

ВІДЗІВ

офіційного опонента на дисертаційну роботу Оліха Олега Ярославовича
«Акусто- та радіаційно-індуковані явища
в поверхнево-бар'єрних кремнієвих та арсенід-галієвих структурах»,
яку подано на здобуття наукового ступеня доктора фізико-математичних наук
зі спеціальности 01.04.07 – фізика твердого тіла

Ця дисертаційна робота стосувалася дослідження впливу ультразвукового навантаження й опромінення на процес протікання струму в напівпровідникових бар'єрних структурах та на їхні характеристики. Таке дослідження є важливим для розвитку методів керування властивостями напівпровідникових пристроїв шляхом зміни стану дефектів їхньої структури.

Задачею напівпровідникового матеріалознавства є створення матеріалів і структур із заданими властивостями на основі кристалічних систем, параметри та характеристики яких значним чином зумовлено дефектною підсистемою. Зокрема, різноманітні порушення періодичности визначають особливості перенесення заряду в напівпровідникових бар'єрних структурах. Оскільки подібні системи є основою мікроелектронних пристроїв, з'ясування та дослідження шляхів контрольованого впливу на їхні електротранспортні властивості є *актуальними завданнями* з прикладної точки зору.

Цікавим методом зовнішньої активації дефектної структури і таким чином розширення функціональних можливостей мікроелектронних пристроїв є збудження в них пружних коливань ультразвукового діапазону. З одного боку, в науковій літературі показано, що таке збудження кристалу приводить до істотних модифікацій у підсистемі дефектів. Проте, з іншого боку, явища, що відбуваються у малодислокаційних неп'єзоелектричних матеріалах і структурах на їх основі при поширенні акустичних хвиль залишаються ще недостатньо вивченими. Аргументом на користь першочергового дослідження саме таких систем, наприклад на основі кремнію, є надзвичайно поширене застосування їх у мікроелектронних технологіях.

Однією з перепон щодо підвищення строку використання мікроелектронних пристроїв є зміна їхніх властивостей внаслідок дії опромінення різного типу. Зокрема, типовими чинниками деградаційного впливу є високоенергетичні фотони, наприклад гамма-кванти чи то електромагнетні хвилі надвисокочастотного діапазону. З'ясування фізичних механізмів радіаційно-індукованих ефектів у кремнієвих або ж арсенід-галієвих бар'єрних структурах *актуалізується* прогнозуванням їхніх реальних робочих характеристик і вибором оптимальних умов функціонування.

Дисертаційна робота пана О. Я. Оліха мала за мету встановлення основних закономірностей акусто-індукованих динамічних ефектів у напівпровідникових структурах із p - n -переходом і контактом Шотткі, виявлення зазначених фізичних механізмів впливу опромінення й ультразвукового навантаження на проходження струму в них. Здійснені у цій роботі комплексні дослідження відповідних явищ складено з розв'язування *сучасних задач* фізики твердого тіла, вирішення яких є затребуваним фундаментальною наукою та практикою.

Ідеї для досягнення мети дисертаційної роботи, що рецензується, є своєчасними та відповідають концептуальним напрямам, орієнтованим на практичне використання результатів фундаментальних досліджень фізичних процесів у матеріалах мікро- та наноелектроніки. Роботу виконано на кафедрі загальної фізики фізичного факультету Київського національного університету імені Тараса Шевченка в рамках планів п'ятих держбюджетних науково-дослідних тем (2001–2018 рр.), а також у рамках проекту УНТЦ №3555 (2006–2008 рр.). Маю відзначити, що ця робота є розвитком традиційного для кафедри загальної фізики напряму досліджень, пов'язаному з активним використанням акустичних хвиль. Починаючи з останньої чверті минулого століття, науковці цієї кафедри одержали вагомі результати при вивченні акустоелектронних процесів (І. Я. Кучеров, В. М. Перга), фотоакустичних ефектів (Р. М. Бурбело), пороого-

вих акустичних явищ (І. В. Островський, О. О. Коротченков) у напівпровідникових сполуках. А дисертація пана О. Я. Оліха розширює спектр тих досліджень у область динамічних акусто-індукованих ефектів у напівпровідникових структурах.

Дисертація пана О. Я. Оліха має прийнятну міру опрацьованості своїх структурних елементів, повноти, поглибленості і конкретності викладення та містить елементи *новизни*, що віддзеркалюється у наявності серед одержаних результатів нової наукової інформації стосовно закономірностей впливу ультразвукового навантаження на процеси електротранспорту в кремнієвих поверхнево-бар'єрних структурах, визначення природи основних акустично активованих дефектів, особливостей модифікування параметрів структур метал-напівпровідник під дією гамма-квантів. Вирішення задач, поставлених перед даною дисертаційною роботою, уможливило одержати наступні *нові* (й цікаві з моєї точки зору) результати з елементами фундаментальності.

1. Експериментально показано, що висота бар'єру, фактор неідеальності та величина зворотнього струму у структурах кремній-метал немонотонно змінюються при опроміненні гамма-квантами; одержані залежності проаналізовано у наближенні неоднорідного контакту.
2. Деталізовано механізми перебудови дефектної підсистеми у приповерхневому шарі монокристалів GaAs та епітаксійних структур на його основі при мікрохвильовому опроміненні.
3. Проведено тестування і порівняльну аналізу аналітичних, чисельних та адаптивних пошукових методів оцінювання параметрів діоди Шотткі за вольт-амперними характеристиками; з'ясовано взаємозв'язок похибок мірювання з точністю визначення тих параметрів.
4. Експериментально виявлено та досліджено ефекти впливу акустичного навантаження на параметри арсенід-галійових і кремнієвих структур метал-напівпровідник; показано, що причинами необоротних акусто-індукованих змін властивостей є генерація та дифузія точкових дефектів у ультразвуковому полі, тоді як зворотні явища зумовлені рухом дислокаційних перегинів.
5. Виявлено ефект оборотної акусто-індукованої деградації фотоелектричних властивостей кремнієвих структур із *p-n*-переходом; встановлено її основні закономірності та показано, що причиною її є зменшення часу життя неосновних носіїв заряду внаслідок перебудови точкових дефектів.
6. Запропоновано наближений фізичний модель акусто-активного комплексного дефекту, на основі якого проаналізовано вплив ультразвукового навантаження на процеси рекомбінації у системі спарених рівнів двох дефектів і рекомбінації Шоклі-Ріда-Голла; експериментально оцінено значення коефіцієнтів акусто-дефектного взаємочину для низки точкових дефектів.

Структура дисертації та логіка подання матеріалу відображають послідовність розв'язування задач дослідження. Дисертація на 369 сторінках містить 121 рисунок, 31 таблицю і складається зі Вступу, шістьох розділів, Висновків, Списку використаних джерел із 659 найменувань на 69 сторінках і 1 Додатку.

У *Вступі* обґрунтовано актуальність теми дисертації, сформульовано мету та задачі дослідження, визначено предмет і методи дослідження, висвітлено наукову новизну та практичну значимість одержаних при цьому результатів, наведено інформацію про зв'язок роботи з відповідними науковими програмами та темами; також зазначено особистий внесок здобувача в працях, опублікованих у співавторстві.

У першій частині *першого розділу* дисертації зроблено огляд літератури та систематизовано дані про вже виявлені ефекти, зумовлені акусто-індукованою перебудовою дефектної підсистеми напівпровідників. Зокрема, розглянуто явища необоротних змін електричних, оптичних і люмінесцентних властивостей бінарних та однокомпонентних напівпровідникових кристалів внаслідок ультразвукового оброблення та вказано, що причиною їх може бути генерація та дифузія точкових дефектів, а також коливний рух лінійних дефектів і малокутових меж субблоків. Також обговорено можливості застосування ультразвуку для ни-

зкотемпературного відпалу радіаційних дефектів, а також у різноманітних технологічних процесах на кшталт йонної імплантації чи хемічної синтези наночастинок. Зазначено переваги акустичного оброблення порівняно з іншими, більш традиційними, способами впливу на дефектну підсистему. Крім того, розглянуто відомі ефекти, які спостерігаються під час поширення пружних коливань, і вказано, що у переважній кількості випадків поява їх пов'язана з рухом лінійних дефектів або п'єзоелектричним полем. Водночас підкреслено, що динамічні акусто-індуковані ефекти у бар'єрних структурах на основі малодислокаційних неп'єзоелектричних напівпровідників фактично не досліджувалися.

У другій частині першого розділу приділено увагу методичним аспектам вивчення ефектів впливу ультразвуку у даній дисертаційній роботі. Зокрема, описано схему експерименту, що мала на меті унеможливити проникнення електричного поля у зразок, та особливості визначення параметрів ультразвукового навантаження за низьких температур.

До першого розділу принципів зауважень немає. Втім зазначу, що з огляду на наступні розділи дисертації, тут було б доцільно більшу увагу приділити методології оцінки похибок визначення параметрів уведеного у зразок ультразвуку (інтенсивності коливань, амплітуди коливань атомів).

Крім того, зазначу, що, як у цьому розділі, так і в інших частинах дисертації та й автореферату, застосовано не найкращу українськомовну наукову термінологію та жаргонову стилістику. Так, за фізичним лексиконом, що дотримується питоменного українського назовництва та так званого «харківського», практично останнього правдивого, Українського правопису ліпше застосовувати словосполучення «легувальна домішка», а не «легуюча домішка», «хемічне щавлення» замість «хімічне травлення», «ультразвукове оброблення», а не «ультразвукова обробка», «відбивання світла» замість «відбиття світла», «напорошення», а не «напилення», «підложжя (або підкладинка)» замість «підкладка», «ґратниця», а не «ґратка», «окиснення кремнію» замість «окислення кремнію» тощо.

У другому розділі дисертації представлено результати експериментального дослідження акусто-індукованих ефектів у вихідних та опромінених кремнієвих структурах із p - n -переходом при температурах у 290–340 К. Виявлено, що під час поширення акустичних хвиль спостерігається зменшення величин напружки холостого ходу, струму короткого замикання та коефіцієнта форми вольт-амперної характеристики, що пов'язане зі зменшенням величин часу життя неосновних носіїв заряду та шунтувального опору. Показано, що рекомбінація в області просторового заряду відбувається внаслідок електронних переходів у системі спарених рівнів близько розташованих дефектів, тоді як у квазинейтральній області подібні процеси доцільно описувати у наближеному моделю Шоклі–Ріда–Голла. Тут також запропоновано модель акусто-активованого комплексного дефекту, рекомбінаційні властивості якого змінюються при ультразвуковому навантаженні через зміну середньої (по періоду хвилі) віддалі між компонентами дефекту. На основі запропонованого моделю пояснено виявлені особливості акусто-індукованих змін часу життя носіїв та фактору неідеальності. Ефект зменшення опору шунтування в ультразвуковому полі пояснено із залученням моделю дислокаційно-індукованого імпедансу зростанням ефективності захоплення електронів лінійними дефектами. Показано, що акусто-активованими дефектами в неопромінених кремнієвих сонячних елементах є Оксигеновмісні преципітати. Виявлено, що у нейтроно- та гамма-опромінених кремнієвих структурах спостерігається зміна знаку та підсилення ефекту акусто-індукованого впливу на час життя носіїв в області просторового заряду та фактор неідеальності. Показано, що у гамма-опромінених структурах при ультразвуковому навантаженні відбувається перебудова метастабільного радіаційного дефекту, яким найімовірніше є А-центр. Спираючись на амплітудні залежності акусто-індукованих змін часу життя електронів у базі діоди, показано, що дівакансія здатна ефективно брати участь у акусто-дефектній взаємодії, тоді як комплекс з міжвузлових атомів Карбону й Оксигену таких властивостей не має.

До розділу 2 є два непринципових зауважень. Одне з них стосується недогляду автора у пп. 2.2.1 та 2.2.3, де величина шунтувального опору R_{sh} записується з врахуванням площі діоди (маючи розмірність $[Ом \cdot см^2]$), як це і має бути відповідно до формули (2.1), тоді як у пп. 2.2.4 та 2.5.4 значення опору шунтування R_{sh} подано в омах. Інше зауваження пов'язано з тим, що застосування виразу (2.29) до оцінювання параметрів кінетики, — часу життя неосновних носіїв заряду в області просторового заряду та фактору неідеальності, — очікується лише у випадку, коли ці характеристики лінійно залежать від концентрації міжвузлових атомів Феруму; але у дисертації не обговорюється вірогідність такого чи то іншого характеру залежності.

Цікавий *третій розділ* присвячено порівняльній аналізі й оптимізації методів визначення параметрів структур метал–напівпровідник за їхніми вольт-амперними характеристиками (ВАХ). Вважалося, що проходження струму описується теорією термоелектронної емісії, а шуканими параметрами були висота бар'єру Шотткі, фактор неідеальності та послідовний опір. З точки зору точності та швидкодії визначення параметрів було розглянуто 16 різних методів, в тому числі аналітичні, числові та такі, що ґрунтуються на використанні еволюційних алгоритмів. Всі методи застосовувалися як до експериментально виміряних ВАХ, так і штучно прогнозованих. В результаті проведеної аналізи було оцінено оптимальні значення додаткових параметрів, які використовуються у ряді аналітичних методів, запропоновано процедуру вибору діапазону ВАХ для побудови допоміжних функцій і показано, що запропоновані шляхи оптимізації уможливають підвищити точність визначення тих параметрів. Показано, що використання Ламбертової W -функції при числовому визначенні параметрів діоди Шотткі уможливорює зменшити похибки. Для еволюційних алгоритмів оптимізації запропоновано та показано ефективність застосування цільової функції у вигляді суми квадратів відносних похибок апроксимації кожної з точок ВАХ. Визначено необхідну кількість поколінь для збіжності кожного з чотирьох розглянутих алгоритмів і показано, що найбільш швидкодійним з них є алгоритм так званої «штучної бджолиної сім'ї». Проаналізовано залежності точностей визначення параметрів від власне їхніх величин і рівня випадкових помилок при мірянні ВАХ та показано, що щодо останнього залежність є близькою до лінійної. Показано, що серед всіх протестованих методів найпридатнішими з огляду на точність визначення зазначених параметрів є еволюційні алгоритми та метод Громова–Пугачевича з адаптивною процедурою.

На мій погляд, представлені в даному розділі результати мають практичну цінність і можуть бути корисними у подальших дослідженнях задля розробки пристроїв з контактом метал–напівпровідник.

Проте маю зауважити, що у тексті дисертації, як видається, завеликий обсяг виділено опису еволюційних алгоритмів, який, взагалі-то, можна знайти у літературі. Крім того, проведена аналіза залежностей точності визначення тих чи інших параметрів від їх абсолютної величини (пункт 3.5.1, табл. 3.1) мала б бути довершеною відповідними лаконічними, але узагальнювальними формулюваннями висновками.

Четвертий розділ дисертації містить результати експериментального дослідження впливу гамма-опромінення на механізми електротранспорту в структурах $Al-n-n^+-Si$ в діапазоні температур 130–330 К. Показано, що у неопроміненних структурах при прямому зміщенні струм протікає внаслідок термоелектронної емісії через неоднорідний бар'єр; при зворотньому зміщенні цей процес доповнюється тунелюванням за участю глибокого рівня, пов'язаного, як це свідчить його положення у забороненій зоні, з міжвузловим атомом Карбону. Після опромінення з дозою у 1 Мрад спостерігається збільшення висоти бар'єру Шотткі за межами локальних областей полегшеного проходження струму (так званих «патчів») внаслідок накопичення на межі поділу дефектів акцепторного типу. Водночас, на думку автора, відбувається перегрупування цих областей, що спричинює зменшення ефективного значення висоти бар'єру, яке визначається з ВАХ. При збільшенні увібраної дози до 10 Мрад у місці розташування «патчів»

ефективно генеруються негативно заряджені точкові дефекти, що приводить до зростання ефективної висоти бар'єру Шотткі. Крім того, гамма-опромінення інтенсифікує процеси тунелювання, зокрема з'являється ще одна компонента зворотнього струму, пов'язана з тунельною багатофононою йонізацією глибоких центрів.

У цьому розділі також наведено результати дослідження впливу ультразвукового навантаження за кімнатної температури на протікання струму в структурах $\text{Al}-n-n^+-\text{Si}$. Виявлено зворотній акусто-індукований ефект інтенсифікації термоемісійних процесів, пов'язаний зі зменшенням висоти бар'єру Шотткі. Показано, що у вихідних структурах цей ефект пов'язаний з йонізацією дефектів внаслідок коливань дислокаційних відрізків, тоді як у опромінених структурах його причиною є взаємодія акустичної хвилі з точковими радіаційними центрами.

Стосовно четвертого розділу є два непринципових зауваження. По-перше, у роботі стверджується, що після опромінення з дозою у 10 Мрад при прямому зміщенні струм визначається як термоелектронною емісією, так і тунелюванням носіїв. У зв'язку з цим доречно було б оцінити, як впливають ці процеси на висоту бар'єру Шотткі, що визначається за модифікованою Річардсоною залежністю — методом, який був використаний у роботі. По-друге, було б показово одержати вольт-фарадні характеристики мірванням не лише за кімнатної температури, але й у всьому дослідженому температурному інтервалі 130–330 К. Це, зокрема, уможливило б напряду оцінити вплив опромінення на висоту бар'єру поза межами так званих «патчів» (тобто локальних областей з пониженим значенням висоти бар'єру Шотткі).

У п'ятому розділі дисертації досліджено вплив ультразвукового навантаження в інтервалі температур 130–330 К на протікання струму в діодах Шотткі $\text{Mo}-n-n^+-\text{Si}$. Показано, що прямий струм доцільно розглядати відповідно до моделю термоелектронної емісії через неоднорідний контакт з висотою бар'єру, що описується подвійним Гауссовим розподілом. Виявлено оборотні акусто-індуковані зміни висоти бар'єру, знак і величина яких при постійній інтенсивності ультразвуку немонотонно залежать від температури. Встановлено, що температура, за якої спостерігається максимальна ефективність впливу ультразвукового навантаження, підвищується із збільшенням частоти пружних коливань. З використанням Брейсфолдового моделю показано, що причиною виявленої залежності може бути рух дислокаційних перегинів. З'ясовано, що зворотній струм пов'язаний із процесами емісії та стимульованого фононами тунелювання, а його оборотне зростання в акустичному полі зумовлене йонізацією інтерфейсних станів і зміною розмірів кластерів дефектів.

До цього розділу дисертації є одне непринципове зауваження, пов'язане з недовершеністю аналізу причин акусто-індукованих оборотніх змін фактору неідеальності (вони просто не обговорюються).

Шостий розділ дисертації є найбільш неоднорідним за своїм змістом і може бути розділеним на три частини. У першій з них представлено результати досліджень впливу мікрохвильового опромінення на параметри дефектів у монокристалах 6H-політипу карбіду кремнію і арсеніду галію та в епітаксійних структурах $n-n^+-\text{GaAs}$ і $n-n^+-n^{++}-\text{GaAs}$. Було застосовано метод акустоелектричної релаксаційної спектроскопії, який уможливлює визначати параметри дефектів, розташованих у приповерхневих областях. До опромінення у досліджених зразках було виявлено дефектні комплекси, до складу яких входять переважно вакансії. З'ясовано, що після опромінення положення енергетичних рівнів дефектів змінюються, що свідчить про їхню перебудову. Показано, що причиною перетворень є збільшення концентрації міжвузлових атомів, що корелює з результатами проведених мірвань радіуса кривини структур і величини деформації у їхньому приповерхневому шарі. В другій частині розділу проведено дослідження впливу ультразвукових оброблень на параметри діод Шотткі $\text{Au}-\text{TiB}_x-n-n^+-\text{GaAs}$, виготовлених за технологією з інтегральним тепловідведенням. Виявлено, що характери акусто-індукованих залишкових змін висоти бар'єру, фа-

ктуру неідеальності, величини зворотнього струму залежать як від інтенсивності введених акустичних хвиль, так і від їхньої частоти. Та найцікавішим, з моєї точки зору, результатом є виявлений ефект підвищення однорідності характеристик діод Шотткі при допорогових ультразвукових обробленнях. Нарешті, останню частину розділу присвячено дослідженню можливості акустичного відпалу радіаційних дефектів у структурах $\text{Au-SiO}_2\text{-Si}$ внаслідок гамма-опромінення. Шляхом аналізу механізмів перенесення заряду показано, що ультразвукове оброблення за температур близько 350 К здатне спричинити пониження концентрації дефектів, розташованих як у діелектричному прошарку (Оксигенові вакансії), так на межі кремній-оксид кремнію (ненасичені зв'язки).

Маю два зауваження-побажання до розділу 6. У першій частині розділу недостатню увагу приділено причинам зміни поперечного перерізу захоплення електронів дефектами внаслідок мікрохвильового опромінення. Зокрема, практично поза увагою залишився той факт, що у монокристалах оброблення електромагнетними хвилями надвисокої частоти викликає зменшення цього параметра, тоді як у епітаксійних структурах — збільшення. У другій частині розділу виявлено, що зі зростанням частоти ультразвукового навантаження інтенсифікуються процеси перебудови дефектів, але фізичні причини цього ефекту не обговорено.

Тим не менш, зазначу, що всі зауваження, яких наведено вище, слід розглядати як побажання стосовно оформлення вмісту дисертації та щодо врахування їх при майбутньому розвитку обраного наукового напрямку; тому вони не можуть знизити загальної позитивної оцінки даної дисертаційної роботи.

Автор дисертації одержав *оригінальні* та *трудомісткі* наукові результати. Експериментальні результати, одержані в дисертаційній роботі пана О. Я. Оліха, та механізми, залучені для пояснення їх, здаються мені фізичними і забезпечують обґрунтованість сформульованих наукових висновків. *Вірогідність* одержаних результатів і висновків дисертації забезпечується використанням комплексу експериментальних методів визначення параметрів напівпровідникових структур, кореляцією експериментальних даних і результатів модельних розрахунків, застосуванням адекватних фізичних моделей, узгодженням низки одержаних результатів з наявними експериментальними даними та висновками інших авторів.

Результати дослідження є новими та сприяють глибшому розумінню фізичних процесів у поверхнево-бар'єрних структурах при знакозмінних механічних навантаженнях і опроміненні високоенергетичними фотонами. У цілому дисертація справляє враження праці, виконаної на високому науковому рівні.

Результати виконаного дисертаційного дослідження можуть бути корисними не лише для фахівців у акустиці. Та, насамперед, вони мають бути використані для розробки нового методу динамічного управління струмом напівпровідникових діод, підвищення точності завбачення властивостей подібних систем, залежно від умов їхнього функціонування, для створення нових сенсорів опромінення, а також можуть скласти основу відповідного розділу в межах навчального курсу «Дефекти в напівпровідникових і діелектричних кристалах».

Дисертацію побудовано логічно, написано науковою українською мовою та структуровано відповідно до вимог ДАК МОН України стосовно оформлення дисертацій.

Результати дисертаційної роботи викладено, принаймні, в 25 статтях (з них 12 є одноосібними), опублікованих у вітчизняних і міжнародних фахових наукових журналах з високими імпакт-факторами. До опублікованих праць, які відображають наукові результати дисертації та є свідченням апробації роботи, відносяться й 29 тез доповідей на міжнародних і всеукраїнських наукових конференціях.

Зміст та основні положення дисертації цілком і вірно відображено в авторефераті дисертації.

ВИСНОВОК

Отже, дисертаційна робота пана О. Я. Оліха (з $h = 7$) являє собою самостій-

не, завершене в цілому (у межах поставлених задач) дослідження з істотним внеском у встановлення основних фізичних механізмів і закономірностей впливу ультразвукового навантаження й опромінення на протікання струму в напівпровідникових структурах із p - n -переходом і контактом Шотткі.

За актуальністю вибраної теми, науковою новизною та значимістю одержаних результатів, ступенем обґрунтованості й вірогідністю сформульованих наукових висновків і рекомендацій, повнотою їх викладу в опублікованих працях дисертаційна робота «Акусто- та радіаційно-індуковані явища в поверхнево-бар'єрних кремнієвих та арсенід-галієвих структурах» задовольняє встановленим критеріям ДАК МОН України щодо дисертацій на здобуття наукового ступеня доктора наук, а саме, пп. 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). Тому я вважаю, що автор дисертації, пан Олег Ярославович Оліх, заслуговує на присудження йому наукового ступеня доктора фізико-математичних наук із спеціальності 01.04.07 – фізика твердого тіла.

Заст. директора з наукової роботи
Інституту металофізики
ім. Г. В. Курдюмова НАН України,
чл.-кор. НАН України,
д-р фіз.-мат. н., проф.



В. А. Татаренко