

ВІДГУК ОФІЦІЙНОГО ОПОНЕНТА

щодо дисертаційної роботи Ховерка Юрія Миколайовича на тему "Розроблення елементів сенсорної техніки на основі структур кремній-на-ізоляторі та мікрокристалів кремнію, модифікованих домішками бору і нікелю представленої на здобуття наукового ступеня доктора технічних наук за спеціальністю 05.27.01-твердотільна електроніка.

Актуальність теми. Суттєвий інтерес до вивчення структурних та фізичних властивостей напівпровідникових матеріалів призводить до створення нового покоління надмініатюрних швидкодіючих приладів і систем обробки інформації, принцип дії яких заснований на квантово-розмірних ефектах. Глибоке розуміння взаємного зв'язку між фізичними процесами у плівкових та ниткоподібних структурах кремнію та їх I електрофізичними, магніторезистивними властивостями дозволить установити умови формування матеріалів для чутливих елементів сенсорів і пристроїв мікросистемної техніки зі стабільними, відтворюваними характеристиками, які володіють високою чутливістю до деформації, температури або магнітного поля. Однак на сьогоднішній день, не дивлячись на велику кількість і інтенсивність досліджень спостерігається недостатня вивченість фізичних явищ та процесів, які протікають в твердих тілах, що і стримує широке їх застосування в приладах нанoeлектроніки. Однією з причин великого комерційного потенціалу напівпровідників на основі кремнію є те, що вони можуть виготовлятися швидко, дешево і у великих кількостях, а також, завдяки поєднанню провідних властивостей з термостійкістю, механічними та магнітними властивостями, вони є перспективним класом матеріалів для створення пристроїв мікро- та нанoeлектроніки. Для практичного використання даних матеріалів існує необхідність вдосконалення технології створення мікроструктур кремнію за рахунок поєднання структур кремній-на-ізоляторі та мікрокристалів кремнію, що має важливе значення для розвитку сучасної, сенсорної мікро- та наносистемної техніки, чому саме і присвячена робота Ховерка Ю.М.

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:

- встановлено зв'язок та виявлено кореляцію між особливостями змін електрофізичних та магнітних властивостей В широкому інтервалі температур мікрочисталів кремнію та структур кремній-на-ізоляторі на основі полікристалічного та ниткоподібного кремнію, легованих до концентрацій в околі переходу метал-діелектрик, які покладені в основу концепції розроблення та прогнозування характеристик сучасних приладів твердотільної електроніки:

- на основі експериментальних та теоретичних досліджень температурних залежностей провідності та магнітоопору виявлено, що у легованих мікрочисталах та структурах кремній-на-ізоляторі характер провідності може бути представлений у відповідності до закону Мотта згідно якого магнітне поле, за якого магнітоопір переходить від від'ємного до додатнього, пропорційне до температури спостереження як $\sim T^{3/8}$, який вказує на стрибкоподібний характер провідності в таких зразках за низьких температур, що використано для створення елементів сенсорної техніки;

- виявлено кореляцію між гістерезисом магнітоопору в ниткоподібних кристалах кремнію, модифікованих домішками бору і нікелю та гістерезисом їх намагніченості, що описується моделлю, згідно якої відбувається спінова поляризація магнітних домішок та утворенням магнітних перколяційних кластерів, що враховано для розроблення сенсорів магнітного поля;

- на основі аналізу характеру електропровідності полікристалічного кремнію в КНІ-структурах показано, що електропровідність дрібнозернистих зразків за криогенних температур змінюється стрибкоподібно і зумовлена стрибками по двічі зайнятих станах локалізованих домішкових рівнів, що лягло В основу створення надчутливих сенсорів температури криогенних середовищ.

Новизна цієї дисертації не вичерпується лише зазначеними 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 даної дисертаційної роботи. Насамперед це стосується того, що запропоновані рішення є "технологічно-сумісними" з точки зору масового

виробництва. 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: результати досліджень використано для створення елементів сенсорної техніки, а також приладів, виготовлених за рахунок поєднання технологій створення структур кремній-на-ізоляторі та мікрокристалів кремнію, що є сумісною із сучасною технологією кремнієвих чипів; на основі структур кремній-на-ізоляторі та ниткоподібних кристалів кремнію розроблено і виготовлено сенсори механічних величин для криогенних температур: з $K=-15500$ в інтервалі 4,2-50 К, з $K=325$ в інтервалі 4,2-300 К; використовуючи леговані мікрокристали кремнію та структури кремній-на-ізоляторі, розроблено і виготовлено сенсори теплових величин для різних інтервалів температури: з $TKO \approx -9\% \times K^{-1}$ в інтервалі 4,2-50 К на основі полі-Si та $0,4 \%/K^{-1}$ для діапазону 77-280 К на основі мікрокристалів кремнію; результати досліджень імпедансної спектроскопії легованих мікрокристалів кремнію та структур кремній-на-ізоляторі лягли в основу створення як дискретних елементів сенсорної техніки (індуктивні, ємнісні), так і комбінованих (коливальні контури), реалізація яких передбачає використання суміщених технологій.

Необхідно також зазначити, що розроблені автором ключові технологічні і технічні рішення захищені 8 патентами на винаходи.

Ступінь 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, способів і методів формування функціональних шарів в КНІ-структурах. Все це і вирішило задачу розробки приладів сенсорної електроніки.

Достовірність отриманих результатів. Теоретичні положення підтверджені результатами багатьох експериментальних досліджень, зокрема, результатами вимірювання електрофізичних параметрів зразків легованих мікрокристалів кремнію та структур кремній-на-ізоляторі за низьких температур на змінному та постійному струмах, що проводили у гелієвих кріостатах за спеціально розробленою методикою з використанням сучасних цифрових метрологічних засобів. Магнетоопір мікрокристалів за низьких температур досліджували за допомогою біттерівських та надпровідних магнітів у Міжнародній лабораторії сильних магнітних полів та низьких температур (м. Вроцлав, Польща)

Крім 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 105 наукових працях, з яких у монографіях - 2; в статтях у фахових наукових журналах- 50, з яких 16 - у виданнях науково-метричної бази даних Scopus, з них 7 в журналах з імпаکت-фактором, що входять до ISI Master Journal List, а також в 45 публікаціях у матеріалах міжнародних конференцій і 8 патентах України. Опубліковані праці дають змогу простежити шлях від постановки задач до алгоритму їх вирішення й отримання результатів досліджень. 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. Автореферат дисертаційної роботи відповідає її змісту та опублікованим роботам.

Робота не позбавлена і недоліків. Відмічу деякі з них:

1. У дисертації (розділ 4, ст.146) та авторефераті (ст. 12) наведено дані, щодо впливу одновісної деформації на температурні залежності реактивної складової

опору ниткоподібних кристалів з різним ступенем наближення до переходу метал-діелектрик. Виявлені характерні особливості низькотемпературної провідності у запропонованій моделі автор пов'язує з проявом поверхневої провідності у кристалах, Однак необхідно було б навести більше експериментальних даних щодо приповерхневого механізму перенесення носіїв заряду.

2. Автор дисертації, при аналізі та розрахунку параметрів стрибкової провідності ниткоподібних мікро- і нанокристалів кремнію не приводить даних про ступінь компенсації, яка є необхідною умовою для забезпечення стрибкової провідності в класичному випадку.

3. В процесі вирощування зразків ниткоподібного кремнію а також лазерної перекристалізації сильно легованого полі кремнію можуть виникати просторові флуктуації концентрації заряджених домішок. На жаль, в роботі дане питання не обговорюється.

4. З експериментальних досліджень, наведених автором під час розроблення сенсорів деформації на основі мікрокристалів кремнію, працездатних в умовах змінного струму, не спостерігається чіткого розмежування щодо використання уявної чи дійсної складової опору, адже при реалізації пристроїв, працездатність яких обумовлена виділенням тільки реактивної складової опору, призведе до значної економії ресурсів споживання за рахунок зменшення розсіяного джоулевого тепла.

5. У роботі наведено пункти висновків, які відображають фундаментальність досліджень (п.2,3,4). Для практичної реалізації досліджень було б доцільно конкретизувати, для яких саме технічних вирішень, розроблення пристроїв тощо служать отримані фундаментальні результати.

6. У розділі 3 не наведено даних щодо залежності коефіцієнта тензочутливості у полікристалічному кремнії, який опромінений високоенергетичними електронами, адже це важливо з точки зору розроблення сенсорів деформації, працездатних в складних умовах експлуатації.

7. В дисертації відсутні графічні зонні діаграми, що наглядно пояснюють механізми низькотемпературного транспорту носіїв по домішкових зонах.

8. Зустрічаються огріхи і в оформленні роботи. Існують посилання на номери рисунків, які відсутні в дисертації. В літературних посиланнях зустрічається деяка невідповідність до правил бібліографічних скорочень.

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

Дисертація Ховерка,Юрія Миколайовича 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 електроніки, оскільки визначають конкретні можливості застосування структур кремній-на-ізоляторі та мікрокристалів кремнію, що має важливе значення для сучасної кріоелектроніки, сенсорної мікро- та наносистемної техніки.

Вважаю, що дисертаційна робота на тему "Розроблення елементів сенсорної техніки на основі структур кремній-на-ізоляторі та мікрокристалів кремнію, модифікованих домішками бору і нікелю " має науковий інтерес, відповідає всім встановленим вимогам МОН України, а її автор заслуговує присвоєння наукового ступеня доктора технічних наук за спеціальністю 05.27.01-твердотільна електроніка.

Чл.-кор. НАН України
д.ф.м.н., професор

В.С. Лисенко

Підпис В.С. Лисенко засвідчую:
вчений секретар ІФН ім. В.Є.Лашкарьова
НАН України,
докт. хім. наук



В.М. Томашек