

ВІДГУК ОФІЦІЙНОГО ОПОНЕНТА

на дисертацію Лях-Кагуй Наталії Степанівни «Електро- і магнітотранспортні властивості базових сенсорних ниткоподібних кристалів Si, Ge, InSb, GaSb в околі переходу метал-діелектрик» представлену на здобуття наукового ступеня доктора технічних наук за спеціальністю 01.04.07 – фізика твердого тіла

1. Актуальність теми дисертації

Розвиток сучасної сенсорики спрямований на створення нових функціональних напівпровідникових матеріалів, як правило наноструктурованих, а також пошук оптимальних технологій їх синтезу, обробки та способів застосування. Актуальність цих робіт пов'язана з проблемами створення наноматеріалів та наноструктур, їх модифікацією з метою подальшого використання в сучасних електронних приладах. Нерідко основними компонентами таких елементів є класичні кремнієві, германієві та інші кристали, відповідним чином модифіковані. Такі кристали, вирощені у формі ниток, так звані ниткоподібні кристали, мають досконалу кристалічну структуру, є ідеальним матеріалом для спостереження квантових ефектів при криогенних температурах, в них спостерігаються цікаві для вивчення фізичної природи та практичного застосування температурні залежності магнітоопору та п'єзомагнітоопору, що робить їх перспективною елементною базою для сенсорної електроніки. Результати проведених авторкою досліджень дозволять розв'язати науково-прикладну проблему створення на основі досліджуваних ниткоподібних кристалів високочутливих сенсорів фізичних величин, що сприятиме розвитку відповідних галузей сенсорики.

Тому комплексне дослідження електро- та магнітотранспортних властивостей ниткоподібних кристалів Si, Ge, InSb та GaSb у широкому інтервалі температур, магнітних полів, механічних навантажень та радіаційного впливу, чому і присвячена дисертація Лях-Кагуй Н. С., є **актуальним** як в теоретичному, так і в практичному співвідношенні.

Актуальність дисертації підтверджується зв'язком із держбюджетними науково-дослідними проектами Міністерства освіти і науки України:

- “Дослідження низькотемпературних деформаційно-стимульованих ефектів у напівпровідникових мікрокристалах і структурах та розробка сенсорів на їх основі”, (№ д/р 0104U002303);
- „Дослідження низькотемпературних характеристик напівпровідникових мікрокристалів і структур в полях ефективного зовнішнього впливу для створення сенсорів”, (№ д/р 0106U001337);
- „Транспорт носіїв заряду та деформаційно-стимульовані ефекти у легованих мікрокристалах та структурах під впливом зовнішніх збурень”, (№ д/р 0108U000325);
- „Розробка наукових основ і технологічних методів створення перетворювачів на базі мікро- і наноструктур кремнію для інформаційних систем”, (№ д/р 0111U001226);

- „Розроблення нових давачів фізичних величин на основі легованих мікро- і нанокристалів кремнію для інформаційно-вимірювальних систем”, (№ д/р 0113U0001361);
 - „Розроблення багатофункційних перетворювачів на основі мікро- і наноструктур кремнію для інформаційно-вимірювальних систем”, (№ д/р 0115U000445);
 - „Перетворювачі фізичних величин на основі напівпровідникових мікро- і наноструктур як елементи мікросистемної техніки інформаційно-вимірювальних систем”, (№ д/р 0117U004457);
 - „Двовимірні періодичні наноструктури кремнію для МЕМС-сумісних інтегрованих мікроперетворювачів”, (№ д/р 0118U000271),
- а також міжнародною науковою співпрацею у 2005–2015 рр. з Міжнародною лабораторією сильних магнітних полів і низьких температур (м. Вроцлав, Польща).

Поставлена в дисертації **мета** досягнута в результаті застосування сучасних експериментальних методів досліджень, в тому числі атомно-силової та електронної мікроскопії, техніки опромінення високоенергетичними електронами на імпульсному прискорювачі електронів, модифікованої і комп'ютеризованої магнітометрії та ін.

2. Найважливіші наукові результати дисертації та їх новизна

До найважливіших наукових результатів авторки дисертації слід віднести наступні:

1. Виявлення осциляційних ефектів у ниткоподібних кристалах Si, Ge, InSb, GaSb та їх особливостей в околі переходу метал-діелектрик в залежності від концентрацій легуючих домішок.
2. Встановлення причин магнітофононних осциляцій поздовжнього та поперечного магнітоопору в ниткоподібних кристалах Ge *n*- та *p*-типу провідності, а також особливостей зміни їхніх амплітуд.
3. Виявлення поверхневої надпровідності у ниткоподібних кристалах GaSb *n*-типу провідності при гелієвих температурах і встановлення факту, що ці кристали є надпровідниками другого роду із визначеними верхнім і нижнім критичними полями.
4. Встановлення існування індукованого магнітним полем переходу метал-діелектрик у легованих оловом ниткоподібних кристалах InSb і розщеплення піків поздовжнього та поперечного магнітоопору.
5. Проведення розрахунків деформаційної залежності розщеплення валентних зон Si та Ge і встановлення зсуву зони легких дірок у Si, а також виявлення у ниткоподібних кристалів Si та Ge екстремально високих значень коефіцієнта тензочутливості.
6. Встановлення особливостей змін і температурних залежностей опору та магнітоопору ниткоподібних кристалів Si при електронному опроміненні, а також вплив домішок бору на радіаційну стійкість тензодатчиків на їх основі.

3. Практичне значення результатів роботи визначається можливістю використання результатів комплексного дослідження електро- та магнітотранспортних властивостей легованих ниткоподібних кристалів Si, Ge, InSb та GaSb за впливу зовнішніх полів в сенсорній електроніці, зокрема в тензорезисторах, які характеризуються високою тензочутливістю та слабкою температурною залежністю коефіцієнта тензочутливості, датчиках гідростатичного тиску для вимірювання високих тисків робочих рідин гідравлічних систем, сенсорах магнітного поля з магніторезистивним принципом дії, багатофункціональних сенсорах температури, деформації і магнітного поля із покращеними експлуатаційними характеристиками.

Новизну практичних розробок захищено восьмома патентами України на корисну модель.

4. Загальна оцінка роботи

Дисертація Лях-Кагуй Н. С. є завершеною науковою роботою, яка містить нові, науково обґрунтовані результати комплексних досліджень. Дисертація складається зі вступу, семи розділів, загальних висновків та списку використаної літератури із 415 найменувань. Обсяг основного тексту дисертації становить 325 сторінок, 183 рисунки та 27 таблиць, а також список літератури на 49 сторінках.

У першому розділі дисертації “ОТРИМАННЯ ЛЕГОВАНИХ НИТКОПОДІБНИХ КРИСТАЛІВ Si, Ge, InSb і GaSb ТА МЕТОДИКА ДОСЛІДЖЕНЬ ЇХ ВЛАСТИВОСТЕЙ” описано розроблені авторкою технологічні засади отримання ниткоподібних кристалів Si, Ge і сполук $A^{III}B^V$ методом хімічних газотранспортних реакцій та досліджено вплив структури на їх електрофізичні властивості. Розглянуто систему напівпровідниковий чутливий елемент – підкладка, яка використовується в сенсорах та розраховано можливі термічні деформації. Представлено методики вивчення електро- та магнітотранспортних характеристик цих зразків у широкому інтервалі магнітних полів і температур, а також запропоновано методику вивчення впливу опромінення високоенергетичними електронами з різними енергіями та дозами на п’єзо- і магнітоопір зразків Si p-типу провідності.

Другий розділ роботи “ЕЛЕКТРОПРОВІДНІСТЬ І П’ЄЗООПІР НИТКОПОДІБНИХ КРИСТАЛІВ КРЕМНІЮ ТА ГЕРМАНІЮ” містить феноменологічний опис п’єзорезистивного ефекту в напівпровідниках, механізмів його виникнення під впливом деформації на прикладі легованих кристалів Si та Ge, а також особливостей їх п’єзорезистивного ефекту за криогенних температур. В цьому розділі представлені результати досліджень впливу спин-орбітальної взаємодії на деформаційне зняття виродження енергетичного спектра валентної зони Si та Ge у двозонному і тризонному наближеннях та комплексу робіт, спрямованих на розроблення сенсорів фізичних величин нового покоління.

У третьому розділі дисертації “МАГНІТОТРАНСПОРТНІ ВЛАСТИВОСТІ НИТКОПОДІБНИХ КРИСТАЛІВ КРЕМНІЮ ТА ГЕРМАНІЮ” проведено комплексі дослідження впливу деформації, температури і магнітного поля на властивості ниткоподібних кристалів Si та Ge з метою розробки фізичних основ створення сенсорів механічних, теплових і магнітних величин, дієздатних у складних умовах, зокрема при криогенних температурах. Досліджено особливості їх магнітоопору і п’єзомагнітоопору в сильних магнітних полях при температурі

рідкого гелію. Досліджено магнітофононні осциляції поперечного і поздовжнього магнітоопору в легованих ниткоподібних кристалах Ge *n*- та *p*-типу провідності, вплив на них одновісної деформації і температури, а також розраховано величини ефективних мас електронів та дірок.

У четвертому розділі дисертації “ВПЛИВ ЕЛЕКТРОННОГО ОПРОМІНЕННЯ НА ЕЛЕКТРОПРОВІДНІСТЬ, П’ЄЗО- ТА МАГНІТООПІР НИТКОПОДІБНИХ КРИСТАЛІВ КРЕМНІЮ” представлено результати експериментального комплексного дослідження впливу високоенергетичного електронного опромінення при кімнатній температурі на властивості ниткоподібних кристалів Si, сильно легованих бором. Досліджено вплив електронного опромінення на поведінку їхнього магнітоопору при низьких температурах. Вичено також вплив одновісної деформації на опір опромінених електронами ниткоподібних кристалів Si і розраховано значення їх коефіцієнта тензочутливості. Вивчено вплив опромінення електронами з різною енергією та флюенсом на характеристики тензорезисторів на їх основі в різних інтервалах температур з метою оцінки радіаційної стійкості відповідних сенсорів.

У п’ятому розділі дисертації “ЕЛЕКТРОТРАНСПОРТНІ ХАРАКТЕРИСТИКИ НИТКОПОДІБНИХ КРИСТАЛІВ InSb та GaSb” розглянуто особливості досліджень електротранспортних властивостей ниткоподібних кристалів InSb та GaSb *n*-типу провідності, методи опису транспортних властивостей в напівпровідниках $A^{III}B^V$, зокрема основні методи розв’язку кінетичного рівняння Больцмана. Описана модель розсіяння носіїв заряду, яка використовується в дослідженнях ниткоподібних кристалів InSb та GaSb, а також розглянуто ізотропне наближення моделі Кейна для опису зонної структури антимонідів індію та галію *n*-типу провідності.

У шостому розділі дисертації “МАГНІТОТРАНСПОРТНІ ВЛАСТИВОСТІ НИТКОПОДІБНИХ КРИСТАЛІВ InSb та GaSb *n*-ТИПУ ПРОВІДНОСТІ” наведено результати досліджень поперечного і поздовжнього магнітоопору ниткоподібних кристалів InSb та GaSb *n*-типу провідності з різною концентрацією легуючої домішки, при цьому виявлені осциляції магнітоопору, аналіз поведінки яких дозволив визначити їх період та ефективну масу електронів. Вивчено спіно-орбітальну взаємодію у ниткоподібних кристалах GaSb *n*-типу провідності та проведено аналіз впливу деформації на характер поздовжнього магнітоопору. Визначено значення *g*-фактора в досліджуваних кристалах та виявлено, індуковану деформацією фазу Беррі.

У сьомому розділі дисертації “СТВОРЕННЯ СЕНСОРІВ ФІЗИЧНИХ ВЕЛИЧИН НА ОСНОВІ НИТКОПОДІБНИХ КРИСТАЛІВ Si, Ge, InSb, GaSb” досліджено можливості та особливості створення елементної бази пристроїв сенсорної електроніки на базі легованих ниткоподібних кристалів Si, Ge, InSb і GaSb. Тензорезистори на основі слабо легованих ниткоподібних кристалів Ge *n*-типу провідності рекомендовано для вимірювання малих деформацій при фіксованих температурах, а сильнолеговані – для вимірювання деформацій у широкому інтервалі температур. Встановлена висока чутливість до тиску легованих ниткоподібних кристалів GaSb *n*-типу провідності, що дозволяє створення на їх основі сенсорів тиску з розширеним робочим діапазоном та спрощеною конструкцією. На основі ниткоподібних кристалів Si, Ge та InSb створено багатофункційний датчик для

вимірювання температури, деформації та магнітного поля, що забезпечить можливість точної кількісної оцінки температури та її впливу на залежності тензочутливості і температурної чутливості до магнітного поля.

5. Ступінь обґрунтованості та достовірності наукових положень і висновків дисертації

Основні результати дисертації опубліковані у провідних закордонних періодичних виданнях та фахових виданнях України, вони широко обговорювалися за безпосередньої участі авторки на профільних наукових конференціях, семінарах та школах міжнародного рівня. Для проведення дослідження авторка використала як сучасні, добре апробовані, так і нові експериментальні методи. Опрацювання та аналіз одержаних результатів здійснено з використанням сучасних програмних засобів та теоретичних підходів. Все вищезгадане забезпечує **обґрунтованість** та **достовірність** одержаних результатів та сформульованих на їх основі висновків дисертації.

Апробація роботи проходила на авторитетних наукових конференціях. Публікації авторки у наукових журналах та матеріалах конференцій (51 наукова праця), а також 8 патентів України на корисну модель відображають суть виконаних досліджень та представлених в дисертації результатів.

Автореферат дисертації повністю відповідає її змісту, він адекватно передає основні наукові результати дисертантки.

6. Зауваження щодо дисертації

Незважаючи на те, що у дисертації Лях-Кагуй Н. С. одержано низку цікавих наукових та практичних результатів, робота не позбавлена недоліків. До таких, на мою думку, можна віднести наступні:

1. Не проаналізовано причини і природу екстремумів температурної залежності питомого електроопору та відносної зміни електроопору ниткоподібних кристалів Ge під дією деформації стиску в околі 30 К (стор. 114, рис. 2.12), а такі екстремуми суттєво впливають на можливості використання у сенсорних структурах, зокрема, в сенсорах механічних величин для криогенних температур.
2. В 3 розділі дисертації детально досліджено поведінку магнітоопору ниткоподібних кристалів кремнію і германію при гелієвих температурах, але не достатньо вивчено температурні залежності цієї поведінки, а там можуть знаходитись ефекти, цікаві для практичного використання, про що засвідчує, наприклад, квазілінійна залежність електроопору від магнітного поля при $T > 36$ К (стор. 168, рис. 3.26), яку можна використати у відповідних сенсорах.
3. З рис. 6.35 на стор. 298 видно, що при гелієвих температурах як в деформованих, так і в недеформованих ниткоподібних кристалах GaSb проявляється ефект надпровідності (різке зменшення електроопору). Однак авторка трактує пригнічення цього ефекту як істотний вплив деформації, що потребує додаткових підтверджень.
4. В таблицях 7.1 і 7.2 представлені експлуатаційні параметри тензорезисторів на основі досліджуваних в дисертаційній роботі ниткоподібних кристалів, однак

не приведені порівняльні характеристики розроблених авторкою і відомих сенсорних елементів, хоча в 7 розділі подано стан проблеми вимірювання температури, деформації та магнітного поля існуючими датчиками.

5. В роботі зустрічаються незначні описки, наприклад, на стор. 60, 126, 129, 130, 234 та ін.

Зазначені зауваження не мають вирішального впливу на загальну позитивну оцінку дисертації і не знижують наукову та практичну цінність результатів та висновків роботи.

Вважаю, що представлена дисертація «Електро- і магнітотранспортні властивості базових сенсорних ниткоподібних кристалів Si, Ge, InSb, GaSb в околі переходу метал-діелектрик» є завершеною науково-дослідницькою роботою, яку виконано на високому науковому рівні із застосуванням сучасних експериментальних методів і повністю відповідає вимогам МОН України, які висуваються до робіт на здобуття наукового ступеня доктора технічних наук, а її авторка, Лях-Кагуй Наталія Степанівна, заслуговує присудження їй наукового ступеня доктора технічних наук за спеціальністю 01.04.07 – фізика твердого тіла.

Офіційний опонент,
доктор технічних наук, професор,
завідувач кафедри загальнотехнічних
дисциплін Львівського національного
університету ветеринарної медицини
та біотехнологій імені С. З. Гжицького



В. Р. Ціж

Підпис професора Б. Р. Ціжа завіряю

Вчений секретар Львівського
національного університету
ветеринарної медицини
та біотехнологій імені С. З. Гжицького



Н. А. Конопленко