

## ВІДЗИВ

офіційного опонента на дисертаційну роботу Ховерка Юрія Миколайовича на тему "Розроблення елементів сенсорної техніки на основі структур кремній-на-ізоляторі та мікрокристалів кремнію, модифікованих домішками бору і нікелю", поданої на здобуття наукового ступеня доктора технічних наук за спеціальністю 05. 27. 01 - твердотільна електроніка

### **1. Актуальність теми дисертації**

Подальший розвиток мікроелектроніки, який перейшов у наноелектроніку, викликав широкий спектр досліджень квантово-розмірних ефектів як в класичних напівпровідникових матеріалах, таких як кремній, так і в новітніх гетероструктурованих нанокompозитних матеріалах, що дало можливість отримання у них нових невідомих досі властивостей. Одним із таких напрямків є дослідження фізичних процесів квантового перенесення носіїв заряду в структурах кремній-на-ізоляторі та мікрокристалів кремнію, модифікованих домішками бору і нікелю, що лягло в основу вирішення проблеми розбудови нового класу приладів мікро- та наноелектроніки, таких як сенсори деформації, сенсори температури, сенсори магнітного поля, сенсори прискорення, індуктивні та ємнісні елементи з унікальними характеристиками в дуже широкому діапазоні температур. Тому дисертаційна робота Ю. М. Ховерка, яка направлена на вирішення вище згаданої проблеми, безумовно, є актуальною.

### **2. Достовірність та обґрунтованість наукових результатів та висновків дисертаційної роботи**

Достовірність та обґрунтованість наукових результатів та висновків дисертаційної роботи Ю. М. Ховерка забезпечується коректним використанням фізичних та математичних методів дослідження, що підтверджено результатами експериментальних перевірок.

### **3. Наукова новизна роботи**

Наукова новизна дисертаційної роботи Ю. М. Ховерка полягає в тому, що в ній вперше встановлено зв'язок та виявлено кореляцію в широкому інтервалі температур між особливостями зміни електрофізичних та магнітних властивостей мікрокристалів кремнію та структур кремній- на ізоляторі на основі полікристалічного та ниткоподібного кремнію, легованих до концентрацій в околі ПМД, які покладені в основу концепції розроблення та прогнозування характеристик сучасних приладів твердотільної електроніки. Серед найбільш значимих наукових результатів, отриманих в дисертаційній роботі, слід віднести:

- на основі експериментальних та теоретичних досліджень температурних залежностей провідності та магнетоопору виявлено, що у легованих мікрокристалах та структурах кремній-на-ізоляторі характер зміни провідності з температурою може бути представлений у відповідності до закону Мотта, згідно якого значення магнітного поля, за якого магнетоопір змінює знак з



від'ємного на додатній, пропорційне до температури як  $T^{3/8}$ , що вказує на стрибкоподібний характер провідності в таких зразках за низьких температур і це використано для створення елементів сенсорної техніки;

- виявлено зв'язок між гістерезисом магнетоопору та намагніченості в ниткоподібних кристалах кремнію, легованих домішками бору і нікелю, що описується моделлю, згідно якої відбувається спінова поляризація магнітних домішок та утворення перколяційних кластерів, що є основою розроблення сенсорів магнітного поля;

- встановлено, що характер уявної складової імпедансу полікристалічного кремнію в КНІ-структурах та ниткоподібних кристалах кремнію залежить від ступеня наближення до ПМД: в області гелійових температур у зразках з діелектричного боку переходу встановлено ємнісний характер імпедансу, проте у зразках, концентрація в яких відповідає металевій області стосовно ПМД, спостерігається індуктивний характер імпедансу, що слугує фундаментом для створення елементів твердотільної електроніки;

- з аналізу характеру електропровідності полікристалічного кремнію в КНІ-структурах показано, що електропровідність дрібнозернистих зразків за криогенних температур змінюється стрибкоподібно і зумовлена стрибками по двічі зайнятим станам локалізованих домішкових рівнів, що покладено в основу створення надчутливих сенсорів температури для криогенних середовищ;

- виходячи з аналізу імпедансної спектроскопії для зразків полікремнію в КНІ-структурах після лазерної рекристалізації з концентрацією носіїв заряду  $n_{300\text{K}} = 4,8 \times 10^{18} \text{ см}^{-3}$  виявлено комбіновані механізми струмопротікання за низьких температур, які в залежності від температури спостереження проявляються у переході від закону Мотта до перколяційного механізму Шкловського-Ефроса, що є основою створення реактивних елементів твердотільної електроніки;

- набув подальшого розвитку фізичний механізм струмопротікання для легованих мікрокристалів кремнію, який пояснює домінуючу роль приповерхневого перенесення носіїв заряду за рахунок перерозподілу енергії пасткових станів внаслідок деформування, що важливо для створення сенсорів механічних величин.

#### **4. Практичне значення одержаних результатів**

Практичне значення одержаних результатів полягає у тому, що результати досліджень використано для створення як елементів сенсорної техніки, так і приладів мікроелектроніки:

- на основі структур кремній-на-ізоляторі та ниткоподібних кристалів кремнію розроблено і виготовлено сенсори механічних величин для криогенних температур, причому для температур 4,2-50 К з коефіцієнтом тензочутливості  $K=15500$ , а для температур 4,2-300 К з коефіцієнтом тензочутливості  $K=325$ ;

- при використанні легованих мікрокристалів кремнію та структури кремній-на-ізоляторі розроблено і виготовлено сенсори теплових величин температури з  $\text{TKO} \approx 9\% \times \text{K}^{-1}$  в інтервалі 4,2-50К на основі полі-Si та  $0,4\% \times \text{K}^{-1}$  для діапазону 77-280 К на основі мікрокристалів кремнію;



- для мікрокристалів кремнію, легованих домішками бору і нікелю, в яких концентрація носіїв заряду знаходиться поблизу до фазового переходу метал-діелектрик виявлено гігантський магніторезистивний ефект, що покладено в основу розбудови надчутливих сенсорів магнітного поля;

- розроблено технологію та конструкції кремнієвих автоемісійних катодів, що лягло в основу виготовлення чутливого елемента акселерометра на основі мікро- та наноструктур кремнію з чутливістю до переміщень порядку 200 нм;

- на основі досліджень імпедансної спектроскопії легованих монокристалів кремнію та структур кремній-на-ізоляторі створені ємнісні та індуктивні елементи, а також коливальні контури для сенсорної техніки.

## **5. Структура та зміст дисертації**

Дисертація складається зі вступу, сімох розділів, висновків, списку використаних джерел. Роботу викладено на 287 сторінках, містить 155 рисунків та 17 таблиць.

Зміст дисертації належним чином відображає мету роботи, основні завдання, проведено теоретичні та експериментальні дослідження та отримано науково-технічні результати прикладного характеру.

У вступі подано всі необхідні дані щодо актуальності, поставлених в дисертації задач, чітко подано мету і задачі дослідження та дані про наукову новизну і практичну цінність отриманих результатів, а також особистий вклад здобувача в отриманні результатів. Наведено дані щодо апробації роботи та її зв'язок з науковими програмами, темами, планами.

У першому розділі наведено огляд сучасних методів отримання кремнієвих структур на основі легованих напівпровідників, стан вивчення технологічних шляхів вдосконалення їх властивостей, а також їх застосування у приладах, зокрема використання наноструктур на основі магнітом'яких матеріалів у спінтроніці, структури кремній-на-ізоляторі для інтегральної технології, ниткоподібні кристали кремнію у сенсорній електроніці, перспективи використання мікроструктур кремнію у наноелектроніці. Особлива увага приділена створенню комбінованих мікро- та наноструктур у приладах наноелектроніки. Виходячи з аналізу літературних даних сформульовані основні завдання досліджень, які необхідно вирішити у дисертації.

У другому розділі подано технологічні аспекти створення структур кремній-на-ізоляторі методом мікрозонної лазерної рекристалізації полікремнію, а також одержання легованих мікрокристалів кремнію методом хімічного парового осадження у відкритій проточній та закритій бромідній системах. В розділі розглянуто обладнання, необхідне для проведення ростових експериментів, методики проведення досліджень властивостей кремнійових мікроструктур у широкому діапазоні температур та під дією магнітного поля. Розроблено методику дослідження електрофізичних властивостей мікроструктур кремнію методом імпедансної спектроскопії, яка дозволила оцінити вклад окремих компонентів матеріалу в загальну провідність зразка. Подано відомості щодо дослідження властивостей матеріалу за складних умов, зокрема під дією високоенергетичного опромінення електронами. Для дослідження властивостей мікро- та наноструктур кремнію у магнітних полях з



індукцією до 14 Тл використано спеціальну методику, яка дозволяє проводити вимірювання магнетоопору за різних фіксованих температур в діапазоні від 14,2 до 300К.

У **третьому розділі** представлені результати дослідження електричних характеристик структур кремній-на-ізоляторі у широкому інтервалі температур для створення мікроелектронних сенсорів на базі полікристалічного кремнію, що ґрунтуються на вивченні електрофізичних та п'єзорезистивних властивостей матеріалу. Особлива увага приділена дослідженням дрібнокристалічних (нерекристалізованих) шарів полікремнію з проміжним рівнем легування ( $\rho_{300\text{K}} = 2,4 \times 10^{18} \text{ см}^{-3}$ ), в яких було виявлено стрибкоподібний характер зміни провідності, згідно закону Мотта. З годографу імпедансних залежностей нерекристалізованих полікремнієвих зразків у КНІ-структурах видно, що він займає від'ємну гілку півкола, що свідчить про наявність ємностей, які зв'язані з зарядами на міжзеренних границях. Для рекристалізованих зразків відбувається зміна транспорту носіїв заряду, що приводить до появи індуктивного характеру імпедансу у КНІ-структурах. Дослідження залежностей п'єзоопору структур кремній-на-ізоляторі показало, що для сенсорів механічних величин з великим коефіцієнтом тензочутливості необхідно обирати рекристалізовані шари полікремнію з концентрацією носіїв заряду  $\rho_{300\text{K}} = 4,8 \times 10^{18} \text{ см}^{-3}$ .

У **четвертому розділі** наведено результати дослідження електрофізичних та п'єзорезистивних властивостей ниткоподібних кристалів кремнію на постійному та змінному струмах в інтервалі температур 4,2-300 К для створення чутливих елементів теплових та механічних величин. Як показали експериментальні дослідження температурних залежностей опору НК Si p-типу провідності з концентрацією домішкових атомів бору  $N_{\text{B}} = 1 \times 10^{19} \text{ см}^{-3}$  для вільного та закріплених на підкладках міді та кварцу зразків, вони мають в усьому температурному діапазоні 4,2-300 К лінійну залежність питомого опору від температури. В ролі чутливих елементів сенсорів температури можна використовувати зразки НК p-Si, закріплених на підкладках з кварцу, оскільки температурна залежність їх опору має лінійний характер. Діаграма Найквіста для НК Si ( $\rho_{300\text{K}} = 0,0168 \text{ Ом} \times \text{см}$ ) показала, що реактивна складова імпедансу змінює знак, тобто стає індуктивною при певній температурі. В цьому разі значну роль починають відігравати поверхневі, так звані таммівські стани, які слугують пастками для носіїв заряду. Виявлено, що дія одновісної деформації на частотні характеристики НК при низьких температурах сприяє розширенню температурної області, в якій спостерігається імпеданс ємнісного характеру в зразках з концентрацією легуючої домішки з діелектричного боку ПМД. Значення еквівалентної ємності при дії деформації стиску зростає, в той час як величина еквівалентної індуктивності - зменшується, що може бути використано в сенсорах деформації.

У **п'ятому розділі** подано результати дослідження магнітнотранспортних характеристик структур кремній-на-ізоляторі у широкому інтервалі температур. Значну увагу було приділено зразкам з дрібнокристалічним полікремнієм в КНІ-структурах з концентрацією носіїв заряду  $2,4 \times 10^{18} \text{ см}^{-3}$ . В таких зразках, коли концентрація електрично активної домішки бору відповідає



діелектричному боку переходу метал-діелектрик, спостерігається від'ємний магнітоопір у відносно слабких магнітних полях. Теоретичні та експериментальні дослідження дозволили виявити основні особливості магнітотранспортних властивостей як для нерекристалізованих, так і рекристалізованих плівок полікремнію в КНІ-структурах з різною концентрацією носіїв заряду, що можна використати для розроблення мікроелектронних приладів і сенсорів фізичних величин на їх основі. Встановлено, що для температур в інтервалі 10-25 К транспорт носіїв заряду в полікристалічному кремнії до лазерної рекристалізації з концентрацією носіїв заряду  $2,4 \times 10^{18} \text{ см}^{-3}$  підлягає закону Мотта, що підтверджує стрибковий характер провідності для таких зразків за низьких температур. Після лазерної рекристалізації для зразків з концентрацією  $4,8 \times 10^{18} \text{ см}^{-3}$  провідність обмежена міжзеренними бар'єрами, що характерно для перколяційних систем з крупно масштабним рель'єф-потенціалом, в цьому випадку провідність описується теорією Шкловського - Ефроса.

**Шостий розділ** присвячено дослідженню магнітних та магнітотранспортних характеристик ниткоподібних мікро- та нанокристалів кремнію. Виявлено, що магнетоопір при індукції магнітного поля за величиною 14 Тл для сильно легованих кристалів не перевищує 4%. Такі зразки з врахуванням їх п'єзорезистивних властивостей можуть бути використані в ролі чутливих елементів сенсорів механічних величин при їх роботі в екстремальних умовах, тобто при криогенних температурах і сильних магнітних полях. Експериментальні дослідження показали, що магнетоопір досліджуваних мікрочристалів Si p-типу провідності в усьому діапазоні магнітних полів до 14 Тл є додатним, при цьому магнетоопір зі збільшенням питомого опору зразків змінюється за квадратичним законом від індукції магнітного поля, а з віддаленням концентрації легуючої домішки від критичного значення, що відповідає фазовому ПМД з металевого боку, спостерігається зменшення магнетоопору, а з діелектричного боку - значне зростання магнетоопору. Експериментально доведено можливість кардинально змінювати магнетоопір та магнітні властивості ниткоподібних кристалів Si p-типу провідності методом їх легування магнітною домішкою нікелю, що дозволило запропонувати з одного боку чутливі елементи сенсорів магнітного поля, а з іншого провести аналіз щодо впливу магнітних домішок на низькотемпературний транспорт носіїв заряду у кристалах.

У сьомому розділі подано результати досліджень щодо розроблення елементної бази пристроїв сенсорної електроніки на основі легованих мікрочристалів кремнію та структур кремній-на-ізоляторі як окремих приладів, так і приладів, що виконані за рахунок поєднання технології створення структур кремній-на-ізоляторі та ниткоподібних кристалів кремнію. Розроблено та виготовлено сенсори механічних величин для широкого інтервалу робочих температур на основі ниткоподібних кристалів кремнію. В області криогенних температур коефіцієнт тензочутливості становить  $K=15500$ , а в області кімнатних температур  $K=325$ , при цьому вихідний сигнал складав 2 мВ. Розроблено сенсори магнітного поля на основі НК Si, легованого домішками нікелю, які працюють за гелієвих температур у сильних магнітних полях до 14



Тл. На основі структур кремній-на-ізоляторі та ниткоподібних кристалів створено сенсори теплових величин, які працездатні в сильних магнітних полях з температурним коефіцієнтом опору, який складає  $2.08\% \times K^{-1}$ . На базі мікрокристалів кремнію та структур кремній-на-ізоляторі розроблено як дискретні індуктивні та ємнісні елементи твердотільної електроніки, так і комбіновані у вигляді коливальних контурів з добротністю, яка становить 60.

#### **6. Повнота висвітлення результатів у наукових працях і особистий внесок здобувача**

Основні результати дисертаційної роботи опубліковано в 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. Аналіз внеску автора в публікації з питань, висвітлених в дисертації, показав, що внесок Ю.М. Ховерка є суттєвим.

#### **7. Відповідність автореферату змісту дисертації**

Автореферат повністю висвітлює зміст дисертації, її мету та наукову новизну. В ньому показано коротку інформацію про кожний з розділів дисертації, а також інші необхідні дані. Дисертація та автореферат оформлені у відповідності до вимог МОН України.

#### **8. Загальні зауваження**

1. В першому розділі розгляд технологій створення структур кремній-на-ізоляторі та технологій отримання мікрокристалів Si можна значно скоротити, оскільки в подальших розділах дисертації вони детально досліджуються.

2. Не обґрунтовано вибір енергій електронів та їх флюєнс при опроміненні мікро- та наноструктур кремнію, оскільки електрони додатково розігрівають досліджувані зразки.

3. На мій погляд, у дисертації потрібно обґрунтувати молярний склад In і Ga в пастовидній консистенції при створенні омичних контактів для субмікронних і особливо для нанокристалів Si, оскільки вони визначають якість роботи розроблених приладів.

4. При розгляді годографа імпедансних залежностей нерекристалізованих полікремнієвих зразків у КНІ-структурах ємності не можуть бути локалізовані на міжзеренних границях, на цих границях локалізовані заряди при певних напругах, які визначають величини ємностей.

5. У формулі (1) автореферату, а також у формулі (3.2) дисертації помилки, оскільки у знаменнику формул частота повинна бути у квадраті ( $\omega^2$ ).

6. При дослідженні температурної залежності електропровідності ниткоподібних мікрокристалів кремнію методом імпедансної спектроскопії показано, що характер повного опору залежить від ступеню наближення до ПМД і змінюється від ємнісного до індуктивного, проте пояснень щодо зміни точки інверсії характеру реактивності не дано, а це визначає температурний діапазон роботи сенсорів.



7. На мою думку, потрібно було б дати пояснення щодо залежності максимуму ємності нерекристалізованих зразків полікремнію з концентрацією  $4,8 \times 10^{18} \text{ см}^{-3}$  (рис.5.12) в області дуже низьких температур в порівнянні з відсутністю такого максимуму також для нерекристалізованих зразків з концентрацією  $2,4 \times 10^{18} \text{ см}^{-3}$  (рис.5.11).

8. Не дано пояснень виникнення від'ємного мегнетоопору для нерекристалізованих полікремнієвих шарів від температури (рис.5.15), що важливо для стабільної роботи приладів на основі цього ефекту.

9. На рис. 6.11 і 6.12 подано графіки польової залежності намагніченості для нанокристалів кремнію, легованого нікелем, в широкому інтервалі температур, проте з цих графіків не зрозуміло про яке поле іде мова, якщо це магнітне поле, то по горизонтальній вісі повинно бути відкладено одиниці магнітної індукції, а не символи T і E (автореферат, рис.16).

10. В дисертації не наведено параметри довготривалої стабільності і повторюваності характеристик розроблених сенсорів.

11. На мою думку, потрібно більш глибоко розглянути фізичний механізм роботи ємнісних та індуктивних елементів, отримати їх аналітичні вирази з метою покращення характеристик.

12. В роботі зустрічаються описки, неточні вирази.

## 9. Висновок

Виходячи з критичного розгляду дисертації та зауважень до неї, вважаю, що зауваження не стосуються її принципових положень. За актуальністю теми, обсягом виконаних досліджень, новизною і ступенем обґрунтованості наукових положень та практичною цінністю рекомендацій робота Ховерка Юрія Миколайовича " Розроблення елементів сенсорної техніки на основі структур кремній-на-ізоляторі та мікрокристалів кремнію, модифікованих домішками бору і кремнію" є завершеною науково-дослідною роботою, в якій розв'язано наукову проблему створення теоретичних засад електропровідності наноструктур кремній-на-ізоляторі та мікрокристалів кремнію при дії температури, деформації та магнітного поля, що в практичному плані дозволило створити нове покоління сенсорної техніки з покращеними метрологічними та економічними показниками, що є суттєвим для розвитку твердотільної електроніки.

Дисертаційна робота відповідає паспорту спеціальності 05.27.01- твердотільна електроніка і вимогам " Порядку присудження наукових ступенів і присвоєння звання старшого наукового співробітника" МОН України, а її автор Ховерко Юрій Миколайович заслуговує присудження наукового ступеня доктора технічних наук за спеціальністю 05.27.01 - твердотільна електроніка.

Офіційний опонент,  
професор, доктор технічних наук,  
професор кафедри електроніки  
Вінницького національного  
технічного університету



В.С. Осадчук

