури в низькотемпературному діапазоні, що зумовлено переходом від напівпровідникової до псевдометалевої провідності і відповідає переходу метал-діелектрик.

3. Виявлено наявність від'ємного магнітоопору в ниткоподібних кристалах $\text{GaP}_x\text{As}_{1-x}$ і показано, що його причиною є переважання поверхневої провідності, пов'язане із їх структурою ядро-оболонка.

4. Запропоновано використання кристалів $\text{GaP}_{0,4}\text{As}_{0,6}$ в якості температурних датчиків в широкому діапазоні температур з можливістю ви-

мірювання криогенної температури з високою точністю і показано можливість застосування даних зразків в якості термісторів зі зворотним температурним коефіцієнтом опору.

5. Встановлено лінійну залежність електроопору від температури в ниткоподібних кристалах GaAs в широкому діапазоні температур від -120 до $+350$ °C з низьким температурним коефіцієнтом опору, що дозволяє використовувати їх в якості чутливих елементів сенсорів.

Практичне значення результатів даної роботи полягає насамперед в тому, що проведенні дослідження можуть бути використані для серійного виробництва тензорезисторів на основі ниткоподібних кристалів GaAs, які характеризуються високими значеннями тензочутливості, слабкою температурною залежністю їх коефіцієнта тензочутливості та низькою зміною опору і температурної залежності опору при повторних циклах нагрівання і охолодження у широких діапазонах робочих температур і деформацій з покращеними експлуатаційними параметрами у порівнянні з існуючими.

Загальна оцінка роботи

Дисертація Чемериса Д. В. є завершеною роботою, яка містить нові, науково обгрунтовані результати цілеспрямованих комплексних досліджень, викладені на 126 сторінках машинопису в 5 розділах.

В першому розділі дисертації “Стан проблеми щодо дослідження властивостей та застосування ниткоподібних кристалів GaAs” проаналізовано дослідження щодо розроблення пристроїв на основі напівпровідникових ниткоподібних кристалів, описано принципи роботи пристроїв, основа роботи яких лежить в магнітотранспортних та п’єзоелектричних процесах. Описано методи вирощування ниткоподібних кристалів GaAs хімічним осадженням з парової фази і методом хімічних транспортних реакцій, та оцінено фактори впливу, що змінюють відтворюваність отриманих кристалів. Проаналізовано явища, котрі проявляються при дослідженні магнітотранспортних властивостей ниткоподібних кристалів GaAs та фізична природа їх п’єзоопору. Показано, що даний напрямок є перспективним і актуальним для розвитку напівпровідникової електроніки і сформульовані основні задачі дослідження.

Другий розділі дисертаційної роботи “Технологічні аспекти створення ниткоподібних кристалів арсеніду галію: методика та засоби

дослідження” є традиційно методологічним. В ньому описано способи вирощування ниткоподібних кристалів методом хімічних транспортних реакцій та хімічним осадженням з парової фази. Описані етапи формування, та параметри отриманих ниткоподібних кристалів GaAs і GaPAs, які використовувалися в дослідженнях, а також методи створення омичних контактів та вимірювань опору при криогенних температурах та під дією сильних магнітних полів. Описана методика дослідження електро- та магнітотранспортних характеристик ниткоподібних кристалів.

В третьому розділі “Магнітотранспортні властивості ниткоподібних кристалів GaAs” наведено результати комплексних досліджень впливу температури і магнітного поля на властивості ниткоподібних кристалів GaAs з метою розробки перетворювачів фізичних величин, що будуть дієздатні у складних умовах експлуатації. Зокрема, досліджено магнітотранспортні характеристики ниткоподібних кристалів GaAs, їх спін-орбітальну взаємодію, слабку локалізацію, лінійний магнітоопір і температурну залежність електроопору. В результаті проведених досліджень показано, що залежність магнітоопору від поля в ниткоподібних кристалах GaAs складається з двох частин, а температурна залежність електроопору в діапазоні температур від 4,2 до 140 К має дві області: лінійну та квазілінійну. Встановлено, що аномальний позитивний магнітоопір та магнітоопір ниткоподібних кристалів GaAs при слабкому полі та низькій температурі виникають внаслідок спін-орбітальної взаємодії носіїв заряду, що походить від домішкової провідності в області переходу метал-діелектрик.

В четвертому розділі дисертації “Магнітотранспортні властивості ниткоподібних кристалів GaPAs” описано результати експериментального дослідження магнітотранспортних властивостей ниткоподібних кристалів GaPAs, зокрема, досліджено явище від’ємного магнітоопору та описано застосування результатів для створення температурних датчиків. Встановлено ефект від’ємного магнітоопору досліджуваних кристалів із концентрацією легування 10^{18} см^{-3} , що відповідає діелектричній стороні переходу метал-діелектрик в широкому температурному діапазоні від 4,2 до 60 К. Показано, що поведінка магнітоопору слабо легованих ниткоподібних кристалів $\text{GaP}_{0,4}\text{As}_{0,6}$ змінюється зі збільшенням магнітного поля та стає позитивною при великих значеннях магнітного поля, що дозволяє отримати значення критичного магнітного поля переходу. Запропоноване пояснення дослі-

дженого від'ємного магнітоопору за допомогою механізмів квантування носіїв заряду в ниткоподібних кристалах GaPAs, магнітного упорядкування як наслідку спінової взаємодії електронів та через неконтрольоване введення магнітних домішок у зразки і квантової взаємодії хвильової функції електронів.

В п'ятому розділі дисертації “Дослідження тензорезистивних властивостей ниткоподібних кристалів GaAs” представлено результати досліджень властивостей деформації ниткоподібних кристалів GaAs в широкому діапазоні температур та деформацій. Досліджено залежності відносної зміни опору від деформації розтягу для кристалів з різним питомим опором, та наведені максимальні значення коефіцієнта тензочутливості для ниткоподібних кристалів GaAs *n*- і *p*-типу. Показано, що коефіцієнт тензочутливості для сильнолегованих кристалів квазістабільний у широкому діапазоні температур. Встановлено, що відтворюваність електроопору для вільних стрічкових кристалів в досліджуваному діапазоні температур не гірша 1 %, а чутливість до деформації цих кристалів також не змінює свого значення, що свідчить про високу реверсивність. Наведено таблицю з основними параметрами розроблених тензорезисторів. Проведено порівняння характеристик датчиків на основі ниткоподібних кристалів GaAs з датчиками на основі GaSb і показано, що датчики на основі ниткоподібних кристалів GaAs володіють покращеними характеристиками і їх доцільно використовувати для створення тензорезисторів.

Ступінь обґрунтованості та достовірність наукових положень і висновків дисертаційної роботи

Основні результати дисертаційного дослідження повністю опубліковані у фахових наукових періодичних виданнях, широко обговорювалися за участю автора на профільних наукових конференціях міжнародного рівня. Для проведення досліджень автор використав сучасні, добре апробовані й адекватні до задач, що вирішуються, технологічні й експериментальні методики. У тій частині проведених досліджень, де результати автора перекриваються з відомими літературними даними, вони добре узгоджуються з ними. Все вищезазначене забезпечує **обґрунтованість** та **достовірність** одержаних наукових результатів та сформульованих на їхній основі висновків дисертаційної роботи.

Апробація роботи проходила на авторитетних наукових форумах. Публікації автора в наукових журналах та матеріалах конференцій відображають суть виконаних досліджень та представлених в дисертації результатів.

Анотація дисертації повністю відповідає її змісту, вона адекватно передає основні наукові результати дисертанта.

Зауваження щодо дисертаційної роботи

Попри те, що у дисертаційному дослідженні Чемериса Д. В. одержано низку цікавих і важливих наукових і практичних результатів, сама робота не позбавлена певних вад. До таких, на мою думку, можна віднести наступні.

1. В п. 2.2 дисертації автор детально описує проблеми формування омичних контактів до ниткоподібних кристалів GaAs і представляє методику формування електричних контактів за допомогою імпульсного струму. Проте не вказано конкретних переваг і недоліків даного методу, а також не вказано матеріал, або ряд матеріалів, які використовувались для створення омичних контактів.
2. В п. 2.3 роботи (с. 66) вказано, що при моделюванні роботи сенсорів та обробці результатів експерименту використовувалось сучасне програмне забезпечення, однак не вказано, яке саме програмне забезпечення було застосоване.
3. На рис. 3.1 дисертації (с. 70) продемонстровано скачкоподібну зміну магнітоопору в ниткоподібних кристалах GaAs при температурі 4,2 К, і вказано, що при вищих температурах така залежність стає лінійною. Бажано було б визначити температурний поріг такої зміни, тобто провести вимірювання в температурному інтервалі між 4,2 і 13 К.
4. На рис. 5.1 і 5.2 дисертації (с. 91, 92) не вказана розмірність деформаційного розтягу.
5. В таблиці 5.1 (с. 95) детально висвітлені значення робочих параметрів тензорезисторів на основі GaAs, а в таблиці 5.2 (с. 101) представлено порівняння характеристик тензорезисторів на основі GaAs і GaSb, однак відсутні порівняння з існуючими сенсорами інших авторів.
6. В дисертаційній роботі для позначення температури використовуються як градуси Кельвіна, так і градуси Цельсія. З огляду на те, що основною

одиницею в системі СІ є градуси Кельвіна, то саме ці одиниці слід було б використовувати в дисертації.

7. Дисертаційна робота Чемериса Д. В. написана грамотно і в доступному стилі. До недоліків можна віднести поодинокі стилістичні огріхи та описки.

Однак ці зауваження не мають вирішального впливу на загальну позитивну оцінку дисертації та не применшують її наукової та практичної цінності.

Все вище сказане дозволяє зробити висновок, що представлена дисертаційна робота «Електрофізичні та магнітотранспортні характеристики ниткоподібних кристалів GaAs для сенсорної електроніки» є завершеною науково-дослідницькою роботою, яку виконано на високому науковому рівні із застосуванням сучасних експериментальних методів і повністю відповідає вимогам Департаменту атестації кадрів Міністерства освіти і науки України щодо робіт на здобуття наукового ступеня доктора філософії, а її автор, Чемерис Дмитро Вікторович, заслуговує присвоєння йому наукового ступеня доктора філософії за спеціальністю 153 «Мікро- та наносистемна техніка».

Офіційний опонент, доктор технічних наук, професор, завідувач кафедри загальнотехнічних дисциплін Львівського національного університету ветеринарної медицини та біотехнологій імені С.З. Гжицького

Б.Р. Ціж

Підпис проф. Б.Р. Ціжа завіряю

Вчена секретарка Львівського національного університету ветеринарної медицини та біотехнологій імені С. З. Гжицького кандидатка сіл.-госп. наук, доцентка



І.М. Сливка