

ЗАТВЕРДЖУЮ

Ректор Волинського національного  
університету імені Лесі Українки

Анатолій ЦЬОСЬ  
„10” жовтня 2022 р.



## ВИСНОВОК

про наукову новизну, теоретичне та практичне значення результатів  
докторської дисертації

Луцьова Сергія Валентиновича

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

за спеціальністю 01.04.10 – фізика напівпровідників і діелектриків

Рецензенти у складі д-р фіз.-мат. наук, проф. Мирончук Г.Л., д-р фіз.-мат. наук, проф. Федосова С.А. та д-р фіз.-мат. наук, доц. Галяна В.В., розглянувши докторську дисертацію канд. фіз.-мат. наук, доц. Луцьова Сергія Валентиновича на тему: «Вплив дефектної структури на електричні та тензоелектричні властивості монокристалів n-Ge та n-Si та плівкових наноструктур на їх основі» та публікації, в яких представлені основні результати докторської дисертації, а також за результатами фахового семінару прийняли наступний висновок:

**Актуальність теми дослідження та її зв'язок з науковими програмами, планами, темами**

За даними багатьох міжнародних конференцій, симпозіумів та семінарів напівпровідникові структури на основі багатодолинних напівпровідників Ge та Si є сьогодні елементною базою сучасної мікро- та наноелектроніки та викликають найбільший інтерес для створення на основі них різних електронних приладів та датчиків. В даному відношенні значна увага приділяється сенсорам тиску, які можуть функціонувати в області дії низьких або високих температур, сильних електричних, магнітних та радіаційних полів, вібрацій. Також напружений

германій та кремній є перспективними матеріалами наноелектроніки. Зокрема, напружені плівки (шари) германію та кремнію знаходять своє практичне використання в технологіях створення каналів MOSFET транзисторів, лазерів на гетеропереходах, електрооптичних модуляторів. При цьому перед технологами та науковцями постає проблема контролю внутрішніх деформаційних полів та їх впливу на електричні властивості таких плівок. Виходячи з того, що процес поліпшення параметрів кремнієвих інтегральних схем, який заснований на зменшенні довжини каналу (масштабуванні), наблизився до свого фізичного обмеження, то багато вчених прийшли до висновку про необхідність заміни кремнію на германій, який має більшу рухливість електронів та дірок. Створення надійних теоретичних моделей розрахунку електропровідності, рухливості та концентрації носіїв струму для таких напружених плівок вимагає спочатку проведення детальних досліджень механізмів тензоефектів та розсіяння носіїв струму в об'ємних монокристалах германію та відомостей щодо параметрів екстремумів зон провідності та валентної цих монокристалів, зокрема високоенергетичних мінімумів, наприклад,  $\Delta_1$ -мінімумів, для яких на даний час існують лише поодинокі роботи із досить розрізненими даними щодо значень констант деформаційного потенціалу та компонент тензора ефективної маси.

Проблема забезпечення радіаційної стійкості радіоелектронної апаратури, яка використовується в різних пристроях ядерної та атомної енергетики, космічної техніки, підводних та надводних кораблів з ядерними реакторами, ракетних комплексах стратегічного призначення, фізичному експерименті, за останні роки стала однією з найважливіших серед комплексу інших традиційних проблем. Тому в даному відношенні використання напівпровідникових структур германію та кремнію в радіоелектронній апаратурі, в свою чергу, висуває вимогу підвищеної радіаційної стійкості таких структур та відповідно проведення фундаментальних досліджень механізмів утворення, ідентифікації природи радіаційних дефектів та їх впливу на електричні властивості даних монокристалів. Опромінення германію та кремнію потоками електронів або  $\gamma$ -квантів з енергіями в кілька МеВ призводить до утворення лише точкових дефектів та їх комплексів. При енергіях

електронного опромінення 10 Мев і більших в германії та кремнії крім точкових дефектів утворюються складні дефекти – області розпорядкування. В більшості відомих на сьогодні робіт розглядається вплив радіаційних дефектів якогось одного типу (точкових або складних) на електричні властивості германію та кремнію і майже зовсім відсутня інформація щодо комплексного впливу цих дефектів. Також практично невивченою є кінетика відпалу радіаційних дефектів в германії, особливо, коли відбувається одночасний відпал як точкових, так і складних дефектів. У той же час використання опромінення в комплексному поєднанні з термообробкою (відпалом) дозволяє цілеспрямовано змінювати фізичні та експлуатаційні властивості монокристалів германію та кремнію. Це відкриває перспективи створення на основі даних монокристалів різного роду напівпровідникових сенсорів (тиску, магнітного поля, температури, ІЧ-випромінювання) з керованими функціональними властивостями.

З огляду на вищенаведене актуальність дисертаційної роботи полягає в комплексному дослідженні впливу технологічних та радіаційних дефектів на механізми розсіяння носіїв струму, електропровідності, тензоефектів в об'ємних монокристалах n-Ge, n-Si та наноплівках германію.

Наукові результати, які одержані в дисертації, пов'язані з напрямком наукових досліджень та планами наукових семінарів кафедри фізики та вищої математики Луцького національного технічного університету, з виконуваними науково-дослідними роботами та темами:

1. Науково-дослідна робота «Розробка комплексу керованих властивостей багатодолинних напівпровідників та полімеркомпозитних матеріалів для функціонування в екстремальних умовах експлуатації», № державної реєстрації 0117U000630.
2. Науково-дослідна робота «Дослідження функціональних властивостей напівпровідникових та епоксикомпозитних матеріалів», № державної реєстрації 0121U108191.

3. Науково-дослідна робота «Дослідження впливу різних фізико - активних впливів на властивості матеріалів електроніки та машинобудування», № державної реєстрації 0116U001936.
4. Цільова тема ВФА НАН України “Елементарні процеси при взаємодії фотонів та електронів з речовиною в газовій та конденсованій фазах”, № 0112U002079, № 59/130-12-64, яка виконувалась кафедрою фізики та вищої математики Луцького національного технічного університету спільно з Інститутом електронної фізики НАН України.
5. Науково-дослідна робота «Наземні радіаційні випробування матеріалів та приладів космічного призначення: вимоги та практика», яка виконувалась спільно з Інститутом електронної фізики НАН України та ДП КБ «Південне» ім. М.К. Янгеля.

У межах зазначених вище тем здобувач особисто брав участь в проведенні експериментальних досліджень електропровідності, тензорезистивного ефекту, ефекту Холла, тензо-холл-ефекту, вимірюваннях ІЧ-спектроскопії, провів всі теоретичні розрахунки та дав інтерпретацію одержаних результатів. В першій науково-дослідній роботі здобувач був відповідальним виконавцем, а в другій та третій – керівником.

### **Наукова новизна одержаних в роботі результатів**

На основі лише проведених досліджень тензоопору для монокристалів n-Ge при сильних одновісних тисках вздовж кристалографічного напрямку [100], коли реалізується ( $L_1-\Delta_1$ )-інверсія типу абсолютного мінімуму в германії, та виразів теорії анізотропного розсіяння для часу релаксації електронів в умовах їх розсіяння на іонах домішки та акустичних фононах було знайдено компоненти тензорів ефективної маси та деформаційного потенціалу для  $\Delta_1$ -мінімуму. Використання даних параметрів дозволило вперше обчислити з врахуванням хімічного зсуву енергію іонізації основного стану домішок фосфору, сурми та миш'яку, зв'язаних з  $\Delta_1$ -мінімумами, та рухливість електронів для різної структури  $\Delta_1$ -зони.

Встановлено, що на відміну від недеформованих або одновісно деформованих вздовж кристалографічного напрямку [100] монокристалів n-Ge до тисків 1,8 ГПа, при тисках  $P \approx 8$  ГПа вздовж кристалографічного напрямку [110] та гідростатичному тискові близько 6 ГПа (для чотирьох та шестидолинної  $\Delta_1$ -моделі германію відповідно) в n-Ge суттєвим стає міждолинне розсіяння електронів на оптичних фононах, а в  $(L_1-\Delta_1)$ -моделі – нееквівалентне міждолинне розсіяння електронів між  $L_1$ - та  $\Delta_1$ -мінімумами, яке впливає на величину тензоопору одновісно деформованих вздовж кристалографічного напрямку [100] монокристалів n-Ge.

При температурах  $T > 300$  К тензоопір таких монокристалів n-Ge, крім механізмів фонного розсіяння, буде визначатись механізмами власної провідності. При цьому для області одновісних тисків від 0,8 до 2,4 ГПа буде проявлятися двохзонний механізм власної провідності.

Проведені розрахунки величини внутрішніх механічних напружень та зонної структури для наноплівки германію, вирощеної на підкладці  $\text{Ge}_{(x)}\text{Si}_{(1-x)}$  з кристалографічною орієнтацією (001) в залежності від компонентного складу підкладки.

Вперше на основі запропонованої моделі зміщення при деформації локальних рівнів домішок було встановлено, що при збільшенні вмісту кремнію в підкладці відбувається зростання енергії іонізації як мілкої, так і глибокої легуючої донорної домішки в наноплівці германію, яке пов'язане зі зростанням ефективної маси електрона за рахунок деформаційної перебудови зони провідності наноплівки.

Встановлено, що електричні властивості наноплівок 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 в таких наноплівках товщиною  $d < 7$  нм. Легування ж цих наноплівок донорними домішками призводить до збільшення концентрації електронів провідності та зменшення ролі квантово-розмірних ефектів.

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  $VO_iI_{2Ge}$  (A-центри, модифіковані двома міжвузловими атомами германію), так і складні дефекти – області розвпорядкування. 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  $VO_i$ , (A-центр) та  $C_iO_i$ , а також нового типу дефектів – комплексів  $VO_iP$  (A-центрів, модифікованих домішкою фосфору).

Вперше виявлено аномальний ізотермічний відпал для опромінених електронами з енергією 10 MeV монокристалів n-Ge, встановлено його механізми та проведено розрахунки енергії активації відпалу ядер областей розвпорядкування, комплексу  $VO_iI_{2Ge}$  та частотних факторів для цих дефектів.

Вперше розроблена теоретична модель рухливості електронів для недеформованих та одновісно деформованих монокристалах n-Ge та n-Si з глибокими рівнями радіаційного та технологічного походження. На основі даної моделі було пояснено експериментально одержане зростання холівської рухливості електронів при збільшенні температури або величини одновісного тиску для опромінених електронами монокристалів n-Ge та n-Si, монокристалів германію, легованих глибокою домішкою золота. Показано, що таке зростання пов'язане зі зменшенням амплітуди крупномасштабного потенціалу та концентрації заряджених дефектів, які є активними центрами розсіяння електронів.

Встановлені механізми тензоопору для опромінених електронами монокристалів n-Ge та n-Si при одновісному тискові та кімнатній температурі. Наявність тензоопору для опроміненого n-Ge пояснюється іонізацією рівня  $E_v + 0,27$  eV, що належить комплексу  $VO_iI_{2Ge}$ , при одновісній деформації, внаслідок чого буде змінюватись 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  $VO_iP$ , будуть повністю іонізованими, а іонізація глибокого рівня  $E_v + 0,35\text{eV}$  комплексу  $C_iO_i$  при деформації не буде проявлятися при кімнатній температурі.

### **Практичне значення одержаних в роботі результатів**

Одержаний при тисках  $P > 1,6$  ГПа, на відміну від n-Si, значний тензорезистивний ефект для одновісно деформованих вздовж кристалографічного напрямку [100] монокристалів n-Ge може бути використаний для конструювання на основі n-Ge чутливого елемента сенсора високого одновісного тиску, що зможе працювати в широкому діапазоні температур.

Проведені розрахунки величини внутрішніх механічних напружень та зонної структури для наноплівки германію, вирощеної на підкладці  $Ge_{(x)}Si_{(1-x)}$  з кристалографічною орієнтацією (001), можуть бути використанні інженерами-технологами та науковцями при моделюванні та синтезі нелегованих та/або легованих наноплівок германію з керованими електричними та оптичними властивостями.

Одержане для напруженої наноплівки германію, товщиною  $d > 50$  нм, яка вирощена на підкладці  $Ge_{(0,9)}Si_{(0,1)}$ , зростання рухливості дірок більше, ніж в 1,5 рази, може мати прикладне застосування при створенні на основі такої наноплівки високопровідних каналів p-MOSFET та p-MODFET транзисторів.

Одержана при кімнатній температурі лінійна залежність тензоопору для опромінених монокристалів n-Ge потоком електронів  $\Phi = 5 \cdot 10^{15}$  ел./ $\text{cm}^2$  з енергією 10 MeV при тисках від 0,25 ГПа до 0,9 ГПа вздовж кристалографічного напрямку [100], на відміну від неопроміненого n-Ge, може бути використана при розробці на основі опромінених монокристалів n-Ge сенсорів одновісного тиску з таким діапазоном вимірювань.

Вперше одержане при кімнатній температурі зростання величини тензоопору монокристалів n-Si за рахунок їх опромінення потоками електронів  $\Phi \geq 1 \cdot 10^{17}$  ел./ $\text{cm}^2$  з енергією 12 MeV відкриває перспективи для конструювання на основі таких монокристалів n-Si сенсорів високого одновісного тиску з підвищеним значенням коефіцієнта тензочутливості.

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

Показано, що використання епоксидно-діанової смоли марки ЕД-20, особливо з наповнювачами порошків алюмінію та заліза, в якості шару покриття монокристалів n-Ge та n-Si дозволяє значно підвищити їх радіаційну стійкість, що є ключовою задачею проектування радіаційно стійких елементів систем автоматики та радіоелектронної апаратури, виготовлених на основі даних монокристалів, для атомних електростанцій, космічних апаратів, ракетних комплексів.

### **Апробація результатів дослідження**

Основні результати досліджень представлено на наукових семінарах кафедри фізики та вищої математики Луцького національного технічного університету, вітчизняних та міжнародних наукових конференціях, семінарах: Proceeding of the XVIIIth XXth and International Seminar on Physics and Chemistry of Solids (September 12-15, 2012, and September 13 – 16, 2015, Lviv, Ukraine); I Міжнародна науково-практична конференція «Актуальні проблеми прикладної фізики» (24-28 вересня, 2012, Севастополь, Україна); VI та VII Міжнародна наукова конференція «Релаксаційні, нелінійні й акустооптичні процеси та матеріали» РНАОПМ'2012 та РНАОПМ'2014 (25-29 травня, 2012, та 8-12 червня, 2014, м. Луцьк – Шацькі озера, Українка); Всеукраїнська наукова конференція «Актуальні проблеми теоретичної, експериментальної та прикладної фізики» АПТЕПФ-2012 (20-22 вересня, 2012, м. Тернопіль, Україна); VI, VII та VII Українська наукова конференція з фізики напівпровідників УНКФН-6, УНКФН-7 та УНКФН -8 (30 вересня – 4 жовтня, 2013, м. Чернівці, 26-30 вересня, 2016, м. Дніпро, 2-4 жовтня, 2018, м. Ужгород, Україна); Proceedings of the XI and XII International Conference «Electronics and Applied Physics» (October 21-24, 2014, October 19-22, 2016, Kyiv, Ukraine); Тези доп. 7-ої та 8-ої Міжнародної науково-



технічної конференції «Сенсорна електроніка та мікросистемні технології» (30 травня – 3 червня, 2016, та 28 травня – 1 червня, 2018, м. Одеса, Україна); 12-й Міжнародна конференція «Взаємодія випромінювання з твердим тілом» (19-22 вересня, 2017, Мінськ, Білорусь); XXIV та XXV щорічна наукова конференція Інституту ядерних досліджень НАН України (10-13 квітня, 2017, та 16-20 квітня, 2018, м. Київ, Україна); IV Міжнародна, Наукова конференція «Актуальні проблеми фундаментальних наук» (1-5 червня, 2021, м. Луцьк, Україна); Конференція молодих вчених з фізики напівпровідників «Лашкар'євські читання-2012, 2013, 2014, 2016, 2017 (3-5 квітня, 2012, 2 – 4 квітня, 2013, 2014, 6-8 квітня, 2016, 5-7 квітня, 2017, м. Київ, Україна); Матеріали VI Всеукраїнської науково-практичної конференції молодих вчених та студентів «Фізика і хімія твердого тіла. Стан, досягнення і перспективи» (16-17 жовтня, 2020, м. Луцьк, Україна); Міжнародна конференція молодих вчених та аспірантів «ІЕФ'2017» (23-26 травня, 2017, м. Ужгород, Україна); Міжнародна наукова конференція студентів і молодих науковців з теоретичної та експериментальної фізики «Еврика–2012» (19–22 квітня, 2012, м. Львів, Україна).

### **Повнота викладу матеріалів дисертації в публікаціях та особистий внесок у них здобувача**

Положення та найвагоміші результати дисертаційної роботи знайшли своє відображення в 69 наукових працях, з яких 27 статей індексованих 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 колективні монографії та 4 патенти на корисну модель. Наукові публікації відповідають вимогам п. 8 Порядку присудження та позбавлення наукового ступеня доктора наук (Постанова Кабінету Міністрів України від 17 листопада 2021 р. № 1197) та наказу МОН України № 1220 від 23.09.2019 р. «Про опублікування результатів дисертацій на здобуття наукових ступенів доктора і кандидата наук». Більшість наукових праць здобувача за результатами дисертаційного дослідження процитовано у провідних наукових

журналах. Відповідно до бази даних Scopus на даний час є 57 цитувань в 29 публікаціях, індекс Гірша здобувача рівний 5.

Постановка завдань, одержані основні наукові та практичні результати, їх інтерпретація та висновки, які представляють зміст та тему дисертації, отримано та сформульовано здобувачем особисто. Експериментальні дослідження в дисертації проводились здобувачем особисто або з співавторами публікацій за допомогою на сьогодні добре розроблених методик вимірювання ефекту Холла, тензоопору, тензо-холл-ефекту та інфрачервоної Фур'є-спектроскопії. Теоретичні розрахунки параметрів  $\Delta_1$ -долин германію, електричних властивостей напружених монокристалів n-Ge та n-Si і наноплівки германію здійснювались здобувачем з використанням теорії деформаційного потенціалу, анізотропного розсіяння, варіаційного методу Рітца та теорії збурень.

### **Оцінка мови та стилю дисертації**

Дисертаційна робота написана грамотно, чітко та логічно структурована. Стиль викладу матеріалу дослідження, наукових положень, висновків і рекомендацій забезпечує легкість та доступність їх сприйняття. Застосована у роботі наукова термінологія є загальноновизнаною.

### **Відповідність змісту дисертації паспорту спеціальності**


Зміст дисертації відповідає спеціальності 01.04.10 – фізика напівпровідників і діелектриків.

### **Загальний висновок**

На підстав вищенаведеного вважаємо, що дисертаційна робота Луньова Сергія Валентиновича «Вплив дефектної структури на електричні та тензоелектричні властивості монокристалів n-Ge та n-Si та плівкових наноструктур на їх основі» є завершеним комплексним науковим дослідженням, яке за своєю актуальністю, ступенем новизни, науковим рівнем та практичною цінністю, змістом та оформленням повністю відповідає вимогам п. 7, 9 Порядку присудження та позбавлення наукового ступеня доктора наук (Постанова Кабінету Міністрів України від 17 листопада 2021 р. № 1197) та наказу МОН України № 40 від 12.01.2017 р. «Про затвердження вимог до оформлення

дисертації» і паспорту спеціальності 01.04.10 – фізика напівпровідників і діелектриків.

Рекомендуємо 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», подану на здобуття наукового ступеня доктора фізико-математичних наук за спеціальністю 01.04.10 – фізика напівпровідників і діелектриків, до попереднього розгляду та захисту в спеціалізованій вченій раді Д 61.051.01 Державного вищого навчального закладу «Ужгородський національний університет».

Рецензент  Галина МИРОНЧУК

Рецензент  Сергій ФЕДОСОВ

Рецензент  Володимир ГАЛЯН

  
ПІДПИС  Мухомова, Т. Тетяна  
ЗАСВІДЧУЮ  
Вчений секретар університету  
«10» 10 2022 р.