

ВІДГУК

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

Актуальність теми.

Інтерес до вивчення структурних і фізичних властивостей напівпровідникових матеріалів зумовлює створення нового покоління мініатюрних швидкодіючих приладів та систем, принцип дії яких базується на квантово-розмірних ефектах. Однак і сьогодні, не зважаючи на інтенсивність досліджень залишаються не вивченими кінетичні ефекти в твердих тілах, що обмежує їх широке застосування у приладах мікро-та наноелектроніки.

Ниткоподібні кристали є перспективною елементною базою для сенсорної електроніки. Важливою науково-технічною проблемою, яка на сьогодні не до кінця розв'язана, є створення сенсорів фізичних величин, дієздатних у складних умовах експлуатації (сильні магнітні поля, низькі температури, вплив опромінення, тощо). При цьому невирішеним залишається низка проблем, зокрема дослідження електрофізичних та магніторезистивних властивостей одновимірних ниткоподібних кристалів кремнію, германію, антимонідів галію та індію з концентрацією легуючої домішки в околі переходу метал-діелектрик при низьких температурах. Розширення фізичних уявлень про механізми переносу носіїв заряду в легованих напівпровідникових ниткоподібних кристалах при низьких температурах, у сильних магнітних полях та за впливу електронного опромінення дозволить розробити концепцію створення надчутливих радіаційно стійких сенсорів, дієздатних в екстремальних умовах експлуатації.

Подальший розвиток наноелектроніки викликав широкий спектр досліджень квантово-розмірних ефектів як в класичних напівпровідникових матеріалах, таких як кремній і германій, так і в сполуках АЗВ5, що дозволило

отримати нові властивості. Один із таких напрямків є дослідження фізичних процесів перенесення носіїв заряду в таких структурах, що лягло в основу проблеми розбудови нового класу приладів мікро- і наноелектроніки, таких як сенсори деформації, температури, магнітного поля, дієдатних у широкому діапазоні температур.

Дисертація Лях-Кагуй Н.С. є завершеним науковим дослідженням і присвячена вирішенню важливої науково-технічної проблеми фізики твердого тіла, безумовно, є актуальною.

Наукова новизна отриманих результатів.

Проведені комплексні дослідження електро- та магнітотранспортних властивостей ниткоподібних кристалів Si, Ge, InSb та GaSb є істотним кроком у розв'язанні науково-прикладної проблеми – створення високочутливих сенсорів фізичних величин.

- Виявлено осциляційний ефект магнітоопору в ниткоподібних кристалах Si, Ge, InSb та GaSb, легованих в околі переходу метал-діелектрик пов'язаний із магнітофононними осциляціями чи осциляціями Шубнікова – де Гааза, що дозволило оцінити ряд важливих параметрів.

- Встановлено індукований магнітним полем перехід метал-діелектрик у ниткоподібних кристалах InSb, що зумовлює розщеплення піків поздовжнього і поперечного магнітоопору та отримання гігантських значень g-фактора Ланде.

- Встановлена поверхнева надпровідність у ниткоподібних кристалах GaSb, зумовлена сильною спин-орбітальною взаємодією носіїв заряду в металевій фазі та визначено критичні магнітні поля.

- Встановлено перехід від слабкої антилокалізації до слабкої локалізації носіїв заряду, зумовлений зміною з температурою співвідношення між часом збою фази та часом спінової релаксації електронів у сильно легованих ниткоподібних кристалах GaSb із металевим ходом провідності.

- Виявлено, що вплив деформації в ниткоподібних кристалах GaSb приводить до розщеплення піків осциляцій Шубнікова – де Гааза, отримання гігантських значень g-фактора Ланде, зменшення ефективної маси електронів, пригнічення

ефектів надпровідності та слабкої локалізації.

Таким чином наукова новизна одержаних результатів полягає в тому, що вперше встановлено зв'язок та виявлено кореляцію між особливостями зміни електро- і магнітотранспортних властивостей ниткоподібних кристалів Si, Ge, InSb та GaSb із різною концентрацією легуючої домішки в широкому інтервалі температур, які покладені в основу концепції розроблення перетворювачів фізичних величин на їх основі.

Практичне значення результатів.

Необхідно відзначити практичну спрямованість даної дисертаційної роботи. Результати досліджень використано для створення елементів сенсорної техніки, зокрема тензорезисторів на основі ниткоподібних кристалів Ge та GaSb, датчиків гідростатичного тиску на основі спеціально легованих ниткоподібних кристалів GaSb n-типу провідності. Необхідно також зазначити, що розроблені автором технічні рішення захищені 8 патентами України.

Практичне значення одержаних результатів дисертації полягає у тому, що результати комплексного дослідження кінетичних ефектів у ниткоподібних кристалах Si, Ge, InSb та GaSb за ефективного впливу зовнішніх полів використані в сенсорній електроніці, зокрема для створення сенсорів магнітних, теплових і механічних величин, дієздатних в складних умовах експлуатації.

Достовірність та ступінь обґрунтованості отриманих результатів, наукових положень, висновків і рекомендацій.

Сформульовані висновки логічно виходять зі змісту дисертації та підтверджуються великою кількістю експериментальних даних і відтворюваністю результатів, одержаних на зразках широкого спектру матеріалів, а також теоретичним обґрунтуванням і практичним підтвердженням розроблених технологічних рішень. Наукові положення, висновки і рекомендації що сформульовані в дисертації, ґрунтуються на використанні класичних та сучасних методів, а також основних положень фізики напівпровідників.

Достовірність і обґрунтованість наукових результатів та висновків дисертаційної роботи Лях-Кагуй Н. С. забезпечується коректним використанням

математичних та різноманітних фізичних методів дослідження, що підтверджується результатами експериментальних перевірок. Використання сучасної обчислювальної техніки та промислового технологічного обладнання, а також добра узгодженість експериментальних даних із теоретичними моделями, дозволяють стверджувати, що наукові положення, висновки і рекомендації, представлені в дисертації є абсолютно достовірними. Зокрема, польові залежності магнітоопору ниткоподібних кристалів Si, Ge, InSb та GaSb при низьких температурах вивчали за допомогою біттерівського та надпровідного магнітів у Міжнародній лабораторії сильних магнітних полів і низьких температур у місті Вроцлаві (Польща).

Публікації результатів роботи, їх обговорення.

Основні наукові результати автора опубліковані впродовж останніх десяти років у виданнях за профілем дисертації. Теоретичні й експериментальні дослідження опубліковані в 59 основних наукових працях, з яких 35 статей у фахових наукових журналах України та у періодичних виданнях, які включені до міжнародних наукометричних баз Scopus та Web of Science. Аналіз змісту дисертації й наукових праць автора свідчить, що наукові положення та висновки опубліковані в повному об'ємі, а матеріали дисертації апробовані на багатьох міжнародних і вітчизняних науково-практичних конференціях. Аналіз публікацій із питань, висвітлених у дисертації, показав, що особистий внесок автора в отриманих наукових результатах є безсумнівним. Автореферат дисертації відповідає її змісту та опублікованим роботам.

Наголошуючи на високому рівні дисертаційних досліджень та їх практичній значущості, **робота не позбавлена недоліків**, серед яких варто зауважити наступні:

- 1) У другому та третьому розділі дисертації авторка порівнює низькотемпературні характеристики ниткоподібних кристалів Si з різною концентрацією легуючої домішки. Однак, з дисертації не видно, як визначалася концентрація легуючої домішки у зразках. Наприклад, варто б

було привести результати вимірювання температурної залежності рухливості носіїв заряду ниткоподібних кристалів Si.

- 2) У дисертації отриманий цікавий результат – виявлений гігантський магнітоопір деформованих ниткоподібних кристалів InSb, який лінійно залежить від індукції магнітного поля, що важливо для сенсорики. Однак, авторка не пояснює фізичну природу появи лінійної польової залежності магнітоопору під впливом деформації стиску, що може бути пов'язано, наприклад, з квантуванням електронних станів у приповерхневій області кристалу.
- 3) У ниткоподібних кристалах GaSb при низьких температурах ($< 4,2$ К) виявлений частковий перехід носіїв заряду у надпровідний стан, який характеризується дуже малим значенням довжини когерентності ($\xi(0) \sim 1,7$ нм) куперівських пар (розд. 6.3.2). У дисертації не проаналізовано, чим пояснюються такі малі значення довжини когерентності, які властиві в основному для високотемпературних надпровідників.
- 4) У ниткоподібних кристалах GaSb виявлений «кроссовер» від слабкої локалізації до антилокалізації носіїв заряду за низьких температур. Однак, не проаналізовано, як змінюється критична температура виявленого «кроссовера» під впливом деформації стиску, яка, як показано авторкою, приводить до суттєвих змін у кристалі, наприклад, до появи фази Беррі.
- 5) Дисертація починається з розділу присвяченого опису методики отримання зразків та проведення експериментальних досліджень. Огляд літератури зроблений в кожному розділі окремо. Більш доцільно було б виділити огляд літератури у першій окремий розділ, висновки якого вказували на необхідність і актуальність запровадження досліджень викладених у дисертації у наступних розділах.

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

ВИСНОВОК

У представленій роботі отримано нові науково обґрунтовані експериментальні результати та практичні рішення, що в сукупності вирішують актуальну задачу створення надчутливих сенсорів фізичних, дієздатних в екстремальних умовах експлуатації.

Автореферат дисертації відповідає вимогам МОН України, в ньому ґрунтовно розкрито зміст дисертації, що дозволяє ознайомитися з її основними положеннями.

Дисертаційна робота «Електро- і магнітотранспортні властивості базових сенсорних ниткоподібних кристалів Si, Ge, InSb, GaSb в околі переходу метал-діелектрик» в повній мірі відповідає вимогам п.п. 9, 10, 12, 13 «Порядку присудження наукових ступенів», затвердженого постановою Кабінету Міністрів України № 567 від 24 липня 2013 р. щодо здобуття наукового ступеня доктора технічних наук, а її автор Лях-Кагуй Наталія Степанівна заслуговує присудження наукового ступеня доктора технічних наук зі спеціальності 01.04.07 – фізика твердого тіла.

Проректор з науково-педагогічної роботи
Національного технічного університету
«Харківський політехнічний інститут»,
доктор технічних наук, професор

Г.С. Хрипунов

