

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 **Чемериса Дмитра Вікторовича «Електрофізичні та магнітотранспортні характеристики ниткоподібних кристалів GaAs для сенсорної електроніки»**, поданої на здобуття наукового ступеня доктора філософії за спеціальністю 153 – мікро- та наносистемна техніка, галузі знань 15 - Автоматизація та приладобудування.

Актуальність теми дисертації. Важливим напрямом сучасної мікро- та наносистемної техніки є створення нових сенсорних пристроїв, елементів мікросистем-на-кристалі, особливо для жорстких умов експлуатації є створення цього типу сенсорних елементів. Створення цього сенсорів вимагає застосування нових матеріалів і відповідного вивчення та дослідження їх властивостей для оцінки можливостей створення цього типу пристроїв. Одним із перспективних матеріалів для цієї мети є використання ниткоподібних кристалів арсеніду галію.

Дисертаційні дослідження спрямовані на важливі науково-прикладні завдання, а саме: проведення комплексних досліджень електро- та магнітотранспортних властивостей у широкому інтервалі досліджуваних температур $1,4 \div 300$ К та магнітних полів з індукцією $0 \div 14$ Тл, для підтвердження можливостей створення пристроїв сенсорної електроніки; розширенню фізичних уявлень щодо механізмів переносу носіїв заряду за низьких температур та деформаційно-стимульованих ефектів у НК арсеніду галію.

Тому вирішення цих завдань є актуальними і відповідно дисертаційна робота Чемериса Д. В. є сучасною та актуальною.

Необхідними і важливими є дослідження характеру змін електро- та магнітотранспортних властивостей ниткоподібних кристалів під впливом зовнішніх полів, для прогнозування зміни характеристик напівпровідникових матеріалів і їх використання у сенсорній електроніці; дослідження характеристик чутливих елементів сенсорів механічних, теплових і магнітних величин під впливом зовнішніх полів; є необхідними розроблення концепції та створення пристроїв сенсорної мікроелектроніки на основі легованих ниткоподібних кристалів GaAs, що будуть дієздатні у складних умовах експлуатації, таких, як криогенні температури та сильні магнітні поля.

Тому й дисертація Чемериса Д.В., яка присвячена дослідженням доз легування, впливу низьких температур та сильних магнітних полів на їх властивості і майбутніх сенсорних приладів є сучасною та **актуальною науково-прикладною задачею** і присвячена встановленню закономірностей зміни магнітотранспортних та електротранспортних характеристик ниткоподібних кристалів арсеніду галію, при різних

рівнях домішкового легування поблизу переходу метал-діелектрик під ефективним впливом зовнішніх полів (магнітного поля, температури та деформації) для створення сенсорів фізичних величин, дієздатних у складних умовах експлуатації.

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 стан проблеми щодо створення сенсорних пристроїв на основі напівпровідникових ниткоподібних кристалів, щоб зрозуміти принципи роботи пристроїв, основа роботи яких лежить в магнітотранспортних та п'єзоелектричних процесах. Проаналізовано методи вирощування ниткоподібних кристалів GaAs хімічним осадженням з парової фази і методом хімічних транспортних реакцій, проведено оцінку факторів впливу, що змінюють відтворюваність отриманих кристалів. Описані явища, котрі проявляються при дослідженні магнітотранспортних властивостей НК GaAs. Проаналізована фізична природа п'єзоопору ниткоподібних кристалів арсеніду галію.

У **другому розділі** наведено методику проведення досліджень. Описано технологію, 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. Описано методи створення омичних контактів, та вимірювань опору при криогенних температурах (4,2 К) та під впливом сильних магнітних полів (до 14 Тл).

У **третьому розділі** подано результати проведених досліджень впливу температури і магнітного поля на властивості НК GaAs з метою розробки сенсорних елементів фізичних величин, для у складних умовах експлуатації. Досліджено особливості магнітоопору зразків при різній концентрації легуючої домішки в магнітних полях з індукцією $0 \div 14$ Тл, та при температурі від 4,2 до 77 К. Розкрито особливості перенесення носіїв заряду в низькотемпературних характеристиках зразків. Виявлено аномально позитивний магнітоопір кристалів при 4,2 К при дуже низькому магнітному полі з індукцією до 0,2 Тл, та лінійну характеристику магнітоопору у магнітному полі при збільшенні його індукції.

Четвертий розділ присвячений комплексним дослідженням впливу температури і магнітного поля на властивості НК GaPAs з метою розроблення сенсорних елементів перетворювачів фізичних величин, для складних умовах експлуатації. Досліджено

магнітоопору зразків при різній концентрації легуючої домішки в магнітних полях з індукцією $0 \div 14$ Тл і температурах від 4,2 до 77 К. Продемонстровано, що характер залежностей магнітоопору $\Delta R_B/R$ під дією магнітного поля B значно відрізняється для зразків із зростанням температури. При вищих температурах від 10 до 60 К спостерігається від'ємний магнітоопір (ВМО) максимальне значення якого сягає 7% за індукції магнітного поля 4,5 Т та температурі 4,2 К. Проведено порівняння в поведінці магнітоопору ниткоподібних кристалів $\text{GaP}_x\text{As}_{1-x}$ ($x = 0.4$) та InSb для якісного аналізу механізму появи від'ємного магнітоопору. Визначено ймовірні причини появи цих ефектів і запропоновано альтернативне пояснення спостереженого явища від'ємного магнітоопору (ВМО) переважанням провідності на поверхні зразка через структуру ядро-оболонка кристала. Запропоновано використання кристалів в якості точних температурних датчиків в широкому діапазоні температур, та наведено криву калібрування температурного датчика на основі кристалів GaPAs .

П'ятий розділ містить результати досліджень властивостей деформації НК кристалів GaAs в широкому діапазоні температур ($-120 \div 300$ °C) та деформацій $\pm(1 \times 10^{-5} \div 1 \times 10^{-3}$ відносних одиниць). Досліджено залежності відносної зміни опору від деформації розтягу для кристалів з різним питомим опором, та наведені максимальні значення коефіцієнта тензочутливості для НК GaAs n і p – типів. Показано, що коефіцієнт тензочутливості для сильнолегованих кристалів мало від температури у широкому діапазоні температур (для НК GaAs p – типу з питомим опором 0,001-0,002 Ом·см температурний коефіцієнт тензочутливості становить $-(0,02 \div 0,03)\% \cdot \text{град}^{-1}$ в діапазоні температур від -120 до +3500C). Наведено основні параметри розроблених тензорезисторів.

Достовірність та обґрунтованість отриманих дисертантом Для дослідження електро- та магнітотранспортних властивостей кристалів GaAs застосовували сучасні методи АСМ та електронної мікроскопії, зокрема, мікроскоп АФМ ІФН НАНУ у місті Київ та СЕМ Hitachi SEM S806, JEOL JSM-U3. Електричний опір ниткоподібних кристалів GaAs при низьких температурах проводили у гелієвому кріостаті типу ГКОП за допомогою сучасних цифрових метрологічних приладів, таких як Keithley 224, Keithley 2010. Дослідження магнітотранспортних характеристик НК виконувалась у режимах DC та AC, які забезпечували ідентичні результати, свідчаючи про уникнення паразитних термо-е.р.с. ефектів, різниці потенціалів на контактах та можливих деформаційних напружень у зоні контакту кристалів. Це відкриває перспективи їх використання для створення чутливих елементів сенсорів. Вимірювання магнітної сприйнятливості зразків GaAs здійснювалося за допомогою SQUID магнітометра MPMS-XL5 з цифровим з'єднанням з ПК. Магнітоопір зразків при полях від 0 до 14 Тл та кріогенних температурах вивчався з використанням біттерівського та надпровідного магнітів у “Міжнародній лабораторії сильних магнітних полів і низьких

температур” у місті Вроцлав, Польща. Результати дисертації були апробовані на провідних конференціях, опубліковані у відомих виданнях в тому числі у наукометричних базах SCOPUS і WoS, міжнародних конференціях, що індексуються ух наукометричних базах SCOPUS і WoS, тому результати роботи можна вважати повністю обґуньованими і достовірними..

До найсуттєвіших наукових результати роботи слід віднести наступні: В дисертації Чемериса Д.В. основну увагу зосереджено на проведенні комплексних досліджень електро- та магнітотранспортних властивостей НК GaAs, спрямованих на розв’язання науково-прикладних задач зі створення на їх основі високочутливих елементів сенсорів фізичних величин, що може бути використано у створенні сенсорів спеціалізованого призначення. Отримано наступні основні результати: Вперше встановлено кореляцію між електро- та магнітотранспортними характеристиками ниткоподібних кристалів GaAs з різною концентрацією легуючих домішок поблизу переходу метал-діелектрик в широкому діапазоні температур, що дозволяє створити перетворювачі фізичних величин на їхній основі.

Встановлено, що в залежності магнітоопору ниткоподібних кристалів GaAs від поля при 4,2 К в діапазоні магнітних полів від 0,2 до 14 Тл спостерігається лінійна поведінка магнітоопору, яка спричинена зростанням електрон-електронної взаємодії. Ця особливість є цінною для створення сенсорних елементів.

Основне практично-прикладне значення результатів дисертації полягає в тому, що вона має чітку прикладну спрямованість, і на основі проведених досліджень

- розроблено тензорезистори на основі НК GaAs р-типу провідності з відповідним рівнем легування, які характеризуються високими значеннями тензочутливості, слабкою температурною залежністю їх коефіцієнта тензочутливості та низькою зміною опору та температурної залежності опору при повторних циклах нагрівання і охолодження, які рекомендовано для проведення вимірювань у різних діапазонах робочих температур (-120 ÷ +350 0C) і деформацій ($\pm(1 \times 10^{-5} \div 1 \times 10^{-3})$ відн.од.);

- встановлено, що ниткоподібні кристали GaAs можуть бути використані як термістори з високим температурним коефіцієнтом опору в діапазоні температур від 4,2 до 80 К за рахунок зміни опору на кілька порядків величини в цьому діапазоні температур.

- встановлений ефект лінійного магнітоопору у магнітних полях з індукцією від 0,2 до 14 Тл при температурі 4,2 К відкриває перспективи створення на їх основі активних елементів сенсорів магнітного поля.

Значна частина експериментальних результатів може послужити основою для подальшого розвитку напрямку сенсорної електроніки, а саме для низьких температур та сильних магнітних полів.

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

1. Відсутня розшифровка механізму VLS? (стосується вирощування)
2. SOI (spin orbital interaction) (стр.47) перекликається із більш поширеною аббревіатурою SOI (silicon on insulator).
3. На рис.1.14. подано результати комп'ютерного моделювання залежності магнітоопору від кута прикладання поля. Проте не вказано у якому пакеті прикладних програм це зроблено.
4. Термінологія не «Галій арсенід», а «Арсенід галію». (Стр.57.).
5. Відсутні зображення - структур (поперечні перетини) омичних контактів до НК до GaAs, що дозволило б краще розуміння цих елементів сенсорів.
6. Окремі граматичні помилки, напр., Тензорезистори на основі **стрічкових** кристалів, Табл 5.1.
7. Не має в роботі результатів комп'ютерних моделювань, напр., технології формування ниткоподібних кристалів, розроблених структур сенсорних приладів. Невідомо з роботи, чи можливе латеральне вирощування НК (паралельно до кремнієвої пластини, з можливістю інтеграції таких елементів в інтегральні кремнієві технології).

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. Дисертація містить результати власних досліджень. Використання ідей, результатів і текстів інших авторів мають посилання на відповідне джерело.

Загальний обсяг дисертації становить 126 сторінок. Результати дисертації опубліковані у 17 наукових працях, з них 6 статей – у виданнях, що індексуються в міжнародних наукометричних базах даних Scopus 3 статті – у наукових фахових виданнях України 2 статті, 6 публікацій у матеріалах міжнародних і українських наукових конференцій, що підтверджує **повноту висвітлення результатів у наукових працях та особистий внесок здобувача**.

Висновок На підставі вищевикладеного вважаю, що дисертація **Чемериса Д.В. «Електрофізичні та магнітотранспортні характеристики ниткоподібних кристалів GaAs для сенсорної електроніки»**, є завершеною науково-дослідницькою працею, у якій розв'язано актуальне наукове завдання і у якій вперше вирішено науково-технічне завдання зі встановленню закономірностей зміни магнітотранспортних та електротранспортних характеристик НК 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 для складних умовах експлуатації.

За науково-прикладним рівнем виконання дисертації, актуальністю теми, обґрунтованістю і достовірністю наукових досліджень і висновків, науковою новизною, обсягом дисертація відповідає паспорту спеціальності 153 – мікро- та наносистемна техніка і вимогам МОН України, які ставляться до робіт на здобуття наукового ступеня доктора філософії, а її автор, **Чемерис Дмитро Вікторович**, заслуговує присудження наукового ступеня доктора філософії за спеціальністю 153 – мікро- та наносистемна техніка, галузі знань 15 - Автоматизація та приладобудування.

Офіційний опонент

- д.т.н., проф., зав. кафедри комп'ютерної інженерії та електроніки,

Прикарпатського національного університету імені Василя Стефаника

Когут І.Т.

