

ВІДГУК

офіційного опонента на дисертаційну роботу **Оліха Олега Ярославовича**
«Акусто- та радіаційно-індуковані явища в поверхнево-бар'єрних
кремнієвих та арсенід-галієвих структурах», представлену
на здобуття наукового ступеня доктора фізико-математичних наук
за спеціальністю 01.04.07 – фізики твердого тіла

Актуальність теми. Дисертаційна робота Олега Ярославовича Оліха охоплює широке коло задач, які стосуються розробки фізичних основ модифікації дефектної структури поверхнево-бар'єрних кремнієвих та арсенід-галієвих структур з використанням акустичних хвиль та проникної радіації. В арсеналі методів, якими оперують сучасні тонкі технології, особливе місце займають комбіновані засоби впливу на кристал – радіаційно-термічні, акусто-термічні, радіаційно-акустичні та ін. Наразі існує необхідність удосконалення ще недостатньо розроблених процесів керованого втручання у кристалічну та електронну структуру виробу, а також прогнозування реакції зразка на дію екстремальних навантажень. Саме на розв'язання згаданих проблем спрямовані дослідження, проведені в дисертаційній роботі О.Я. Оліха.

Про актуальність результатів, одержаних О.Я. Оліхом свідчить список робіт дисертанта, більшість з яких (17 з 25) опубліковані у високо рейтингових провідних журналах світу. Численні посилання на опубліковані автором роботи служать незалежним і об'єктивним підтвердженням високого наукового рівня автора. Робота виконувалася згідно до планів науково-дослідних робіт у межах п'яти держбюджетних тем кафедри загальної фізики фізичного факультету Київського національного університету імені Тараса Шевченка та проекту УНТЦ, у яких дисертант був співвиконавцем.

Загальна характеристика структури та змісту роботи. Дисертаційна робота складається зі вступу, шести розділів та загальних висновків.

У **вступі** подана у відповідності до вимог «Порядку присудження наукових ступенів» загальна характеристика роботи. У **першому розділі «Передумови та особливості використання активного ультразвука»** приведено короткий літературний огляд, де звернено увагу на широке застосування бар'єрних

структур на основі $-Si$. Відмічено, що на початок виконання даної роботи динамічні акустичні ефекти у бар'єрних структурах фактично не досліджувалися; розглядаються також методологічні аспекти збудження АХ у зразках, приведена оцінка параметрів акустичного поля, описані характеристики використаних вимірювальних установок та особливості конструкції акустичних комірок.

У другому розділі «*Динамічні акусто-індуковані ефекти в опромінених та вихідних кремнієвих структурах з p-n переходом*» вперше експериментально досліджено вплив ультразвукового навантаження на параметри монокристалічних кремнієвих сонячних елементів. З метою встановлення фізичних механізмів виявлених ефектів, зокрема оборотної акусто-індукованої деградації фотоелектричних властивостей, проведено детальний аналіз впливу ультразвукового навантаження на основні рекомбінаційні параметри. Вперше запропонована модель акусто-активного комплексного дефекту, в рамках якої вияснено особливості акустоіндукованих явищ. Проведені дослідження можливої ролі різноманітних комплексів, відповідальних за зміну характеристик структур та показано, що саме кисневмісні преципітати ефективно впливають на процеси рекомбінації та беруть участь у акусто-дефектній взаємодії. Виявлено ефект акустоіндукованого зменшення опору шунтування та запропоновано механізм його дії в межах дислокаційно-індукованого імпедансу. У цьому ж розділі приведені одержані вперше результати впливу ультразвукового навантаження на параметри кремнієвих з p-n-структур, опромінених реакторними нейtronами та γ -квантами ^{60}Co . Виявлено, що в опромінених зразках спостерігається підвищення ефективності акустоіндукованого зменшення опору шунтування та часу життя неосновних носіїв заряду. З'ясовано, що акусто-індуковані оборотні зміни фактору неідеальноті та часу життя носіїв в області просторового заряду мають різний знак в опромінених та неопромінених структурах.

У третьому розділі зроблено «*Порівняльний аналіз та оптимізацію основних відомих методів розрахунку параметрів діодів Шотки на основі дослідження вольт-амперних характеристик*

У літературі відомі роботи, де проводилося порівняння та огляд шляхів визначення параметрів діодів Шотки, проте, як зазначається у тексті розділу,

використовувалися лише декілька методів. Водночас, як показано в роботах О.Я. Оліха, найефективнішими методами з погляду точності визначення параметрів та швидкості розрахунків є еволюційні алгоритми.

У четвертому розділі викладено результати «*Дослідження ефектів впливу γ -опромінення та ультразвукового навантаження на структури $Al-n-n^+Si-Al$ з контактом Шотки».*

Виявлено особливості протікання струму в опромінених і вихідних зразках та встановлено основні механізми проходження заряду через потенціальний бар'єр; з'ясована роль радіаційних дефектів та патчів. Встановлено, що немонотонні зміни висоти бар'єра Шотки від дози опромінення, визначаються ступенем неоднорідності контакту. Показано, що акусто-індуковані (AI) зміни зворотного струму зумовлені термоемісійною складовою. Використовуючи одержані результати щодо особливостей акустичного впливу на діод, а саме – збільшення величини зворотнього струму при зростанні дози опромінення, автор запропонував спосіб оцінки дози γ -квантів, поглинутих структурою.

У п'ятому розділі «*Особливості динамічних акустоіндукованих змін параметрів структур $Mo-n-n^+Si$* подані результати досліджень динамічних акустоіндукованих (частоти 8-28 МГц) ефектів у структурах метал-напівпровідник на основі кремнію в широкому діапазоні температур 130-300К, а також дані про механізми взаємодії акустичної хвилі здефектами. Основні зусилля спрямовувались на вивчення впливу УЗ на параметри, характерні саме для діодів Шотки; отже отримані результати розширяють наявну базу експериментальних даних і підтверджують ідею акустокерування струмом діода, яка може мати практичне застосування в електроніці і заслуговує на дальшу увагу та вивчення. Використана модель неоднорідного контакту дозволила пояснити AI збільшення висоти бар'єру. Зясовано, що механізм AI змін зумовлений рухом дислокаційних перегинів. Показано, що основними механізмами виникнення зворотного струму є термоелектронна емісія та тунелювання, стимульоване фононами; виявлено нові AI ефекти зменшення енергії активації рівнів, які беруть участь у тунелюванні, густини заповнених інтерфейсних станів та коефіцієнта Пула-Френкеля.

У шостому розділі «Залишкові ефекти, спричинені мікрохвильовими та ультразвуковими обробками в напівпровідникових структурах на основі GaAs, SiC та Si» методом акустоелектричної релаксаційної спектроскопії досліджено вплив ВЧ випромінення на параметри глибоких рівнів у приповерхневій області n–6H–SiC, n–GaAs та арсенід-галієвих епітаксійних структур. Встановлено, що виявлені пострадіаційні зміни параметрів пасток зумовлені збільшенням кількості міжвузельних атомів та релаксацією внутрішніх механічних напруг. Зясована можливість низькотемпературного акусто-індукованого відпалу радіаційних дефектів в системі Si–SiO₂; показано, що відпал пов’язаний з стимульованою ультразвуком дифузією міжвузельних атомів водню та кисню; виявлено, що ультразвукова обробка здатна викликати зменшення розкиду параметрів і підвищення однорідності характеристик, створених в єдиному технологічному процесі.

Відтак, дисертація є цілісною завершеною працею, в якій всі розділи успішно розв'язують головну наукову задачу: встановлення основних закономірностей та фізичних механізмів впливу ультразвукового навантаження та опромінення на процеси проходження струму в напівпровідниковых поверхнево-бар'єрних структурах

Наукова новизна. Вперше проведені детальні дослідження низки фундаментальних процесів електроперенесення та рекомбінації нерівноважних носіїв заряду для різних поверхнево-бар'єрних структур в умовах керованих змін системи дефектів решітки кристала, як за допомогою нейtronного та γ-опромінення, так і акустичного навантаження. Співставлення стриманих експериментальних результатів з теоретичним аналізом та результатами інших авторів, дозволили якісно і у більшості випадків кількісно описати всі виявлені процеси, і вияснити їхні основні характеристики і параметри. Встановлено механізм процесів протікання струму в поверхнево-бар'єрних структурах дозволяє надійно оцінювати ефективність роботи відповідних пристрій і передбачати поведінку подібних напівпровідниковых пристрійв.

Варто відзначити, що цикл робіт О.Я. Оліха є серйозним продовженням і подальшим розвитком традиційного для кафедри загальної фізики Київського національного університету імені Тараса Шевченка напрямку акустоелектроніки дефектів, - школи, розвиток якої розпочинався з 80-тих років минулого століття.

До найвагоміших наукових результатів дисертації слід віднести:

1. Повний та достатньо інформативний огляд результатів за темою використання акустичних хвиль у фізиці і технології напівпровідників.

2. Вперше виявлено та досліджено динамічні (оборотні) ефекти в неопромінених і опромінених кремнієвих діодних структурах, що дозволило отримати кількісні дані про низку електрофізичних параметрів бар'єрних структур на основі Si, призначеного для сонячної енергетики. Встановлено, що означені ефекти в нейтронно-опромінених діодах пов'язані з впливом ультразвуку на стан дівакансій, тоді як у γ -опромінених діодах основним акустоактивним центром є комплекс вакансії та міжвузельного кисню. Також показано, що ультразвукове навантаження викликає перебудову комплексу VO_i , а комплекс з міжвузольного вуглецю та міжвузольного кисню практично не приймає участі в акусто-дефектній взаємодії.

3. Вперше запропонована модель акусто-активного комплексного дефекту в напівпровідниках, в рамках якої пояснено особливості акустоіндукованих ефектів.

4. Зроблено спеціальний аналіз методів визначення параметрів діодів Шотки, який дозволив оптимізувати і суттєво підвищити достовірність власних результатів; він також є корисним для подальшого використання у процесі розробки інших метал-напівпровідникових пристройів.

5. Встановлено, що при зростанні дози γ -квантів, поглинутих структурою метал-напівпровідник, спостерігається збільшення величини зворотнього струму; обговорено можливість використання цього ефекту для оцінки дози, що може слугувати сенсором γ -опромінення.

6. Вперше ідентифіковано основні акустоактивні дефекти в структурах з контактом Шотки, з'ясовано умови, при яких можлива їхня перебудова. Вперше введено коефіцієнт взаємодії ультразвука з конкретним дефектом та оцінено його величину для низки дефектів.

7. Виявлено нові ефекти, наприклад, АІ термоелектрична емісія електронів з пасток.

8. У сукупності проведені ретельні експериментальні вимірювання на автоматизованих сучасних установках, глибокий теоретичний аналіз результатів з використанням оптимізованих обчислювальних методів та залученням теоретичних сучасних моделей дозволили автору отримати достовірну інформацію про стан та процеси акусто- і радіаційної перебудови конкретних акусто-активних дефектів в структурах.

Оцінюючи весь комплекс досліджень, які представлені в рукописі, зазначимо, що дисертаційна робота О.Я. Оліха безперечно є закінченим науковим дослідженням; отримані в ній суттєві результати мають як наукове значення для фізики напівпровідниківих структур, так і перспективні для практичного застосування. Можна стверджувати, що виконана робота визначає новий напрямок акустоелектроніки напівпровідниківих структур.

Основні наукові результати роботи багаторазово апробовані на 26 профільних міжнародних наукових конференціях. Автореферат дисертації повністю відображає її зміст. Роботу написано на високому науковому рівні, добре оформлено, зміст викладено чітко, текст написано грамотно, добротною українською мовою.

Ступінь обґрунтованості та достовірності наукових положень, висновків і рекомендацій є достатнім та базується на детальному аналізі літературних джерел, які стосуються визначеної мети та постановки задачі дослідження; використанні апробованих теоретичних досліджень із подальшим співставленням результатів; на критичному аналізі результатів.

До дисертаційної роботи О.Я.Оліха є окремі пропозиції та зауваження:

1. Висновок про роль рухомих дислокацій не підкріплюється інформацією про дислокаційну структуру даних зразків (розділи 2,4).

2. При обговоренні мало звернено увагу на роль поверхневих станів в AI ефектах.

3. Висновок 7 до розділу2 стверджує, що одним з основних механізмів акусто-індукованого впливу на фотогенерацію носіїв струму в нейтронно-опромінених структурах є зменшення коефіцієнта відбивання світла за рахунок радіаційного порушення приповерхневого шару напівпровідника. Варто було б перевірити прямим дослідом, який міг би цю думку підтвердити.

4. Сприйняття наведеної інформації дещо ускладнене внаслідок використання значного числа абревіатур (більше 90!); почасти застосовується незагальновживана термінологія, присутні окремі граматичні та стилістичні помилки.

Результати і висновки дисертації доцільно використовувати при виконанні наукових робіт, а також у курсах лекцій з фізики (дефекти у напівпровідниках, поверхнево-бар'єрні структури, акустоелектроніка, радіаційні технології та інші) у вищих навчальних закладах та академічних установах НАН України (наприклад, ІЯД НАНУ, ІФН НАНУ, Київський національний університет імені Т. Шевченка).

Загалом докторська дисертаційна робота «Акусто- та радіаційно-індуковані явища в поверхнево-бар'єрних кремнієвих та арсенід-галієвих структурах» відповідає вимогам п.п. 9, 10, 12, 13 «Порядку присудження наукових ступенів», затвердженого постановою Кабінету Міністрів України №567 від 24.07.2013 року (зі змінами внесеними згідно з постановами Кабінету Міністрів України №656 від 19.08.2015, №1159 від 30.12.2015 та №567 від 27.07.2016), а її автор, Оліх Олег Ярославович, безумовно заслуговує присудження йому наукового ступеня доктора фізико-математичних наук за спеціальністю 01.04.07 – фізики твердого тіла.

Офіційний опонент,
проводний науковий співробітник
відділу радіаційної фізики
Інституту ядерних досліджень НАН України,
доктор фіз.-мат. наук, професор

В.П. Тартачник

Підпис В.П. Тартачника засвідчує:

Учений секретар Інституту ядерних
досліджень НАН України,
кандидат фіз.-мат. наук



Н.Л. Дорошко