

ВІДГУК

офіційного опонента
на дисертацію Бурбана Олександра Вікторовича
"Деформаційні ефекти в (L_1 - Δ_1)-моделі зони провідності кристалів германія",
подану на здобуття наукового ступеня
кандидата фізико-математичних наук
за спеціальністю 01.04.10 – фізика напівпровідників і діелектриків

Основними матеріалами для виробництва широкого класу пристроїв сучасної мікро-, нано- та оптоелектроніки є багатодолині напівпровідники, серед яких центральне місце займають кристали германія. Дослідження їх фізичних властивостей складає одну із важливих задач напівпровідникового матеріалознавства, що зумовлено можливістю перспективного та високоефективного використання даних матеріалів в якості базових елементів для різного роду напівпровідникових датчиків, інтегральних мікросхем, фотодетекторів, перетворювачів енергії, тощо. Ключовими в цьому напрямку є дослідження транспортних властивостей, відтворюваність електрофізичних параметрів та їх керована зміна під впливом зовнішніх факторів, що визначає роботу електронних приладів, в тому числі і в екстремальних умовах. Монокристали германію суттєво змінюють свої характеристики при дії механічних напружень, що пояснюється радикальною перебудовою його енергетичної структури. Як впливає з дисертаційної роботи, одновісні або гідростатичні тиски можна розглядати як надійні інструменти для зондування зонного спектру багатодолиного напівпровідника. Вдало поєднуючи теоретичні розрахунки в рамках теорії анізотропного розсіювання та експериментальні дослідження тензорезистивного ефекту для германію, автору роботи вдалось отримати ряд зонних параметрів для L і Δ -долин, довести вплив інверсії типу абсолютного мінімуму у визначенні рухливості носіїв і встановити додаткові механізми міждолинного розсіювання. Це, з однієї сторони, створює передумови для врахування деформаційних полів при конструюванні пристроїв, а, з іншої сторони, дає інформацію про деталі енергетичного спектру, анізотропію фізичних параметрів, особливості розсіювання заряду в напівпровідниках зі складною зонною структурою. Незважаючи на значний технічний прогрес в прикладній галузі, такі результати є важливими для подальшого розвитку фізичних моделей, глибшого розуміння природи кінетичних процесів в багатодолинних напівпровідниках, а також їх використання, що визначає **актуальність** даного дисертаційного дослідження. Розглянута в роботі проблема, яка знаходиться в руслі інтенсивно досліджуваних сьогодні задач, зокрема, в області напівпровідникових наноструктур на основі германія, є **цікавою і сучасною**.

Дисертаційна робота тісно пов'язана з напрямком наукових досліджень кафедри фізики і електротехніки Луцького національного технічного університету та науково-дослідної роботи "Морфологічні методи і моделі контролю якості напівпровідникових та композитних матеріалів".

Достовірність результатів

Результати дисертації отримані добре апробованими методами і тому нема підстав сумніватися в їхній **достовірності**. Це експериментальні методики дослідження кінетичних явищ, зокрема, тензорезистивного ефекту, та методи теорії анізотропного розсіювання, розвинуті для багатодолинних напівпровідників, метод деформаційного потенціалу та варіаційний метод Рітца. Крім того, автор додатково провів оцінки похибок, які виникають при вимірюваннях, причому ці похибки є однаковими для різних геометрій зразків з різною концентрацією домішок, чим додатково підтвердив достовірність своїх результатів по вивченню тензоефекту у вибраних кристалах. **Достовірність** результатів

також підтверджується узгодженістю отриманих електрофізичних характеристик досліджуваних кристалів германію з наявними в літературі даними.

Основні результати роботи, їхня новизна і значимість.

Дисертація складається з вступу, чотирьох розділів, висновків, списку літературних джерел, викладена на 141 сторінці, містить 39 рисунків та 6 таблиць.

У *Вступі* обґрунтовуються актуальність теми, формулюється мета та предмет дослідження, відображається наукова новизна та практичне значення роботи, відзначається особистий внесок автора та описується структура роботи.

У *Першому розділі* роботи для кристалу германію представлено огляд експериментального і теоретичного дослідження залежності питомого опору від прикладеного в різних кристалографічних напрямках тиску. Відмічається, що особливості п'єзоопору для даного напівпровідника можуть бути пояснені трансформацією різних долин його енергетичної структури. Аналізуються методи визначення енергетичних параметрів, таких як компоненти тензора деформаційного потенціалу. Відсутність повної інформації про ці константи, а також про ефективну масу для Δ -долини стимулювало пошукувача до проведення додаткових досліджень у рамках сформульованих у роботі завдань.

У *другому розділі* проведено опис установки для створення одновісної пружної деформації та вимірювання електричних параметрів для деформованих зразків германію. Дисертант звертає увагу на ретельну підготовку зразків до вимірювання питомого опору. Він попередньо провів теоретичні розрахунки впливу оптимальних геометричних розмірів, форми, ступеня легування на межі діапазону вимірювання тензорезистивного ефекту, що дозволило встановити залежність критичних напруг від площі поперечного перерізу зразків при одновісному тиску в різних кристалографічних напрямках.

Третій розділ містить результати, які стосуються визначення енергетичних параметрів Δ -долини в зоні провідності кристалу Ge. Тут слід відмітити оригінальний підхід, який автор застосував для одержання компонент тензора деформації та компонент тензора ефективної маси для даної долини. З цією метою були проведені вимірювання питомої електропровідності та п'єзоопору для одновісно деформованих монокристалів германію вздовж напрямку $[100]$, дані яких використовувались в аналітичних виразах для енергетичного зміщення Δ_1 -мінімуму та ефективної маси, одержаних на основі теорії потенціалу деформацій та теорії анізотропного розсіювання. У цьому ж розділі були визначені баричні коефіцієнти для Δ_1 -мінімуму та зміна енергетичної щільності між L і Δ -долинами. Цікавим результатом є виявлена різна поведінка L і Δ при одновісному тиску вздовж різних кристалографічних напрямків та гідростатичному тиску аж до появи інверсії даних долин. Досліджено вплив цієї інверсії типу $L_1 - \Delta_1$ на ефект екранування та з урахуванням хімічного зсуву у рамках варіаційного методу Рітца визначено енергію іонізації основного стану мілких донорів у n -Ge.

У *четвертому розділі* аналізуються температурні залежності питомого опору у різних моделях L_1 - долини (чотирьох, дво- та однодолинній), які мають місце при дії тиску вздовж кристалографічних напрямків $[100]$, $[110]$, $[111]$ та Δ_1 - долини з врахуванням впливу інверсії ($L_1 - \Delta_1$) абсолютного мінімуму на рухливість електронів. Для кожної моделі запропоновано домінуючий механізм розсіювання електронів. Показано, що експериментальні залежності питомого опору від температури для монокристалу германію можна пояснити тільки при наявності точно визначених констант електрон-фононної взаємодії для оптичних фононів та фононів, які приймають участь у міждолинному розсіянні. Про важливу роль механізму міждолинного розсіювання носіїв свідчать експериментальні та розраховані температурні залежності рухливості електронів для різних моделей Δ_1 - долини (чотирьохеліпсоїдної та шестиеліпсоїдної), а також залежності параметра анізотропії часів релаксації від температури. Як впливає з дисертаційної роботи, поряд з вказаними вище механізмами розсіювання електронів, для пояснення п'єзоопору в n -Ge потрібно враховувати нееквівалентне міждолинне розсіювання між

мінімумами L_1 і Δ_1 - долин зони провідності, оскільки тиски приводять до суттєвого перерозподілу електронів між мінімумами різного типу.

До *найважливіших результатів*, одержаних на основі комплексного дослідження впливу деформаційних полів на кінетичні характеристики кристалу германія, слід віднести:

- у роботі детально представлено методику визначення енергетичних параметрів основного і додаткового мінімумів зони провідності кристалу германія у поєднанні результатів експериментальних досліджень тензорезистивного ефекту та теоретичних розрахунків в рамках теорії анізотропного розсіювання носіїв. Одержані системи рівнянь, які дозволили знайти компоненти тензора ефективної маси та компоненти тензора потенціалу деформації, баричні коефіцієнти;

- показано, що інверсію типу ($L_1 - \Delta_1$) абсолютного мінімуму у кристалі германію можна реалізувати тільки при гідростатичному та одновісних тисках вздовж кристалографічних напрямків $[100]$ і $[110]$;

- вперше досліджено вплив інверсії типу ($L_1 - \Delta_1$) на ефекти екранування у кристалі Ge. З урахуванням хімічного зсуву одержані енергії іонізації основного стану для різних мілких донорів (Sb, P, As), які суттєво збільшуються при переході від L_1 долини до Δ_1 долини. Встановлена природа різної довжини екранування для L_1 і Δ_1 - мінімумів зони провідності;

- у рамках розгляду різних моделей для $L_1 -$, Δ_1 - долин та інверсії типу ($L_1 - \Delta_1$) абсолютного мінімуму з використанням одержаних енергетичних параметрів на основі дослідження температурних залежностей питомого опору, концентраційних та температурних залежностей параметра анізотропії часів релаксації та рухливості носіїв встановлені механізми тензоефектів та механізми розсіювання носіїв заряду в монокристалі германія. Ці результати вказують на суттєву роль міждолинного розсіювання електронів;

- доведена також необхідність врахування нееквівалентного міждолинного розсіювання електронів між L_1 і Δ_1 - долинами для пояснення тензорезистивного ефекту в даному кристалі при одновісних тисках ($1.6 < P < 2.7$ ГПа) вздовж напрямку $[100]$;

- одержано значний п'єзоопір та коефіцієнт тензочутливості (при пружній деформації до тисків 3 ГПа), величини яких суттєво залежать від температури.

Узгодження експериментальних температурних залежностей питомого опору та рухливості з теоретичними розрахунками свідчать про коректність використаної зонної моделі для кристалу германію.

Таким чином, з великого об'єму проведених у дисертаційній роботі досліджень випливає, що вимірюючи електрофізичні характеристики в кристалі Ge при дії тиску, можна прослідкувати за радикальною перебудовою його зонної структури.

Зроблені автором висновки разом з приведеними в дисертації результатами підтверджують *наукову і практичну цінність* роботи, а також її *новизну*.

При загальному позитивному враженні від дисертації, по тексту можна зробити й окремі зауваження.

1. Як відомо, зонна структура кристалу Ge, крім найнижчого L-мінімуму, містить локальний мінімум у центрі зони Бріллюена (в точці Г), який також може зазнавати зміщення при деформаціях, і непрямоzonний напівпровідник стає прямоzonним. Доречно було б привести інформацію (наприклад, баричний коефіцієнт) про зміну Г-екстремуму під дією одновісних і гідростатичного тисків та порівняти з такими ж змінами з L та Δ – долин. Також у роботі ніде не згадується, чому носії Г- долини не приймають участі у явищах перенесення.
2. Зонна структура під впливом зовнішніх напружень змінюється, а, відповідно, міняються і компоненти тензора ефективної маси. Це також підтверджується в рамках методу Пікуса Г.Є. в *кр* –наближенні. При цьому у дисертаційній роботі

відсутні оцінки таких змін для компонент тензора ефективної маси для L та Δ – долин. Було б доцільно навести принаймні літературні дані щодо залежності ефективної маси від тиску для монокристалу германія.

3. У роботі стверджується, що барична залежність деформаційного зміщення $\Delta E_{\Delta 1}$ долини Δ_1 має лінійний характер, що підтверджується експериментальними даними, однак теоретичний вираз (3.5) не містить явної залежності від тиску. Тому було б цікаво графічно представити залежність $\Delta E_{\Delta 1}(P)$ (3.5) та порівняти її з такою ж згідно формули (3.6).
4. У тексті дисертації зустрічаються поодинокі граматичні помилки, описки і неточності у формулах (наприклад, формула (3.28)), невдалі вирази (наприклад, “міждолинні” фонони). Для деяких фізичних величин автор використовує різні позначення, зокрема, для заряду електрона “ e ” і “ q ”, для тиску “ X ” і “ P ”.

Ці зауваження жодним чином не применшують значення отриманих результатів та дисертаційної роботи в цілому.

Оцінка роботи в цілому

Все вище згадане дозволяє зробити висновок, що дисертаційна робота Бурбана О.В. є завершеним науковим дослідженням, а представлені в роботі дослідження є певним внеском у фізику кінетичних явищ в багатодолинних напівпровідниках. Автором належно розроблено методику дослідження кінетичних характеристик у кристалах германію при дії одновісних тисків і отримано нові вагомі результати, кількість і якість яких відповідає рівню кандидатських дисертацій. Основні результати роботи повноцінно відображені у 29 друкованих працях у фахових виданнях (11) і збірниках наукових праць та апробовані на міжнародних і вітчизняних конференціях. Автореферат повністю відображає зміст і основні результати дисертації. Висновки роботи відповідають поставленим та вирішуваним завданням.

Дисертація написана гарною мовою, викладена грамотно, зрозуміло та послідовно, якісно ілюстрована. Робота містить ґрунтовні пояснення експериментальних вимірювань. Автор успішно освоїв як методики технічної підготовки зразків і проведення експерименту, так і теоретичні методи розрахунків кінетичних ефектів, що свідчить про глибоке розуміння та добру кваліфікацію автора.

Вважаю, що за сукупністю та якістю отриманих наукових результатів, їх інтерпретацією, фундаментальною та прикладною цінністю дисертаційна робота "Деформаційні ефекти в $(L_1-\Delta_1)$ -моделі зони провідності кристалів германія" повністю відповідає вимогам ДАК України до кандидатських дисертацій, а її автор Бурбан Олександр Вікторович цілком заслуговує присудження йому наукового ступеня кандидата фізико-математичних наук за спеціальністю 01.04.10 – фізика напівпровідників і діелектриків.

Офіційний опонент:

доктор фізико-математичних наук, професор кафедри
фізики напівпровідників ДВНЗ “Ужгородський національний університет”,
зав. теор.лабораторією НДІ фізики і хімії твердого тіла УжНУ

Хархаліс Л.Ю.

Підпис д.ф.-м. н., проф. Хархаліс Л.Ю. підтверджую:
Вчений секретар ДВНЗ “Ужгородський
національний університет”

Мельник О.О.

14.04.2016р.

