

ВІДГУК

офіційного опонента

доктора фізико-математичних наук, професора Головацького В.А.

на дисертаційну роботу Луньова Сергія Валентиновича

«Вплив дефектної структури на електричні та тензоелектричні властивості монокристалів n-Ge та n-Si та плівкових наноструктур на їх основі»,

представленої на здобуття наукового ступеня

доктора фізико-математичних наук

за спеціальністю 01.04.10 – фізика напівпровідників і діелектриків

Актуальність теми дослідження

Зростання вимог до сучасної електронної техніки, таких як швидкодія ЕОМ, механічна, термічна та радіаційна стійкість, точність вимірювальної апаратури та ін., потребує розробки або вдосконалення її складових частин, які, в основному, виготовляються з напівпровідникових матеріалів. Функціональні властивості таких матеріалів істотно залежать від дефектів та домішок, які виникають при технологічних процесах їх отримання або експлуатації. За даними багатьох літературних джерел та доповідей вчених на вітчизняних та міжнародних конференціях, семінарах напівпровідникові структури германію і кремнію викликають сьогодні значний інтерес та знаходять своє практичне використання в сучасній електронній техніці. Зокрема, на базі даних матеріалів створюються діоди, тріоди, силові випрямлячі, дозиметричні прилади, тензодатчики, датчики Холла, терморезистори, оптичні елементи інфрачервоної техніки, лазери, високошвидкісні нанотранзистори. Тому актуальним є дослідження легування різними домішками та впливу радіаційного опромінення на різні фізичні та експлуатаційні властивості як об'ємних монокристалів кремнію та германію, так і наноструктур на їх основі.

Особлива увага технологів та науковців сьогодні присвячена дослідженню напружених гетероструктур кремній-германій, що обумовлено можливістю керувати широким спектром фізичних властивостей композиційних шарів структури за рахунок зміни величини деформації в шарах та значними успіхами в створенні на основі таких гетероструктур нових перспективних приладів з використанням квантових ефектів. З'являються світловипромінюючі та фотоприймальні кремній-германієві пристрої, що дозволяють кремнієвій технології успішно конкурувати з традиційними оптоелектронними матеріалами, такими як з'єднання сполук $A^{III}B^V$. Останні дослідження присвячені переважно вивченню електричних властивостей напружених шарів германію, оскільки кремній практично себе вичерпав в технологіях створення каналів МОН-транзисторів, заснованих на ефекті

масштабування. Заміна ж кремнію на германій дозволить підвищити швидкодню таких транзисторів за рахунок більшої рухливості носіїв струму в германії. Моделювання електричних властивостей напружених наноплівоч (шарів) германію вимагає, в першу чергу, відомостей про фундаментальні параметри зонної структури германію та механізми тензоефектів та розсіяння носіїв струму в об'ємних монокристалах германію.

Створення на основі кремнію та германію радіаційно стійкої радіоелектронної апаратури космічних апаратів, пристроїв ядерної та атомної енергетики, ракетних комплексів стратегічного призначення висуває вимогу пошуку шляхів підвищення радіаційної стійкості даних матеріалів та відповідно проведення комплексних досліджень механізмів утворення, відпалу радіаційних дефектів та їх впливу на електричні властивості монокристалів кремнію та германію. Також використання радіаційного опромінення та термообробки в деяких випадках може слугувати перспективною технологією одержання монокристалів германію та кремнію з комплексом нових функціональних властивостей, на основі яких можуть бути створені сенсори тиску, магнітного поля, температури, ІЧ-випромінювання з принципово іншими робочими та експлуатаційними характеристиками.

Тому проведені в дисертаційній роботі Луньова С.В. дослідження електричних та тензоелектричних властивостей монокристалах n-Ge, n-Si та наноплівоч германію є актуальними та своєчасними.

Обґрунтованість наукових положень, висновків та рекомендацій

Одержані в роботі експериментальні результати є достовірними, оскільки для їх інтерпретації були використані різні експериментальні методики, такі як вимірювання ефекту Холла, тензоопору, тензо-холл-ефекту, інфрачервоної Фур'є-спектроскопії. Результати проведених теоретичних розрахунків добре узгоджуються з відповідними експериментальними результатами. Обґрунтування одержаних результатів та висновків базувалися дисертантом на основі основних положень радіаційної фізики напівпровідників, теорії деформаційних ефектів в анізотропних напівпровідниках, зонної теорії твердого тіла, теорії пружності, статистики електронного та діркового газу, теорії розсіяння носіїв струму в анізотропних напівпровідниках та наноструктурах.

Наукова новизна одержаних результатів

В дисертаційній роботі одержано багато нових наукових результатів, що є важливими як для вітчизняної, так і світової науки, зокрема фізики

напівпровідників та наноструктур, радіаційної фізики твердого тіла. До таких основних результатів слід віднести наступні:

1. На основі експериментальних результатів досліджень тензоопору для одновісно деформованих вздовж кристалографічного напрямку [100] монокристалів n-Ge до тисків 3 ГПа та теорії анізотропного розсіяння електронів на іонах легуючих домішок та акустичних фононах знайдено компоненти тензорів ефективної маси та деформаційного потенціалу для Δ_1 -мінімуму зони провідності германію.

2. Вперше на основі варіаційного методу Рітца з врахуванням хімічного зсуву та анізотропії закону дисперсії обчислено енергію іонізації основного стану мілких домішок фосфору, сурми та миш'яку, зв'язаних з Δ_1 -мінімумами германію,

3. Встановлено, що на величину тензоопору для одновісно деформованих вздовж кристалографічного напрямку [100] монокристалів n-Ge, крім відомих механізмів, впливає міждолинне нееквівалентне розсіяння електронів на оптичних фононах між L_1 - та Δ_1 мінімумами германію. При температурах $T > 300$ К на тензоопір n-Ge буде впливати додатково також механізм власної провідності.

4. Встановлено, що для наноплівки германію, вирощеної на підкладці $\text{Ge}_{(x)}\text{Si}_{(1-x)}$ з кристалографічною орієнтацією (001), збільшення вмісту кремнію в підкладці призводить до виникнення внутрішніх механічних напружень в наноплівці величиною більше, ніж 2%. Наявність таких механічних напружень призводить до інверсії типу (L_1 - Δ_1) абсолютного мінімуму зони провідності германію та до зростання енергії іонізації легуючої донорної домішки в наноплівці германію, що пояснюється збільшенням ефективної маси електрона та ступеня взаємодії енергетичного рівня домішки з валентною зоною.

5. Показано, що електричні властивості нелегованих та легованих донорною домішкою наноплівок Ge/Si, Ge/ $\text{Ge}_{(0,64)}\text{Si}_{(0,36)}$ та Ge/ $\text{Ge}_{(0,9)}\text{Si}_{(0,1)}$ визначаються, в першу чергу, структурою їх зон провідності та валентної. Лише для наноплівок германію товщиною $d < 7$ нм їх електричні властивості суттєво залежать від ефектів розмірного квантування.

6. Вперше на основі досліджень ефекту Холла, тензо-холл-ефекту та інфрачервоної Фур'є-спектроскопії було встановлено, що в опромінених монокристалах n-Ge електронами з енергією 10 MeV основними радіаційними дефектами, що відповідають за їх електричні та тензоелектричні властивості, є комплекси $\text{VO}_i\text{I}_{2\text{Ge}}$, та області розпорядкування. Електропровідність та тензоопір одновісно деформованих монокристалів n-Si, опромінених електронами з енергією 12 MeV, будуть визначатися радіаційними дефектами,

що належать як відомим комплексам VO_i , (A-центр) та C_iO_i , так і новим – комплексам VO_iP .

7. Вперше експериментально зафіксовано аномальний ізотермічний відпал для опромінених електронами з енергією 10 MeV монокристалів n-Ge та запропоновано його теоретичну модель, на основі якої була обчислена енергія активації відпалу складних та точкових дефектів (ядер областей розвпорядкування та комплексів VO_iI_{2Ge}) і пояснено механізм такого відпалу.

Практична цінність одержаних наукових результатів

До найбільш вагомих результатів, які зможуть знайти своє практичне використання, слід віднести такі:

1. Одержаний для одновісно деформованих вздовж кристалографічного напрямку [100] монокристалів n-Ge при тисках $P > 1,6$ ГПа ефект значного тензоопору може бути використаний для конструювання на основі n-Ge чутливого елемента сенсора високого одновісного тиску.

2. Одержані залежності величини внутрішніх механічних напружень, які виникають в наноплівці германію, від компонентного складу підкладки $Ge_{(x)}Si_{(1-x)}$ можуть бути використані технологіями при синтезі наноплівок германію з керованими електричними та оптичними властивостями.

3. Одержане зростання рухливості дірок при кімнатній температурі, більше, ніж в 1,5 рази, для наноплівки $Ge/Ge_{(0,9)}Si_{(0,1)}$ товщиною $d > 50$ нм може бути використаним в технологіях створення на основі такої наноплівки каналів р-MOSFET та р-MODFET транзисторів.

4. Встановленні оптимальні умови електронного опромінення в комплексному поєднанні з термовідпалом монокристалів n-Ge та n-Si дозволили підвищити їх магнітну чутливість та тензочутливість, що може знайти своє практичне використання при створенні високочутливих сенсорів магнітного поля та одновісного тиску.

5. Розроблене на основі епоксидно-діанової смоли марки ЕД–20 з наповнювачем порошку заліза захисне покриття дозволило значно підвищити радіаційну стійкість монокристалів n-Si, що значно розширить сферу експлуатації радіоелектронної апаратури, виготовленої на основі таких монокристалів n-Si, в полях підвищеної радіації (атомна та ядерна енергетика, космос, авіаційна промисловість).

Повнота викладу в опублікованих працях наукових положень, висновків та рекомендацій

За результатами проведених досліджень дисертантом опубліковано 69 публікацій, з яких – 27 статей у наукових журналах, які індексовано в наукометричних базах даних Scopus та Web of Science Core Collection, 10 статей – у наукових фахових періодичних виданнях України та інших держав, 2

монографії, одна з яких опублікована закордоном, 4 патенти на корисну модель та 26 тез вітчизняних та міжнародних наукових конференцій, семінарів.

Відсутність у дисертації та наукових працях, які розкривають її результати, академічного плагіату, фабрикації, фальсифікації

Представлені результати досліджень здобувачем в наукових працях та дисертації є новими та повністю відповідають вимогам академічної доброчесності. Дисертант досить детально зазначив свій особистий внесок в публікаціях. Використані ідеї, теорії, методи, експериментальні та теоретичні результати і тексти інших авторів в наукових працях та дисертації мають посилання на відповідне джерело.

Оформлення дисертації та реферату

Дисертаційна робота складається зі вступу, п'яти розділів та висновків до них, загальних висновків, списку використаних джерел та одного додатка. Загальний обсяг дисертації становить 379 сторінок, з яких 323 сторінки основного тексту, що включає 133 рисунки та 18 таблиць. Зміст реферату повністю відповідає основним положенням дисертаційної роботи. Дисертація та реферат оформлені за вимогами відповідно до наказу МОН України № 40 від 12.01.2017 р. «Про затвердження вимог до оформлення дисертації».

Зауваження щодо змісту дисертації та реферату

1. З яких міркувань вибиралась пробна хвильова функція основного стану електрона, локалізованого на мілкому донорі, для розв'язку рівняння Шредінгера на основі варіаційного методу Рітца саме у вигляді (2.46)?
2. Дисертантом не вказано чи впливали квантово-розмірні ефекти на визначену енергію іонізації донорних домішок в напруженій наноплівці германію.
3. Під дією одновісних деформацій може спостерігатися атомна переорієнтація радіаційних дефектів, яка впливає на зміну їх енергії іонізації. Чи враховувався вплив такого ефекту на тензоелектричні властивості одновісно деформованих монокристалах n-Ge та n-Si, опромінених швидкими електронами?
4. Здобувачем в дисертації не вказано розмір зерен наповнювачів порошків алюмінію та заліза для одержаного радіаційно-захисного покриття на основі епоксидної смоли і чи досліджувався вплив розміру таких зерен на радіаційну стійкість кремнію.

Проте, вказані зауваження ніяким чином не применшують цінність одержаних наукових результатів, висновків та рекомендацій, а також високу

оцінку наукового рівня та загальне позитивне враження від дисертаційної роботи.

Загальний висновок

Дисертаційна робота Луньова С.В. є завершеним науковим дослідженням, яке виконано автором самостійно на високому науковому рівні. В роботі дисертантом одержано багато нових результатів, які є достовірними та науково обґрунтованими, мають значний науковий та практичний інтерес. Тема та мета дисертаційної роботи відповідає паспорту спеціальності 01.04.10 – фізика напівпровідників і діелектриків.

Дисертаційна робота Луньова С.В. «Вплив дефектної структури на електричні та тензоелектричні властивості монокристалів n-Ge та n-Si та плівкових наноструктур на їх основі» за науковим рівнем, новизною та цінністю одержаних результатів і рекомендацій, а також значною кількістю профільних публікацій за темою дисертації, дотриманням принципів академічної доброчесності повністю відповідає вимогам Порядку присудження та позбавлення наукового ступеня доктора наук (Постанова Кабінету Міністрів України від 17 листопада 2021 р. № 1197), а її автор, Луньов Сергій Валентинович, беззаперечно заслуговує присудження йому наукового ступеня доктора фізико-математичних наук за спеціальністю 01.04.10 – фізика напівпровідників і діелектриків.

Офіційний опонент

доктор фізико-математичних наук, професор,
професор кафедри термоелектрики
та медичної фізики
Чернівецького національного університету
імені Юрія Федьковича

Головацький В.А.

