

Голові разової спеціалізованої вченої ради
Національного університету «Львівська політехніка»
доктору фіз.-мат. наук, професору
Микитюку З.М.

РЕЦЕНЗІЯ

професора кафедри напівпровідникової електроніки Навчально-наукового інституту телекомунікацій, радіоелектроніки та електронної техніки Національного університету «Львівська політехніка» д.т.н., проф. Бурого Олега Анатолійовича на дисертаційну роботу Щербань Наталії Олексіївни "Контрольована модифікація електрофізичних характеристик кремнієвих мікрокристалів легуванням домішками перехідних металів для сенсорної техніки", представлену на здобуття наукового ступеня доктора філософії в галузі знань 15 «Автоматизація та приладобудування» зі спеціальності 153 «Мікро- та наносистемна техніка»

В умовах стрімкого розвитку інформаційних систем, автоматизації різних видів виробництв необхідність реалізації нових підходів до принципів побудови сенсорів фізичних величин є визначальною. При цьому слід вирішити цілий комплекс важливих з точки зору виробництва проблем, серед яких необхідно відзначити використання відносно простих і, в той же час, прогресивних технологій. В цьому аспекті розбавлені магнетиками напівпровідники є перспективними матеріалами для сучасної магнітоелектроніки (спінтроніки). Завдяки унікальним характеристикам, чільне місце для таких технологій посідають ниткоподібні кристали, завдячуючи високому рівню бездислокаційності, феноменальному рівню міцності, який майже досягає теоретичної межі, низькому рівню споживаної потужності та ін. Дослідження легованих напівпровідникових мікрокристалів з концентрацією домішки в околі переходу метал-діелектрик дозволяє, водночас, сфокусувати погляд на визначений концентраційний інтервал, а також спрогнозувати електро- та магнітотранспортні характеристики при зміні типу провідності. З іншого боку, швидкий розвиток спінтроніки за останній час окреслюється низкою переваг гальваномагнітних приладів, а саме: електрична розв'язка вхідних і вихідних каскадів, моніторинг індукції магнітної поля з високою роздільною здатністю, виготовлення механічних комутаторів, які «не іскрять» у радіоелектричних схемах, безконтактне вимірювання електричних струмів. Вагомою перевагою пристроїв спінтроніки є надвисока швидкодія, що реалізується за рахунок того, що

немає необхідності переміщувати в просторі заряд та зв'язану з ним масу. Для переключення стану достатньо перевернути спін в протилежному напрямку. Всі ці чинники, в основному, визначають актуальність теми дисертаційної роботи Щербань Н.О.

Дисертація містить вступ, чотири розділи, висновки, список використаних джерел, що налічує 170 бібліографічних найменувань. Роботу викладено на 160 сторінках, що містить 86 рисунків та 7 таблиць.

У *вступі* дисертантом на достатньому науковому рівні обґрунтовано вибір теми, її актуальність, визначено мету, завдання, об'єкт, предмет, аргументовано використання обраних методів дослідження. Автор поставив перед собою мету щодо розроблення приладів та пристроїв для спінтроніки та елементів сенсорної техніки. Вважаю, що поставлену мету досягнуто у повній мірі.

У *першому розділі* проаналізовано стан проблеми щодо розроблення пристроїв сучасної спінтроніки на основі напівметалів та напівпровідників в основі роботи яких лежать поляризаційні процеси. Подано відомості щодо елементів функціональної магнітоелектроніки на основі напівпровідникових гетероструктур, в т.ч. особливостей роботи магніторезистивної оперативної пам'яті (MRAM). Показано, що для значного спрощення технології виготовлення приладів слід використовувати розбавлені магнетиками ниткоподібні напівпровідникові кристали (DMS). Завдяки природно утвореній гетероструктурі у кристалах відкриваються можливості виготовлення надшвидких, мініатюрних, технологічно сумісних елементів сенсорної техніки.

У *другому розділі* наведено технологічні аспекти створення легованих мікрокристалів кремнію, методику та засоби їх дослідження. Виходячи з аналізу технології вирощування легованих мікрокристалів Si <B, Ni>, визначено параметри процесу росту для одержання ниткоподібних кристалів Si р-типу провідності з концентрацією донорної домішки, яка відповідає околу переходу метал-діелектрик для дослідження їх електрофізичних, терморезистивних і магнітних властивостей в широкому інтервалі температур за дії деформування та магнітного поля. Для аналізу електронної системи кристалів Si <B, Ni> та отримання додаткової інформації про внутрішню структуру зразків описано методику розрахунку електронного енергетичного стану кристала за допомогою програмно-апаратного комплексу ABINIT та оцінку параметрів електронної підсистеми кристалів методом порівняльного аналізу наборів даних PAW.

Третій розділ присвячений дослідженню та розрахункам електронної структури легованих кристалів Si <B, T>, де $T = \{V, Cr, Mn, Fe, Co, Ni\}$ – перехідні 3d елементи, що оцінювалася за допомогою проекційно доповнених хвиль (PAW). Підхід PAW поєднує в собі особливості

псевдопотенціального та повністю електронного методу розширених плоских хвиль. Розрахунки електронної структури кристала кремнію, легovanого атомами В і Ni, отримані з використанням гібридного обмінно-кореляційного функціоналу PBE0 на основі одночастинкового базису функцій PAW показали, що додавання бору в кремній, легований нікелем, приводить до значного звуження ширини забороненої зони. Результати досліджень електронного енергетичного спектру кристалів на основі кремнію для різних домішок перехідних металів показали, що для електронної DOS притаманна асиметрія, що вказує на відмінний від нуля магнітний момент у суперкомірці. Інтервал магнітного моменту лежить у межах від найменшого $0.002 \mu_B$ для Co до $3.45 \mu_B$ для марганцю Mn. Виявлено, що внаслідок легування домішкою бору та нікелю за вакансійним механізмом магнітний момент суперкомірки на основі кремнію становить $1.1 \mu_B$.

У четвертому розділі представлено результати експериментальних досліджень мікрокристалів кремнію, легованих домішкою бору та модифікованих домішкою перехідного металу нікелю в широкому інтервалі температур ($4.2 \dots 300$ K) та магнітних полів ($0 \dots 14$ Тл). Розроблено та запропоновано ряд приладів і пристроїв мікросистемної техніки. Виявлено, що для розроблення високочутливих сенсорів температури з терморезистивним принципом дії, або височутливих термореле, слід використовувати мікрокристали Si <B, Ni> з питомим опором $\rho_{300K} = 0.025$ Ом \times см, що відповідає діелектричній області переходу метал-діелектрик. Відносна зміна опору кристалів становить кілька порядків за температур скрапленого гелію (4.2 K). Температурний коефіцієнт опору таких зразків сягає $300\% \times K^{-1}$. Окрім того, встановлено, що зразки з питомим опором $\rho_{300K} = 0.007$ Ом \times см з концентрацією носіїв заряду $N_B \approx 1 \times 10^{19}$ см $^{-3}$, що відповідає металевій стороні ПМД, придатні для використання в терморезистивних сенсорах. Температурний коефіцієнт опору таких зразків становить $TKO = 0.011\% \times K^{-1}$. Для температур зрідженого гелію максимальний магнітоопір досягає не більше 4% у магнітних полях з індукцією до 14 Тл. Встановлено, що незважаючи на слабку чутливість до температури в широкому діапазоні, продуктивність терморезистивних датчиків визначається лінійністю характеристик і стійкістю термоелементів до впливу зовнішніх дестабілізуючих факторів.

У додатку до роботи подано акт впровадження її результатів, список публікацій здобувача за темою дисертації та інформацію щодо апробації одержаних практичних результатів.

Матеріали дисертації пройшли необхідну апробацію, обговорювалися на міжнародних наукових конференціях. Основні результати дослідження достатньо повно висвітлені у 11 наукових працях, серед яких у статтях у

провідних наукових журналах України та за кордоном – 5 (1 стаття у виданні науково-метричної бази даних Scopus/WoS, яка опублікована в журналі з імпаکت-фактором, що входить 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. Опубліковані праці повністю висвітлюють матеріали дисертаційної роботи.

Дисертація Щербань Н.О. повністю відповідає паспорту спеціальності 153 «Мікро- та наносистемна техніка».

Не викликає сумніву і практичне значення одержаних результатів. Основні положення, викладені в дисертації, можуть слугувати науковою основою для розроблення нормативних документів щодо впровадження та інтеграції розроблених сенсорів у інформаційно-комунікаційні системи моніторингу довкілля, різноманітні роботизовані автономні комплекси, які можуть застосовуватись під час розмінування, пожежних небезпек тощо.

Підстав для сумнівів у науковій добросовісності і рівні наукової підготовки здобувача під час детального ознайомлення з дисертаційною роботою не виявлено. Узгодженість тексту дисертації із науковими працями дисертанта, що пройшли, зокрема, множинне рецензування, свідчить про відсутність ознак фальсифікації. Проведений аналіз основних ідей та методів, дотичних до тематики інших робіт, містить відповідні посилання.

Позитивно оцінюючи наукове і практичне значення дисертаційної роботи, повинен відзначити, що мають місце деякі зауваження та побажання дискусійного характеру:

1. Зрозуміло, що проблема створення розбавлених магнетиками напівпровідників інтенсивно обговорюється науковою громадськістю з початку 2000 років. З цього приводу хотілось би побажати дисертанту спиратись на відомі публікації цього напрямку, більш сучасні, які відповідають сьогоденним проблемам.
2. Проведений аналіз щодо стану проблеми під час розроблення пристроїв магнітоелектроніки на основі напівметалів та напівпровідників (розділ 1) містить значну кількість даних щодо працездатності таких приладів, їх технологічні особливості виготовлення, режими роботи тощо. Можливо, варто було б обмежитись значно меншою номенклатурою розглянутих пристроїв і значно скоротити представлений матеріал.
3. Технологічний розділ (розділ 2) містить численні методики щодо вирощування, вимірювання, створення напружено-деформованого стану мікрочастин кремнію тощо. Доцільно було б значно обмежити поданий матеріал, спираючись на цитування у відкритому друці.
4. Присутні незначні стилістичні та граматичні помилки.

Проте, висловлені зауваження і побажання не знижують загальної високої оцінки проведеного дослідження.

Аналіз дисертації та опублікованих праць дає підстави для надання висновку про те, що дисертація Щербань Наталії Олексіївни на тему «Контрольована модифікація електрофізичних характеристик кремнієвих мікрокристалів легуванням домішками перехідних металів для сенсорної техніки» є завершеною, самостійно виконаною науковою працею, що має вагомe теоретичне і прикладне значення. У дисертації розв'язано конкретне наукове завдання - розроблення нових підходів до синтезу і контрольованої модифікації функціональних наноматеріалів, легованих перехідними металами на основі ниткоподібного кремнію *p*-типу провідності та встановлення закономірностей зміни їх характеристик під впливом зовнішніх збурень для спінтроніки та елементів сенсорної техніки в цілому, що, зокрема, має важливе значення для галузі знань 15 Автоматизація та приладобудування. Дисертація відповідає вимогам наказу МОН України № 40 від 12.01.2017р. «Про затвердження вимог до оформлення дисертації», вимогам освітньо-наукової програми, яку успішно завершив здобувач, вимогам Порядку присудження ступеня доктора філософії та скасування рішення разової спеціалізованої вченої ради закладу вищої освіти, наукової установи про присудження ступеня доктора філософії (затвердженого Постановою Кабінету Міністрів України від 12 січня 2022 р. № 44), а її автор – Щербань Наталія Олексіївна – може бути рекомендована для присудження, за умови розгляду разовою спеціалізованою вченою радою рецензованої дисертаційної роботи, ступеня доктора філософії зі спеціальності 153 «Мікро- та наносистемна техніка».

Професор кафедри
напівпровідникової електроніки
Національного університету
«Львівська політехніка»
д.т.н., проф.



Бурий О.А.

Підпис д.т.н., професора Буриго О.А. засвідчую

Вчений секретар
Національного університету
«Львівська політехніка»
к.т.н., доцент



Брилинський Р.Б.