

## ВІДГУК

офіційного опонента

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

Встановлення основних закономірностей та фізичних механізмів зовнішнього впливу на властивості напівпровідникових кристалів та плівкових структур є надзвичайно актуальною задачею сучасної електроніки. Подібні дослідження дозволяють розробити нові методи цілеспрямованого формування внутрішньої структури матеріалів та реалізувати наявність в них різноманітних корисних з точки зору практичного застосування властивостей. Актуальність дисертаційної роботи С.В. Луньова, з одного боку, визначається тим, що об'єктом досліджень були кристали та структури які або надзвичайно широко використовуються у сучасній технології (кремній, германій), або вважаються надзвичайно перспективними системами для практичного застосування (напружені плівки германію, нанесені на підкладці  $\text{Ge}_x\text{Si}_{1-x}$ ). З іншого боку, переважна частина роботи присвячена вивченню явищ, причиною яких є механічне навантаження, радіаційний вплив чи комбінація вказаних факторів. Багаточисленні попередні дослідження інших авторів продемонстрували ефективність використання напруженого стану та електронного опромінення як інструментів модифікації зонної структури напівпровідникових кристалів та інженерії дефектів відповідно. Проте питання щодо закономірностей та механізмів саме тензоелектричних ефектів та особливостей тензоіндукованих процесів у підсистемі радіаційних дефектів залишалися багато в чому відкритими. Зокрема це стосується вирізнення переважаючих механізмів розсіяння електронів у деформованій внаслідок статичного навантаження чи радіаційного дефектоутворення кристалічній ґратці та опису процесів перебудови локальних енергетичних рівнів під час пружної деформації: відповідні ефекти вперше детально досліджені у представленій роботі. Таким чином, тема дисертаційної роботи С.В. Луньова є вельми актуальною як з наукової, так і з практичної точок зору.

Принадно зауважу, що про актуальність проведених досліджень також свідчить їхня узгодженість із планами науково-дослідних робіт, які проводились як безпосередньо у Луцькому національному технічному університеті, так і у рамках спільних науково-технічних тем з Інститутом електронної фізики НАН України та ДП КБ «Південне» ім. М.К. Янгеля.

Основними науковими задачами проведеного дослідження були:

- 1) встановлення основних механізмів розсіяння носіїв заряду в монокристалах германію та кремнію з електронним типом провідності залежно від ступеню та напрямку одновісної деформації, дози опромінення високоенергетичними електронами, наявності глибоких донорних домішок та побудова відповідних моделей рухливості електронів;
- 2) визначення констант деформаційного потенціалу, компонент тензору ефективної маси та енергій іонізацій низки мілких донорів, зв'язаних з  $\Delta_1$ -мінімумом зони провідності германію;
- 3) розрахунок зонної структури та електричних властивостей механічно напружених плівок германію, вирощених на кремній-германієвій підкладці, а також іонізаційних властивостей невластних дефектів донорного типу у подібних системах;
- 4) з'ясування особливостей радіаційного дефектоутворення у монокристалах n-Ge та n-Si при опроміненні електронами з енергією близько 10 MeV та механізмів перебудови дефектної підсистеми під час наступних відпалів при температурах 390-450 K;
- 5) визначення оптимальних режимів радіаційної та термічної обробок монокристалів кремнію та германію з метою підвищення чутливості їхніх електричних властивостей до температури, магнітних та механічних полів.

Всі зазначені задачі об'єднані спільною метою пошуку вирішення наукової проблеми, яка полягає у встановленні загальних закономірностей та фізичних механізмів тензоефектів та електропровідності в монокристалах n-Ge та n-Si і наноплівках германію з дефектами різної природи.

Сама дисертаційна робота є цілісною науковою працею, в якій відповідні розділи логічно та послідовно зв'язані між собою та спрямовані на вирішенні визначеної автором мети. Зокрема, дисертація містить п'ять розділів основної частини. Перший розділ присвячено загальним причинам виникнення тензоелектричних ефектів у багатодолинних напівпровідниках, механізмам утворення радіаційних дефектів у монокристалах та основним типам дефектів, що утворюються при опроміненні у кремнії та германії, а також причинах їхнього впливу на тензоелектричні властивості. У другому розділі наведено результати дослідження електрофізичних властивостей монокристалів германію за умов механічного навантаження та їхнє пояснення з використанням  $L_1$ -,  $\Delta_1$ - та  $L_1$ - $\Delta_1$ -моделей зони провідності, а також представлені визначені значення ефективних мас електронів та параметрів деформаційного потенціалу для  $\Delta_1$ -мінімумів зони провідності та енергій іонізацій домішкових донорів, пов'язаних з атомами сурми, фосфору та миш'яку. Третій розділ містить розрахункові результати, що стосуються наноплівок германію, вирощених на підкладці  $\text{Ge}_x\text{Si}_{1-x}$ ; зокрема розглянуто вплив механічних напруг, які в них виникають, на зонну структуру, енергії іонізації донорів та електричні властивості. У четвертому розділі розглянуті ефекти радіаційного дефектоутворення в монокристалах n-Ge та n-Si при опроміненні електронами, особливості відпалу подібних порушень

періодичності, а також ефекти впливу одвісного навантаження на їхні енергетичні характеристики. Нарешті, п'ятий розділ надає інформацію щодо дослідження ефектів деформаційно-індукованого впливу на процеси перенесення заряду в радіаційно модифікованих кристалах кремнію та германію з електронною провідністю, а також результатів пошуку (вдалого!) оптимальних режимів використання вказаних монокристалів для реєстрації температури, магнітних та механічних полів. Окрім цього, дисертація вміщує й всі інші частини, передбачені вимогами до оформлення подібних робіт, а саме: анотації українською та англійською мовами, вступ, список використаних джерел, загальні висновки, додаток.

Основні результати, що складають предмет наукової новизни та практичної вагомості дисертаційної роботи, полягають у наступному.

1. Вперше виявлено аномальний ізотермічний відпал опромінених електронами з енергією 10 MeV монокристалів n-Ge та встановлено, що при температурах менше 410 K спостерігається збільшення концентрації А-центрів внаслідок розпаду областей розупорядкування, тоді як при вищих температурах переважаючим процесом є відпал саме А-центрів; показана можливість вказаного ефекту для реалізації циклічної інверсії провідності  $n \rightarrow p \rightarrow n$ ;

2. Експериментально визначено низку параметрів для кристалів германію, а саме компоненти тензорів ефективної маси та деформаційного потенціалу для  $\Delta_1$ -мінімуму зони провідності, що дозволило провести обчислення рухливості електронів та врахувати хімічний зсув при розрахунках енергії іонізації основного стану домішок фосфору, сурми та миш'яку в рамках  $\Delta_1$ -моделі.

3. Вперше розроблена теоретична модель рухливості електронів для недеформованих та одновісно деформованих монокристалів n-Ge та n-Si, яка, зокрема, враховує наявність глибоких рівнів та великомасштабного потенціалу; модель використана для пояснення низки експериментально виявлених тензоелектричних ефектів.

4. Проведено розрахунки зонної структури наноплівки германію, вирощеної на підкладці  $\text{Ge}_x\text{Si}_{1-x}$  з кристалографічною орієнтацією (001), які враховують величини внутрішніх механічних напружень; проведено моделювання електропровідності, концентрації та рухливості носіїв, енергії іонізації донорних домішок у вказаних плівках; виявлений ефект зростання рухливості дірок при кімнатній температурі запропоновано використати для створення високошвидкісних транзисторів.

5. Встановлено, що виявлені ефекти тензоопору для опромінених електронами монокристалів n-Ge та n-Si при одновісній деформації та кімнатній температурі можуть бути пояснені з врахуванням механо-індукованих іонізації радіаційних дефектів та змін рухливості носіїв заряду.

Достовірність отриманих у дисертації результатів визначається комплексним характером проведених досліджень та розрахунків,

зіставленням отриманих експериментальних результатів із даними теоретичного аналізу та окремими результатами інших авторів, чіткою картиною вивчених явищ і закономірностей, які добре узгоджуються із наявними теоретичними уявленнями про характер змін у структурі напівпровідників та їхніми фізичними характеристиками. Як наслідок, обґрунтованість наукових положень та висновків, сформульованих у дисертації, їх достовірність та новизна не викликають сумнівів. Результати роботи є важливими для розробки і застосування нових тензоактивних методів формування електричних властивостей монокристалів та наноплівки.

Основні результати дисертації повністю викладені у наукових фахових виданнях. Зокрема опубліковано 37 наукових статей, з них 27 - у наукових виданнях, що входять до міжнародних наукометричних баз даних Web of Science та/або Scopus; 2 колективні монографії, підготовлено 4 Патенти України на корисну модель. 7 наукових статей, опублікованих за темою дисертації, є одноосібними роботами здобувача, що свідчить його високий рівень як науковця. Основні положення дисертаційної роботи пройшли апробацію на 26 міжнародних та всеукраїнських наукових конференціях.

Дисертаційна робота містить оригінальні результати та характеризується відсутністю плагіату, фабрикації, фальсифікації, що додатково підтверджується як висновками попередньої експертизи, так і відображенням результатів у виданнях, які індексуються в наукометричних базах Scopus та Web of Science і де передбачено обов'язкові рецензування і перевірка поданого матеріалу на дотримання вимог академічної доброчесності. Використані ідеї, результати і тексти інших авторів в дисертації мають посилання на відповідне джерело.

Автореферат дисертації вірно та повно відображає її основні положення та зміст.

Мушу відмітити і деякі недоліки дисертації, що розглядається. А саме.

1. Робота містить помилки стилістичного та граматичного характеру. Наприклад, автор використовує слова «співпадають», «всестороннього», «призводить», «слідуює», «вклад», «зазор», «ціленаправлений», «ступінчаста», «розглядувана» тощо замість «збігаються», «всебічного», «викликає», «впливає», «внесок», «проміжок», «цілеспрямований», «сходінкова», «та, що розглядається»; на рис.3.8 (ст.171) не вказано координатні осі; підписи до рис.3.20 та 3.21 тотожні (не вказано енергії іонізації донорів); перше речення на ст.257 не узгоджене; підписи осей для ри.1.16 та 1.17 англійські; відсутній опис того, що таке «LT-Ge/Si структури», які згадуються на ст.77.

2. Робота містить неточності з фізичної точки зору. Наприклад, на ст.43 сказано, що « $\Delta = \epsilon_{11} + \epsilon_{22} + \epsilon_{33}$  - зміна об'єму при деформації», тоді як це відносна зміна об'єму; на ст.41 вказано «якщо деформувати монокристал кремнію вздовж осі [001], то у цьому напрямку міжатомна відстань зменшиться...» тоді як твердження є справедливим лише при деформації стиску; перелік на ст.46 «..різні дефекти, дислокації, порушення структури, дефекти на поверхні

напівпровідника...» є до певної міри тавтологічним; на ст.87 сказано, що « $J_{\min}$  – мінімальний момент інерції», тоді як вирази (2.3) і (2.4), які описують цю величину не мають очікувану розмірність  $\text{кг м}^2$ ; неочевидними є низка використаних словосполучень на кшталт «анігіляція наноструктури» (ст.84), «зарядовий стан 0/0» (табл.1.2, 1.4-1.6), «ступінь взаємодії домішкового рівня з валентною зоною» (ст.200), «..концентрація електронів в об'ємі зразка кремнію зменшується...що пов'язано зі збільшенням концентрації розсіюючих центрів» (ст.68).

3. Дещо знижує враження від якісно написаної роботи наявність повторів інформації. Це стосується як текстової інформації (наприклад, дані при яких потоках опромінення відбувається конверсія типу провідності кристалів германію зустрічається на ст.209 та ст.229), так і формул. Зокрема, тотожними є вирази

- (5.9) та (1.16);
- (5.1), (3.31), (2.18);
- (2.65), (5.2), (5.26), (5.40), (5.49);
- (5.7), (4.36), (4.42), (5.30);
- (2.62), (2.102), (5.37);
- (2.74), (3.35), (5.21);
- (4.31) та (5.3);
- (4.32) та (5.4);
- (4.34) та (5.15);
- (4.33) та (5.16);
- (4.39) та (5.27);
- (4.40) та (5.28).

4. У дисертаційній роботі недостатня увага приділена обговоренню питання оцінки похибок наведених експериментальних результатів. Зокрема, не вказана точність визначення положення енергетичних рівнів радіаційних дефектів, що є необхідним для обґрунтування висновку (ст.221) про те, що виявлені зміни на 20 меВ (табл.4.2) та 5 меВ (табл.4.1) можуть бути пов'язані зі змінами величини внутрішніх напружень. Подібна ситуація з визначенням енергії активації відпалу дефектів (виявлена різниця цих величин для А-центрів та областей розвпорядкування близько 12%, ст.254) та холівської рухливості (відмінність для опроміненого n-Si за відсутності механічного навантаження та одновісному тиску 0,42 ГПа – порядку 10%, рис.5.8).

5. Певному підвищенню точності отриманих результатів могло б послугувати врахування температурних залежностей енергетичних параметрів. Наприклад, на ст.165-167 вказується значення констант деформаційного потенціалу для  $\Gamma_2$  мінімуму при температурі 4,2 К, а для валентної зони – при 300 К; при розрахунку параметрів дефектів з використанням значень концентрації носіїв при різних температурах (рівняння (4.10) ст.214, (4.14) ст.216, (4.26) ст.226 та (4.26) ст.231) не враховується можливий зсув енергій іонізації дефектів. Тоді як, наприклад,

відомо, що для А-центру в кремнії температурна залежність рівня (0/-) описується виразом  $E_C - (0,16 + 1,1 \cdot 10^{-4} T)$  еВ.

6. На мій погляд, система рівнянь (4.48) на ст.253 потребує певного удосконалення. Так, перше рівняння не враховує, що для утворення А-центру окрім появи вакансії необхідним є також процес їхнього комплексоутворення з атомом кисню. У другому рівнянні доданок  $N_V/\tau_1$  має мати протилежний знак; окрім того, це рівняння не враховує, що відпал А-центру окрім прямого відпалу може відбуватися внаслідок приєднання додаткового атому кисню. Нарешті, виглядає доречним додати до системи рівнянь, яке безпосередньо описуватиме кінетику відпалу ядер областей розупорядкування.

7. Незважаючи на високий науковий рівень автора, що був виявлений ним про аналізі отриманих результатів, фізичні причини деяких особливостей висвітлені недостатньо. Наприклад, чому саме рівень  $E_V + 0.27$  еВ у германії іонізується в умовах механічного навантаження, а близький за енергетичним положенням рівень  $E_V + 0.35$  еВ у кремнії – ні; чи у чому причини розбіжностей результатів розрахунку та експерименту при  $T > 200$  К, представлених на рис.5.5 та 5.6.

8. Зустрічається не достатньо повний опис проведених розрахунків. Зокрема, незрозуміло як визначалася концентрація компенсуючих заряджених акцепторів при розрахунках амплітуди флуктуаційного потенціалу з використанням виразу (5.25), результати яких наведені, наприклад, на рис.5.18 та 5.19; а також деталі розрахунків температурної залежності рухливості при різних механізмах розсіяння на ст.219.

Зроблені зауваження не зменшують цінності виконаних автором досліджень та значимість представлених в дисертаційній роботі результатів і не впливають на загальну позитивну оцінку у цілому.

Оцінюючи весь комплекс досліджень, які представлені в рукописі, слід зазначити що дисертаційна робота С.В. Луньова «Вплив дефектної структури на електричні та тензоелектричні властивості монокристалів n-Ge та n-Si та плівкових наноструктур на їх основі» безперечно є закінченим науковим дослідженням; отримані в ній суттєві результати мають як наукове значення для фізики напівпровідників та діелектриків, так і перспективи практичного застосування.

Загалом вважаю, що дисертаційна робота «Вплив дефектної структури на електричні та тензоелектричні властивості монокристалів n-Ge та n-Si та плівкових наноструктур на їх основі» за актуальністю теми, обсягом отриманих теоретичних та експериментальних даних та рівнем їхньої інтерпретації, науковою новизною та практичним значенням отриманих результатів, обґрунтованістю висновків, а також кількістю та якістю публікацій, дотриманням принципів академічної доброчесності повністю відповідає вимогам п. 7, 9 Порядку присудження та позбавлення наукового ступеня доктора наук (Постанова Кабінету Міністрів України від

17 листопада 2021 р. № 1197), а її автор, Луцьов Сергій Валентинович, заслуговує присудження наукового ступеня доктора фізико-математичних наук за спеціальністю 01.04.10 – фізика напівпровідників і діелектриків.

Офіційний опонент,  
професор кафедри загальної фізики  
Київського національного університету  
імені Тараса Шевченка,  
доктор фіз.-мат. наук, доцент

Олег ОЛІХ

Підпис Олега Оліха засвідчую:  
Вчений секретар Науково-дослідної частини  
Київського національного університету  
імені Тараса Шевченка,  
кандидат філософських наук, доцент

Наталія КАРАУЛЬНА

