

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ  
УЖГОРОДСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ

ЛУНЬОВ СЕРГІЙ ВАЛЕНТИНОВИЧ



УДК 621.315.592.3; 538.975; 544.032

**ВПЛИВ ДЕФЕКТНОЇ СТРУКТУРИ НА ЕЛЕКТРИЧНІ ТА  
ТЕНЗОЕЛЕКТРИЧНІ ВЛАСТИВОСТІ МОНОКРИСТАЛІВ n-Ge ТА n-Si ТА  
ПЛІВКОВИХ НАНОСТРУКТУР НА ЇХ ОСНОВІ**

01.04.10 – фізика напівпровідників і діелектриків

**РЕФЕРАТ**

дисертації на здобуття наукового ступеня  
доктора фізико-математичних наук

Ужгород – 2022

Дисертацією є рукопис

Робота виконана на кафедрі фізики та вищої математики Луцького національного технічного університету Міністерства освіти і науки України

Офіційні опоненти: доктор фізико-математичних наук, професор  
**Гомоннай Олександр Васильович**,  
Інститут електронної фізики НАН України,  
завідувач відділу матеріалів функціональної електроніки;

доктор фізико-математичних наук, професор  
**Головацький Володимир Анатолійович**,  
Чернівецький національний університет  
імені Юрія Федьковича,  
професор кафедри термоелектрики та медичної фізики;

доктор фізико-математичних наук, доцент  
**Оліх Олег Ярославович**  
Київський національний університет імені Тараса Шевченка,  
професор кафедри загальної фізики.

Захист відбудеться „19” січня 2023 року о 11<sup>00</sup> годині на засіданні спеціалізованої вченої ради Д 61.051.01 при ДВНЗ «Ужгородський національний університет» за адресою: м. Ужгород, вул. Волошина, 54, аудиторія 181.

З дисертацією можна ознайомитись на офіційному сайті <https://www.uzhnu.edu.ua/uk/infocentre/6824> та у науковій бібліотеці Ужгородського національного університету за адресою: м. Ужгород, вул. Університетська, 14.

Учений секретар  
спеціалізованої вченої ради  
доктор фізико-математичних наук,  
професор



О. О. Грабар

## ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

**Актуальність теми.** За даними багатьох міжнародних конференцій, симпозіумів та семінарів напівпровідникові структури на основі багатодолинних напівпровідників Ge та Si є сьогодні елементною базою сучасної мікро- і 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. Наприклад, на сьогодні не існує повної теоретичної моделі зв'язку між провідністю каналів MOSFET транзисторів та величинами деформацій, які в них виникають. 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. Така заміна дозволяє збільшити коефіцієнт підсилення та тунельний струм таких транзисторів. Це, в свою чергу, робить актуальним дослідження електричних властивостей напружених наноплівки германію.

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. До таких параметрів, в першу чергу, належать константи деформаційного потенціалу та ефективна маса, які є надійно встановленими для  $L_1$ -мінімумів зони провідності та віток валентної зони германію. Проте, при описі різних кінетичних та оптичних ефектів в сильно деформованих монокристалах германію або в наноструктурах на його основі необхідно враховувати вклад в такі ефекти інших 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. А це вимагає проведення додаткових експериментальних досліджень та пошуку методів визначення даних параметрів зонної структури германію.

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, оскільки опромінення напівпровідників навіть малими потоками радіації може призводити до суттєвих змін їх електричних параметрів. Пошук методів підвищення радіаційної стійкості германію та кремнію вимагає проведення фундаментальних досліджень механізмів утворення, ідентифікації природи радіаційних дефектів та їх впливу на електричні властивості даних монокристалів. Можливість використання методу електронного парамагнітного резонансу для кремнію, на відміну від германію, дозволила досить точно встановити природу, мікроструктуру та енергетичні рівні багатьох радіаційних дефектів в кремнії.

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 не вивченою 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 контролювано утворювати дефекти структури заданої концентрації в напівпровідниках і тим самим цілеспрямовано змінювати їх фізичні та експлуатаційні властивості. Утворенні радіаційні дефекти, як правило, створюють в забороненій зоні напівпровідника глибокі енергетичні рівні, які можуть бути неіонізованими при кімнатній температурі та вищій. Це відкриває перспективи створення різного роду напівпровідникових сенсорів (тиску, магнітного поля, температури, ІЧ-випромінювання) з керованими функціональними властивостями. Також створення глибоких рівнів в забороненій зоні напівпровідника можливе за рахунок легування певними домішками. Однак така технологія є досить дороговартісною та має такі основні недоліки: 1) обмежена розчинність легуючих домішок, що значно зменшує діапазон керування концентрацією носіїв струму; 2) зменшення ступеня однорідності матеріалу при збільшенням концентрації легуючої домішки, що може призводити до виникнення значних градієнтів питомого опору. Тому встановлення оптимальних умов опромінення та термообробки монокристалів германію та кремнію дозволить одержати на основі даних матеріалів принципово нові електронні прилади та сенсори з покращеними технічними характеристиками. Все вище сказане аргументує **актуальність** цього дисертаційного дослідження.

### **Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами**

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.

**Методи дослідження.** Електричні та тензоелектричні властивості монокристалів n-Ge та n-Si досліджувались з використанням методик вимірювань ефекту Холла, тензоопору та тензо-холл-ефекту. Ідентифікація природи утворених радіаційних дефектів в n-Ge та n-Si здійснювалась на основі вимірювань інфрачервоної Фур’є-спектроскопії. Розрахунки констант деформаційного потенціалу, компонент тензора ефективної маси для  $\Delta_1$ -мінімуму зони провідності германію, рухливості електронів та питомого опору неопромінених та опромінених електронами монокристалів n-Ge та n-Si, напружених наноплівки германію проводились на основі теорій пружності, деформаційного потенціалу та анізотропного розсіяння. Визначення енергії іонізації основного стану мілких донорів в  $\Delta_1$ -моделі германію здійснювалось з використанням варіаційного методу Рітца та теорії збурень.

**Об’єктом дослідження** були електричні та тензоелектричні властивості неопромінених та опромінених електронами монокристалів n-Ge та n-Si; напружених наноплівки германію, нелегованих та легованих донорними домішками.

**Предметом дослідження** було встановлення взаємозв’язків між дефектною структурою монокристалів n-Ge та n-Si, наноплівки германію та механізмами розсіяння електронів, електропровідності та тензоопору таких напівпровідникових структур.

#### **Мета та завдання дослідження**

Мета дисертаційної роботи полягала у вивченні загальних закономірностей та механізмів тензоефектів, електропровідності, розсіяння електронів в монокристалах n-Ge та n-Si та наноплівках германію з радіаційними та/або технологічними дефектами, що створюють як мілкі, так і глибокі локальні енергетичні рівні.

Для досягнення поставленої мети необхідно було вирішити наступні **завдання**:

1. Визначити компоненти тензорів ефективної маси та деформаційного потенціалу для  $\Delta_1$ -мінімуму зони провідності германію, обчислити на основі варіаційного методу Рітца та теорії збурень енергію іонізації мілких донорів Sb, P, As, зв'язаних з  $\Delta_1$ -мінімумами германію.

2. Дослідити механізми розсіяння електронів, тензоопору та власної провідності в одновісно деформованих монокристалах n-Ge при таких тисках, коли реалізується  $L_1$ -,  $\Delta_1$ - та  $L_1$ - $\Delta_1$ -модель зони провідності германію.

3. Провести розрахунки зонної структури, електричних властивостей нелегованих та легованих наноплівочок германію, які вирощені на підкладці  $\text{Ge}_{(x)}\text{Si}_{(1-x)}$  з кристалографічною орієнтацією (001), та енергії іонізації мілких та глибоких донорних домішок в таких наноплівках.

4. Знайти енергетичний спектр та встановити природу утворених радіаційних дефектів в опромінених швидкими електронами монокристалах n-Ge та n-Si, механізми ізотермічного відпалу точкових та складних дефектів в n-Ge, опромінену електронами з енергією 10 MeV.

5. Дослідити механізми розсіяння електронів та побудувати теоретичну модель рухливості електронів для недеформованих та одновісно деформованих монокристалів n-Ge та n-Si, опромінених високоенергетичними електронами та/або легованих глибокими донорними домішками.

6. Встановити механізми впливу електронного опромінення на тензоопір монокристалів n-Ge та n-Si та оптимальні режими радіаційної та термічної обробки даних монокристалів з метою підвищення їх магнітної, температурної та тензочутливості, розробити методи підвищення радіаційної стійкості кремнію та германію.

### **Наукова новизна одержаних результатів**

1. 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 фонах, 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.

2. 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 фонах, 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.

3. 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. Було показано, що для випадків  $x=0$  та  $x=0,9$  найнижчими за шкалою енергій будуть  $\Delta_1$ - та  $L_1$ -мінімуми зони провідності відповідно, а зростання вмісту германію в підкладці призводить до зменшення внутрішніх деформаційних полів в наноплівці та, як наслідок, до збільшення її ширини забороненої зони та зменшення величини розщеплення зон «легких» та «важких» дірок. 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.

4. Встановлено, що електричні властивості наноплівок  $\text{Ge}/\text{Si}$ ,  $\text{Ge}/\text{Ge}_{(0,64)}\text{Si}_{(0,36)}$  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.

5. 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  $\text{VO}_i\text{I}_{2\text{Ge}}$  (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  $\text{VO}_i$ , (A-центр) та  $\text{C}_i\text{O}_i$ , а також нового типу дефектів – комплексів  $\text{VO}_i\text{P}$  (A-центрів, модифікованих домішкою фосфору).

6. Вперше виявлено аномальний ізотермічний відпал для опромінених електронами з енергією 10 MeV монокристалів n-Ge та встановлено його механізми, на основі яких були проведені розрахунки енергії активації відпалу ядер областей розвпорядкування, комплексу  $\text{VO}_i\text{I}_{2\text{Ge}}$  та частотних факторів для цих дефектів.

7. 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.

8. Встановлені механізми тензоопору для опромінених електронами монокристалів n-Ge та n-Si при одновісному тискові та кімнатній температурі. Найявність тензоопору для опроміненого n-Ge пояснюється іонізацією рівня  $E_v + 0,27$  eВ, 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  $E_v + 0,35$  eВ комплексу  $C_iO_i$  при деформації не буде проявлятися при кімнатній температурі.

### **Практичне значення одержаних результатів**

1. 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.

2. Проведені розрахунки величини внутрішніх механічних напружень та зонної структури для наноплівки германію, вирощеній 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. Наприклад, на основі таких плівок можуть бути створенні детектори інфрачервоного випромінювання з керованим діапазоном фоточутливості. При цьому довжиною хвилі, на яку припадає максимум ІЧ-поглинання, можна керувати за рахунок варіації вмісту кремнію в підкладці.

3. 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.

4. Одержана при кімнатній температурі лінійна залежність тензоопору для опромінених монокристалів n-Ge потоком електронів  $\Phi = 5 \cdot 10^{15}$  ел./см<sup>2</sup> з енергією 10 MeВ 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.

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

6. 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.

7. 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.

#### **Особистий внесок здобувача**

Постановка завдань, одержані основні наукові та практичні результати, їх інтерпретація та висновки, які представляють зміст та тему дисертації, отримано та сформульовано здобувачем особисто. Особистий внесок дисертанта в працях [Д1-Д39] полягає у наступному.

У статтях [1], [2], [4], [5], [7], [28], [32], [33] дисертант брав участь в проведенні експериментальних досліджень тензорезистивного ефекту при сильних одновісних тисках, запропонував методику визначення та провів розрахунки констант деформаційного потенціалу та ефективних мас для  $\Delta_1$ -мінімуму зони провідності германію, констант електрон-фононої взаємодії в германії, температурних залежностей рухливості та тензоопору для одновісно деформованих монокристалів n-Ge, дав інтерпретацію спостережувальних механізмів розсіяння електронів та тензоефектів, провів розрахунки енергії іонізації основного стану мілких донорів Sb, P, As, які зв'язані з  $\Delta_1$ -долинами германію, на основі варіаційного методу Рітца. В роботі [30] було сформульовано рекомендації щодо геометричних розмірів, форми зразків германію для досліджень тензоефектів при високих одновісних тисках. В роботі [11] дисертантом запропоновано методику визначення модуля зсуву для монокристалів германію та кремнію на основі вимірювань поздовжнього тензорезистивного ефекту. У статтях [8-10], [12], [13], [16], [18], [20], [21], [26], [27], [34], [35], [37] брав участь в проведенні експериментальних досліджень електричних, тензоелектричних та гальваномагнітних властивостей опромінених електронами монокристалів n-Ge та n-Si, електричних та оптичних властивостей монокристалів n-Ge після електронного опромінення та ізотермічного відпалу, провів розрахунки параметрів утворених радіаційних дефектів та відпалу, рухливості та електропровідності для недеформованих та одновісно деформованих монокристалів n-Ge та n-Si з радіаційними дефектами. В роботі [19] брав участь в дослідженні тензо-холл-ефекту, запропонував теоретичну модель рухливості при одновісному тиску для монокристалів германію, легованих домішками Au та Sb, та провів теоретичні розрахунки температурних залежностей рухливості для цих монокристалів. В роботах [25] та [36] запропоновано метод підвищення радіаційної стійкості монокристалів германію та кремнію, взято участь в дослідженнях ефекту Холла, проведено розрахунки концентрації радіаційних дефектів та магнітної чутливості для опромінених електронами монокристалів n-Ge та n-Si, покритих шаром епоксикомпозиту. У статтях [17], [23] та [24] дисертантом одержано вирази для розрахунку рухливості та електропровідності напруженої наноплівки германію та обчислено дані електричні параметри в залежності від товщини наноплівки, ступеня її легування різними домішками та температури.

В монографіях [38] та [39] дисертант описав проведені ним дослідження електричних та тензоелектричних властивостей неопромінених та опромінених електронами монокристалів n-Ge, систематизував спостережувальні механізми тензоефектів та розсіяння носіїв струму для даних монокристалів та сформулював загальні висновки.

### **Апробація результатів дисертації**

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 Международная конференция «Взаимодействие излучений с твердым телом» (19-22 сентября, 2017, Минск, Беларусь); 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 «Лашкарьовські 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).

**Публікації.** Результати дисертації опубліковано в 69 наукових працях: 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 колективні монографії, одна з яких англійською мовою, видана в закордонному виданні, та 26 тез конференцій; за результатами досліджень отримано 4 патенти на корисну модель.

## Структура та обсяг дисертації

Дисертація складається зі вступу, п'яти розділів, загальних висновків, списку використаних джерел (443 позиції) та одного додатка. Загальний обсяг праці становить 379 сторінок, з них 323 сторінки основного тексту, що включає 133 рисунки та 18 таблиць.

## ОСНОВНИЙ ЗМІСТ ДИСЕРТАЦІЇ

У **вступі** розглянуто стан вирішуваної наукової проблеми, обґрунтовано актуальність теми дослідження, встановлено мету та основні завдання, об'єкт та предмет дослідження, зазначено наукову новизну та практичне значення одержаних результатів. Дисертантом описано методи досліджень, висвітлено зв'язок одержаних в роботі результатів із виконуваними науково-дослідними роботами та темами, наведено дані про апробацію результатів роботи, публікації, відзначено особистий внесок, окреслено обсяг та структуру праці.

У **першому розділі** дисертації *«Вплив деформаційних та радіаційних полів на електричні властивості монокристалів та наноструктур германію та кремнію»* розглянута феноменологічна теорія виникнення тензоефектів в багатодолинних напівпровідниках, на основі якої пояснено закономірності тензоефектів в монокристалах кремнію та германію. Одновісна пружна деформація призводить до зняття виродження за енергіями еквівалентних екстремумів зон провідності та валентної цих напівпровідників, що є причиною зміни їх електричних властивостей. Тензоопір слабологованих та середньоологованих монокристалів n-Ge та n-Si при одновісних тисках до 1,2 ГПа та температурах 77–300 К зумовлений зменшенням рухливості за рахунок перерозподілу електронів з різною рухливістю між мінімумами зони провідності при деформації. Наявність значного тензоопору для одновісно деформованих вздовж кристалографічного напрямку [100] монокристалів n-Ge при  $P > 1,5$  ГПа пов'язана з переходом електронів в  $\Delta_1$ -мінімуми з меншою рухливістю. Зростання вкладу блохівських функцій  $\Delta_1$ -мінімумів в хвильову функцію домішкових станів мілких донорів Sb, P та As при зближенні  $L_1$ - та  $\Delta_1$ -мінімумів за рахунок такої деформації призводить до збільшення величини поля ударної іонізації та відповідно енергії іонізації для цих домішок.

Розглянуто основні механізми взаємодії ядерного випромінювання з твердим тілом та утворення точкових і складних дефектів в напівпровідниках. Одержані на сьогодні результати досліджень спектрів домішкової фотопровідності та ІЧ-поглинання, рекомбінаційного випромінювання, ефекту Холла та тензо-холл-ефекту для опромінених швидкими частинками монокристалів кремнію та германію дозволили встановити природу, мікроструктуру та механізми утворення багатьох радіаційних дефектів в цих монокристалах. Більшість таких дефектів створюють в забороненій зоні даних напівпровідників декілька глибоких енергетичних рівнів, які відповідають різним зарядовим станам утворених дефектів. Модифікація цих рівнів фоновими домішками призводить до зміни їх положення.

Як правило, рухливість електронів в монокристалах n-Ge та n-Si зменшується під дією опромінювання. Проте, при певних потоках та енергіях швидких частинок можливий і протилежний ефект. Наприклад, для опромінених протонами

монокристалів n-Si наявність в їх об'ємі високопровідних металічних включень призводить до зростання ефективної рухливості. Збільшення холівської рухливості електронів в  $\gamma$ -опромінених малими потоками монокристалах n-Ge та n-Si пов'язане з утворенням радіаційних дефектів акцепторного типу, які локалізуються поблизу позитивно заряджених іонних залишків легуючих домішок. Це призводить до часткової нейтралізації цих іонних залишків та відповідно до зменшення ефективності домішкового розсіяння та зростання рухливості. Також причиною збільшення рухливості є зменшення концентрації розсіюючих центрів з ростом потоку  $\gamma$ -опромінення.

Утворення радіаційних дефектів з глибокими енергетичними рівнями в монокристалах n-Ge та n-Si є причиною суттєвих змін тензоелектричних властивостей цих монокристалів. Зокрема, крім механізмів зміни рухливості електронів при одновісній деформації (як і для неопромінених монокристалів) в даному випадку відбувається також зміна концентрації електронів за рахунок зміни енергії активації утворених дефектів при деформації та відповідно питомого опору.

Проведено огляд методів одержання кремній-германієвих гетероструктур та проаналізовано вплив величини та розподілу внутрішніх механічних напружень, складу та квантово-розмірних ефектів на зонну структуру, рухливість та концентрацію носіїв струму в цих гетероструктурах. Зміна величини механічних напружень та співвідношенням товщин шарів контактуючих напівпровідників гетероструктури призводить до змін енергетичного спектру носіїв струму та дозволяє направлено керувати фізичними властивостями таких структур. Розглянуті основні закономірності впливу ядерного опромінення на наноматеріали показують, що просторова локалізація носіїв струму в наноструктурах призводить до суттєвої відмінності їх електричних та оптичних властивостей порівняно з об'ємними напівпровідниками. Зокрема, гетероструктури кремній-германій мають вищу радіаційну стійкість, ніж об'ємні матеріали, з яких вони складаються

**Другий розділ** дисертації *«Тензорезистивні ефекти та механізми розсіяння електронів в умовах радикальної деформаційної перебудови зонної структури монокристалів n-Ge»* присвячений дослідженню електричних властивостей сильно деформованих монокристалів n-Ge, коли при високих тисках вклад в електропровідність вносять  $L_1$ - та  $\Delta_1$ -мінімумами зони провідності германію. Проведення таких досліджень вимагає підготовки зразків германію специфічної форми. На основі розрахунків критичної напруги руйнування зразків германію паралелепіпедної та гантелеподібної форми було встановлено, що зразки у формі гантелі є більш стійкими до одновісних тисків, тому і використовувались при вимірюваннях питомого опору одновісно деформованих вздовж кристалографічного напрямку [100] монокристалів n-Ge при  $P > 1,5$  ГПа. Для знаходження ефективних мас електронів, що відповідають  $\Delta_1$ -мінімумам, проводились вимірювання при температурі рідкого гелію питомої електропровідності одновісно деформованих вздовж кристалографічного напрямку [100] до тисків 3 ГПа монокристалів n-Ge, легуваних домішкою сурми, концентрацією  $N_d = 2 \cdot 10^{18} \text{ см}^{-3}$ . Для даних умов рухливість електронів буде залежати лише від ефективних мас  $m_{\parallel}$  та  $m_{\perp}$  і не залежатиме від констант деформаційного потенціалу. Враховуючи те, що при

одновісних тисках від 1,6 до 2,8 ГПа участь в електропровідності сильнолегованих монокристалів n-Ge беруть як  $L_1$ -, так і  $\Delta_1$ -мінімумами, було одержано систему рівнянь відносно невідомих значень ефективної маси густини станів  $m_{\Delta_1}$  та баричного коефіцієнта  $\alpha$  для  $\Delta_1$ -мінімуму в германії:

$$\left\{ \begin{array}{l} 4\pi \left( \frac{2m_{\Delta_1}}{h^2} \right)^{3/2} \int_{E_{\Delta_1}(P_1)}^{\infty} \frac{(E - E_{\Delta_1}(P_1))^{1/2} dE}{\exp\left(\frac{E - F(P_1)}{kT}\right) + 1} = \frac{n_e \mu_{L_1} q - \sigma(P_1)}{q(\mu_{L_1} - \mu_{\Delta_1})}, \\ 4\pi \left( \frac{2m_{\Delta_1}}{h^2} \right)^{3/2} \int_{E_{\Delta_1}(P_2)}^{\infty} \frac{(E - E_{\Delta_1}(P_2))^{1/2} dE}{\exp\left(\frac{E - F(P_2)}{kT}\right) + 1} = \frac{n_e \mu_{L_1} q - \sigma(P_2)}{q(\mu_{L_1} - \mu_{\Delta_1})}. \end{array} \right. \quad (1)$$

Беручи до уваги обчисленні значення енергії Фермі  $F(P_1)$  та  $F(P_2)$  при тисках  $P_1$  та  $P_2$  з діапазону від 1,6 до 2,8 ГПа, визначені експериментально величини рухливостей  $\mu_{L_1} = 780 \frac{\text{см}^2}{\text{Вс}}$  та  $\mu_{\Delta_1} = 220 \frac{\text{см}^2}{\text{Вс}}$ , електропровідностей  $\sigma(P_1)$  та  $\sigma(P_2)$ , було отримано

наступні розв'язки системи рівнянь (1):  $m_{\Delta_1} = 0,88m_0$  та  $\alpha = -8,65 \cdot 10^{-11} \frac{eV}{\text{Па}}$ .

Значення ефективних мас  $m_{\parallel}$  та  $m_{\perp}$  визначались з врахуванням знайденого значення ефективної маси густини станів та загального виразу для рухливості електронів, одержаного на основі теорії анізотропного розсіяння електронів на іонах домішки:

$$\left\{ \begin{array}{l} 2^{2/3} (m_{\parallel} m_{\perp}^2)^{1/3} = m_{\Delta_1}, \\ \frac{4q}{3\sqrt{\pi} m_{\parallel}} \int_0^{\infty} dx x^2 e^{-x} \tau_{\parallel} = \mu_{\Delta_1}. \end{array} \right. \quad (2)$$

де  $\tau_{\parallel}$  – поздовжня складова тензора часів релаксації,  $q$  – модуль заряду електрона.

З розв'язів системи рівнянь (2) були знайдені значення  $m_{\parallel} = 1,65m_0$  та  $m_{\perp} = 0,32m_0$ .

Для знаходження констант деформаційного потенціалу  $\Xi_u^{\Delta_1}$  та  $\Xi_d^{\Delta_1}$  для  $\Delta_1$ -мінімуму проводились дослідження тензоопору для одновісно деформованих вздовж кристалографічного напрямку  $[100]$  монокристалів n-Ge, легованих домішкою Sb, концентрацією  $N_d = 5 \cdot 10^{14} \text{ см}^{-3}$ , при  $T = 77 \text{ К}$  (рис. 1). В даному випадку необхідно також враховувати розсіяння електронів на акустичних фононах і відповідно залежність часу релаксації від констант акустичного потенціалу деформації  $\Xi_u^{\Delta_1}$  та  $\Xi_d^{\Delta_1}$ . Як і у випадку тензоопору сильнолегованих монокристалів n-Ge, рухливість електронів для  $\Delta_1$ -мінімуму при  $T = 77 \text{ К}$  визначалась за відомими значеннями концентрації електронів, питомого опору недеформованого та одновісно деформованого n-Ge при  $P > 2,6 \text{ ГПа}$ . На основі теорії деформаційного потенціалу та знайденого значення баричного коефіцієнта  $\alpha$  легко знаходиться комбінація констант деформаційного потенціалу для  $\Delta_1$ -мінімуму:  $0,35\Xi_d^{\Delta_1} + 0,77\Xi_u^{\Delta_1} = 8,65 \text{ eV}$ .

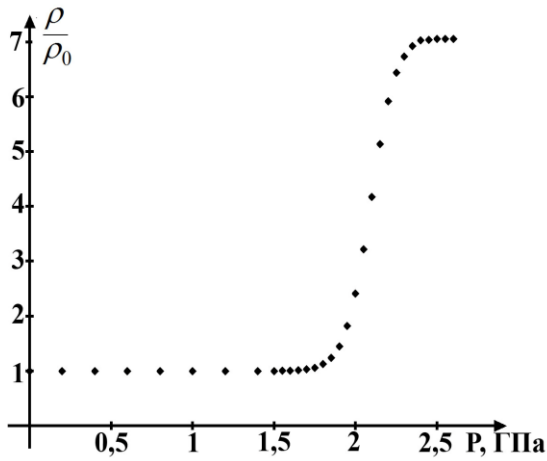


Рис. 1. Тензоопір одновісно деформованих вздовж кристалографічного напрямку [100] монокристалів n-Ge при температурі  $T=77$  К.

Врахування цієї комбінації та одержаного на основі теорії анізотропного розсіяння виразу для рухливості електронів дозволило одержати наступну систему рівнянь для знаходження  $\Xi_u^{\Delta_1}$  та  $\Xi_d^{\Delta_1}$ :

$$\begin{cases} \frac{4qa_{\parallel}}{3\sqrt{\pi k_B m_{\parallel}} T^{3/2}} \int_0^{\infty} \frac{x^3 e^{-x} dx}{x^2 + b_0} = \mu_{\Delta_1}, \\ 0,35\Xi_d^{\Delta_1} + 0,77\Xi_u^{\Delta_1} = 8,65. \end{cases} \quad (3)$$

З розв'язку (3) були одержані значення  $\Xi_u^{\Delta_1} = 11,82$  еВ та  $\Xi_d^{\Delta_1} = -1,29$  еВ.

Проведенні розрахунки значень баричних коефіцієнтів для  $\Delta_1$ -мінімуму для гідростатичного та одновісного тиску дозволили встановити, що  $(L_1 - \Delta_1)$  - інверсію типу

абсолютного мінімуму в германії можна реалізувати при одновісних тисках  $P \approx 2,1$  ГПа та  $P \approx 8$  ГПа вздовж кристалографічних напрямків [100] та [110] відповідно або при гідростатичному тиску  $P \approx 5$  ГПа.

Спричинена одновісним або гідростатичним тиском  $(L_1 - \Delta_1)$  - інверсія буде впливати на енергію іонізації легуючих домішок. Тому на основі теорії збурень та варіаційного методу Рітца проводились розрахунки енергії іонізації основного стану мілких донорів Sb, As та P, зв'язаних з  $\Delta_1$ -долинами германію. Одержанні значення енергії іонізації виявились рівними:  $E_{1S}^{\Delta_1} = 27,3$  меВ (теорія збурень) та  $E_{1S}^{\Delta_1} = 30,4$  меВ (варіаційний метод Рітца). Раніше проведені дослідження ударної іонізації донорних домішок в одновісно деформованих вздовж кристалографічного напрямку [100] монокристалах Ge дозволили знайти  $E_{1S}^{\Delta_1} = (35 \pm 2)$  меВ,  $E_{1S}^{\Delta_1} = (45 \pm 2)$  меВ та  $E_{1S}^{\Delta_1} = (41 \pm 2)$  меВ для донорів Sb, As та P відповідно. Порівняння даних експериментальних результатів з результатами теоретичних розрахунків показує, що використана при розрахунках модель кулонівського потенціалу домішкового іона може з відносно невеликою похибкою використовуватись лише для домішки Sb в Ge. Для домішок As та P необхідно враховувати хімічний зсув, тобто їх природу. Для вирішення даної задачі був запропонований наступний потенціал:

$$U(r) = -\frac{q^2}{\epsilon r} \left( 1 + A e^{-\frac{r}{r_0}} \right) e^{-\frac{r}{R}}, \quad (4)$$

де  $A(Sb) = 11,29$ ,  $A(P) = 32,34$ ,  $A(As) = 34,67$ ,  $r_0 = 1,225 \cdot 10^{-10}$  м,  $R$  - радіус екранування.

На основі варіаційного методу Рітца та побудованого гамільтоніану для електрона, що рухається в полі (4), були обчислені енергії іонізації  $E_{1S}^{\Delta_1} = 32,6$  меВ,  $E_{1S}^{\Delta_1} = 42,5$  меВ та  $E_{1S}^{\Delta_1} = 39$  меВ для домішок Sb, As та P відповідно, які добре узгоджується з їх експериментальними значеннями, знайденими з аналізу полів ударної іонізації.

Проведені експериментальні дослідження та теоретичні розрахунки рухливості електронів для шести- та чотирьохдолинної  $\Delta_1$ -моделі германію дозволили встановити, що в цих моделях суттєвим є еквівалентне міждолинне розсіяння електронів на оптичних фононах. Рухливість електронів та питомий опір n-Ge при одновісних тисках вздовж кристалографічного напрямку [100], в діапазоні від 1,6 до 2,7 ГПа, будуть в значній мірі визначатись механізмами розсіяння електронів на оптичних фононах, що відповідають за нееквівалентне міждолинне розсіяння між  $L_1$ - та  $\Delta_1$ -мінімумами зони провідності германію. На рис. 2 та рис. 3 представлено розрахунки коефіцієнта Холла та питомого опору для одновісно деформованих вздовж кристалографічного напрямку [100] монокристалів n-Ge.

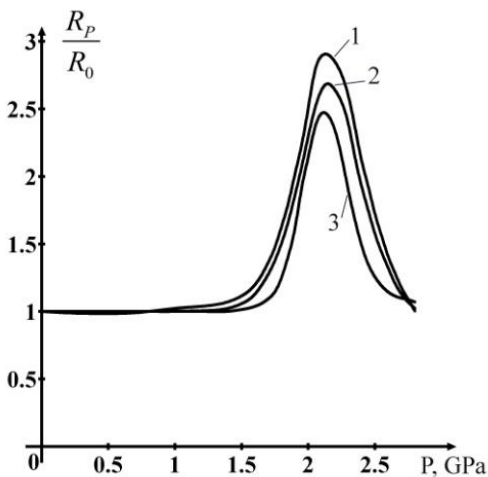


Рис. 2. Залежність коефіцієнта Холла від одновісного тиску вздовж кристалографічного напрямку [100] для n-Ge при різних температурах  $T$ , К: 1 – 180, 2 – 150, 3 – 110.

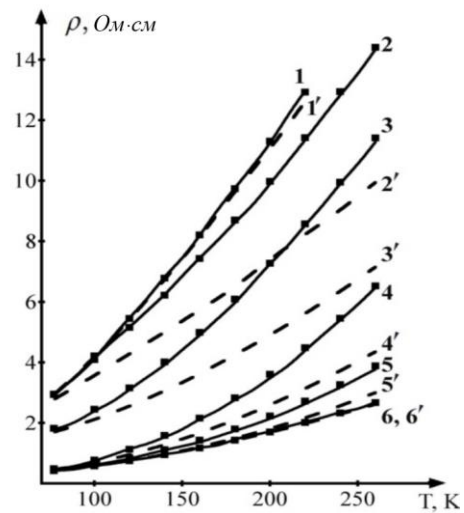


Рис. 3. Температурні залежності питомого опору для одновісно деформованих монокристалів n-Ge при різних значеннях одновісного тиску  $P//[100]$ : 1 – 2,8 ГПа, 2 – 2,3 ГПа, 3 – 2,1 ГПа, 4 – 1,8 ГПа, 5 – 1,4 ГПа, 6 – недеформований зразок; Суцільні криві – результати розрахунків з врахуванням нееквівалентного міждолинного розсіяння, а штрихові – без врахування; ■ – експериментальні результати.

Наявність максимуму при  $P \sim 2,1$  ГПа для залежностей коефіцієнта Холла (рис. 2) пояснюється найбільшою ефективністю нееквівалентного міждолинного розсіяння при таких тисках. Це є причиною найбільшої розбіжності між кривими 3 та 3' рис. 3. При таких тисках  $L_1$ - та  $\Delta_1$ -мінімумами зрівнюються за шкалою енергій при деформації. Зменшення відносних значень величини коефіцієнта Холла для тисків  $P > 2,1$  ГПа або  $P < 2,1$  ГПа пов'язане зі зменшенням ефективності нееквівалентного міждолинного розсіяння. Тому, як слідує з рис. 3, для недеформованих та одновісно деформованих монокристалів n-Ge при  $P = 2,8$  ГПа нееквівалентним міждолинним розсіянням електронів можна знехтувати.

В загальному випадку, крім змін енергетичних положень екстремумів зон провідності та валентної германію при одновісному тиску, змінюється також його ширина забороненої зони. Це призводить до того, що зміни концентрації власних

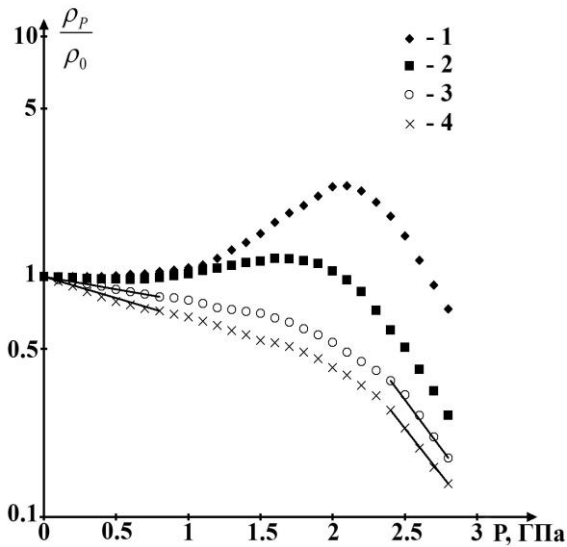


Рис. 4. Залежності питомого опору від одновісного тиску вздовж кристалографічного напрямку  $[100]$  для монокристалів n-Ge при різних температурах  $T, K$ : 1 – 300, 2 – 330. 3 – 360. 4 – 380.

носіїв струму можуть суттєво впливати на механізми тензоефектів в германії в області змішаної та власної провідності. При високих температурах та одновісних тисках вздовж кристалографічного напрямку  $[100]$  необхідно також враховувати вклад  $\Delta_1$ -мінімумів у власну провідність та відповідно в тензоопір германію. На рис. 4 представлено результати досліджень тензоопору при одновісному тиску  $P//[100]$  для монокристалів n-Ge. Як слідує з рис. 4, залежності тензоопору n-Ge при температурах  $T=300 K$  та  $T=330 K$  мають три характерних області. Для першої області, коли  $P < 0,8$  ГПа, тензоопір відсутній, оскільки при таких тисках ще не буде відбуватись перерозподіл електронів між  $L_1$ - та  $\Delta_1$ -мінімумами та не проявлятиметься механізм власної провідності. Для другої області одновісних тисків від 0,8 до 2 ГПа зростання питомого опору n-Ge пояснюється зменшенням ефективної рухливості електронів за рахунок їх

перерозподілу між  $L_1$ - та  $\Delta_1$ -мінімумами з різною рухливістю. Різке зменшення питомого опору n-Ge при одновісних тисках  $P > 2$  ГПа (третья область) пов'язане зі збільшенням концентрації власних носіїв струму. В даному випадку вплив  $\Delta_1$ -мінімумів на тензоопір та власну провідність германію стає визначальним. Тензоопір n-Ge при вищих температурах (рис. 4, криві 3 та 4) у всьому діапазоні досліджуваних тисків буде визначатись домінуючими механізмами власної провідності. При цьому збільшення концентрації власних носіїв струму при тисках до 0,8 ГПа пов'язане зі зменшенням ширини забороненої між віткою «легких» дірок валентної зони та  $L_1$ - мінімумами зони провідності германію, а при  $P > 2,4$  ГПа – зменшенням ширини забороненої зони між віткою «легких» дірок та двома  $\Delta_1$ -мінімумами. Для перехідної області одновісних тисків від 0,8 до 2,4 ГПа реалізується  $(L_1-\Delta_1)$ -модель зони провідності германію та буде проявлятися двохзонний механізм власної провідності, який пов'язаний з переходи електронів з валентної зони в  $L_1$ - та  $\Delta_1$ -мінімуми. Лінійні ділянки спаду питомого опору n-Ge при збільшенні одновісного тиску від 0 до 0,8 ГПа та при тисках  $P > 2,4$  ГПа (рис. 4, криві 3 та 4) будуть відповідати власній провідності у випадках ширини забороненої зони між віткою «легких» дірок валентної зони та  $L_1$ - і  $\Delta_1$ -мінімумами зони провідності германію відповідно. Обчислені значення баричних коефіцієнтів для зміни ширини забороненої зони германію на основі теорії деформаційного потенціалу та статистики невиродженого газу носіїв струму добре узгоджуються з їх

відповідними значеннями, які визначались експериментально за прямолінійними нахилами зменшення питомого опору при деформації.

**Третій розділ** дисертації «*Моделювання електричних та тензоелектричних властивостей нелегованих та легованих наноплівки германію*» присвячений розрахункам зонної структури та електричних властивостей нелегованої та

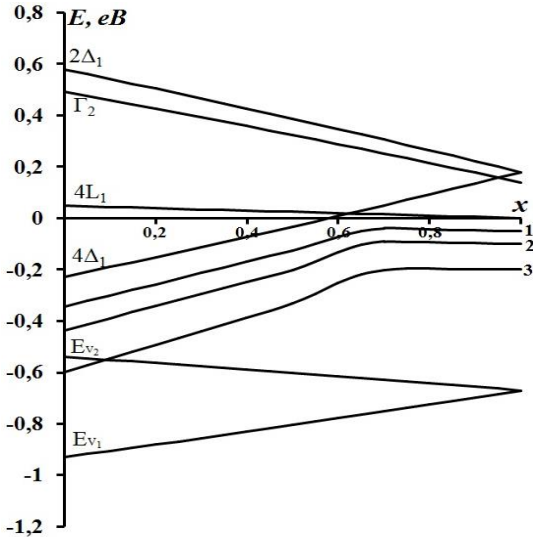


Рис. 5. Залежності зонної структури наноплівки германію, легованої донорною домішкою з різною енергією іонізації  $E_r^0$ , від компонентного складу підкладки  $\text{Ge}_{(x)}\text{Si}_{(1-x)}$ . Результати розрахунків для домішок з енергією іонізації  $E_r^0$ ,  $\text{meV}$ : 1 – 50, 2 – 100, 3 – 200.

легованої донорною домішкою наноплівки германію, вирощеної на підкладці  $\text{Ge}_{(x)}\text{Si}_{(1-x)}$  (001) в залежності від її компонентного складу. Проведені розрахунки показують, що в такій наноплівці германію, за рахунок різних значень сталої ґраток германію та підкладки, виникають значні (більше, ніж 2%) внутрішні механічні напруження. В кристалографічних напрямках [100] та [010] наноплівка зазнає двохосьового стиску, а в напрямку [001] – одновісного розтягу. Наявність таких напружень призводить до радикальної деформаційної перебудови її зонної структури (рис. 5). Зонна структура напруженої наноплівки германію розраховувалась з врахуванням як відомих параметрів екстремумів зон провідності та валентної германію, так і знайдених в розділі 2 параметрів  $\Delta_1$ -мінімуму. Як слідує з рис. 5, для випадку, коли маємо підкладку з кремнію ( $x=0$ ), найнищими за шкалою енергій в зонній структурі наноплівки германію будуть чотири  $\Delta_1$ -мінімуми зони провідності германію, а верхньою виявиться валентна зона «важких»

дірок. При вмісті германію  $x > 0,6$  в підкладці визначальними в енергетичному спектрі наноплівки германію стають  $L_1$ -мінімуми. Зростання вмісту германію в підкладці (зменшення величини механічних напружень) призводить до збільшення ширини забороненої зони та зменшення енергії іонізації донорної домішки. Основною причиною зменшення енергії іонізації домішки є збільшення ефективної маси електрона. Залежність енергії іонізації домішки від величини внутрішніх напружень пов'язана з різними значеннями величини баричних коефіцієнтів для зміщення енергетичного рівня домішки та найнижчого мінімуму зони провідності напруженої наноплівки германію. Також баричний коефіцієнт для зміщення домішкового рівня залежить від енергії іонізації домішки  $E_r^0$  в ненапруженій наноплівці германію. Зростання даної енергії призводить до збільшення генетичного зв'язку енергетичного рівня домішки з валентною зоною германію. Тому для домішок з енергією іонізації  $E_r^0$  більше, ніж 200  $\text{meV}$ , їх енергетичні рівні в  $\Delta_1$ -моделі зони провідності будуть знаходитись у валентній зоні.

На основі статистики невиродженого двовимірного електронного та діркового газу в напівпровідниках були одержані вирази для концентрації електронів в  $L_1$ - та

$\Delta_1$ -мінімумах зони провідності, «легких» та «важких» дірок валентної зони напруженої наноплівки германію:

$$n_{L_1} = \left( \frac{2}{d} \sum_{n=1}^{\infty} e^{-\frac{h^2 n^2}{8m_{\perp}^{\Delta_1} k T d^2}} \right) \frac{2\pi m_{\perp}^{\Delta_1} k T}{h^2} \cdot e^{-\frac{E_F - E_{L_1}}{k T}}, \quad n_{\Delta_1} = \left( \frac{2}{d} \sum_{n=1}^{\infty} e^{-\frac{h^2 n^2}{8m_{\perp}^{\Delta_1} k T d^2}} \right) \frac{2\pi m_{\perp}^{\Delta_1} k T}{h^2} \cdot e^{-\frac{E_F - E_{\Delta_1}}{k T}}, \quad (5)$$

$$p_1 = \left( \frac{2}{d} \sum_{n=1}^{\infty} e^{-\frac{h^2 n^2}{8m_1 k T d^2}} \right) \frac{2\pi m_1 k T}{h^2} \cdot e^{-\frac{E_F - E_{V_1}}{k T}}, \quad p_2 = \left( \frac{2}{d} \sum_{n=1}^{\infty} e^{-\frac{h^2 n^2}{8m_2 k T d^2}} \right) \frac{2\pi m_2 k T}{h^2} \cdot e^{-\frac{E_F - E_{V_2}}{k T}}. \quad (6)$$

Тут  $n_{L_1}$ ,  $n_{\Delta_1}$  – концентрації електронів в  $L_1$ - та  $\Delta_1$ -мінімумах;  $p_1$  та  $p_2$  – концентрації «легких» та «важких» дірок;  $d$  – товщина наноплівки;  $m_{\perp}^{L_1} = 0,082m_0$ ,  $m_{\perp}^{L_1} = 1,58m_0$ ,  $m_{\perp}^{\Delta_1} = 0,32m_0$ ,  $m_{\perp}^{\Delta_1} = 1,65m_0$ ,  $m_1 = 0,044m_0$ ,  $m_2 = 0,28m_0$  – ефективні маси провідності для  $L_1$ -,  $\Delta_1$ -мінімумів, зон «легких» та «важких» дірок відповідно;  $m_0$  – маса вільного електрона;  $E_{L_1}$ ,  $E_{\Delta_1}$ ,  $E_{V_1}$ ,  $E_{V_2}$  – енергетичні положення  $L_1$ -,  $\Delta_1$ -мінімумів зони провідності та зон «легких» та «важких» дірок в напруженій наноплівці германію. Сумарні концентрації електронів та дірок в зоні провідності та валентній

$$n = n_{L_1} + n_{\Delta_1}, \quad p = p_1 + p_2. \quad (7)$$

Тоді концентрація власних носіїв струму в напруженій наноплівці

$$n_i(\varepsilon) = \sqrt{np}. \quad (8)$$

Для випадку ненапруженої наноплівки концентрація власних носіїв струму

$$n_i(0) = \frac{4\pi k T}{h^2 d} (m_{\perp}^{L_1} m_p)^{1/2} \left[ \sum_{n=1}^{\infty} e^{-\frac{h^2 n^2}{8m_{\perp}^{L_1} k T d^2}} \cdot \sum_{n=1}^{\infty} e^{-\frac{h^2 n^2}{8m_p k T d^2}} \right]^{1/2} \cdot e^{-\frac{E_g(0)}{2kT}}, \quad (9)$$

де  $m_p = 0,193m_0$  – ефективна маса провідності для дірок,  $E_g(0) = 0,66 \text{ eV}$ .

На основі виразів (5-9) були проведені розрахунки залежності концентрації власних носіїв струму для наноплівок германію, вирощених на підкладках Si,  $\text{Ge}_{(0,64)}\text{Si}_{(0,36)}$  та  $\text{Ge}_{(0,9)}\text{Si}_{(0,1)}$  з кристалографічною орієнтацією (001) від їх товщини при різних температурах (рис. 6-8).

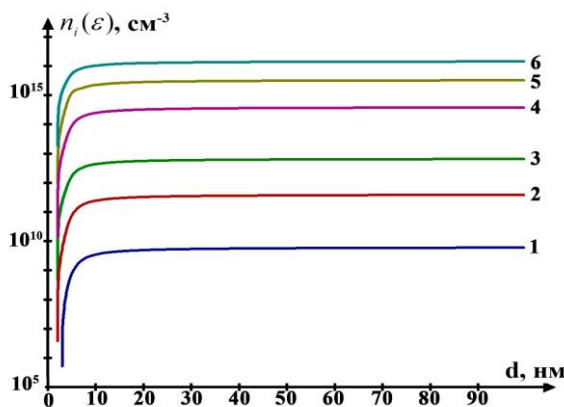


Рис. 6. Залежності концентрації власних носіїв струму для наноплівки Ge/Si від її товщини при різних температурах  $T$ , К: 4–200, 5–250, 6–300. Криві 1, 2 та 3 – теоретичні розрахунки для ненапруженої наноплівки германію при температурах 200 К, 250 К та 300 К відповідно.

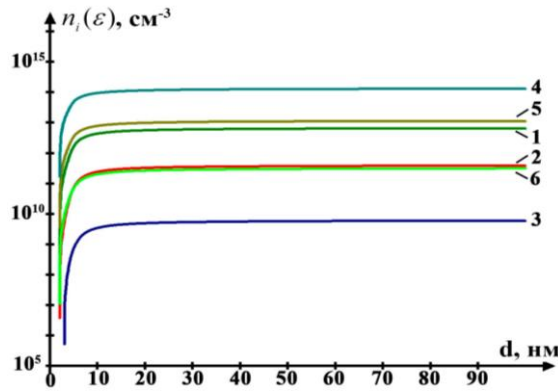


Рис. 7. Залежності концентрації власних носіїв струму для наноплівки  $\text{Ge}/\text{Ge}_{(0,64)}\text{Si}_{(0,36)}$  від її товщини при різних температурах  $T$ , К: 4–300, 5–250, 6–200. Криві 1, 2 та 3 – теоретичні розрахунки для ненапруженої наноплівки германію при температурах 300 К, 250 К та 200 К відповідно.

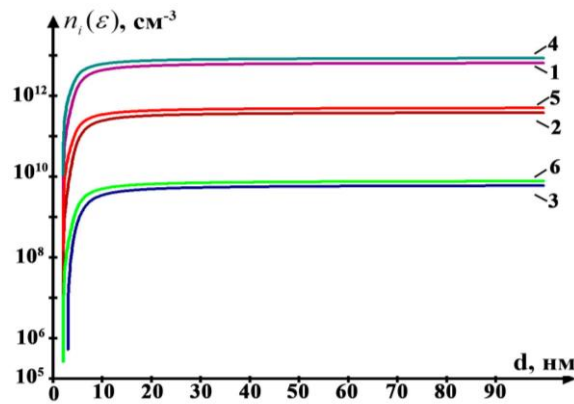


Рис. 8. Залежності концентрації власних носіїв струму для наноплівки  $\text{Ge}/\text{Ge}_{(0,9)}\text{Si}_{(0,1)}$  від її товщини при різних температурах  $T$ , К: 4–300, 5–250, 6–200. Криві 1, 2 та 3 – теоретичні розрахунки для ненапруженої наноплівки германію при температурах 300 К, 250 К та 200 К відповідно.

Як слідує з даних залежностей, для ненапружених наноплівок германію та наноплівки  $\text{Ge}/\text{Ge}_{(0,9)}\text{Si}_{(0,1)}$  довільної товщини концентрація власних носіїв струму при  $T=200$  К є меншою, ніж  $10^{10}$   $\text{cm}^{-3}$ . Тому такі наноплівки будуть діелектриками. Особливо їх діелектричні властивості проявляються, коли  $d < 7$  нм. Зростання концентрації власних носіїв струму для напружених наноплівок германію товщиною  $d > 7$  нм відносно ненапружених пояснюється, перш за все, зменшенням їх ширини забороненої зони під дією внутрішніх деформаційних полів. Найбільше відносне збільшення концентрації власних носіїв струму спостерігається для наноплівки  $\text{Ge}/\text{Si}$ , оскільки в даному випадку величина внутрішніх деформаційних полів є найбільшою. Наявність таких полів призводить до максимального зменшення ширини забороненої зони порівняно з наноплівками  $\text{Ge}/\text{Ge}_{(0,9)}\text{Si}_{(0,1)}$  та  $\text{Ge}/\text{Ge}_{(0,64)}\text{Si}_{(0,36)}$ . Значне зменшення концентрації власних носіїв струму для наноплівок германію товщиною  $d < 7$  нм пов'язане зі збільшенням ролі розмірного квантування. Додатковим фактором, який посилює роль цього ефекту для таких наноплівок, є пониження температури.

Відносні зміни ефективної рухливості електронів та дірок для цих же наноплівок германію в умовах розсіяння на акустичних фонах визначались на

основі одержаних виразів:

$$\frac{\mu_n(\varepsilon)}{\mu_n(0)} = \frac{A + b_1}{1 + A}, \quad \frac{\mu_p(\varepsilon)}{\mu_p(0)} = \frac{m_v^{3/2} m_p (m_2^{5/2} B + m_1^{5/2})}{(1 + B)(m_1 m_2)^{5/2}}, \quad (10)$$

$$\text{де } \frac{n_{L_1}}{n_{\Delta_1}} = \frac{\sum_{n=1}^{\infty} e^{-\frac{\hbar^2 n^2}{8m_1^{\Delta_1} k T d^2}} \left( \frac{m_{\perp}^{L_1}}{m_{\perp}^{\Delta_1}} \right) e^{-\frac{E_{\Delta_1} - E_{L_1}}{k T}}}{\sum_{n=1}^{\infty} e^{-\frac{\hbar^2 n^2}{8m_1^{\Delta_1} k T d^2}} \left( \frac{m_{\perp}^{L_1}}{m_{\perp}^{\Delta_1}} \right) e^{-\frac{E_{\Delta_1} - E_{L_1}}{k T}}} = A, \quad \frac{p_1}{p_2} = \frac{\sum_{n=1}^{\infty} e^{-\frac{\hbar^2 n^2}{8m_1 k T d^2}} \left( \frac{m_1}{m_2} \right) e^{-\frac{E_{V_1} - E_{V_2}}{k T}}}{\sum_{n=1}^{\infty} e^{-\frac{\hbar^2 n^2}{8m_2 k T d^2}} \left( \frac{m_1}{m_2} \right) e^{-\frac{E_{V_1} - E_{V_2}}{k T}}} = B, \quad m_v = 0,292 m_0.$$

На рис. 9 та рис. 10 представлені залежності рухливостей електронів та дірок для наноплівки германію, вирощених на підкладках Si,  $\text{Ge}_{(0,64)}\text{Si}_{(0,36)}$  та  $\text{Ge}_{(0,9)}\text{Si}_{(0,1)}$  від їх товщини при різних температурах.

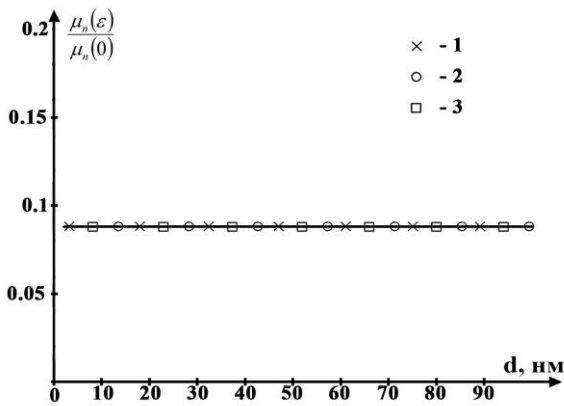


Рис. 9 а.

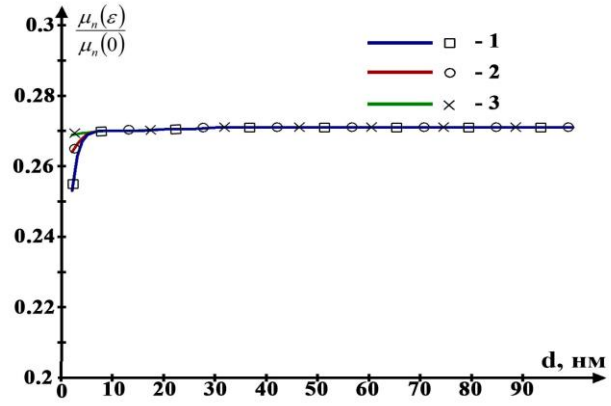


Рис. 9 б.

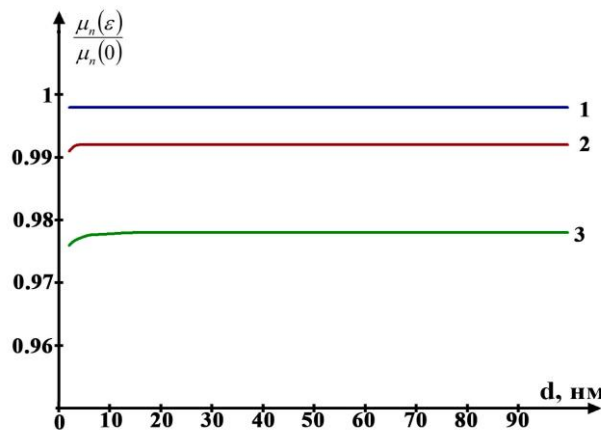


Рис. 9 с.

Рис. 9. Залежності рухливостей електронів для наноплівки Ge/Si (а),  $\text{Ge}/\text{Ge}_{(0,64)}\text{Si}_{(0,36)}$  (б) та  $\text{Ge}/\text{Ge}_{(0,9)}\text{Si}_{(0,1)}$  (с) від їх товщини при різних температурах  $T$ , К: 1–200, 2–250, 3–300.

Як слідує з даних залежностей, рухливість електронів зі збільшенням вмісту кремнію в підкладці, а отже й величини внутрішніх механічних напружень в таких наноплівках, зменшується та практично не залежить від товщини наноплівки та температури.

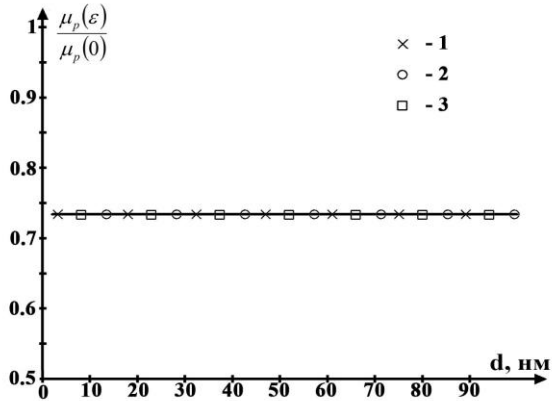


Рис. 10 а.

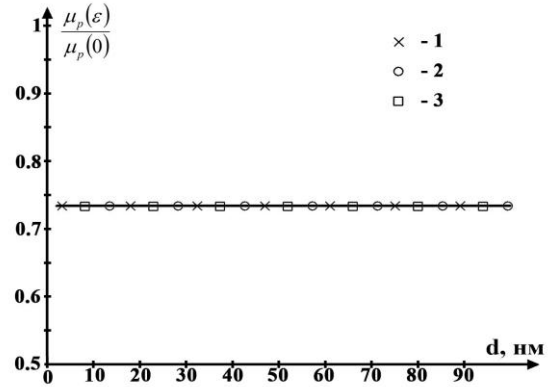


Рис. 10 б.

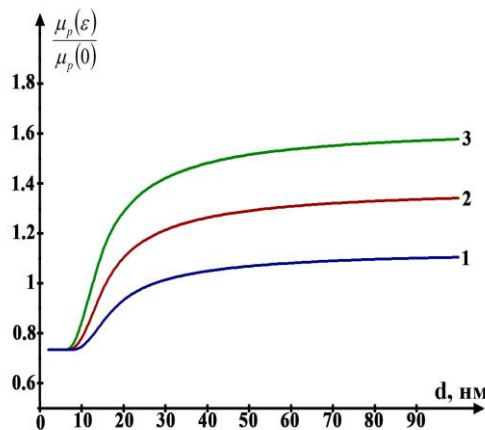


Рис. 10 с.

Рис. 10. Залежності рухливостей дірок для наноплівки Ge/Si (а), Ge/Ge<sub>(0,64)</sub>Si<sub>(0,36)</sub> (б) та Ge/Ge<sub>(0,9)</sub>Si<sub>(0,1)</sub> (с) від їх товщини при різних температурах Т, К: 1–200, 2–250, 3–300. Рухливість дірок для наноплівки Ge/Si та Ge/Ge<sub>(0,64)</sub>Si<sub>(0,36)</sub> (див. рис. 10 а та рис. 10 б) зменшується відносно ненапруженої наноплівки германію приблизно на 27 відсотків. Таке зменшення рухливості не залежить від товщини наноплівки, температури, а також, на відміну від залежностей рухливостей електронів, від величини внутрішніх механічних напружень. Лише для наноплівки Ge/Ge<sub>(0,9)</sub>Si<sub>(0,1)</sub> рухливість дірок буде залежати як від її товщини, так і температури (рис. 10 с). Зростання ролі ефекту розмірного квантування при зменшенні товщини наноплівки та пониженні температури призводить в даному випадку до зменшення рухливості дірок. Підвищення ж рухливості дірок досягається для наноплівки товщиною  $d > 15$  нм при температурах 250 К та 300 К (рис. 10 с, криві 2 та 3) та товщиною  $d > 25$  нм при температурі 200 К (рис. 10 с, крива 1). При цьому рухливість дірок за рахунок наявності внутрішніх механічних напружень зростає при кімнатній температурі більше, ніж в 1,5 разів для наноплівки товщиною  $d > 50$  нм. Перерозподіл дірок з різною ефективною масою між зонами «легких» та «важких» дірок за рахунок варіації температури призводить до змін ефективної рухливості дірок. При збільшенні температури концентрація «легких» дірок буде зростати, внаслідок чого ефективна маса дірок зменшиться, а їх рухливість відповідно зростає. Тому зменшення ймовірності квантово-розмірних ефектів та ефективної маси дірок при збільшенні температури пояснює особливості одержаних залежностей

рухливості дірок для наноплівки германію, вирощеній на підкладці  $\text{Ge}_{(0,9)}\text{Si}_{(0,1)}$ .

Відносне зростання питомої електропровідності наноплівок  $\text{Ge}/\text{Si}$  та  $\text{Ge}/\text{Ge}_{(0,64)}\text{Si}_{(0,36)}$  товщиною  $d > 7$  нм пояснюється зростанням концентрації власних носіїв струму за рахунок зменшення ширини забороненої зони під дією внутрішніх механічних напружень. Значне зростання питомої електропровідності таких наноплівок товщиною  $d < 7$  нм, особливо при зменшенні температури, пов'язане (як і у випадку залежностей концентрації власних носіїв струму) значним посиленням ролі квантово-розмірних ефектів. Для наноплівки  $\text{Ge}/\text{Ge}_{(0,9)}\text{Si}_{(0,1)}$  збільшення її товщини призводить до незначного зростання питомої електропровідності при переході через мінімум, коли  $d \approx 10$  нм, що пов'язано зі зростанням ефективної рухливості дірок.

Легування наноплівок германію, вирощених на підкладках  $\text{Ge}$ ,  $\text{Ge}_{(0,64)}\text{Si}_{(0,36)}$  та  $\text{Ge}_{(0,9)}\text{Si}_{(0,1)}$ , як мілкими, так і глибокими донорними домішками, призводить до збільшення концентрації електронів в зоні провідності цих наноплівок та зменшення ролі квантово-розмірних ефектів. При цьому, як показують розрахунки, для наноплівок, легованих мілкою донорною домішкою з енергією іонізації  $\Delta E_d = 50$  меВ та концентрацією  $N_d = 10^{15} \text{ см}^{-3}$ , концентрація електронів практично рівна концентрації легуючої домішки. Зростання енергії іонізації донорної домішки до  $\Delta E_d = 200$  меВ призводить до зменшення концентрації електронів в зоні провідності наноплівки за рахунок деіонізації домішкового рівня. Концентрація електронів в таких наноплівках, легованих мілкими та глибокими донорами, концентрацією  $N_d = 10^{15} \text{ см}^{-3}$ , практично не залежить від їх товщини. Тому в даному випадку ефекти розмірного квантування не впливатимуть на електричні властивості цих наноплівок. Зміна електропровідності легованої наноплівки, порівняно з нелегованою, під впливом внутрішніх механічних напружень буде визначатись в значній мірі змінами рухливості електронів.

**Четвертий розділ** дисертації «*Механізми дефектоутворення та відпалу в опромінених електронами монокристалах n-Ge та n-Si*» присвячений дослідженню природи та параметрів радіаційних дефектів в опромінених високоенергетичними електронами монокристалах n-Ge<Sb> та n-Si<P>, а також механізмів ізотермічного відпалу точкових та складних радіаційних дефектів в n-Ge<Sb>. На рис. 11 представлено температурні залежності сталої Холла для монокристалів германію, легованих домішкою Sb, концентрацією  $5 \cdot 10^{14} \text{ см}^{-3}$ , опромінених різними потоками електронного опромінення з енергією 10 МеВ. Для потоків опромінення  $\Phi < 10^{16} \text{ ел./см}^2$  германій мав n-тип провідності, а при потоках  $\Phi > 2 \cdot 10^{16} \text{ ел./см}^2$  – конвертував у p-тип. За нахилом кривих залежностей рис. 11, в координатах  $\ln(|R_x|) = f(1/T)$ , були визначені для досліджуваних зразків n-Ge енергетичні рівні утворених радіаційних дефектів. Для потоків електронного опромінення  $\Phi = 5 \cdot 10^{15} \text{ ел./см}^2$  та  $\Phi = 10^{16} \text{ ел./см}^2$  енергетичні рівні практично співпадали (рис. 11, енергетичні рівні  $E_c - 0,27 \text{ еВ}$  та  $E_c - 0,28 \text{ еВ}$ ). Також незначна розбіжність енергетичних рівнів радіаційних дефектів спостерігалась і після n-p конверсії (рис. 11, енергетичні рівні  $E_v + 0,29 \text{ еВ}$  та  $E_v + 0,27 \text{ еВ}$ ).

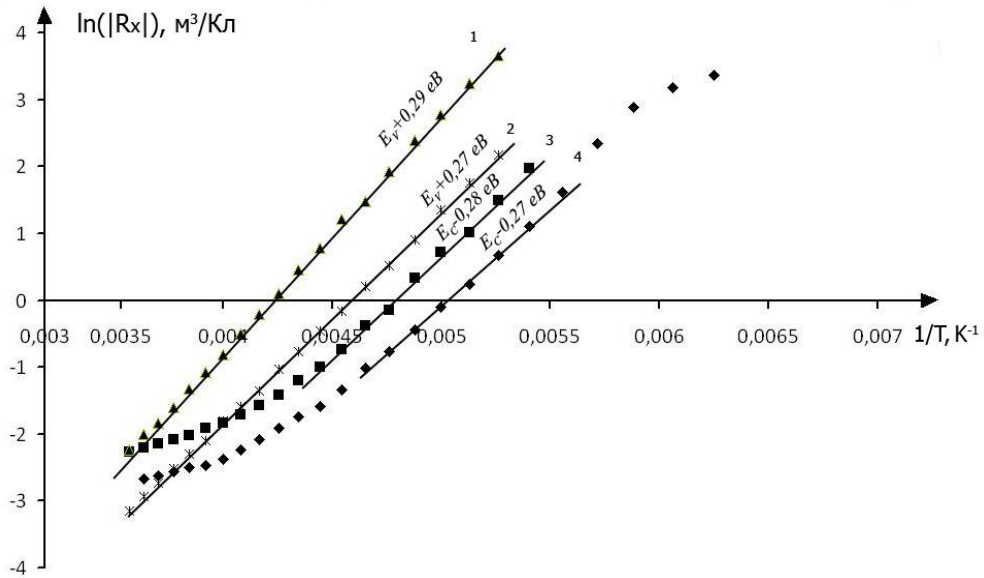


Рис. 11. Температурна залежність сталої Холла  $\ln(|R_x|) = f(1/T)$  для опромінених монокристалів n-Ge різними потоками електронів  $\Phi$ , ел./см<sup>2</sup>: 1 –  $2 \cdot 10^{16}$ ; 2 –  $5 \cdot 10^{16}$ ; 3 –  $10^{16}$ ; 4 –  $5 \cdot 10^{15}$ .

Одним із основних методів ідентифікації природи радіаційних дефектів в кремнії та германії є дослідження ІЧ Фур'є – спектроскопії. Тому проводились вимірювання спектри ІЧ-поглинання при різних температурах для монокристалів германію після опромінення швидкими електронами з енергією 10 MeV та потоком  $\Phi = 5 \cdot 10^{15}$  ел./см<sup>2</sup> (рис. 12). Як видно з рис. 12, в спектрі опромінених зразків n-Ge

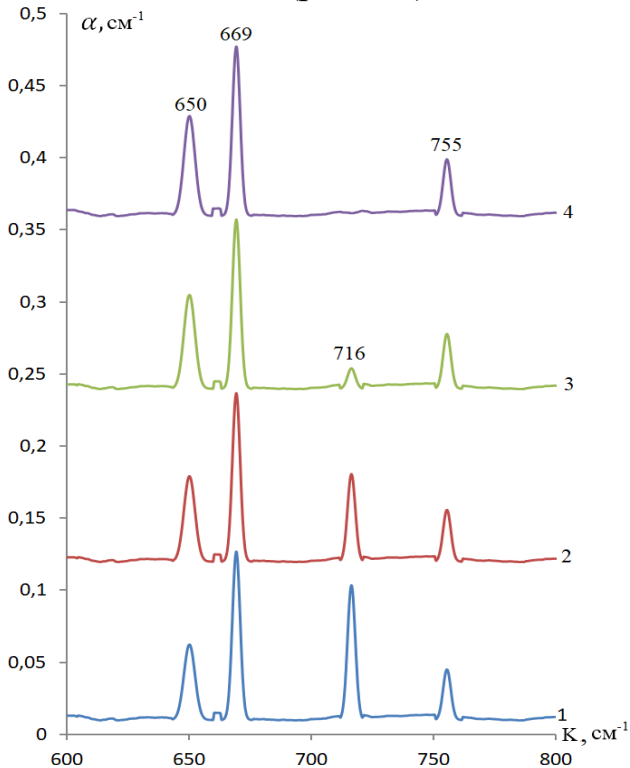


Рис. 12. Спектри поглинання опромінених монокристалів n-Ge для різних температур  $T$ , К:  
1 – 150, 2 – 200, 3 – 250, 4 – 300.

утворюються дві додаткові смуги:  $669 \text{ cm}^{-1}$  та  $716 \text{ cm}^{-1}$ . При цьому з підвищенням температури інтенсивність смуги  $716 \text{ cm}^{-1}$  зменшується, а смуги  $669 \text{ cm}^{-1}$  не змінюється. Дані смуги відповідають різним зарядовим станам А-центру в германії (комплекс  $\text{VO}_i$ ): смуга  $716 \text{ cm}^{-1}$  відповідає подвійному негативному, а смуга  $669 \text{ cm}^{-1}$  – негативному стану А-центра з відповідними енергетичними рівнями  $E_c - 0,21 \text{ eV}$  та  $E_v + 0,27 \text{ eV}$ . Додаткова модифікація А-центру двома міжвузловими атомами германію з утворенням комплексу  $\text{VO}_i\text{I}_{2\text{Ge}}$  понижує рівень А-центру  $E_c - 0,21 \text{ eV}$  до  $E_c - 0,27 \text{ eV}$ , що узгоджується з результатами вимірювань ефекту Холла (рис. 11). При кімнатній температурі рівень  $E_c - 0,27 \text{ eV}$  буде іонізований, тому в спектрі поглинання зникає смуга  $716 \text{ cm}^{-1}$  (рис. 12, крива 4). При цьому всі електрони будуть заповнювати глибокий акцепторний

рівень  $E_v + 0,27$  eV. На основі раніше проведених досліджень DLTS інших авторів для одновісно деформованих монокристалів n-Ge, опромінених електронами, були знайдені баричні коефіцієнти для різних компонентів глибокого рівня А-центру в германії. Одержані залежності ефективної енергії активації А-центру від одновісних тисків вздовж кристалографічних напрямків [110] та [111], які були отриманні з врахування даних вимірювань тензо-холл-ефекту для опромінених електронами з енергією 10 MeV та потоком  $\Phi = 5 \cdot 10^{15}$  ел./см<sup>2</sup> монокристалів n-Ge, добре узгоджуються з відповідними розрахованими залежностями для А-центру в германії, одержаними за даними DLTS. Також результати експериментальних досліджень добре корелюють з проведеними розрахунками спектру радіаційних в досліджуваних монокристалах n-Ge, згідно з якими в забороненій зоні германію при електронному опроміненні утворюються лише два енергетичні рівні:  $E_c - 0,27$  eV та  $E_v + 0,27$  eV, що відповідають одному дефекту. Обчислене значення концентрації інших дефектів виявилось на два порядки меншим, ніж для комплексів  $VO_iI_{2Ge}$ . В германії при опроміненні електронами з енергіями 10 MeV та більшими, крім точкових дефектів, можуть утворюватись області розвпорядкування, які є активними центрами розсіяння носіїв струму та суттєво впливають на величину рухливості електронів. Тому на основі запропонованої моделі рухливості проводився розрахунок температурних залежностей холівської рухливості електронів в монокристалах n-Ge, опромінених потоками електронів  $\Phi = 5 \cdot 10^{15}$  ел./см<sup>2</sup> та  $\Phi = 1 \cdot 10^{16}$  ел./см<sup>2</sup> з енергією 10 MeV. Одержана суттєва різниця у величині холівської рухливості для опромінених монокристалів n-Ge з врахуванням та без врахування розсіяння електронів на областях розвпорядкування показує, що даний механізм розсіяння досить ефективно проявляється для таких потоків опромінення швидкими електронами паралельно з механізмами розсіянням електронів на фонах, іонах сурми та крупномаштабному потенціалі, який виникає внаслідок флуктуації концентрації заряджених дефектів. Також підтвердженням цього є наявність в спектрах власного поглинання опромінених зразків германію потоками електронів  $\Phi = 5 \cdot 10^{15}$  ел./см<sup>2</sup> білякрайового поглинання.

Отже, на основі експериментальних вимірювань ефекту Холла, тензо-холл-ефекту, інфрачервоної Фур'є-спектроскопії, використання статистики невиродженого електронного та діркового газу, проведених розрахунків холівської рухливості було встановлено, що основними електрично активними точковими радіаційними дефектами, які утворюються при опроміненні електронами n-Ge, є А-центри, модифіковані двома атомами германію, і також складні дефекти – області розвпорядкування.

Дослідженню процесів дефектоутворення в монокристалах кремнію під дією різних видів випромінювань на сьогодні присвячена значно більша кількість публікацій, ніж для германію. Кремній відноситься до модельних напівпровідників, оскільки електронний парамагнітний резонанс дозволив визначити атомну конфігурацію та мікроструктуру багатьох радіаційних дефектів. На рис. 13 представлено спектри поглинання для монокристалів кремнію, легованих домішкою фосфора, концентрацією  $N_d = 2,2 \cdot 10^{16}$  см<sup>-3</sup>, після опромінення потоком електронів  $1 \cdot 10^{17}$  ел./см<sup>2</sup> з енергією 12 MeV. Лінії поглинання з частотами 836 та 885 см<sup>-1</sup>

відповідають А-центру (комплекс VO<sub>i</sub>). Даний дефект створює в забороненій зоні кремнію глибокий акцепторний рівень  $E_c - 0,17\text{eV}$  та спостерігається в спектрах ІЧ-

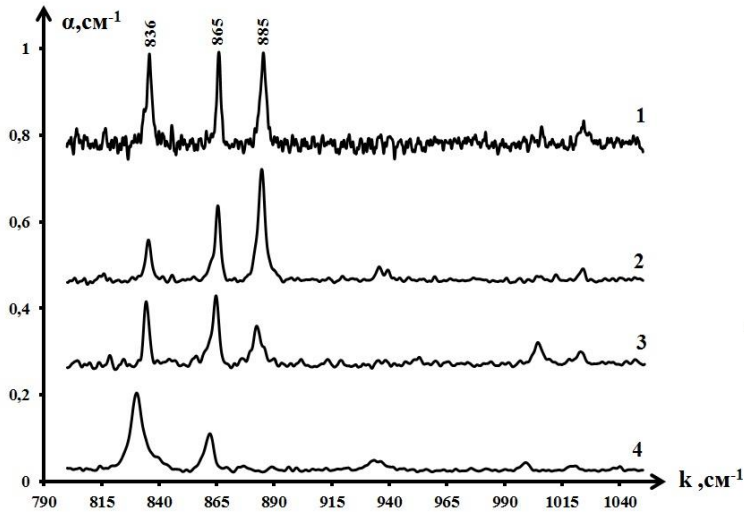


Рис. 13. Спектри поглинання для опромінених монокристалів n-Si потоком електронів  $1 \cdot 10^{17}$  ел./см<sup>2</sup> при різних температурах Т, К: 1 – 10, 2 – 80, 3 – 150, 4 – 300.

виявилась рівною  $E_A = E_c - (0,107 \pm 0,005)$  еВ, що відповідає А-центру, який додатково модифікований домішкою фосфору (комплекс VO<sub>i</sub>P). Для опроміненого кремнію потоком електронів  $\Phi = 2 \cdot 10^{17}$  ел./см<sup>2</sup> спостерігається зміна нахилу температурної залежності концентрації при температурах  $T \approx 195$  К (див. рис. 14, крива 4). Для температур  $T < 195$  К енергія активації утворених радіаційних дефектів

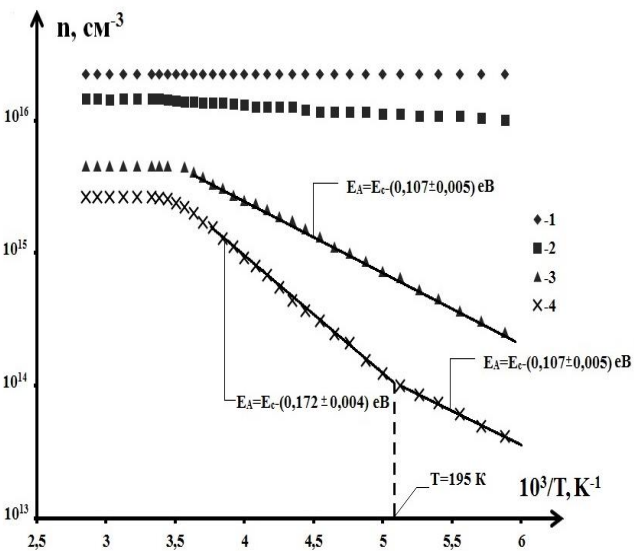


Рис. 14. Температурні залежності концентрації електронів для опромінених монокристалів n-Si різними потоками електронів  $\Phi$ , ел./см<sup>2</sup>: 1 – 0, 2 –  $5 \cdot 10^{16}$ , 3 –  $1 \cdot 10^{17}$ , 4 –  $2 \cdot 10^{17}$ .

поглинання в нейтральному (лінія поглинання  $836\text{ cm}^{-1}$ ), та негативно зарядженому (лінія поглинання  $885\text{ cm}^{-1}$ ) станах. Лінія поглинання з частотою  $865\text{ cm}^{-1}$  відповідає комплексу C<sub>i</sub>O<sub>i</sub>. Даний комплекс є термічно стабільним до температур  $T = 600$  К та створює в забороненій зоні кремнію глибокий рівень  $E_v + 0,35$  еВ. Енергія активації радіаційних дефектів для опроміненого кремнію потоком електронів  $\Phi = 1 \cdot 10^{17}$  ел./см<sup>2</sup> визначалась на основі вимірювань ефекту Холла. За нахилом одержаної температурної залежності концентрації електронів (рис. 14, крива 3), енергія активації

в кремнії (як і у випадку опромінення потоком  $\Phi = 1 \cdot 10^{17}$  ел./см<sup>2</sup>) відповідає комплексу VO<sub>i</sub>P, а для температур  $T > 195$  К – комплексу VO<sub>i</sub>. При  $T > 290$  К радіаційні дефекти, які належать А-центрам, будуть повністю іонізованим, оскільки концентрація електронів виходить на насичення (рис. 14, криві 2-4), а в спектрі поглинання зникає лінія  $885\text{ cm}^{-1}$  (рис. 13, крива 4), що відповідає негативно зарядженому стану А-центра. Глибокий рівень  $E_v + 0,35$  еВ в даному випадку буде деіонізованим і для всього досліджуваного діапазону температур не буде проявлятися його іонізація. Також зі збільшенням потоку електронного опромінення зростатиме концентрація комплексів C<sub>i</sub>O<sub>i</sub>, що пояснюється зменшенням концентрації електронів для опромінених монокристалів

кремнію відносно неопромінених зі збільшенням потоку електронного опромінення для температур вищих за кімнатну. Утворення областей розвпорядкування в n-Si при даних умовах електронного опромінення не було зафіксовано для досліджуваного діапазону температур, як в спектрах ІЧ-поглинання, так і при вимірюваннях температурних залежностей сталої Холла. Це пов'язано з тим, що, більш за все, концентрація утворених областей розвпорядкування в опромінених зразках кремнію є набагато меншою, ніж концентрація комплексів  $VO_i$ ,  $VO_iP$  та  $C_iO_i$ . На основі розв'язків системи рівнянь електронейтральності були обчисленні концентрації даних комплексів та було встановлено, що при збільшенні потоку електронного опромінення зростає їх концентрація. Максимально ефективно при опроміненні вводяться А-центри, модифіковані домішкою фосфору. При збільшенні потоку від  $1 \cdot 10^{17}$  до  $2 \cdot 10^{17}$  ел./см<sup>2</sup> концентрація таких дефектів практично не змінюється, оскільки існує обмеження за концентрацією легуючої домішки фосфору. Одержані різні залежності енергії активації комплексу  $VO_iP$  від орієнтації осі деформації (як і для комплексу  $VO_iI_{2Ge}$  в германії) можуть свідчити про його анізотропні характеристики.

Більшість публікацій, в яких розглядався відпал радіаційних дефектів в германії та кремнії, присвячена дослідженню відпалу або точкових дефектів, або кластерів дефектів. Випадок одночасного процесу відпалу цих дефектів та його

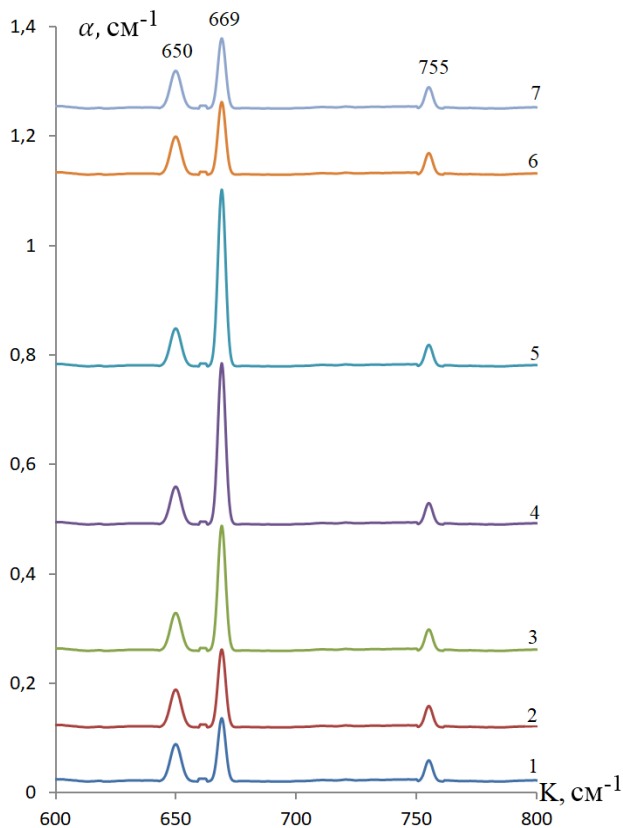


Рис. 15. Спектри поглинання для опромінених монокристалів n-Ge після ізотермічного відпалу при  $T_b=393$  К протягом часу  $t$ , год.: 1 – 0, 2 – 1, 3 – 2, 4 – 3, 5 – 4, 6 – 5, 7 – 6.

вплив на електричні властивості даних напівпровідників, особливо германію, є мало вивченим. Також не існує теоретичних моделей такого відпалу. Тому для монокристалів n-Ge, опромінених електронами з енергією 10 MeV та потоком  $\Phi=5 \cdot 10^{15}$  ел./см<sup>2</sup>, проводились дослідження кінетики ізотермічного відпалу на основі вимірювань ефекту Холла та інфрачервоної Фур'є-спектроскопії. При температурах відпалу  $T_b=433$  К та  $T_b=448$  К протягом 1 год. спостерігалось зменшення сталої Холла у порівнянні з опроміненими (невідпаленими) зразками для всього досліджуваного діапазону температур. Це свідчить про зростання концентрації електронів у зоні провідності за рахунок відпалу комплексів  $VO_iI_{2Ge}$ . Збільшення ж часу відпалу призводило до подальшого зменшення сталої Холла та відповідно концентрації цих комплексів. Після відпалу при температурі  $T_b=403$  К протягом однієї години було виявлене аномальне зростання сталої Холла в

порівнянні з опроміненими (невідпаленими) зразками, яке тривало до 3 годин. При температурі відпалу  $T_v=393$  К протягом однієї години n-Ge конвертував у р-тип і подальший аномальний відпал спостерігався до 4 год. Як слідує з рис. 15, інтенсивність смуги  $669 \text{ см}^{-1}$ , що відповідає негативно зарядженому стану А-центра в германії, буде збільшуватись протягом 4 год. Тому в даному випадку відбуватиметься накопичення в об'ємі германію комплексів  $VO_iI_{2Ge}$ , що також підтверджується кількісними розрахунками концентрації цих комплексів в опромінених зразках n-Ge після такого відпалу. Одержані результати відпалу можна пояснити наступним чином: відпал ядер областей розвпорядкування можливий при нижчій температурі, ніж А-центрів. Ядра областей розвпорядкування мають високу концентрацію вакансій. Це дає змогу більш легкій їх перебудові та дифузії цих вакансій у провідну матрицю монокристалу Ge. Дифундуючі вакансії можуть знову вступати у квазіхімічні реакції з киснем та міжвузловими атомами германію та створювати нові А-центри. Збільшення ж часу відпалу призводить до зменшення концентрації областей розвпорядкування та відповідно вакансій, з яких можуть бути утворені нові А-центри. Тому при температурах відпалу  $T_v=403$  К (більше 3 год.) та  $T_v=393$  К (більше 4 год.) процеси відпалу А-центрів починають переважати над процесами їх генерації, що призводило до зменшення сталої Холла.

Для розрахунку енергії активації відпалу та частотного фактора для А-центрів та областей розвпорядкування проводились вимірювання температурних залежностей сталої Холла для таких монокристалів n-Ge після відпалу при  $T_1=433$  К та  $T_2=448$  К та розрахунки концентрації А-центрів на основі розв'язків рівняння електронейтральності. Нелінійний характер одержаних залежностей концентрації А-центрів від часу відпалу в напівлогарифмічному масштабі свідчить про те, що кінетика відпалу радіаційних дефектів в нашому випадку не може бути описана простим експоненціальним законом, який використовується при описі відпалу дефектів одного типу. Для випадку одночасних процесів відпалу А-центрів та ядер областей розвпорядкування в досліджуваних монокристалах n-Ge, можна записати наступну систему рівнянь:

$$\begin{cases} \frac{dN_A}{dt} = \frac{N_V}{\tau_1} - \frac{N_A}{\tau_2}, \\ \frac{dN_V}{dt} = \frac{N_V}{\tau_1} + \frac{N_A}{\tau_2}. \end{cases}, \quad (11)$$

де  $N_A$ ,  $N_V$  – концентрації А-центрів та вакансій в довільний момент часу відпалу,  $\tau_1$  та  $\tau_2$  – середній час життя вакансії та А-центру відповідно.

З розв'язку системи (11) отримаємо, що

$$N_A(t) = -\frac{N_0(k_2\tau_1 + \frac{\tau_1}{\tau_2})}{\tau_1(k_1 - k_2)} e^{k_1 t} + \frac{N_0(k_1\tau_1 + \frac{\tau_1}{\tau_2})}{\tau_1(k_1 - k_2)} e^{k_2 t}, \quad (12)$$

$$\text{де } k_1 = \frac{-\left(\frac{\tau_1}{\tau_2} - 1\right) + \sqrt{\left(\frac{\tau_1}{\tau_2} - 1\right)^2 + \frac{8\tau_1}{\tau_2}}}{2\tau_1}, \quad k_2 = \frac{-\left(\frac{\tau_1}{\tau_2} - 1\right) - \sqrt{\left(\frac{\tau_1}{\tau_2} - 1\right)^2 + \frac{8\tau_1}{\tau_2}}}{2\tau_1}.$$

Записавши рівняння (12) для двох різних часів ізотермічного відпалу  $t_1$  та  $t_2$ , отримаємо наступну систему рівнянь для знаходження  $\tau_1$  та  $\tau_2$ :

$$\begin{cases} N_A(t_1) = -\frac{N_0(k_2\tau_1 + \frac{\tau_1}{\tau_2})}{\tau_1(k_1 - k_2)} e^{k_1 t_1} + \frac{N_0(k_1\tau_1 + \frac{\tau_1}{\tau_2})}{\tau_1(k_1 - k_2)} e^{k_2 t_1}, \\ N_A(t_2) = -\frac{N_0(k_2\tau_1 + \frac{\tau_1}{\tau_2})}{\tau_1(k_1 - k_2)} e^{k_1 t_2} + \frac{N_0(k_1\tau_1 + \frac{\tau_1}{\tau_2})}{\tau_1(k_1 - k_2)} e^{k_2 t_2}. \end{cases} \quad (13)$$

Для проведення таких розрахунків були використані обчисленні значення концентрації А-центрів для різних часів відпалу, при температурах  $T_1=433$  К та  $T_2=448$  К. Для знаходження енергії активації відпалу А-центрів та ядер областей розвпорядкування запишемо вирази для середнього часу життя А-центру та вакансії для двох різних температур відпалу  $T_1$  та  $T_2$ :

$$\tau_1(T_1) = \frac{1}{\nu_1} e^{\frac{E_{a1}}{kT_1}}, \quad \tau_1(T_2) = \frac{1}{\nu_1} e^{\frac{E_{a1}}{kT_2}}, \quad (14)$$

$$\tau_2(T_1) = \frac{1}{\nu_2} e^{\frac{E_{a2}}{kT_1}}, \quad \tau_2(T_2) = \frac{1}{\nu_1} e^{\frac{E_{a2}}{kT_2}}. \quad (15)$$

З розв'язків рівнянь (14) та (15) отримаємо:  $E_{a1} = 0,92$  еВ – енергія активації відпалу ядра області розвпорядкування та  $E_{a2} = 1,04$  еВ – енергія активації відпалу А-центра,  $\nu_1 = 2,52 \cdot 10^6$  с<sup>-1</sup> та  $\nu_2 = 1,07 \cdot 10^8$  с<sup>-1</sup> – частотні фактори для вакансії та А-центра відповідно.

Запропонована теоретична модель відпалу, з врахуванням знайдених енергій активації відпалу та частотних факторів для даних дефектів, добре описує аномальний відпал при температурах  $T_v=403$  К та  $T_v=393$  К. Отримані раніше іншими авторами значення енергії активації відпалу та частотного фактора для комплексу  $VO_i$  в германії виявилися рівними  $0,94$  еВ та  $4 \cdot 10^7$  с<sup>-1</sup>. Знайдене ж значення енергії активації відпалу для комплексу  $VO_i I_{2Ge}$  є більшим, ніж для  $VO_i$ , що свідчить про більшу його термічну стійкість.

**П'ятий розділ** дисертації «Електричні властивості та механізми розсіяння носіїв струму для недеформованих та одновісно деформованих монокристалів n-Ge та n-Si з глибокими енергетичними рівнями» присвячений дослідженню механізмів електропровідності та розсіяння носіїв струму в недеформованих та одновісно деформованих монокристалах n-Ge та n-Si з технологічними та радіаційними дефектами, що створюють в забороненій зоні германію та кремнію глибокі енергетичні рівні. Рухливість електронів в опромінену n-Ge електронами з енергією 10 МеВ, для випадку наявності областей розвпорядкування, можна представити наступним виразом:

$$\mu_{\phi} = \frac{\mu_0}{1 + 2 \cdot 10^{-16} \Phi}, \quad (16)$$

$\mu_0$  – рухливість електронів з врахуванням всіх діючих механізмів розсіяння за виключенням розсіяння на областях розвпорядкування,  $\Phi$  – потік опромінення.

Утворенні при опроміненні в забороненій зоні германію локальні рівні радіаційних дефектів виконуватимуть роль компенсуючих центрів по відношенню до основних носіїв струму. Зменшення при цьому ефекту екранування призводить до появи крупномасштабних флуктуацій концентрації заряджених дефектів і відповідно виникнення крупномасштабного потенціалу та значних градієнтів питомого опору, що впливатиме на зменшення холівської рухливості носіїв струму. Тоді, холівську рухливість для електронів опроміненого n-Ge можна записати так:

$$\mu_n = \mu_{\phi} A \exp\left(-\frac{\Delta}{kT}\right), \quad (17)$$

де  $A$  – холл-фактор,  $\Delta$  – амплітуда крупномасштабного потенціалу.

$$\Delta = \frac{q^2 N^{2/3}}{\varepsilon \cdot n^{1/3}}, \quad (18)$$

де  $N$  – концентрація заряджених дефектів, яка рівна сумі концентрацій іонізованих донорів  $N_d$  та компенсуючих заряджених акцепторів  $N_a$ ,  $\varepsilon$  – діелектрична проникність,  $n$  – концентрація електронів в зоні провідності,  $q$  – заряд електрона.

Для досліджуваних монокристалів n-Ge концентрація легуючої домішки сурми  $N_d = 5 \cdot 10^{14} \text{ см}^{-3}$ , а обчислене значення концентрації заряджених дефектів, що відповідають комплексам  $\text{VO}_i\text{I}_{2\text{Ge}}$ , для потоку опромінення електронами  $\Phi = 5 \cdot 10^{15} \text{ ел./см}^2$  складає  $N_a = 2,8 \cdot 10^{14} \text{ см}^{-3}$ . Для знаходження залежностей концентрації електронів від одновісного тиску проводились вимірювання тензо-холл-ефекту для опромінених потоком електронів  $\Phi = 5 \cdot 10^{15} \text{ ел./см}^2$  монокристалів n-Ge. Рухливість електронів  $\mu_0$  та холл-фактор  $A$  обчислювались з врахуванням механізмів розсіяння електронів на іонах домішки сурми, акустичних та оптичних фонах (внутрідолинне та міждолинне розсіяння) в недеформованих та одновісно деформованих монокристалах германію. Результати експериментальних досліджень та теоретичних розрахунків температурних залежностей холівської рухливості для опромінених електронами з енергією 10 MeV та потоком  $\Phi = 5 \cdot 10^{15} \text{ ел./см}^2$  монокристалів n-Ge, одновісно деформованих вздовж кристалографічних напрямків [110], [111] та [100], представлені на рис. 16-18. Як слідує з рис. 16 та 17, холівська рухливість одновісно деформованих монокристалів n-Ge при збільшенні температури спочатку зростає та при переході через максимум починає монотонно зменшуватись. Зростання холівської рухливості електронів пов'язане зі зменшенням відносного вкладу розсіяння електронів на заряджених глибоких рівнях А-центрів внаслідок їх перезарядки та амплітуди крупномасштабного потенціалу при збільшенні концентрації електронів в зоні провідності германію зі збільшенням температури. Зменшення холівської рухливості пояснюється деформаційним перерозподілом електронів між мінімумами зони провідності германія з різною рухливістю. При цьому механізми розсіяння електронів на заряджених дефектах та крупномасштабному потенціалі будуть менше впливати на зростання рухливості з

підвищенням температури, ніж деформаційно-індукована анізотропія рухливості, яка призводить до її зменшення. Для випадку одновісного тиску вздовж кристалографічного напрямку [100] (рис. 18) відсутній деформаційний перерозподіл електронів між мінімумами, і, як для недеформованих, так і одновісно деформованих монокристалів n-Ge, холівська рухливість збільшується при підвищенні температури для всього діапазону досліджуваних температур.

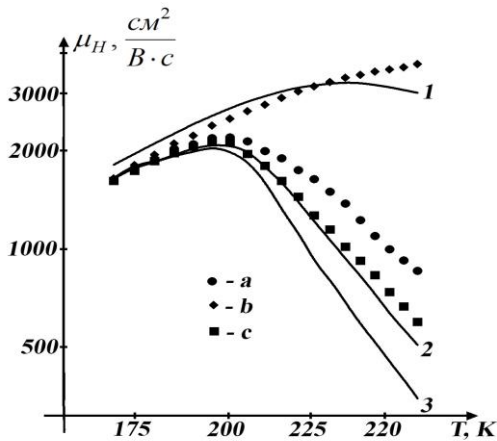


Рис. 16. Температурні залежності холівської рухливості для опромінених монокристалів n-Ge при різних значеннях одновісного тиску вздовж кристалографічного напрямку [111]: а – 0,49 ГПа; б – 0 ГПа; с – 0,93 ГПа. Суцільні криві – теоретичні розрахунки для цих же значень одновісних тисків  $P$ , ГПа: 1 – 0; 2 – 0,49; 3 – 0,93.

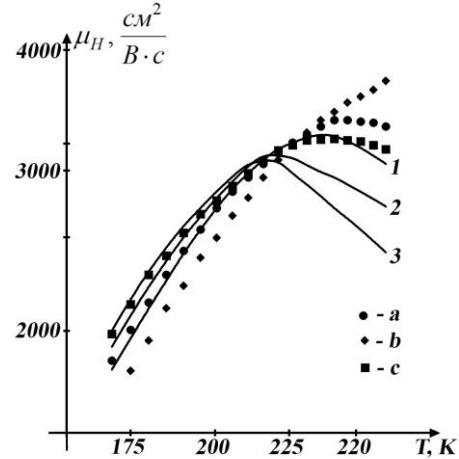


Рис. 17. Температурні залежності холівської рухливості для опромінених монокристалів n-Ge при різних значеннях одновісного тиску вздовж кристалографічного напрямку [110]: а – 0,41 ГПа; б – 0 ГПа; с – 0,74 ГПа. Суцільні криві – теоретичні розрахунки для цих же значень одновісних тисків  $P$ , ГПа: 1 – 0; 2 – 0,41; 3 – 0,74.

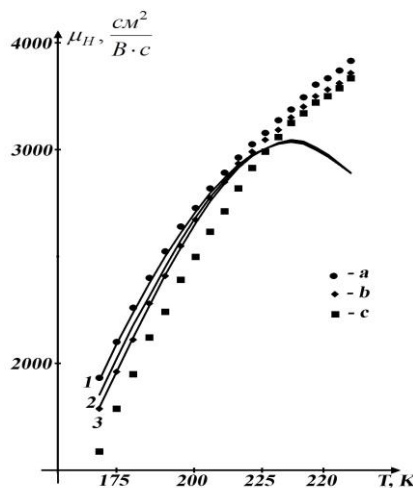


Рис. 18. Температурні залежності холівської рухливості для опромінених монокристалів n-Ge при різних значеннях одновісного тиску вздовж кристалографічного напрямку [100]: а – 0,86 ГПа; б – 0,37 ГПа; с – 0 ГПа. Суцільні криві – теоретичні розрахунки для цих же значень одновісних тисків  $P$ , ГПа: 1 – 0,86; 2 – 0,37; 3 – 0.

Зростання холівської рухливості електронів при температурах  $T > 235$  К, яке не узгоджується з відповідними теоретичними розрахунками, пов'язане зі зменшенням відносного вкладу розсіяння електронів на заряджених глибоких рівнях А-центрів внаслідок їх перезарядки. Також при збільшенні одновісного тиску спостерігається зростання холівської рухливості електронів, що пояснюється зменшенням амплітуди крупномасштабного потенціалу та концентрації заряджених А-центрів при збільшенні концентрації електронів в зоні провідності германію при деформації. Достатньо добра узгодженість при температурах  $T < 220$  К одержаних експериментальних результатів температурних залежностей холівської рухливості електронів для одновісно деформованих монокристалів n-Ge з відповідними теоретичними розрахунками вказує на другорядну роль механізму розсіяння електронів на заряджених А-центрах по відношенню до механізмів розсіяння електронів на крупномасштабному потенціалі та областях розвпорядкування для даного діапазону температур. Для теоретичного опису одержаних експериментальних результатів при температурах  $T > 235$  К необхідно вже враховувати в часі релаксації механізм розсіяння електронів на А-центрах з різним зарядовим станом. А це вимагає побудови коректного потенціалу взаємодії електрона з таким центром.

Як було зазначено вище, зростання потоку електронного опромінення призводить до збільшення концентрації комплексів  $VO_iI_{2Ge}$  та до n-p конверсії типу провідності германію. У випадку n-провідної матриці германію (при  $\Phi < 10^{16}$  ел./см<sup>2</sup>) області розвпорядкування можна вважати ізолюючими включеннями, які мають провідність р-типу та відділені від основного провідного середовища p-n переходом. Якщо питома електропровідність таких включень є більшою за питому електропровідність матриці, то їх наявність може призводити до зростання ефективної рухливості носіїв струму. При зростанні потоку електронного опромінення зростатиме доля об'єму монокристалу германію, який займають провідні включення. Це може пояснювати одержане зростання ефективної холівської рухливості носіїв струму при потоках опромінення електронами  $\Phi > 10^{16}$  ел./см<sup>2</sup>. Для опромінених монокристалів n-Ge потоком електронів  $\Phi = 5 \cdot 10^{16}$  ел./см<sup>2</sup> ефективна холівська рухливість дірок при температурах від 230 К до 270 К за абсолютною величиною виявилась більшою, ніж холівська рухливість електронів для неопроміненого n-Ge.

Подібні температурні залежності холівської рухливості та закономірності механізмів розсіяння електронів спостерігались для недеформованих та одновісно деформованих монокристалах n-Si, опромінених електронами з енергією 12 MeV, та монокристалів германію, легованих глибокою домішкою золота. Проведенні теоретичні розрахунки рухливості на основі виразу (17), коли  $\mu_\phi = \mu_0$ , показують, що для таких монокристалів n-Si та n-Ge величина холівської рухливості електронів, як і у випадку опромінених електронами монокристалів n-Ge, буде в значній мірі визначатись механізмами розсіяння електронів на крупномасштабному потенціалі та заряджених дефектах, які створюють в забороненій зоні германію та кремнію глибокі енергетичні рівні.

Цілеспрямована зміна властивостей напівпровідників за допомогою радіаційного опромінення є одним із основних методів створення на основі них нових приладів з прогнозованими характеристиками, таких як сенсорів тиску, температури, магнітного поля, ІЧ-випромінювання. На рис. 19 представлені залежності тензоопору для опромінених монокристалів n-Ge потоком електронів  $\Phi=5 \cdot 10^{15}$  ел./см<sup>2</sup>, з енергією 10 МеВ, при T=300 К. Для однобісно деформованих монокристалів n-Ge (неопромінених) вздовж кристалографічного напрямку [100] відсутній

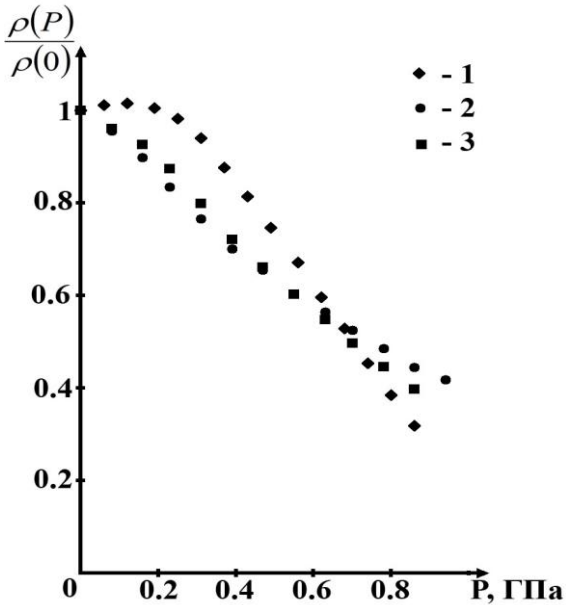


Рис. 19. Залежності тензоопору для опромінених електронами монокристалів n-Ge при однобісному тискові вздовж різних кристалографічних напрямків: 1 – [100], 2 – [111], 3 – [110].

перерозподіл електронів між  $L_1$ -мінімуми зони провідності германію та відповідно тензоопір. При деформації n-Ge вздовж кристалографічних напрямків [110] та [111] буде відбуватись перерозподіл електронів між  $L_1$ -мінімуми з різною рухливістю. При цьому ефективна рухливість електронів буде зменшуватись, а питомий опір зростатиме при збільшенні величини однобісного тиску. Як було зазначено в розділі 4, для таких умов електронного опромінення в монокристалах n-Ge утворюються електрично активні радіаційні дефекти, що належать комплексам  $VO_iI_{2Ge}$ , які створюють в забороненій зоні германію акцепторні рівні  $E_C - 0,27$  еВ та  $E_V + 0,27$  еВ. Зміна питомого опору при деформації для опромінених монокристалів n-Ge може бути пов'язана як зі змінами рухливості носіїв струму, так і концентрації. Тому для більш

детального вивчення механізмів тензоопору опромінених монокристалів n-Ge проводились також вимірювання температурної залежності сталої Холла та тензо-холл-ефекту. Як показують такі дослідження, для розглядуваного випадку тензоопору опроміненого n-Ge при кімнатній температурі може проявлятися лише іонізація рівня  $E_V + 0,27$  еВ при деформації, внаслідок чого буде змінюватись концентрація носіїв струму. З одержаних залежностей сталої Холла від однобісного тиску слідує, що для  $P < 0,6$  ГПа вздовж кристалографічних напрямків [110] та [111] стала Холла майже не залежить від деформації, а при однобісному тиску вздовж кристалографічного напрямку [100] – монотонно зростає. Відомо, що для випадку лише носіїв струму з однією ефективною масою внаслідок зростання концентрації носіїв струму при деформації стала Холла мала б зменшуватись. Тому такі специфічні залежності сталої Холла від деформації для опромінених монокристалів n-Ge можна пояснити наявністю двох типів носіїв струму: електронів та дірок з близькими значеннями концентрацій. При цьому тензоопір досліджуваних монокристалів n-Ge буде визначатись співвідношенням між концентраціями електронів та дірок при однобісній деформації, яке залежить від ступеня заповнення рівня А-центу  $E_V + 0,27$  еВ. Одержана лінійна залежність

тензоопору n-Ge при  $P > 0,25$  ГПа вздовж кристалографічного напрямку [100] (рис. 19, крива 1) може знайти своє практичне використання при створенні на основі такого монокристалу n-Ge чутливого елементу сенсора тиску.

Проведенні при кімнатній температурі дослідження тензо-холл-ефекту та інфрачервоної Фур'є-спектроскопії для опромінених різними потоками електронів з енергією 12 МеВ монокристалів n-Si дозволили встановити, що їх тензоопір буде визначатись тими ж механізмами, що і для неопромінених монокристалів кремнію, оскільки глибокі рівні радіаційних дефектів, що належать комплексам  $VO_i$  та  $VO_iP$ , будуть повністю іонізованими. Іонізація ж глибокого рівня  $E_v + 0,35$  eV комплексу  $C_iO_i$  при одновісній деформації не проявлятиметься. Характерною особливістю залежностей тензоопору при одновісних тисках вздовж кристалографічних напрямків [100] та [111] для таких монокристалів n-Si є зростання величини тензоопору при потоках опромінення  $\Phi \geq 1 \cdot 10^{17}$  ел./см<sup>2</sup>, яке для випадку  $P // [100]$  пов'язане з деформаційно-індукованою анізотропією розсіяння електронів на утворених радіаційних дефектах. При одновісній деформації n-Si вздовж кристалографічного напрямку [111] не буде виникати анізотропії рухливості, але зростатиме ефективна маса електронів, що призведе до змін радіуса екранування та відповідно потенціальної енергії взаємодії електрона із центром розсіювання. Такими центрами розсіяння для електронів в опромінених монокристалах кремнію є домішкові іони фосфору та утворені радіаційні дефекти. Зміна умов розсіяння електронів при деформації в даному випадку пояснює різні залежності холівської рухливості від потоку електронного опромінення для недеформованих та одновісно деформованих монокристалів n-Si. Дані залежності будуть визначати особливості тензоопору одновісно деформованих вздовж кристалографічного напрямку [111] монокристалів n-Si для різних потоків електронного опромінення. Одержане при кімнатній температурі зростання тензочутливості монокристалів n-Si за рахунок електронного опромінення потоками  $\Phi \geq 1 \cdot 10^{17}$  ел./см<sup>2</sup> може бути використане при розробці на основі таких монокристалів кремнію чутливих елементів для сенсорів тиску.

Використання електронного опромінення в комплексному поєднанні з термообробкою (відпалом) дозволило значно підвищити магнітну чутливість монокристалів n-Ge та n-Si. За рахунок послідовних етапів опромінення монокристалів германію, легованих домішкою Sb, концентрацією  $5 \cdot 10^{14}$  см<sup>-3</sup>, електронами з енергією 10 МеВ і потоком  $\Phi = 5 \cdot 10^{15}$  ел./см<sup>2</sup> та ізотермічного відпалу при  $t = 130$  °C протягом трьох годин було досягнуто для n-Ge зростання магнітної чутливості від 10 до 350 мВ/Тл при кімнатній температурі. Такий же ефект зростання практично на порядок магнітної чутливості був одержаний для кремнію, легованого домішкою фосфору, концентрацією  $2,2 \cdot 10^{16}$  см<sup>-3</sup>, при опроміненні електронами з енергією 12 МеВ та потоком  $\Phi = 2 \cdot 10^{17}$  ел./см<sup>2</sup>.

Експлуатація електронної апаратури в умовах підвищеної радіації вимагає забезпечення їй високої радіаційної стійкості. Така задача може бути вирішена шляхом локального захисту з використанням захисних покриттів, одержаних, наприклад, на основі епоксидно-діанової смоли марки ЕД-20 з твердником ПЕПА без наповнювачів та/або з наповнювачами порошків металів. Зокрема, на основі

досліджень ефекту Холла, було встановлено, що найбільша радіаційна стійкість електричних параметрів монокристалів n-Si до електронного опромінення з енергією 12 MeV та потоком  $\Phi=1 \cdot 10^{17}$  ел./см<sup>2</sup> досягається при покритті цих монокристалів шаром епоксидної смоли з наповнювачем порошку заліза масовою часткою 30 мас. ч. на 100 мас. ч. епоксидної смоли.

### ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ

1. Дослідження поздовжнього тензорезистивного ефекту в n-Ge при одновісних тисках P//[100] до 3 ГПа та використання виразів теорії анізотропного розсіяння електронів на акустичних фонах та іонах мілких донорів дозволили досить точно знайти константи деформаційного потенціалу  $\Xi_d^{\Delta_1} = -1,29$  eV,  $\Xi_u^{\Delta_1} = 11,82$  eV та ефективні маси  $m_{\parallel} = 1,65m_0$ ,  $m_{\perp} = 0,32m_0$  для  $\Delta_1$ -мінімуму зони провідності германію. Враховуючи в розрахунках значення даних параметрів, було визначено енергію іонізації основного стану домішок фосфору, сурми та миш'яку. Показано, що розрахунки енергії іонізації, які проводились на основі варіаційного методу Рітца та теорії збурень, досить добре узгоджуються з експериментальними даними лише для домішки сурми. При збільшенні енергії іонізації домішки зменшується генетичний зв'язок домішкового рівня з  $\Delta_1$ -мінімумом і наближення ефективної маси стає грубим. В даному випадку обчислення енергії іонізації домішок фосфору та миш'яку необхідно проводити вже на основі варіаційного методу Рітца, враховуючи хімічний зсув для цих домішок, оскільки відповідні розрахунки на основі теорії збурень дають суттєві неточності.

2. На основі проведених розрахунків рухливості в умовах розсіяння електронів на акустичних, оптичних фонах та іонах домішки, відомих даних по гідростатичному тиску, коли реалізується шестидолинна  $\Delta_1$ -модель зони провідності германію, та експериментальних досліджень тензоопору при одновісних тисках вздовж кристалографічного напрямку [100] було встановлено, що в германії при гідростатичному тиску близько 6 ГПа та одновісному тиску P//[100] в діапазоні від 1,6 до 2,7 ГПа суттєвим стає еквівалентне та нееквівалентне міждолинне розсіяння електронів на оптичних фонах відповідно. Також, як показують розрахунки, еквівалентне міждолинне розсіяння на оптичних фонах виникає в чотирьохдолинній  $\Delta_1$ -моделі германію при тисках  $P \approx 8$  ГПа вздовж кристалографічного напрямку [110].

3. Встановлено, що величина тензоопору n-Ge при одновісному тиску P//[100] від 1,6 до 2,7 ГПа буде в значній мірі залежати від нееквівалентного міждолинного розсіяння електронів між  $L_1$ - та  $\Delta_1$ -мінімумами зони провідності германію. При температурах вищих за кімнатну тензоопір монокристалів n-Ge в даному випадку додатково буде визначатися механізмами власної провідності. Зокрема, в діапазоні одновісних тисків від 0,8 до 2,4 ГПа проявляється двохзонний механізм власної провідності, який пов'язаний з переходами електронів з валентної зони в  $L_1$ - та  $\Delta_1$ -мінімуми. Одержаний для n-Ge значний тензорезистивний ефект при тисках  $P > 1,6$  ГПа може бути використаний для створення на його основі сенсорів високого одновісного тиску.

4. Проведено розрахунки зонної структури нелегованої та легованої донорною домішкою наноплівки германію, вирощеної на підкладці  $\text{Ge}_{(x)}\text{Si}_{(1-x)}$  з кристалографічною орієнтацією (001). На основі даних розрахунків було встановлено, що зростання вмісту германію в підкладці призводить до зменшення величини внутрішніх деформаційних полів та енергії іонізації як мілкої, так і глибокої легуючої донорної домішки в наноплівці германію. Причиною такої зміни енергії іонізації донорної домішки є зменшення ефективної маси електрона за рахунок деформаційної перебудови зонної структури наноплівки під дією внутрішніх механічних напружень.

5. Встановлено, що електричні властивості нелегованих та легованих наноплівок  $\text{Ge}/\text{Si}$ ,  $\text{Ge}/\text{Ge}_{(0,64)}\text{Si}_{(0,36)}$  та  $\text{Ge}/\text{Ge}_{(0,9)}\text{Si}_{(0,1)}$  визначаються особливостями їх зонної структури та ефектами розмірного квантування, які є досить суттєвими для наноплівок товщиною менше 7 нм. Зростання концентрації легуючої домішки призводить до послаблення ролі квантово-розмірних ефектів. Одержане (більше, ніж в 1,5 рази) зростання рухливості дірок при кімнатній температурі для наноплівки  $\text{Ge}/\text{Ge}_{(0,9)}\text{Si}_{(0,1)}$  товщиною  $d > 50$  нм може бути використано для виготовлення на її основі каналів p-MOSFET та p-MODFET транзисторів.

6. На основі розв'язків рівнянь електронейтральності, вимірювань ефекту Холла та інфрачервоної Фур'є-спектроскопії для опромінених електронами монокристалів n-Ge<Sb> та n-Si<P> була встановлена природа утворених дефектів та їх основні параметри. Опромінення електронами з енергією 10 MeV n-Ge<Sb> призводить до утворення в його об'ємі комплексів  $\text{VO}_i\text{I}_{2\text{Ge}}$  (А-центри, модифіковані двома міжвузловими атомами германію) та областей розвпорядкування. При опроміненні електронами з енергією 12 MeV монокристалів n-Si<P> утворюються переважно лише точкові дефекти, що відповідають як відомим комплексам  $\text{VO}_i$ , (А-центр) та  $\text{C}_i\text{O}_i$ , так і практично не вивченим комплексам  $\text{VO}_i\text{P}$  (А-центр, модифікованих домішкою фосфору).

7. Вперше при температурах  $t = 120$  °C та  $t = 130$  °C виявлено аномальний ізотермічний відпал опромінених електронами з енергією 10 MeV монокристалів n-Ge<Sb>, який пояснюється домінуючим процесом генерації А-центрів над процесом їх відпалу. Згідно із запропонованою моделлю відпалу, генерація А-центрів відбувається за рахунок відпалу ядер областей розвпорядкування, які мають меншу енергію активації відпалу, ніж А-центри. Зокрема, з розв'язків системи кінетичних рівнянь були обчислені значення енергії активації відпалу  $E_{a1} = 0,92$  eV та  $E_{a1} = 1,04$  eV для ядра області розвпорядкування та А-центра відповідно, що підтверджує дане твердження. Одержане за рахунок відпалу при  $t = 130$  °C протягом трьох годин зростання магнітної чутливості від 10 до 350 мВ/Тл для опроміненого n-Ge при кімнатній температурі може бути використане при конструюванні високочутливих сенсорів магнітного поля на основі таких монокристалів.

8. Дослідження механізмів розсіяння електронів в недеформованих та одночасно деформованих монокристалах n-Ge та n-Si з глибокими рівнями радіаційного та технологічного походження показали, що на величину рухливості електронів в таких монокристалах будуть впливати не лише механізми розсіяння електронів на акустичних, оптичних фононах (внутрідолинних фононах та фононах,

що відповідають за міждолинне розсіяння), іонах мілких донорів, але й розсіяння електронів на крупномасштабному потенціалі та заряджених дефектах, які створюють в забороненій зоні германію та кремнію глибокі енергетичні рівні. Було встановлено, що аномальне зростання холівської рухливості електронів при збільшенні температури або величини одновісного тиску для монокристалів n-Ge та n-Si, опромінених потоками швидких електронів, та монокристалів германію, легованих глибокою домішкою золота, пов'язане зі зменшенням амплітуди крупномасштабного потенціалу та концентрації заряджених дефектів.

9. Встановлено, що тензоопір при кімнатній температурі для одновісно деформованих монокристалів n-Ge, опромінених потоком електронів  $\Phi=5 \cdot 10^{15}$  ел./см<sup>2</sup> з енергією 10 MeV, буде визначатись не лише перерозподілом електронів з різною рухливістю між мінімумами зони провідності германію при одновісній деформації, що призводить до зростання питомого опору, але й іонізацією рівня  $E_v + 0,27$  eV, що належить комплексу  $VO_iI_{2Ge}$ . При цьому буде змінюватись співвідношення між концентраціями електронів та дірок, що є причиною зменшення питомого опору при деформації. Тензоопір опромінених різними потоками електронів з енергією 12 MeV монокристалів n-Si при кімнатній температурі визначається лише змінами рухливості електронів при одновісних тисках вздовж кристалографічних напрямків [100] та [111], оскільки глибокі рівні радіаційних дефектів, що відповідають комплексам  $VO_i$  та  $VO_iP$ , будуть повністю іонізованими, а іонізація глибокого рівня  $E_v + 0,35$  eV комплексу  $C_iO_i$  при деформації не буде проявлятися. Залежність величини тензоопору n-Si в області насичення від потоку електронного опромінення при одновісному тискові вздовж кристалографічного напрямку [100] обумовлена деформаційно-індукованою анізотропією розсіяння електронів на утворених радіаційних дефектах. Вперше одержане при кімнатній температурі зростання величини тензоопору монокристалів n-Si за рахунок їх опромінення потоками електронів  $\Phi \geq 1 \cdot 10^{17}$  ел./см<sup>2</sup> з енергією 12 MeV відносно неопромінених монокристалів кремнію, легованих донорними домішками з різною концентрацією, може знайти своє практичне використання для конструювання на основі опромінених монокристалів n-Si тензочутливих елементів для сенсорів високого одновісного тиску.

10. На основі вимірювань електропровідності та ефекту Холла для опромінених електронами з енергією 12 MeV та потоком  $\Phi=1 \cdot 10^{17}$  ел./см<sup>2</sup> монокристалів n-Si, які були покриті шаром епоксидної смоли без наповнювачів та з наповнювачами порошоків заліза та алюмінію масовими частками 30 мас. ч. на 100 мас. ч. епоксидної смоли, було встановлено, що найбільшу радіаційну стійкість мають монокристали кремнію з епоксидним покриттям, що містить наповнювач порошку заліза. Одержані результати можуть бути використанні при конструюванні на основі таких монокристалів кремнію радіаційно-стійких елементів електронної техніки.

**НАУКОВІ ПРАЦІ, В ЯКИХ ОПУБЛІКОВАНІ  
ОСНОВНІ РЕЗУЛЬТАТИ ДИСЕРТАЦІЇ**

*Статті наукових періодичних видань, які індексовано в наукометричних  
базах даних Scopus та Web of Science Core Collection*

1. Параметри високоенергетичного  $\Delta_1$ -мінімуму зони провідності n-Ge / **С. В. Луцьов**, П. Ф. Назарчук, О. В. Бурбан. *Журнал фізичних досліджень*. 2013. Т. 17, №3. С. 3702.
2. Константи електрон-фононої взаємодії для оптичних та міждолинних фононів в n-Ge / **С. В. Луцьов**, О. В. Бурбан. *Журнал нано- та електронної фізики*. 2014. Т. 6, №1. С. 01020.
3. Вплив інверсії типу ( $L_1-\Delta_1$ ) абсолютного мінімуму на енергію іонізації основного стану мілких донорів в монокристалах n-Ge / **С.В. Луцьов**. *Східно-Європейський журнал передових технологій*. 2014. № 5. С. 18–21.
4. Calculation of the Electron Mobility for the  $\Delta_1$ -Model of the Conduction Band of Germanium Single Crystals / **S. V. Luniov**, P. F. Nazarchuk, O. V. Burban. *Semiconductors*. 2014. Vol. 48, №4. P. 438–441.
5. Розрахунок енергії іонізації основного стану мілких донорів у  $\Delta_1$ -моделі зони провідності монокристалів n-Ge / **С. В. Луцьов**, О. В. Бурбан, П. Ф. Назарчук. *УФЖ*. 2015. Т. 60, №10. С. 1022–1026.
6. Розсіювання електронів для одновісно деформованих монокристалів n-Ge / **С. В. Луцьов**. *Журнал нано- та електронної фізики*. 2015. Т. 7, №3. С. 03029.
7. Electron scattering in the  $\Delta_1$ -model of the conduction band of germanium crystals / **S. V. Luniov**, O. V. Burban, P. F. Nazarchuk. *Semiconductors*. 2015. Vol. 49, №5. P. 574–578.
8. Вплив радіаційних дефектів на механізми розсіювання електронів в монокристалах n-Ge / **С. В. Луцьов**, А.І. Зіміч, П.Ф. Назарчук, В. Т. Маслюк, І. Г. Мегела. *Журнал фізичних досліджень*. 2015. Т. 19, №4. С. 4704.
9. Визначення параметрів радіаційних дефектів в опромінених високоенергетичними електронами монокристалах n-Ge / **С. В. Луцьов**, А. І. Зіміч, П. Ф. Назарчук, В. Т. Маслюк, Мегела, І. Г. *Ядерна фізика та енергетика*. 2016. Т. 17, № 1. Р. 47-52.
10. Specific features of electron scattering in uniaxially deformed n-Ge single crystals in the presence of radiation defects. **S.V. Luniov**, A.I. Zimych, P.F. Nazarchuk, V. T. Maslyuk, I. G. Megela. *Radiation Effects and Defects in Solids*. 2016. Vol. 171, Issue 11–12. P. 855–868.
11. A Method for the Determination of Shear Moduli for n-Ge and n-Si Single Crystals / V. I. Shvab'yuk, A. V. Matkova, **S. V. Lun'ov**, V. V. Shvab'yuk. *Materials Science*. 2017. Vol. 53, № 2. P. 257–263.
12. Визначення енергії активації А-центра в одновісно деформованих монокристалах n-Ge / **С. В. Луцьов**, А. І. Зіміч, П. Ф. Назарчук, С. А. Мороз, Л. М. Поліщук, В. Т. Маслюк, І. Г. Мегела. *Ядерна фізика та енергетика*. 2017. Т. 18, № 1. С. 48–55.

13. Specific features of defect formation in the nSi single crystals at electron irradiation / **S. Luniov**, A. Zimych, M. Khvyshchun, M. Yevsiuk, V. Maslyuk. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*. 2018. Vol. 6, № 12(96). P. 35–42.

14. Вплив власної провідності на механізми тензоопору одновісно деформованих монокристалів n-Ge / **С. В. Луцьов**. *Журнал фізичних досліджень*. 2019. Т. 23, No. 3. С. 3701.

15. Calculation of Electron Mobility for the Strained Germanium Nanofilm / **S.V.Luniov**. *Journal of Nano-and Electronic Physics*. 2019. Vol. 11, №. 2. P. 02023.

16. Mechanisms of electron scattering in uniaxially deformed silicon single crystals with radiation defects. **S. V. Luniov**, V. V. Lyshuk, V. T. Maslyuk, O. V. Burban. *Latvian Journal of Physics and Technical Sciences*. 2019. V. 56(5). P. 45–57.

17. The impact of internal mechanical strains on the electrical properties of germanium nanofilm / **S.V. Luniov**, Yu. A. Udovyt'ska, Yu.V. Koval, O.V. Burban. // IEEE 9th International Conference on Nanomaterials: Applications & Properties (NAP -2019), September 15-20. Odesa, 2019. P. 02TM02.

18. Features of Radiation-Defect Annealing in n-Ge Single Crystals Irradiated with High-Energy Electrons / **S. V. Luniov**, A. I. Zimych, M. V. Khvyshchun, V. T. Maslyuk, I. G. Megela. *Ukrainian Journal of Physics*. 2019. 64(2). P. 151.

19. Mechanisms of electron scattering in uniaxially deformed n-Ge (Sb, Au) single crystals. **S.V. Luniov**, P.F. Nazarchuk, A.I. Zimych, Y. A. Udovyt'ska. *Condensed Matter Physics*. 2019. V. 22, No. 1. P. 13702.

20. The Impact of Radiation Defects on a Photosensitivity of Silicon Single Crystals / **S. V.Luniov**, M. V. Khvyshchun, V. T. Maslyuk // IEEE 11th International Scientific and Practical Conference on Electronics and Information Technologies (ELIT), September 16–18. Lviv, 2019. P. 295–298.

21. The impact of heat treatment on the magnetic sensitivity of irradiated by electrons single crystals n-Ge. **S. V. Luniov**, A. I. Zimych M. V. Khvyshchun, V. T. Maslyuk, I. G. Megela. *Funct. Mater.* 2019. V.26 (1). P. 41–47.

22. Calculation of band structure of the strained germanium nanofilm, doped with a donor impurity / **S. V. Luniov**. *Physica E: Low-dimensional Systems and Nanostructures*. 2020. C. 113954.

23. Electrical Properties of Doped Germanium Nanofilms / **S. Luniov**, O. Burban, Y. Koval // IEEE 10th International Conference Nanomaterials: Applications & Properties (NAP-2020), 9-13 November. Sumy, 2020. P. 02TM03-1.

24. Electrical properties of strained germanium nanofilm / **S. V. Luniov**, P. F. Nazarchuk, O. V. Burban. *Physics and Chemistry of Solid State*. 2021. V. 22(2). P. 313–320.

25. Effect of Epoxy Composite Coatings on Radiation Stability and Magnetic Sensitivity of n-Si Single Crystals. Y. A. Udovyt'ska, **S. V. Luniov**, V.P. Kashytskyi, V.T Maslyuk. *Surface Engineering and Applied Electrochemistry*. 2021. V. 57(2). P. 222–227.

26. Tenselectrical properties of electron-irradiated n-Si single crystals / **Sergiy Luniov**, Petro Nazarchuka, Volodymyr Maslyuk. *East. Eur. J. Phys.* 2021. V. 3. P. 37–42.

27. Influence of Electron Irradiation and Annealing on the IR Absorption of Germanium Single Crystals / **S. V. Luniov**, M. V. Khvyshchun, A. I. Tsyz, V. T. Maslyuk // IEEE 12th International Conference on Electronics and Information Technologies (ELIT), May 19 – 21. Lviv, 2021. P. 18–22.

**Статті у наукових фахових періодичних виданнях України та інших держав із напрямку, з якого підготовлено дисертацію**

28. Вплив інверсії ( $L_1$ - $\Delta_1$ )-типу абсолютного мінімуму n-Ge на ефект екранування / **С. В. Луцьов**, П. Ф. Назарчук, О. В. Бурбан. *Сенсорна електроніка і мікросистемні технології*. 2012. Т. 3, №2. С. 69–74.

29. Тензочутливість у  $\Delta_1$ -моделі зони провідності кристалів германія / **С. В. Луцьов**. *Сенсорна електроніка і мікросистемні технології*. 2013. Т. 10, №3. С. 76–81.

30. Методика вимірювання електричних властивостей монокристалів n-Ge при високих одновісних тисках / **С. В. Луцьов**, П. Ф. Назарчук, О. В. Бурбан, В. А. Лопухович. *Вісник ТНТУ*. 2014. №3. С. 172–179.

31. Ефективна маса густини станів електронів  $\Delta_1$ -мінімуму зони провідності кристалів германію / **С. В. Луцьов**. *Фізика и техника высоких давлений*. 2014. Т. 24, № 1. С. 48–53.

32. Deformation potentials for  $\Delta_1$ -minimum of conduction band of single crystals n-Ge / **Luniov Sergiy**, Burban Olexandr, Nazarchuk Petro. *Journal of Advances in Physics*. 2014. Vol. 5, №1. P. 705–711.

33. Influence of electron-phonon interaction on piezoresistance of single crystals n-Ge / **Luniov Sergiy**, Burban Olexandr, Nazarchuk Petro, Zimych Andriy. *Zimych. Journal of Advances in Physics*. 2015. Vol. 7, №3. P. 1931–1938.

34. Вплив електронного опромінення на тензоопір монокристалів n-Ge. **С.В. Луцьов**, А.І. Зіміч, М.В. Хвищун, В. Т. Маслюк, І. Г. Мегела. *Сенсорна електроніка і мікросистемні технології*. 2017. Т. 14. №1. С. 58–65.

35. Вплив електронного опромінення на магнітну чутливість монокристалів n-Si. **С. В. Луцьов**, А. І. Зіміч, В. Т. Маслюк, І. Г. Мегела. *Сенсорна електроніка і мікросистемні технології*. 2019. V. 16(1). P. 68–76.

36. Розробка захисних покриттів на основі епоксикомпозитних матеріалів для монокристалів германію від впливу магнітного поля та радіації. Ю. А. Удовицька, **С. В. Луцьов**, В. П. Кашицький, В. Т. Маслюк, І. Г. Мегела. *Сенсорна електроніка і мікросистемні технології*. 2019. V. 16(4). P. 53–65.

37. The impact of electron irradiation on the electrical properties of n-Ge single crystals. **S.V. Luniov**, A.I. Zimych, P. F. Nazarchuk, V.T. Maslyuk, O.V. Burban. *SCIREA Journal of Physics*. 2019. V. 4, No. 1. P. 1–7.

**Монографії**

38. The impact of uniaxial deformation and irradiation on the electrical properties of single crystals n-Ge / **S.V. Luniov**, A.I. Zimych, V.T. Maslyuk, M. V. Khvyshchun, Yu. A. Herasymiuk. Austria, Vienna: “East West” Association for Advanced Studies and Higher Education GmbH, 2017. 136 p.

39. Електричні властивості монокристалів германію в умовах деформаційної перебудови зонної структури: монографія / **С.В. Луньов**, В.М. Єрмаков, П.Ф. Назарчук, Ю.А. Удовицька. Луцьк: Інформаційно-видавничий відділ Луцького НТУ, 2018. 208 с.

*Наукові праці апробаційного характеру*

40. Патент України на корисну модель 118459. Спосіб отримання магніточутливого мікросенсора / **С.В. Луньов**, А.І. Зіміч, М.В. Хвищун, В.Т. Маслюк; заявник і патентовласник: Луцький національний технічний університет. – № у 201701816; заявл. 27.02.17; опубл. 10.08.17, Бюл. №15.

41. Патент України на корисну модель 126364. Спосіб виготовлення давача тиску / **С.В. Луньов**, О.В. Бурбан, А.І. Зіміч, Ю.А. Удовицька; заявник і патентовласник: Луцький національний технічний університет.– № у 201801895; заявл. 23.02.18; опубл. 11.06.18, Бюл. № 11.

42. Патент України на корисну модель 134928. Спосіб одержання багатофункціонального сенсора / **С.В. Луньов**, А.І. Зіміч, В.Т. Маслюк; заявник і патентовласник: С.В. Луньов, А.І. Зіміч, В.Т. Маслюк. –№ у201900038; заявл. 02.01.19; опубл. 10.06.19, Бюл. № 11.

43. Патент України на корисну модель 137899. Спосіб одержання чутливого елемента для тридіапазонного фотоприймача інфрачервоного випромінювання / **С.В. Луньов**, М.В. Хвищун, В.Т. Маслюк; заявник і патентовласник: Луцький національний технічний університет. – № у201904223; заявл. 19.04.19; опубл. 11.11.19, Бюл. № 21.

44. Вплив деформаційної перебудови зонної структури кристалів n-Ge на ефект екранування / О. В. Бурбан, **С. В. Луньов** // Конференція молодих вчених з фізики напівпровідників «Лашкарьовські читання-2012»: матеріали наук. конф. Україна м. Київ 3 – 5 квітня 2012 р. К. 2012. С. 151–152.

45. Рухливість носіїв заряду в  $\Delta_1$ -моделі зони провідності кристалів n-Ge / **С. В. Луньов**, О. В. Бурбан, П. Ф. Назарчук, Л. І. Панасюк // I Міжнародна науково-практична конференція «Актуальні проблеми прикладної фізики» АППФ: матеріали I Міжнар. наук. конф., Україна м Севастополь 24 – 28 вересня 2012 р. Севастополь, 2012. С. 114–115.

46. Parameters of high – energy  $\Delta_1$ -minimum conduction band of n-Ge / **S. V. Luniov**, P. F. Nazarchuk, O. V. Burban // Proceeding of the XVIIIth International Seminar on Physics and Chemistry of Solids, September 12–15. Lviv, 2012. P. 12.

47. Деформаційні потенціали  $\Delta_1$ -мінімуму зони провідності кристалів n-Ge / **С. В. Луньов**, П. Ф. Назарчук, О. В. Бурбан // VI Міжнародна наукова конференція «Релаксаційні, нелінійні й акустооптичні процеси та матеріали» РНАОПМ'2012: матеріали VI Міжнар. наук. конф., Україна м. Луцьк – Шацькі озера 25-29 травня 2012 р. Луцьк: ВНУ ім. Лесі Українки, 2012. С. 42–45.

48. Вплив інверсії ( $L_1$ - $\Delta_1$ )-типу абсолютного мінімуму на тензочутливість кристалів германія / **С. В. Луньов**, О. В. Бурбан, П. Ф. Назарчук // Всеукраїнська наукова конференція «Актуальні проблеми теоретичної, експериментальної та прикладної фізики» АПТЕПФ–2012: матеріали Всеукр. наук. конф., Україна м. Тернопіль, 20 – 22 вересня 2012 р. Тернопіль: ТНТУ, 2012. С. 106–107.

49. Анізотропія розсіяння носіїв заряду для  $L_1$ - та  $\Delta_1$ -мінімумів зони провідності кристалів германія / О. В. Бурбан, **С. В. Луцьов** // Міжнародна наукова конференція студентів і молодих науковців з теоретичної та експериментальної фізики «Еврика–2012»: зб. тез. Україна м. Львів, 19–22 квітня 2012 р. Львів: ЛНУ ім. Івана Франка, 2012. С. 44.

50. Розсіяння носіїв заряду в умовах інверсії типу  $L_1$ - $\Delta_1$  абсолютного мінімуму кристалів n-Ge / О. В. Бурбан, **С. В. Луцьов**, Л. А. Косинець. Конференція молодих вчених з фізики напівпровідників «Лашкарівські читання-2013»: матеріали наук. конф. Україна м. Київ, 2 – 4 квітня 2013 року. К. 2013. С. 149–150.

51. Міждолинне розсіяння електронів в  $\Delta_1$ -моделі зони провідності монокристалів n-Ge / О. В. Бурбан, **С. В. Луцьов**, П. Ф. Назарчук, Л. А. Косинець // VI Українська наукова конференція з фізики напівпровідників УНКФН-6: зб. тез. Україна м. Чернівці 30 вересня – 4 жовтня 2013 р. Чернівці: ЧНУ, 2013. С. 257–258.

52. Вплив ефекту екранування на п'єзоопір монокристалів n-Ge / О. В. Бурбан, **С. В. Луцьов**, П. Ф. Назарчук // VI Українська наукова конференція з фізики напівпровідників УНКФН-6: зб. тез. Україна м. Чернівці 30 вересня – 4 жовтня 2013 р. Чернівці : ЧНУ, 2013. С. 255–256.

53. Особливості електрон-фононої взаємодії в n-Ge / **С. В. Луцьов**, П. Ф. Назарчук, О. В. Бурбан, Ю. А. Герасимюк // VII Міжнародна наукова конференція «Релаксаційні, нелінійні й акустооптичні процеси та матеріали» РНАОПМ'2014: матеріали VI Міжнар. наук. конф., Україна м. Луцьк – Шацькі озера, 8–12 червня 2014 року. Луцьк: РВВ «Вежа» Східноєвропейського національного університету ім. Лесі Українки, 2014. С. 178–182.

54. Особливості електрон-фононої взаємодії для одновісно деформованих монокристалів n-Ge / О. В. Бурбан, **С. В. Луцьов** // Конференція молодих вчених з фізики напівпровідників «Лашкарівські читання-2014»: матеріали наук. конф. Україна м. Київ 2-4 квітня 2014. К.: Едельвейс, 2014. С. 119–121.

55. Effect of phonon scattering of electrons by piezoresistance of single-crystals n-Ge / **S. V. Luniov**, O. V. Burban, P. F. Nazarchuk, A. V. Zimych // XI International Scientific Conference «Electronics and Applied Physics»: Book of Abstracts 11th Inter. Conf. Ukraine Kyiv, October 21-24, 2014. Kyiv, 2014. P. 84–85.

56. The impact of radiation defects on the mechanisms of electron scattering in single crystals n-Ge / **S.V. Luniov**, A.I. Zimych, P.F. Nazarchuk, V. T. Maslyuk, I. G. Megela // The XXth International Seminar on Physics and Chemistry of Solids, September 13-16, 2015, Lviv, 2015. P. 30.

57. The influence of heat treatment on the sensitivity of the irradiated single crystals n-Ge to the magnetic field / **S.V. Luniov**, A.I. Zimych, M. V. Khvyshchun, V.T. Maslyuk, I.G. Megela // Proceedings of the XII International Conference «Electronics and Applied Physics» (APHYS 2016), October 19-22, 2016, Kyiv, Ukraine, 2016. P. 121.

58. Тензодатчики на основі опромінених електронами високих енергій монокристалів n-Ge / **С.В. Луцьов**, А.І. Зіміч, Ю.А. Герасимюк, В.Т. Маслюк, І.Г. Мегела // Тези доп. 7-ї Міжнародної науково-технічної конференції «Сенсорна електроніка та мікросистемні технології» (СЕМСТ – 7), 30 травня – 3 червня 2016 р., Україна, м. Одеса, 2016 р. С.139.

59. Вплив одновісної деформації на електричні властивості монокристалів германію опромінених високоенергетичними електронами / **С.В. Луньов**, А.І. Зіміч, П.Ф. Назарчук, В.Т. Маслюк, І.Г. Мегела // Тези доп. конф. молодих вчених з фізики напівпровідників “Лашкарьовські читання” з міжнародною участю, Київ, 6-8 квітня 2016 р. Інститут фізики напівпровідників імені В.Є. Лашкарьова 2016 р. С. 91–92.

60. Розсіяння електронів в одновісно деформованих монокристалах n-Ge при наявності радіаційних дефектів / **С.В. Луньов**, А.І. Зіміч, П.Ф. Назарчук, В.Т. Маслюк, І.Г. Мегела // Тези доповідей 7-мої Української наукової конференції з фізики напівпровідників (УНКФН-7) (з міжнародною участю), 26-30 вересня 2016 р., Україна, м. Дніпро, 2016 р. С. 76–77.

61. Ідентифікація природи радіаційних дефектів в монокристалах n-Ge на основі вимірювань тензо-холл-ефекту / **С. В. Луньов**, А. І. Зіміч, Ю. А. Герасимюк // Тези доповідей Міжнародної конференції молодих вчених та аспірантів “ІЕФ’2017”, м. Ужгород, 23-26 травня 2017. С. 44–45.

62. Ізотермічний відпал радіаційних дефектів в опромінених електронами монокристалах n-Ge / **С.В. Луньов**, А. І. Зіміч, Ю. А. Герасимюк. // Лашкарьовські читання: зб. тез доп. конф. молодих вчених з фізики напівпровідників з міжнародною участю, Інститут фізики напівпровідників імені В.Є. Лашкарьова НАН України, м. Київ, 5 – 7 квітня 2017 року. К., 2017. С. 45–46.

63. Моделі відпалу радіаційних дефектів в опромінених електронами монокристалах n-Ge / **С.В. Луньов**, А. І. Зіміч, В. Т. Маслюк, І. Г. Мегела // XXIV щорічна наукова конференція Інституту ядерних досліджень НАН України: тези доповідей, Україна м. Київ, 10-13 квітня 2017 року. К., 2017. С. 148–149.

64. Определение параметров отжига радиационных дефектов в монокристаллах n-Ge облученных быстрыми электронами / **С. В. Лунев**, А. И. Зимич, Н. В. Хвыщун, В. Т. Маслюк, И. Г. Мегела // 12-й Международная конференция «Взаимодействие излучений с твердым телом» (ВИТТ-2017), Минск, Беларусь, 19-22 сент. 2017 г. / редкол.: В.В. Углов (отв.ред.) [и др.]. Минск: Изд. центр БГУ, 2017. С. 164–166.

65. Вплив одновісного тиску на механізми розсіяння електронів в монокристалах германію, легованих домішками сурми та золота / **С.В. Луньов**, А.І. Зіміч, П.Ф. Назарчук // Тези доповідей VIII Української наукової конференції з фізики напівпровідників (УНКФН -8), Україна, Ужгород, 2-4 жовтня 2018 р. С. 58–59.

66. Вплив високопровідних включень на електричні властивості опромінених електронами монокристалів германію / **С.В. Луньов**, А.І. Зіміч, В.Т. Маслюк, І.Г. Мегела // Тези доповідей XXV щорічної наукової конференції Інституту ядерних досліджень НАН України, м. Київ, 16-20 квітня 2018 року, 2018. С. 132–133.

67. Одержання магніточутливого елемента на основі опромінених електронами монокристалів n-Si / **С. В. Луньов**, А. І. Зіміч, В. Т. Маслюк, І.Г. Мегела, Ю.А.Удовицька // Тези доповідей 8-ої Міжнародної науково-технічної конференції "Сенсорна електроніка та мікросистемні технології" (СЕМСТ-8), Україна, Одеса, 28 травня – 1 червня 2018 р., 2018. С. 180.

68. Електричні властивості напружених наноплівки германію / **С.В. Луньов**, А.І. Цизь, І.В. Бабула // Фізика і хімія твердого тіла. Стан, досягнення і перспективи: Матеріали VI Всеукраїнської науково-практичної конференції молодих вчених та студентів, 16-17 жовтня 2020 р. Луцьк: ІВВ Луцького НТУ. 2020. С. 110-112.

69. Оцінка екрануючої властивості шару епоксикомпозиту від потоку електронного опромінення / **С.В. Луньов**, М.В. Хвищун, А.І. Цизь // Актуальні проблеми фундаментальних наук: матеріали IV Міжнар. Наук. конф., 1-5 червня 2021 р., Луцьк: Вежа-друк, 2021. С. 124–127.

### АНОТАЦІЯ

**Луньов С.В. Вплив дефектної структури на електричні та тензоелектричні властивості монокристалів n-Ge та n-Si та плівкових наноструктур на їх основі.**

*Дисертація на здобуття наукового ступеня доктора фізико-математичних наук за спеціальністю 01.04.10 – фізика напівпровідників і діелектриків. – Ужгородський національний університет, Міністерство освіти і науки України, Ужгород, 2022.*

Дисертація присвячена вивченню закономірностей впливу деформаційних, радіаційних, температурних полів та легування різними домішками на механізми тензоефектів, електропровідності та розсіяння носіїв струму в монокристалах n-Ge, n-Si та наноплівках германію.

На основі проведених вимірювань тензоопору одновісно деформованих вздовж кристалографічного напрямку [100] монокристалів n-Ge, теорій деформаційного потенціалу та анізотропного розсіяння було знайдено константи деформаційного потенціалу та ефективні маси для  $\Delta_1$ -мінімуму зони провідності германію. Використання даних параметрів дозволило провести розрахунки енергії іонізації мілких донорів Sb, As та P, зв'язаних з  $\Delta_1$ -долинами, питомого опору, коефіцієнта Холла та рухливості електронів при сильних одновісних тисках.

Проведено розрахунки величин відносних деформацій, зонної структури та електричних властивостей для нелегованої та легованої донорною домішкою наноплівки германію, вирощеної на підкладці  $\text{Ge}_{(x)}\text{Si}_{(1-x)}$  (001) в залежності від її компонентного складу. Встановлено, що на електричні властивості такої наноплівки товщиною  $d < 7$  нм суттєво впливають квантово-розмірні ефекти.

Досліджено механізми дефектоутворення та ідентифіковано природу радіаційних дефектів в монокристалах n-Ge<Sb> та n-Si<P>, опромінених високоенергетичними електронами. Запропоновано теоретичну модель відпалу точкових та складних дефектів в опромінених електронами монокристалах n-Ge<Sb>.

Проведено дослідження механізмів електропровідності та розсіяння носіїв струму в недеформованих та одновісно деформованих монокристалах n-Ge та n-Si з технологічними та радіаційними дефектами, що створюють в забороненій зоні германію та кремнію глибокі енергетичні рівні. Встановлено, що ціленаправлений

вплив електронного опромінення та термовідпалу дозволяє підвищити тензо-, фото-, термічну та магнітну чутливість монокристалів n-Ge та n-Si.

**Ключові слова:** тензоопір, міждолинне розсіяння, напружена наноплівка германію, квантово-розмірні ефекти, радіаційні дефекти, холівська рухливість, ізотермічний відпал, крупномасштабний потенціал.

## АННОТАЦІЯ

**Лунёв С.В. Воздействие дефектной структуры на электрические и тензоэлектрические свойства монокристаллов n-Ge и n-Si и пленочных наноструктур на их основе.**

*Диссертация на соискание ученой степени доктора физико-математических наук по специальности 01.04.10 – физика полупроводников и диэлектриков. – Ужгородский национальный университет, Министерство образования и науки Украины, Ужгород, 2022.*

Диссертация посвящена изучению закономерностей воздействия деформационных, радиационных, температурных полей и легирования разными примесями на механизмы тензоэффектов, электропроводности и рассеяния носителей тока в монокристаллах n-Ge, n-Si и нанопленках германия.

На основе проведенных измерений тензосопротивления одноосно деформированных вдоль кристаллографического направления [100] монокристаллов n-Ge, теорий деформационного потенциала и анизотропного рассеяния были найдены константы деформационного потенциала и эффективные массы для  $\Delta_1$ -минимума зоны проводимости германия. Использование данных параметров позволило произвести расчет энергии ионизации мелких доноров Sb, As и P, связанных с  $\Delta_1$ -долинами, удельного сопротивления, коэффициента Холла и подвижности электронов при сильных одноосных давлениях.

Проведены расчеты относительных деформаций, зонной структуры и электрических свойств для нелегированной и легированной донорной примесью нанопленки германия, выращенной на подложке  $\text{Ge}_{(x)}\text{Si}_{(1-x)}$  (001) в зависимости от ее компонентного состава. Установлено, что на электрические свойства такой нанопленки толщиной  $d < 7$  нм оказывают существенное влияние квантово-размерные эффекты.

Исследованы механизмы дефектообразования и идентифицирована природа радиационных дефектов в монокристаллах n-Ge<Sb> и n-Si<P>, облученных высокоэнергетическими электронами. Предложена теоретическая модель отжига точечных и сложных дефектов в облученных электронами монокристаллах n-Ge<Sb>.

Проведены исследования механизмов электропроводности и рассеяния носителей тока в недеформированных и одноосно деформированных монокристаллах n-Ge и n-Si с технологическими и радиационными дефектами, что создают в запретной зоне германия и кремния глубокие энергетические уровни. Установлено, что целенаправленное влияние электронного облучения и термоотжига позволяет повысить тензо-, фото-, термическую и магнитную чувствительность монокристаллов n-Ge и n-Si.

**Ключевые слова:** тензопротивление, междолинное рассеяние, напряженная нанопленка германия, квантово-размерные эффекты, радиационные дефекты, холловская подвижность, изотермический отжиг, крупномасштабный потенциал.

## SUMMARY

**Luniov S.V. Influence of defective structure on the electrical and tensoelectrical properties of n-Ge and n-Si single crystals and film nanostructures based on them.**

*The thesis for obtaining a scientific degree of the Doctor of Physical and Mathematical Sciences by the major in 01.04.10 – Semiconductor and Dielectric Physics. – Uzhhorod National University, Ministry of Education and Science of Ukraine, Uzhhorod, 2022.*

The thesis is devoted to studying the regularities of influence of deformation, radiation, temperature fields and doping by the various impurities on the mechanisms of tensoeffects, electrical conductivity and scattering of current carriers in the n-Ge and n-Si single crystals and germanium nanofilms.

Deformation potential constants and effective masses for  $\Delta_1$ -minimum of the germanium conduction band were found based on tensorresistance measurements of uniaxially deformed n-Ge single crystals along the crystallographic direction [100], theories of deformational potential and anisotropic scattering. Using these parameters allowed us to calculate the resistivity, Hall coefficient, mobility, electron concentration at high uniaxial pressures and ionization energy of shallow donors Sb, As and P associated with the  $\Delta_1$  - valleys.

Experimental and theoretical studies of the tensoelectrical properties of strongly deformed n-Ge single crystals revealed that the magnitude of resistivity and electron mobility for these single crystals at uniaxial pressures  $P > 1.5$  GPa along the crystallographic direction [100] will be largely determined by the mechanisms of electron scattering on optical phonons responsible for nonequivalent intervalley scattering between the  $L_1$ - and  $\Delta_1$ -minima of the germanium conduction band. Equivalent intervalley electron scattering in the  $\Delta_1$ -model of germanium is essential for the cases of hydrostatic pressure  $P \approx 6$  GPa and uniaxial pressure  $P \approx 8$  GPa along the crystallographic direction [110]. Tensorresistance of the uniaxially deformed n-Ge single crystals along the crystallographic direction [100] at temperatures above room temperature will depend on the mechanisms of intrinsic conductivity.

The values of relative deformations and band structure for undoped and doped by the donor impurity of germanium nanofilm grown on the  $\text{Ge}_{(x)}\text{Si}_{(1-x)}$  (001) substrate, depending on its component composition were calculated. It is established that increasing the Si content in the substrate leads to inversion of the type ( $L_1$ - $\Delta_1$ ) of the absolute minimum of the conduction band of the nanofilm. Due to such deforming reconstruction of the band structure of germanium nanofilms, the ionization energy of the doping donor impurity increases, which is explained by the increasing the effective mass of electron and interaction of the impurity energy level with the valence band.

Dependences of electrical properties for strained germanium nanofilms grown on the Si,  $\text{Ge}_{(0,64)}\text{Si}_{(0,36)}$  and  $\text{Ge}_{(0,9)}\text{Si}_{(0,1)}$  substrates with crystallographic orientation (001), on their thickness, degree of doping by the shallow and deep donor impurities were

calculated. It was established that the electrical properties of such nanofilms are determined by the peculiarities of their band structure and quantum-dimensional effects, which are effectively manifested for germanium nanofilms with the thickness of  $d < 7$  nm. Increasing the temperature and the degree of doping by the donor impurities reduces the role of dimensional quantization effects.

The mechanisms of defect formation in n-Ge <Sb> and n-Si<P> single crystals, irradiated by the high-energy electrons, were conducted. Investigations of infrared Fourier spectroscopy and the Hall effect allowed us to identify the nature of the created radiation defects and determine their energy spectrum. It was established that irradiation of the n-Ge<Sb> single crystals by the electrons with an energy of 10 MeV leads to the creation of  $VO_iI_{2Ge}$  complexes and regions of disordering in these single crystals. Additional isothermal annealing of these single crystals at  $T=403$  K and  $T=393$  K contributed to the accumulation of  $VO_iI_{2Ge}$  complexes in their volume. According to the proposed annealing model and theoretical calculations, this effect is explained by the dominant role of the generation processes of  $VO_iI_{2Ge}$  complexes due to the annealing of the nuclei of the regions of disordering with less activation energy over the annealing processes of these complexes. Irradiation of n-Si> single crystals by the electrons with an energy of 12 MeV led to the formation of known complexes of  $C_iO_i$  and  $VO_i$ , as well as new ones –  $VO_iP$ . Based on studies of the Hall effect, tenso-Hall effect and solutions of systems of equations of electroneutrality, the concentrations of such radiation defects in the electron-irradiated n-Ge<Sb> and n-Si<P> were calculated and the dependences of activation energy on the uniaxial pressure for  $VO_iI_{2Ge}$  and  $VO_iP$  complexes were obtained.

The mechanisms of electrical conductivity and scattering of current carriers in undeformed and uniaxially deformed n-Ge and n-Si single crystals with technological and radiation defects were studied. The creation of radiation defects with deep energy levels in n-Ge and n-Si under the electron irradiation or additional doping of n-Ge single crystals by the deep impurity of gold leads to a large scale potential, the amplitude of which will decrease with increasing temperature or uniaxial pressure. A decrease of the amplitude of this potential is the main reason for the increase of the Hall mobility of electrons in n-Ge and n-Si.

The change of the activation energy  $E_v + 0,27$  eV of the A-center level in electron-irradiated n-Ge single crystals under the uniaxial deformation will affect the change in the ratio between the concentrations of electrons and holes and, accordingly, the tensoresistance of n-Ge. The created radiation defects under the electron radiation in n-Si<P> belonging to the  $VO_i$  and  $VO_iP$  complexes will be completely ionized at room temperature, and the energy level of  $E_v + 0,35$  eV of the  $C_iO_i$  complex will be deionized. Therefore, the tensoresistance of these single crystals will be determined only by changes in electron mobility. The targeted impact of the electron irradiation and thermal annealing allows to an increase in the tenso, photo-, thermal and magnetic sensitivity of n-Ge and n-Si single crystals.

**Key words:** tensoresistance, intervalley scattering, strained germanium nanofilm, quantum-dimensional effects, radiation defects, Hall mobility, isothermal annealing, large scale potential.