

ВІДГУК

офіційного опонента на дисертаційну роботу

Бурбана Олександра Вікторовича

“Деформаційні ефекти в $(L_1-\Delta_1)$ -моделі зони провідності кристалів германія”,

представлену на здобуття наукового ступеня

кандидата фізико-математичних наук

за спеціальністю 01.04.10 – фізика напівпровідників і діелектриків

Актуальність теми дисертації. Важливою задачею фізики напівпровідників та напівпровідникового матеріалознавства є отримання нових напівпровідникових матеріалів та вдосконалення властивостей вже існуючих. Одним із таких перспективних матеріалів електронної техніки, незважаючи на всебічну вивченість його властивостей, і надалі залишається монокристалічний германій. Енергетична зонна структура германію є анізотропною. В анізотропному середовищі, на відміну від ізотропного, існує багато явищ, зумовлених анізотропними властивостями кристалів, вивчення яких є цікавим як з теоретичної, так і практичної точок зору. Для прямого спостереження впливу анізотропії електронного спектра носіїв заряду на кінетичні ефекти необхідно, як правило, застосовувати додатковий вплив, наприклад, деформації. При цьому суттєвий, а то й домінуючий вклад у відповідні ефекти будуть вносити ті екстремуми зони провідності та валентної, які не беруть участь при малих збуреннях. Тому доцільним є визначення параметрів цих екстремумів, також різних кінетичних ефектів за їх участю. А це, в свою чергу, обґрунтовує актуальність теми дисертації та проведених досліджень в дисертаційній роботі Бурбана Олександра Вікторовича.

Новизна роботи в цілому та зокрема визначається, оригінальністю знаходження параметрів Δ_1 -мінімуму зони провідності монокристалів германію, таких як константи деформаційного потенціалу, ефективна маса густини станів та компоненти тензора ефективної маси, обчислених значень енергії іонізації основного стану мілких донорів Sb, P, As з врахуванням хімічного зсуву в Δ_1 - моделі зони провідності германію, оригінальністю інтерпретації окремих результатів та запропонованих механізмів тензоефектів в n-Ge при сильних одновісних тисках. Врахування ж даних параметрів для Δ_1 -мінімуму дозволило теоретично дослідити особливості розсіяння електронів для Δ_1 - та $(L_1-\Delta_1)$ -моделей зони провідності монокристалів германія, пояснити особливості тензорезистивного ефекту для одновісно деформованих вздовж кристалографічного напрямку [100] монокристалів n-Ge при одновісних тисках більших від 1,5 ГПа. Вперше теоретично обґрунтована особливість специфічної

форми та геометричні розміри зразків n-Ge для досліджень тензоефектів при високих одновісних тисках. Автором вперше оцінено вплив хімічного зсуву на енергію іонізації цих донорів, що є важливим для знаходження відповідних параметрів інших типів мінімумів зони провідності германію.

Дисертаційну роботу написано згідно з вимогами, які пред'являються до кандидатських дисертацій.

Дисертація складається з вступу, чотирьох розділів, висновків та переліку використаної літератури. Загальний обсяг дисертаційної роботи становить 141 сторінка: з яких 39 рисунків та 6 таблиць. У роботі використано 126 бібліографічних посилань. У **вступі** обґрунтовано актуальність дисертаційної роботи, мету та основні завдання досліджень, відзначено наукову новизну та практичне значення одержаних результатів, наведено відомості про апробацію результатів дисертаційної роботи дисертантом, його особистий внесок, кількість публікацій, об'єм та структуру дисертації. **В першому розділі** розглянуто основи теорії тензоефектів в багатодолинних напівпровідниках, опрацьовано ряд теоретичних та експериментальних робіт, в яких вивчався вплив сильних гідростатичних та одновісних тисків на трансформацію зонної структури n-Ge та пов'язаних із цим різних кінетичних ефектів. Також аргументовано актуальність дослідження впливу значних деформаційних полів на енергетичну зонну структуру та механізми розсіяння носіїв заряду в n-Ge, вивчення властивостей напружених наноструктур на основі германію. **Другий розділ містить** опис методики та техніки експериментальних досліджень тензоефектів в монокристалах n-Ge. **У третьому та четвертому розділі** викладено результати оригінальних досліджень.

Дисертаційна робота Бурбана О.В. містить чимало цікавих ідей, реалізація яких дозволила отримати ряд теоретичних та експериментальних результатів. До **найбільш вагомих результатів** можна віднести визначені на основі теорії анізотропного розсіяння та вимірювань лише направленої тензорезистивного ефекту вздовж кристалографічного напрямку [100] монокристалів n-Ge компонент тензорів деформаційного потенціалу та ефективної маси для Δ_1 -мінімуму зони провідності. Вагомою є одержана як експериментально, так і теоретично температурна залежності рухливості електронів для двохдолинної Δ_1 -моделі зони провідності n-Ge. Аналіз даної залежності показує, що, на відміну від чотирьох та шестиеліпсоїдної Δ_1 -моделі германію, в температурному інтервалі 100-300 К для двохдолинної Δ_1 -моделі, міждолинне розсіяння є другорядним по відношенню до розсіяння на акустичних фононах та іонах домішки. Встановлено, що на тензорезистивний ефект при $T > 100$ К для одновісно деформованих вздовж кристалографічного напрямку [100] монокристалів n-Ge при одновісних тисках $P > 1,5$ ГПа поряд з відомими механізмами тензорезистивного ефекту додатково впливає механізм

нееквівалентного міждолинного розсіяння електронів між L_1 - та Δ_1 -мінімумами. Також заслуговують на увагу теоретичні розрахунки енергії іонізації основного стану мілких донорів Sb, P, As, зв'язаних із Δ_1 -долинами зони провідності германію..

Обґрунтованість та достовірність результатів дисертаційної роботи забезпечено використанням добре апробованих експериментальних та теоретичних методів досліджень: методу дослідження тензоефектів при одновісній пружній деформації, варіаційний метод Рітца. Розрахунки рухливості проводились на основі добре розробленої на сьогодні теорії анізотропного розсіяння та деформаційного потенціалу. Результати, одержані в дисертаційній роботі, пройшли широку апробацію на профільних семінарах, всеукраїнських і міжнародних конференціях та опубліковані у фахових наукових виданнях.

У роботі чітко сформульовано мету та завдання, які необхідно було вирішити для досягнення цієї мети. Досить компактний огляд літературних джерел дозволив виділити актуальність та новизну невирішених задач з даного напрямку досліджень. Одержані в роботі експериментальні та теоретичні результати добре проілюстровані. Також, що є досить позитивним, зроблено порівняння проведених теоретичних розрахунків з експериментальними результатами інших авторів, що ще раз підтверджує достовірність визначених параметрів зонної структури германію та використаних для розв'язку поставлених задач теоретичних методів та теорій.

Робота не позбавлена деяких недоліків, зокрема:

1. При великих концентраціях домішки може проявлятися вплив її природи на ефективність механізму домішкового розсіяння, що відповідно призведе до появи додаткових похибок. Тому в розрахунках рухливості бажано було б враховувати "серцевину" іона для конкретної домішки.
2. В таблиці 3.3 наведені обчислені значення енергії іонізації основного стану мілких донорів у n -Ge, зв'язаних з Δ_1 – долинами за допомогою метода Рітца. Проте не вказано з якою точністю вони обчислені.
3. Оскільки властивості Ge наноструктур суттєво залежать від величини та розподілу в них внутрішніх механічних напружень, то з практичного застосування було б доречним зробити оцінку величини внутрішніх деформаційних полів, які виникають, наприклад, в гетереструктурах SiGe в залежності від співвідношення між товщинами шарів кремнію та германію.
4. На принциповій схемі підсилювача рис.2.4, та пояснення до неї, на Стор.41, 42 містяться некоректності. Необхідний коефіцієнт підсилення визначається відношенням опорів резисторів R_1 та R_3 а не R_1 та R_2 .

Дисертація викладена доброю мовою хоча містить деякі неточності та друкарські помилки. Також є певні зауваження щодо оформлення. Наприклад,

на стор. 63, рис 3.2, підпис під рисунком не розділений з текстом, це стосується також рисунків 3.3, 3.8, 4.2, 4.4, та 4.5. На деяких рисунках відсутнє позначення кривих рис.4.5 ст.98. На стор. 30 потрібно замінити «уточнялись» на «уточнювалися»; на стор. 31 «внутридолиним» оптичним фоном на «внутрішньо долинним»; на стор. 33 «розглядався» - «розглядався» і т.п.

Варто зазначити, що вказані вище зауваження ніякою мірою не впливають на основні висновки роботи, їх наукове та практичне значення. Дисертація Бурбана О.В. є завершеним науковим дослідженням, яке розв'язує конкретні актуальні задачі фізики напівпровідників та вносить вагомий вклад в розуміння впливу радикальної деформаційної перебудови зонної структури монокристалів п-Ge на механізми тензоефектів та розсіяння носіїв струму. Результати її мають фундаментальне та прикладне значення.

Автореферат дисертації оформлений згідно чинних вимог і повністю відображає зміст дисертації, основні наукові положення та практичну значимість роботи.

Представлена дисертаційна робота “Деформаційні ефекти в (L1-Δ1)-моделі зони провідності кристалів германія” цілком відповідає затвердженню Постановою Кабінету Міністрів України від № 567 24 липня 2013 року вимогам Департаменту атестації кадрів МОН України щодо кандидатських дисертацій, а її автор, Бурбан Олександр Вікторович, безумовно, заслуговує присудження йому наукового ступеня кандидата фізико-математичних наук за спеціальністю 01.04.10 – фізика напівпровідників і діелектриків.

Офіційний опонент,
старший науковий співробітник
відділу напівпровідникових детекторів
іонізуючого випромінювання,
Інституту фізики напівпровідників
імені В.Є. Лашкарьова НАН України,
кандидат фізико-математичних наук,
старший науковий співробітник



Єрмаков В. М.

Підпис Єрмакова Валерія Миколайовича
Засвідчую
Вчений секретар
Інституту фізики напівпровідників
імені В.Є. Лашкарьова НАН України
доктор хім. наук, проф.




Томашик В. М.