

ВІДГУК

офіційного опонента

на дисертаційну роботу Луньова Сергія Валентиновича на тему:
«Вплив дефектної структури на електричні та тензоелектричні властивості
монокристалів n-Ge та n-Si та плівкових наноструктур на їх основі»,
що представлена на здобуття наукового
ступеня доктора фізико-математичних наук
за спеціальністю 01.04.10 – фізика напівпровідників і діелектриків

Важливим напрямком розвитку сучасної фізики напівпровідників та матеріалознавства є створення елементної бази з наперед заданими параметрами для потреб мікро- та оптоелектроніки. Одним із шляхів реалізації такого завдання є цілеспрямована зміна параметрів існуючих матеріалів під дією зовнішніх факторів, зокрема опромінення, іншим, який особливо активно розвивається в останні роки, – перехід до матеріалів з нанометричними розмірами, в яких спостерігається ряд нових ефектів, пов'язаних з розмірним квантуванням. Паралельне використання обох вказаних методів є привабливим як з огляду на фундаментальні аспекти нових фізичних явищ, так і з точки зору отримання нових матеріалів з широким інтервалом характеристик для застосування в напівпровідниковій електроніці.

Серед зовнішніх чинників, які мають здатність цілеспрямовано змінювати фізичні характеристики твердих тіл, особливе місце належить високоенергетичному опроміненню, при якому внаслідок радіаційного дефектоутворення відбуваються зміни як у кристалічній структурі, так і в електронній підсистемі. Індуковані високоенергетичним опроміненням ефекти у напівпровідниках визначаються типом, енергією, потоком бомбардуючих частинок та умовами опромінення. Це, зокрема, стосується класичних напівпровідників, серед яких особлива роль належить модельним матеріалам кремнію та германію, для яких відомі дослідження впливу опромінення на електронну структуру. Слід зазначити, що знання поведінки фізичних параметрів даних монокристалів під дією опромінення є вкрай важливим для дослідження впливу аналогічних факторів на нанокристалічні матеріали.

Завдяки створенню в останні роки нових класів нанорозмірних об'єктів із використанням успіхів молекулярно-пучкової епітаксії, іонної імплантації, колоїдного синтезу та інших новітніх методів отримання мезоскопічних напівпровідників, на основі яких формуються різноманітні топологічні структури квантових точок, квантових дротів, квантових ям, квантових острівців, квантових кілець, квантових каскадів тощо, можливість використання наноструктур для створення мікромініатюрних електронних та оптичних

приладів стала однією з найактуальніших тем сучасної фізики напівпровідників та нанотехнології. У той же час для дослідження нових фізичних ефектів, що спостерігаються у широкому спектрі нанооб'єктів, важливе значення має вивчення дії на них зовнішніх чинників, зокрема температури, тиску, іонізуючого випромінювання.

Найбільш придатними для такого типу досліджень є структури, що за відносно короткий період досліджень вже встигли стати "класичними", модельними. До них слід віднести напівпровідникові структури на основі монокристалічного кремнію та германію, які є базою для створення діодів, тріодів, силових випрямлячів, дозиметричних приладів, сенсорів тиску, магнітного поля, температури, елементів інфрачервоної техніки, лазерів, нанотранзисторів з високопровідними каналами. Використання напівпровідникових структур германію та кремнію в різних пристроях функціональної електроніки висуває вимогу пошуку методів підвищення радіаційної стійкості таких структур та відповідно проведення досліджень механізмів дефектоутворення, відпалу радіаційних дефектів та їх впливу на електрофізичні властивості. З цього погляду практично невивченим є комплексний вплив точкових та складних радіаційних дефектів, які утворюються в кремнії та германії, наприклад, при їх опроміненні високоенергетичними електронами ($E \geq 10$ MeV) на електричні та тензоелектричні властивості даних монокристалів. Такі дослідження самі по собі є актуальними не тільки з фундаментальної, а й з прикладної точки зору, оскільки їх результати можуть бути використані при моделюванні впливу різного роду опромінення на фізичні властивості матеріалів такого типу та створенні на їх основі пристроїв для реєстрації іонізуючого випромінювання.

Тому проведення комплексних досліджень впливу технологічних та радіаційних дефектів на механізми розсіювання носіїв струму, електропровідність, тензоефекти в об'ємних монокристалах n-Ge, n-Si та наноплівках германію визначає актуальність дисертаційної роботи Луньова С.В.

Дисертаційна робота складається зі вступу, п'яти розділів, у кінці кожного з яких містяться короткі висновки, загальних висновків, списку використаних джерел (443 позиції) та одного додатка. Загальний обсяг дисертації становить 379 сторінок, з них 323 сторінки основного тексту, що включає 133 рисунки та 18 таблиць. Дисертацію та реферат оформлено згідно з наказом МОН України № 40 від 12.01.2017 р. «Про затвердження вимог до оформлення дисертації».

Слід відзначити, що основні наукові результати, що розкривають основний зміст дисертації, висвітлено у 21 науковій публікації в журналах, які індексуються в базах даних Scopus та WoS, 10 статтях у наукових фахових

періодичних виданнях України (7) та інших держав (3), 4 патентах України на корисну модель та узагальнено в 2 монографіях. Статті автора, які відзначено в авторефераті за номерами 4 і 7 та опубліковано в журналі "Semiconductors", який є англійськомовною версією російського журналу "Физика и техника полупроводников" відповідно до Наказу Міністерства освіти і науки № 496 від 27.05.2022 не можуть бути зараховані при розгляді дисертаційної роботи, оскільки вони опубліковані у виданнях держави, визнаної Верховною Радою України державою-агресором. Варто також зауважити, що результати опубліковано у чотирьох статтях у закордонних журналах західних країн ("Physica E: Low-dimensional Systems and Nanostructures" (Q2), "Radiation Effects & Defects in Solids" (Q3), "Surface Engineering and Applied Electrochemistry" (Q3), "Latvian Journal of Physics and Technical Sciences" (Q3)). Отримані дисертантом результати пройшли апробацію на понад 20-ти наукових конференціях національного та міжнародного рівня.

Дисертантом проведено комплексні експериментальні дослідження з використанням різних та добре розроблених на сьогодні методик вимірювань ефекту Холла, тензоопору, тензо-холл-ефекту, інфрачервоної Фур'є-спектроскопії, а також теоретичні розрахунки на основі теорій пружності, деформаційного потенціалу та анізотропного розсіяння, варіаційного методу Рітца та теорії збурень. Добра узгодженість між одержаними експериментальними результатами різними методами, а також хороша кореляція між результатами теоретичних розрахунків та відповідними експериментальними даними підтверджує достатній рівень обґрунтованості отриманих автором результатів, наукових положень та висновків дисертації.

Обґрунтованість наукових положень, висновків і рекомендацій забезпечено коректно сформульованою метою та основними завданнями дисертаційного дослідження.

Переходячи до конкретних результатів дисертаційної роботи, можна відзначити, що отримані у роботі результати є оригінальними. У роботі отримано ряд нових наукових результатів, до яких можна віднести наступні:

1. Проведено розрахунки величини внутрішніх механічних напружень, зонної структури та електричних властивостей для нелегованих та легованих донорною домішкою наноплівки германію, вирощених на підкладці $\text{Ge}_x\text{Si}_{1-x}$ з кристалографічною орієнтацією (001) залежно від компонентного складу підкладки. Встановлено, що електричні властивості наноплівки Ge/Si , $\text{Ge}/\text{Ge}_{0,64}\text{Si}_{0,36}$ та $\text{Ge}/\text{Ge}_{0,9}\text{Si}_{0,1}$ визначаються особливостями їх зонної структури, яка залежить від величини внутрішніх механічних напружень, температури та ефектів розмірного квантування, які проявляються для наноплівки германію товщиною $d < 7$ нм.

2. Вперше на основі експериментальних досліджень та теоретичних розрахунків показано, що в *n*-Ge при опроміненні електронами з енергією 10 MeV утворюються як точкові дефекти, що належать комплексам VO_iI_{2Ge} , так і складні дефекти – області розупорядкування. Опромінення електронами з енергією 12 MeV монокристалів кремнію, легованих фосфором, призводить переважно до утворення в їх об'ємі лише точкових дефектів, що відповідають відомим комплексам VO_i (А-центр) та C_iO_i , а також нового типу дефектів – комплексів VO_iP .

3. Розроблено теоретичну модель рухливості електронів для недеформованих та одновісно деформованих монокристалах *n*-Ge та *n*-Si з глибокими рівнями радіаційного та технологічного походження, на основі якої пояснено на прикладі опромінених електронами монокристалів *n*-Ge та *n*-Si, а також монокристалів германію, легованих глибокою домішкою золота, одержане експериментально аномальне зростання холівської рухливості електронів при збільшенні температури або величини одновісного тиску.

4. На основі досліджень тензо-холл-ефекту та інфрачервоної Фур'є-спектроскопії встановлено механізми тензоопору при одновісному тиску для опромінених електронами монокристалів *n*-Ge та *n*-Si при кімнатній температурі. Виявлено, що наявність тензоопору для опроміненого *n*-Ge обумовлено іонізацією рівня $E_v + 0,27$ eV, який належить комплексу VO_iI_{2Ge} , при одновісній деформації, внаслідок чого змінюється співвідношення між концентраціями електронів та дірок. Тензоопір опромінених монокристалів *n*-Si визначається лише змінами рухливості електронів, оскільки глибокі локальні рівні, що відповідають комплексам VO_i та VO_iP , є іонізованими, а іонізація глибокого рівня $E_v + 0,35$ eV комплексу C_iO_i при деформації не проявляється при кімнатній температурі.

У дисертації представлено й інші результати, але, на нашу думку, вищезазначених достатньо, щоб дати високу оцінку новизні та значимості роботи.

Отримані в рамках дисертаційного дослідження результати мають також практичне значення, оскільки, наявність для *n*-Ge, на відміну від *n*-Si, при тисках $P > 1,6$ ГПа вздовж кристалографічного напрямку [100] значного тензоопору може бути використано для конструювання на основі германію чутливого елемента сенсора високого одновісного тиску. Також встановлено умови електронного опромінення та ізотермічного відпалу, які значно підвищують температурну, магнітну та тензочутливість монокристалів *n*-Ge і *n*-Si. Запропоновано спосіб підвищення радіаційної стійкості монокристалів *n*-Ge та *n*-Si за рахунок використання епоксикомпозитних покриттів, одержаних на основі епоксидно-діанової смоли марки ЕД-20 з наповнювачами порошків

алюмінію та заліза. Практичне значення результатів підтверджується наявними в дисертанта патентами.

Результати дисертаційного дослідження, які зазначено як такі, що мають наукову новизну та практичне значення, є оригінальними. Це додатково підтверджується як проведенням попередньої експертизи результатів дисертаційних досліджень Луньова С.В., так і наявністю в дисертанта опублікованих статей у виданнях, в яких обов'язково проводиться рецензування і перевірка поданого матеріалу на дотримання вимог академічної доброчесності.

У той же час слід звернути увагу на те, що робота не позбавлена й окремих недоліків, серед яких варто виділити такі:

1. З матеріалів роботи незрозуміло, чи впливав час витримки досліджуваних зразків кремнію та германію після електронного опромінення на зміну їх електрофізичних характеристик? Яким чином забезпечувалося проведення опромінення зразків при температурах рідкого азоту та гелію і вимірювання їх характеристик за тих же температурних умов (див. наприклад, рис. 4. 13) при транспортуванні зразків з міста Ужгород в міста Луцьк чи Київ, де проводилися дослідження. Незрозуміло також, з яких міркувань дисертантом вибиралась величина потоку електронного опромінення монокристалів кремнію та германію, необхідного для утворення заданої концентрації радіаційних дефектів.

2. Крім представлених у дисертації температурних залежностей сталої Холла для опромінених електронами монокристалів *n*-Ge, які додатково піддавалися ізотермічному відпалу, дисертантові варто було б представити відповідні температурні залежності холівської рухливості, що дозволило б більш детально описати вплив перебудови утворених радіаційних дефектів при відпалі на розглядувані механізми розсіяння електронів в *n*-Ge.

3. Дисертантом не розглядається вплив зміни енергії іонізації глибокого рівня $E_v+0,27$ eV комплексу VO_iI_{2Ge} при одночасному тискові на величину холівської рухливості електронів в опромінених електронами монокристалах *n*-Ge (рис. 5.5, рис. 5.6 та рис. 5.11).

4. Результати в переважній більшості автором подаються у вигляді огляду своїх опублікованих робіт з відповідними посиланнями, що веде до незручностей при сприйнятті інформації, оскільки виникає постійна потреба звертатися до списку використаних джерел для визначення авторства тексту. Наприклад: "в роботах [431, 432] розглянуто ...", а варто: *нами розглянуто ...* [431, 432]. На нашу думку, дисертанту не потрібно було подавати загальновідому інформацію, наприклад, детально описувати методи отримання гетероструктур та надграток чи принцип роботи мікротрона М-30 та ін. Варто

було б скоротити кількість другорядних формул по тексту дисертації, наприклад, на стор. 99, 100, 123.

Водночас слід відзначити, що вищевказані зауваження не впливають на загальне позитивне враження від дисертаційної роботи.

Реферат достатньою мірою відображає матеріал, викладений у дисертації.

Таким чином, можна константувати, що дисертаційна робота С.В.Луньова є завершеним науковим дослідженням, яке виконано автором на належному високому науковому рівні.

Дисертаційна робота С.В. Луньова «Вплив дефектної структури на електричні та тензоелектричні властивості монокристалів n -Ge та n -Si та плівкових наноструктур на їх основі» за науковим рівнем, практичною та теоретичною цінністю одержаних результатів і положень, а також кількістю та якістю публікацій, дотриманням принципів академічної доброчесності повністю відповідає вимогам п. 7, 9 Порядку присудження та позбавлення наукового ступеня доктора наук (Постанова Кабінету Міністрів України від 17 листопада 2021 р. № 1197), а її автор Луньов Сергій Валентинович 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,
завідувач відділу матеріалів функціональної
електроніки Інституту електронної фізики
НАН України

 Олександр ГОМОННАЙ

Підпис Олександра Васильовича Гомонная засвідчую
Вчений секретар Інституту
електронної фізики НАН України,
кандидат хімічних наук, ст. дослідник



Людмила РОМАНОВА