

ВІДГУК

офіційного опонента на дисертаційну роботу

Лях-Кагуй Наталії Степанівни

“Електро- і магнітотранспортні властивості базових сенсорних ниткоподібних кристалів Si, Ge, InSb, GaSb в околі переходу метал-діелектрик”,

яка подана на здобуття наукового ступеня доктора технічних

наук за спеціальністю 01.04.07 – фізика твердого тіла

1. Актуальність теми дисертаційної роботи

Розвиток багатьох сучасних напрямків у науці і техніці пов'язаний із дослідженнями і використанням мікро- та нанорозмірних матеріалів і структур, зокрема, нульмірних, одномірних та двомірних систем. Важливим при цьому є розробка технологій отримання досконалих матеріалів з використанням напівпровідникових мікро- та нанотехнологій. Все це робиться з метою отримати нові, значно покращені фізичні, хімічні і біологічні властивості, явища і процеси. В кінцевому результаті це веде до нових технологічних перспектив, а заодно і до нових викликів.

Ниткоподібні кристали напівпровідників мають великі перспективи використання і використовуються в різноманітних електронних пристроях і, зокрема, в сенсорах. Незважаючи на бурхливий розвиток досліджень і розробок в області сенсорики, існує ще ряд невирішених проблем при створенні сенсорів різних величин в певних умовах їх експлуатації. І тому дослідження матеріалів з метою їх використання в сенсоріці, безумовно, є актуальним.

Науково-прикладна проблема, яка вирішується в цій роботі, належить до фізичних і прикладних аспектів створення сенсорів деформації, температури та магнітного поля, які здатні функціонувати в області криогенних температур і високих магнітних полів, причому бути радіаційно стійкими.

Таким чином, тема дисертаційної роботи пов'язана з дослідженнями фізичних та технологічних властивостей ниткоподібних напівпровідникових матеріалів в області криогенних температур та високих магнітних полів і спрямована на розробку сенсорів фізичних величин дієздатних у складних умовах експлуатації.

2. Метою дисертаційної роботи є вивчення електро- та магнітотранспортних властивостей базових сенсорних ниткоподібних кристалів Si, Ge, антимонідів індію і галію з різним рівнем легування домішки в околі переходу метал-діелектрик за ефективного впливу зовнішніх полів (магнітного, температурного, деформаційного та радіаційного) для створення сенсорів фізичних величин, дієздатних у складних умовах експлуатації.

3. Наукова новизна одержаних результатів полягає в наступному.

3.1. На основі експериментальних досліджень польових залежностей магнітоопору в області криогенних температур виявлено осциляційний ефект у ниткоподібних кристалах Si, Ge, InSb та GaSb, який в залежності від концентрації легуючої домішки в околі ПМД пов'язаний із магнітофононними осциляціями чи осциляціями Шубнікова – де Гааза, що дозволило оцінити енергії фононів та циклотронні ефективні маси носіїв заряду в зразках.

3.2. Встановлено індукований магнітним полем ПМД у ниткоподібних кристалах InSb, легуваних оловом до концентрації, що відповідає близькості до переходу, зумовлений сильною спин-орбітальною взаємодією, що приводить до розщеплення кожного піку поздовжнього і поперечного магнітоопору в усьому діапазоні полів 0 - 14 Тл і отримання гігантських значень g-фактора Ланде, який в залежності від значення індукції магнітного поля становить $g^* = 46 - 60$.

3.3. Вперше встановлена наявність поверхневої надпровідності при критичній температурі 4,2 К у ниткоподібних кристалах GaSb n-типу провідності з концентрацією легуючої домішки $2 \times 10^{18} \text{ см}^{-3}$, яка зумовлена сильною спин-орбітальною обмінною взаємодією

носіїв заряду в металевій фазі в околі ПМД. На основі вивчення польових залежностей намагніченості встановлено, що ниткоподібні кристали GaSb є надпровідниками другого роду з визначеними верхнім і нижнім критичними полями $Bc2 = 1,1$ Тл та $Bc1 = 50$ мТл, відповідно.

3.4. Вперше виявлено ефект Кондо, який проявляється на температурних залежностях опору при температурі 30 К у ниткоподібних кристалах GaSb із концентрацією телуру 1×10^{18} см⁻³ і зумовлений обмінною взаємодією між локалізованими на атомах домішки електронами та вільними носіями заряду, що приводить до пригнічення ефекту надпровідності та є важливим для пояснення механізмів переносу носіїв заряду при низьких температурах.

3.5. Встановлено, що перехід від ефекту слабкої антилокалізації до слабкої локалізації носіїв заряду реалізується в інтервалі температур $3 \div 4,2$ К у слабких магнітних полях з індукцією до 1 Тл зумовлений зміною з температурою співвідношення між часом збою фази та часом спінової релаксації електронів у сильно легованих телуром ниткоподібних кристалах GaSb із металевим ходом провідності.

3.6. Показано, що виявлений у слабких магнітних полях від'ємний магнітоопір ниткоподібних кристалів Si та GaSb описується двовимірною моделлю слабкої локалізації, що дозволило визначити параметр Рашби спін-орбітальної взаємодії носіїв заряду $\alpha = 5 \times 10^{-15}$ eV×м та $\alpha = 1,66 \times 10^{-12}$ eV×м, відповідно.

3.7. Вперше встановлена поява фази Беррі в польових залежностях магнітоопору при температурі 4,2 К деформованих ниткоподібних кристалів InSb та GaSb n- типу провідності, зумовлена сильною спін-орбітальною взаємодією носіїв заряду в області ПМД, що підтверджує двовимірну природу електронного газу та деформайційно-індукований перехід зразків у стан топологічного ізолятора.

3.8. Виявлено, що за впливу деформації в ниткоподібних кристалах GaSb відбувається розщеплення піків осциляцій Шубнікова – де Гааза, що дозволило отримати гігантські значення g-фактора Ланде, який становить $g^* = 53$, а також зумовлює зменшення ефективної маси електронів, підвищення температури Дінгла, пригнічення ефектів надпровідності та слабкої локалізації в досліджуваних зразках.

4. Ступінь обґрунтованості, достовірності наукових положень, висновків і рекомендацій, сформульованих у дисертації є достатнім, що забезпечується всебічним і ґрунтовним аналізом науково-технічної літератури, коректністю постановки задач досліджень, правильно обраними методами і організацією їх виконання із застосуванням відповідного вимірювального обладнання, стандартних методів статистичної обробки отриманих даних вимірювань, узгодженням результатів теоретичних та модельних розрахунків з даними експериментів, зіставленням результатів, одержаних здобувачкою, із результатами, які отримані іншими авторами, патентуванням нових технічних рішень, а також обговоренням результатів роботи на тематичних міжнародних та вітчизняних конференціях і симпозиумах.

5. Аналіз змісту та завершеності дисертації.

У вступі обґрунтована актуальність теми, представлені мета і задачі роботи, зв'язок роботи з науковими програмами і планами, наукова новизна і практичне значення, особистий внесок, апробація роботи і публікації.

Перший розділ присвячений технології отримання ниткоподібних кристалів (НК) Si, Ge, InSb та GaSb методом хімічних газотранспортних реакцій у закритій системі з різною концентрацією легуючої домішки, дослідженню кристалічної структури отриманих зразків, розробленню технологічних засад створення електричних контактів до НК, вимірюванню ВАХ створених контактів при різних температурах, обґрунтуванню та використанню спеціальної методики, яка дозволяє створити механічно напружений стан напівпровідникових НК, розробленню методу створення механічно напруженого стану, розробленню методики дослідження магнітотранспортних характеристик зразків та запропоновано методику вивчення впливу електронного опромінення.

У **другому розділі** наведено результати щодо дослідження низькотемпературних деформаційно-стимульованих ефектів у НК Si та Ge р-типу провідності з концентрацією легуючої домішки в околі ПМД, що уможливило їх застосування в якості чутливих елементів сенсорів теплових і механічних величин, дієздатних в області криогенних температур. Розглянуто поверхнево-деформований стан закріпленого НК, оцінено термічну деформацію зразків Si та Ge в широкому інтервалі температур для різних матеріалів підкладок і методу їх закріплення, вивчено вплив спін-орбітальної взаємодії на деформаційне зняття виродження енергетичного спектра валентної зони Si та Ge, розглянуто деформаційний генезис валентної зони при різних способах урахування в гамільтоніані деформації кристала та спін-орбітальної взаємодії. Показано, що дослідити взаємний вплив деформації та спін-орбітального розщеплення можна лише одночасно беручи до уваги збурення деформацією та спін орбітальну взаємодію у початково невиродженому стані. Уточнено вигляд зонного спектру легких і важких дірок у деформованих зразках Si та Ge за рахунок більш коректного врахування зонного спектра, розрахована деформаційна залежність розщеплення їх валентних зон у центрі зони Бріллюена, розглянуто ступінь наближення до ПМД як фактор отримання максимального ефекту п'єзоопору для НК Si та Ge, досліджено температурні залежності опору деформованих і недеформованих НК Si р-типу провідності та температурні залежності їх коефіцієнта тензочутливості при високому рівні відносної деформації стиску.

У **третьому розділі** наведені результати комплексних досліджень впливу деформації, температури і магнітного поля на властивості НК Si та Ge з метою розроблення перетворювачів фізичних величин, дієздатних у складних умовах експлуатації. Вивчено особливості магнітоопору і п'єзомагнітоопору зразків із різною концентрацією легуючої домішки в магнітних полях з індукцією $0 \div 14$ Тл при температурі рідкого гелію.

У **четвертому розділі** наведено результати комплексних досліджень щодо впливу високоенергетичного опромінення електронами на основні властивості (провідність, магнітоопір і п'єзоопір) НК Si з концентрацією бору, що відповідає близькості до ПМД як з металевого, так і з діелектричного боку переходу, в широкому інтервалі температур і магнітних полів.

П'ятий розділ представляє дослідження електротransпортних характеристик зразків InSb та GaSb із різною концентрацією легуючої домішки в інтервалі температур $4,2 \div 300$ К. Проаналізовано зонну структуру InSb та GaSb з використанням ізотропного наближення моделі Кейна, яке враховує спін-орбітальну взаємодію, що відіграє суттєву роль в сполуках з кристалічною структурою типу цинкової обманки. Встановлено, що збільшення концентрації легуючої домішки збільшує ймовірність перекриття хвильових функцій, приводить до збільшення значення прямої обмінної взаємодії, що зумовлює зміну знака інтеграла обмінної взаємодії J і спостерігається затухання ефекту Кондо.

У **шостому розділі** наведено магнітні та магнітотransпортні характеристики НК InSb та GaSb n-типу провідності із різною концентрацією легуючої домішки у магнітних полях з індукцією $0 \div 14$ Тл в інтервалі температур $1,5 \div 77$ К. У цих зразках, легуваних в околі ПМД, виявлено осциляції Шубнікова – де Гааза на польових залежностях поперечного і поздовжнього магнітоопору, аналіз поведінки яких дозволив визначити їх період, температуру Дінгла та ефективну масу електронів. Вивчено спін-орбітальну взаємодію у НК GaSb, легуваних телуром та вплив деформації на основні параметри НК InSb n-типу провідності із різною концентрацією легуючої домішки. Встановлено, що стрибкоподібне падіння опору на польових залежностях поздовжнього магнітоопору недеформованих НК GaSb в інтервалі температур $1,5 \div 4,2$ К зумовлене частковим переходом у надпровідний стан. Встановлено, що слабка антилокалізація та надпровідність є основними конкуруючими механізмами провідності, які мають місце у приповерхневих шарах, що пояснює поведінку польових залежностей магнітоопору в НК GaSb, легуваних телуром.

Сьомий розділ представляє результати досліджень щодо розроблення елементної бази пристроїв сенсорної електроніки на основі легуваних НК Si, Ge, InSb та GaSb, дієздатних в

області криогенних температур. Розроблено чутливий елемент багатofункційного датчика температури, деформації і магнітного поля з використанням в якості сенсора температури НК Si p-типу провідності, а сенсорів деформації та магнітного поля – мікрокристалів Ge p- та n-типу, відповідно. Для забезпечення кардинально вищої чутливості розробленого багатofункційного датчика до впливу магнітного поля із збереженням достатньої чутливості також до впливу деформації, запропоновано використання НК InSb n-типу провідності. На основі результатів досліджень впливу гідростатичного тиску на опір спеціально легованих НК GaSb n-типу провідності, встановлено їх високу чутливість до тиску, особливо в діапазоні $0 \div 3$ кбар, що дозволяє створення на їх основі сенсорів тиску з розширеним робочим діапазоном та спрощення їх конструкції.

Робота завершується висновками, які узагальнюють результати виконання експериментальних досліджень.

Дисертація оформлена згідно існуючих вимог, здобувачка послідовно та доступно викладає наукову інформацію, аналітичний матеріал, рекомендації та висновки.

Аналіз основної частини дисертації дозволяє зробити висновок, що дисертація є завершеною науковою кваліфікаційною роботою.

6. Значення одержаних результатів для науки і практики та рекомендації щодо їх можливого використання.

Значення одержаних результатів дисертації полягає у тому, що результати комплексного дослідження електро- та магнітотранспортних властивостей легованих ниткоподібних кристалів Si, Ge, InSb та GaSb за впливу зовнішніх полів були використані в сенсорній електроніці, зокрема:

6.1. Розроблено тензорезистори на основі ниткоподібних кристалів Ge та GaSb як n-, так і p-типу провідності з відповідним рівнем легування домішки, які характеризуються високою тензочутливістю та слабкою температурною залежністю їх коефіцієнта тензочутливості, які рекомендовано для вимірювань у різних робочих діапазонах температур і деформацій.

6.2. Створено датчики гідростатичного тиску на основі спеціально легованих ниткоподібних кристалів GaSb n-типу провідності; завдяки високій чутливості до гідростатичного тиску, такі датчики можуть застосовуватись для вимірювання високих тисків (до 5 кбар) робочих рідин гідравлічних систем.

6.3. Встановлений деформаційно-індукований ефект гігантського магнітоопору, що досягає 720 % у магнітних полях з індукцією до 10 Тл при температурі 4,2 К, у ниткоподібних кристалах InSb із концентрацією легуючої домішки в околі ПМД, відкриває перспективи створення на їх основі сенсорів магнітного поля з магніторезистивним принципом дії.

6.4. Встановлено, що у багатofункційних сенсорах (температури, деформації, магнітного поля) придатні ниткоподібні кристали Si та Ge з концентрацією легуючої домішки $5 \times 10^{17} \div 5 \times 10^{18} \text{ см}^{-3}$, а використання тензорезисторів на основі ниткоподібних кристалів InSb з концентрацією олова $2 \times 10^{17} \text{ см}^{-3}$ як чутливих елементів магнітного поля дозволить істотно підвищити чутливість сенсора в інтервалі температур $4,2 \div 70 \text{ К}$ і досягти незалежності магнітоопору від температури в діапазоні магнітних полів з індукцією $0 \div 7 \text{ Тл}$.

6.5. Показано, що опромінення електронами з енергією 10 MeV і флюенсом $1 \times 10^{18} \text{ ел/см}^2$ не зумовлює зміни коефіцієнта тензочутливості при температурі рідкого гелію у ниткоподібних кристалах Si, легованих бором до концентрації $1 \times 10^{19} \text{ см}^{-3}$, що відкриває перспективи створення на їх основі радіаційностійких сенсорів механічних величин, дієздатних в області криогенних температур.

Новизну практичних розробок захищено патентами України.

Виготовлені чутливі елементи сенсорів деформації, температури та магнітного поля використовуються при виконанні науково-дослідних робіт із госпдоговірної і держбюджетної тематики у лабораторії сенсорної електроніки, а також у навчальному процесі кафедри

напівпровідникової електроніки Національного університету „Львівська політехніка”, НВП «Електрон-Карат»-ДП ПрАТ «Концерн-Електрон».

7. Повнота викладення здобувачем основних результатів дисертаційної роботи в публікаціях. За темою дисертації опубліковано 59 наукових праць, з яких 13 статей у наукових фахових виданнях України, 14 - у періодичних виданнях, які включені до міжнародних наукометричних баз Scopus та Web of Science, 8 матеріалів конференцій, включених у міжнародні наукометричні бази, 16 тез доповідей міжнародних і всеукраїнських конференцій, 8 патентів України.

Публікації здобувачки повною мірою висвітлюють наукові та технічні результати і положення дисертації. Внесок автора у роботи зі співавторами є визначальним.

Апробація результатів дисертації. Основні результати дисертації доповідалися та обговорювалися на українських та міжнародних конференціях, симпозіумах і семінарах по тематиці роботи.

Таким чином дисертація пройшла належну апробацію і є самостійною науковою працею.

8. Відповідність змісту автореферату основним положенням дисертації.

За структурою, змістом та оформленням автореферат відповідає встановленим вимогам. У ньому відображено основні положення, зміст, результати і висновки наукового дослідження, що аналізується. Зміст автореферату та основних положень дисертації є ідентичними.

9. Запитання та зауваження щодо дисертації.

1. В роботі детально описані технологія виготовлення експериментальних зразків. Разом з тим не наведені деякі важливі деталі росту кристалів. Опис росту НК кремнію закінчується утворенням сполук SiBr_2 . Вказується лише, що ріст відбувається за механізмом пар-рідина-кристал, але не наводяться такі важливі параметри росту як температура евтектики, тиск насичених парів, гранично допустима розчинність в каталізаторі та ін.

2. Важливим параметром НК є рівень легування (концентрація легуючої домішки). Неясно як вона вимірювалась і з якою похибкою. Крім того розподіл домішки по радіусі НК є неоднорідним, про що свідчать і дані дисертантки. Виникає питання про яку концентрацію іде мова: усереднену, ефективну чи ін.

3. Незрозумілим є твердження автора, що від'ємний магнітоопір спостерігається в широкому інтервалі індукцій магнітних полів із зменшенням концентрації легуючої домішки недеформованих НК Ge (рис. 3.11). Далі вказується, що ВМО спостерігається у сильно легуваних напівпровідниках (див. стор. 152).

4. Продемонстровано суттєвий вплив струму на залежності магнітоопору НК Ge (рис. 3.28). Разом з тим не вказано при якому значенні струму (а точніше було б густині струму), зазвичай, вимірюється опір та магнітоопір.

5. У дисертації розглянуто магнітоіндукований перехід метал-діелектрик у ниткоподібних кристалах InSb. Однак, з тексту дисертації не зрозуміло чим можна пояснити фізичну природу цього ефекту.

6. У ниткоподібних кристалах InSb, GaSb за низьких температур виявлені осциляції магнітоопору Шубнікова –де Гааза. Незрозуміло, чому дія деформації приводить як до зникнення (рис. 6.28,б), так і до появи (рис.6.29,б) розщеплення піків осциляцій Шубнікова –де Гааза в зразках InSb з різною концентрацією легуючої домішки в околі переходу метал-діелектрик (таблиці 6.5 та 6.6)? Незрозуміло також чому саме мова йде про розщеплення піків, а не про окремі піки, які на рис. 6.1 є подібними.

7. При описі осциляцій Шубнікова- де Гааза в НК InSb (розділ 6.2.1) незрозумілим з фізичної точки зору є твердження «Збільшення концентрації домішки також зумовлює плавне зростання рівня Фермі від $E_F \approx 0,11$ eВ до $E_F \approx 0,12$ eВ» (стор. 253). Звідки ведеться відлік рівня Фермі?

8. В дисертації зустрічаються стилістичні та граматичні помилки, повтори окремих абзаців тексту (див. стор. 81, 141, 239-240), в тексті не згадується про наведені рис. 4.1-4.3 та ін.

Вважаю, що вказані вище зауваження не зменшують загальну наукову новизну та практичну цінність результатів дисертаційної роботи.

10. Загальна оцінка дисертації.

Актуальність обраної теми дисертації, ступінь обґрунтованості наукових положень, висновків і рекомендацій, сформульованих у роботі, їх достовірність і наукова новизна, повнота їх викладу в опублікованих працях, значення результатів для науки і практики, зміст дисертації та її завершеність дає змогу зробити висновок, що в дисертаційній роботі Лях-Кагуй Наталії Степанівни **“Електро- і магнітотранспортні властивості базових сенсорних ниткоподібних кристалів Si, Ge, InSb, GaSb в околі переходу метал-діелектрик”** розв’язано важливу науково-прикладну проблему і вона задовольняє вимогам пп. 9, 10 «Порядку присудження наукових ступенів», затвердженого постановою Кабінету Міністрів України від 24 липня 2013 р. № 567 щодо докторських дисертацій, а її автор **Лях-Кагуй Наталія Степанівна** заслуговує присудження їй наукового ступеня доктора технічних наук за спеціальністю спеціальністю 01.04.07 – фізика твердого тіла

Офіційний опонент:

Завідуючий лабораторією фізики
адсорбційних та поверхневих ефектів
в напівпровідниках і тонких плівках
Інституту фізики напівпровідників
ім. В.Є.Лашкарьова НАН України,
доктор фізико-математичних наук, професор

А.А. Євтух

Підпис д. ф.-м. н. проф., Євтуха А. А.
Вчений секретар
Інституту фізики напівпровідників
ім. В.Є. Лашкарьова НАН України,
доктор хімічних наук, професор



Томашик В.М.