

## ВІДГУК ОФІЦІЙНОГО ОПОНЕНТА

щодо дисертаційної роботи Щербань Наталії Олексіївни на тему "Контрольована модифікація електрофізичних характеристик кремнієвих мікрокристалів легуванням домішками перехідних металів для сенсорної техніки", представленої на здобуття наукового ступеня доктора філософії за спеціальністю 153 – Мікро- та наносистемна техніка.

**Актуальність теми.** На сьогодні розвиток сучасної магнітоелектроніки визначається станом розроблення пристроїв, в основі роботи яких лежить квантово-розмірні ефекти. Працездатність таких пристроїв на основі металевих гетероструктур, або розбавлених магнетиками напівпровідників забезпечується цілою низкою переваг, а саме збільшення швидкодії, зниження енергоспоживання, можливість створення радіаційно-стійких схем тощо. В той же час, глибоке розуміння взаємного зв'язку між фізичними процесами у ниткоподібних структурах кремнію та їх магніторезистивними властивостями дозволить установити умови формування новітніх матеріалів для чутливих елементів сенсорів і пристроїв мікросистемної техніки зі стабільними, відтворюваними характеристиками, які володіють високою чутливістю до температури або магнітного поля. Проблему створення таких пристроїв можна вирішити під час ґрунтовного всебічного аналізу, в т.ч., який відбувається навіть в екстремальних середовищах, при цьому застосовується високий рівень технології відтворення їх елементної бази, чому саме і присвячена робота Щербань Н.О. Дослідження, результати яких наведені в дисертації, проводились у відповідності з програмою наукової тематики кафедри напівпровідникової електроніки Національного університету «Львівська політехніка» «Сенсори та перетворювальні прилади на основі напівпровідникових та діелектричних матеріалів і гетероструктур. Фізико-хімічні процеси синтезу та контрольованої модифікації властивостей матеріалів функціональної, мікро- та наноелектроніки» (протокол №12 від 17.06.2014) та науково-дослідних робіт, що є частиною комплексно-цільових державних та регіональних програм.

**Наукова новизна отриманих результатів.** Широкий перелік теоретичних і експериментальних досліджень, що проведені в роботі, дозволили автору здобути низку цікавих наукових результатів. Серед них варто виділити такі:

- модифікація магнітними матеріалами при дослідженні електрофізичних та магнітотранспортних характеристик мікрокристалів кремнію, дозволяє отримати глибоке розуміння про вплив легуючої домішки на особливості елетропровідності, а саме,

корелювати низькотемпературні поляризаційні залежності та поведінку магнітоопору кристала;

- результати теоретичних досліджень за допомогою проекційно-доповнених хвиль (PAW) щодо спінової поляризації суперкомірки на основі кремнію, який леговано домішками бору та нікелю, в рамках вакансійного механізму, чи механізму заміщення вказують на асиметрію густини електронних станів, що притаманна електронній системі і проявляється у відмінному від нуля магнітному моменті суперкомірки.
- визначено, що максимальний магнітний момент для суперкомірки  $\text{Si}_{61}\text{B}_1\text{Ni}_1$ , яка реалізована за вакансійним механізмом, становить  $1,16\mu_B$ . Ці результати використано для прогнозування характеристик високочутливих сенсорів магнітного поля з магніторезистивним принципом дії.

Новизна цієї дисертації не вичерпується лише зазначеними "основними, положеннями. Можна відзначити ще цілу низку експериментально виявлених і теоретично обґрунтованих явищ, які забезпечують суттєве підвищення ефективності експлуатаційних характеристик пристроїв.

**Практичне значення результатів.** Необхідно відзначити практичну спрямованість дисертації. Дослідження магнітної сприйнятливості, намагніченості та магнітоопору мікрокристалів кремнію, модифікованих домішкою перехідних металів з практичної точки зору цікаві насамперед тому, що магнітна відповідь цього матеріалу визначає можливість застосування мікрокристалів в сенсорах фізичних величин за впливу зовнішнього магнітного поля. Отримані результати комплексних досліджень, знайдені рішення і розвинуті експериментальні і аналітичні підходи дали змогу автору запропонувати напрями практичних застосувань, серед яких, на мою думку, найважливішими є такі:

На основі сильнолегованих ниткоподібних мікрокристалів кремнію, модифікованих домішкою нікеля, розроблено сенсор магнітного поля з чутливістю  $18\% \cdot \text{Tл}^{-1}$  за температури 4,2 К. Працездатність роботи чутливого елемента сенсора забезпечується значним магнеторезистивним ефектом, який відображається в залежності магнітоопору від індукції магнітного поля, сягаючи 253% при 14 Тл за гелієвих температур.

Використовуючи леговані мікрокристали кремнію, розроблено сенсори теплових величин в інтервалі 4,2–50 К: для розроблення високочутливих сенсорів температури з терморезистивним принципом дії, або височутливих термореле, слід використовувати мікрокристали  $\text{Si}\langle\text{B},\text{Ni}\rangle$  з питомим опором  $\rho_{300\text{K}} = 0.025 \text{ Ом}\cdot\text{см}$ , що відповідає діелектричній області переходу метал-діелектрик. Відносна зміна опору кристалів лежить в межах декількох порядків за температур скрапленого гелію (4,2 К). Температурний коефіцієнт опору

таких зразків сягає  $300\% \times K^{-1}$ . Для терморезистивних сенсорів, створених на основі кристалів з питомим опором  $\rho_{300K} = 0.007 \text{ Ом}\cdot\text{см}$ , працездатних за впливу дестабілізуючих чинників, зокрема магнітного поля, температурний коефіцієнт опору становить  $\text{TKO} = 0.011\% \times K^{-1}$ .

Необхідно також зазначити, що розроблені автором ключові технологічні і технічні рішення захищено патентом України.

**Ступень обґрунтованості наукових положень висновків і рекомендацій.** У роботі розглянуто велике коло питань, що пов'язані між собою єдиною методологією. Сформульовані проблема та мета досліджень. У відповідності з метою досліджень проблема розбивається на ряд складових взаємопов'язаних частин, що визначають основні напрямки досліджень. Наукові положення, висновки і рекомендації які сформульовані в дисертаційній роботі, ґрунтуються на використанні класичних і сучасних методів та основних положень фізики напівпровідників, напівпровідникових приладів, електрофізичного діагностування, тестового контролю. Це дозволило побудувати фізичні моделі, розробити методики досліджень, способи оптимізації для проведення наукових досліджень. Все це і вирішило задачу розробки приладів сенсорної техніки.

**Достовірність отриманих результатів.** Комплекс теоретичних досліджень, які отримані з використанням гібридного обмінно-кореляційного функціоналу РВЕ0 на основі одночастинкового базису функцій РАW щодо розрахунків електронної структури кристалів кремнію, що визначаються густиною електронних станів суперкомірок для різних домішок перехідних металів у системах, підтверджується низкою експериментальних досліджень, проведених на сучасному обладнанні, у тому числі у Міжнародній лабораторії сильних магнітних полів і низьких температур (м. Вроцлав, Польща), Національному університеті «Львівська політехніка», а також застосуванням сучасних фізичних уявлень при інтерпретації отриманих результатів. Окрім цього використання промислового технологічного обладнання, сучасної обчислювальної техніки, методики експериментального дослідження, добрій узгодженості експериментальних даних із теоретичними моделями, які розроблені автором або запозичені з літератури, дозволяють стверджувати, що наукові положення, висновки і рекомендації, які сформульовані в дисертації є достатньо достовірними.

**Публікації результатів роботи, їх обговорення.** Результати досліджень, які описані в дисертації, з необхідною повнотою викладені у 11 наукових працях, з яких у статтях провідних наукових журналах України та за кордоном – 5 (1 стаття у виданнях науково-метричної бази даних Scopus/WoS, яка опублікована в журналі з імпаکت-фактором, що входять до ISI Master Journal List 1-го квартилю, 3 статті у закордонних журналах науково-метричної бази даних Scopus/WoS та 1 стаття у фаховому журналі України, що індексується

НМБД Scopus/WoS), 5 публікацій у матеріалах конференцій (1 з яких входить до видань, що індексовані науково-метричною базою даних Scopus), 1 патент України. Аналіз змісту дисертації та опублікованих автором робіт свідчить про те, що наукові положення, висновки і рекомендації опубліковані в повному об'ємі та обговорені на міжнародних і вітчизняних науково-практичних конференціях. Таким чином робота, яка рецензується, достатньо повно проаналізована і, напевно, позитивно оцінена спеціалістами та науковцями в галузі сенсорної електроніки як в Україні, так і за її межами.

**Робота не позбавлена і недоліків. Відмічу деякі з них:**

1. У першому розділі дисертаційної роботи («Літературний огляд»), з аналізу якого формуються завдання досліджень, недостатньо уваги приділено розгляду наукових публікацій, присвячених розрахунку електронної структури легованих кристалів кремнію, густини електронних станів суперкомірок із різними типами домішок, особливо перехідних елементів. Ці результати були б добрим підґрунтям для опису отриманих даних у третьому розділі дисертаційної роботи («Розрахунок електронної структури напівпровідникових кристалів, легованих домішками перехідних металів»).

2. Декілька зауважень до методичного розділу дисертаційної роботи (Розділ 2):

- у табл. 2.2 (ст.53) авторка роботи подає дані про концентрацію домішок у синтезованих кристалах: 6,3% – Ni; 2,7% – C; 2,2% – O. Цікаво було б дізнатись про роль двох останніх домішок (C, O), локалізація яких в кристалах, на мою думку, зумовлена технологічними проблемами їх вакуумного синтезу.
- доцільно було б подати відомості про концентраційні залежності носіїв заряду у досліджуваних зразках в околі різних переходів (напівпровідник-метал; напівпровідник-діелектрик і т.п.).
- з тексту дисертаційної роботи не видно яким методом розрахунковим чи експериментальним отримана величина концентрації носіїв заряду  $N=4 \times 10^{17} \text{ см}^{-3}$ .

3. Не зрозуміло з якою метою авторка роботи розраховує електронну зонну структуру кремнію і з представниками 7-ми перехідних 3d-елементів, оскільки магнітні моменти у суперкомірці ( $\mu_B$ ) змінюються від 0,002 (Co) до 3,45 (Mn), а  $\mu_B(\text{Ni}) = 1,1$ . Необхідно деталізувати дані про визначення ширини забороненої зони ( $E_g$ ) за результатами теоретичних оцінок енергетичних спектрів із врахуванням спінової поляризації суперкомірок досліджуваних зразків, оскільки набір приведених залежностей цих спектрів не дозволяє точно визначати  $E_g$ .

4. Зустрічаються огріхи в оформленні роботи:

- підписи рисунків не державною мовою;

- жаргонні терміни: «поляризація носіїв заряду», «вільна домішка», «спін вгору», «спін вниз», «вакансійний механізм домішки» і т.п.;
- не всі літературні посилання оформлені згідно вимог;
- стилістичні й граматичні помилки.

Однак, ці критичні зауваження не ставлять під сумнів основні результати та висновки дисертації і не знижують їх загальну оцінку, а можуть виступати рекомендаціями в подальших наукових дослідженнях автора.

Дисертація Щербань Наталії Олексіївни є завершеною працею, в якій отримані нові наукові результати, а також розв'язано науково-прикладну проблему створення елементів сенсорної техніки, що в сукупності є суттєвим для розвитку магнітоелектроніки, оскільки визначають конкретні можливості застосування мікрокристалів кремнію, легованих комплексом домішок, що має важливе значення для сучасної кріоелектроніки, сенсорної мікро- та наносистемної техніки.

Вважаю, що дисертаційна робота на тему "Контрольована модифікація електрофізичних характеристик кремнієвих мікрокристалів легуванням домішками перехідних металів для сенсорної техніки" має науковий інтерес, відповідає всім встановленим вимогам МОН України, а її автор заслуговує присвоєння наукового ступеня доктора філософії за спеціальністю 153 – Мікро- та наносистемна техніка.

Зав. кафедри сенсорної  
та напівпровідникової електроніки  
факультету електроніки  
та комп'ютерних технологій  
Львівського національного  
університету імені Івана Франка

докт. фіз.-мат. наук, проф.

*Павлик Б.В.*

Павлик Б.В.

