

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ

КИЇВСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ
імені ТАРАСА ШЕВЧЕНКА

На правах рукопису



ОЛИХ ОЛЕГ ЯРОСЛАВОВИЧ

УДК 534.29, 537.312.5/.6/.9

**АКУСТО– ТА РАДІАЦІЙНОІНДУКОВАНІ ЯВИЩА В
ПОВЕРХНЕВО–БАР’ЄРНИХ КРЕМНІЄВИХ ТА АРСЕНІД ГАЛІЄВИХ
СТРУКТУРАХ**

Спеціальність 01.04.07– фізика твердого тіла

Автореферат
дисертації на здобуття наукового ступеня
доктора фізико-математичних наук

Київ – 2018

Дисертацією є рукопис.

Робота виконана на кафедрі загальної фізики фізичного факультету Київського національного університету імені Тараса Шевченка.

Офіційні опоненти: доктор фізико–математичних наук, професор,
Перший Имя Отчество,
Не очень длинное название для места работы,
старший научный сотрудник

доктор фізико–математичних наук, професор,
Другий Имя Отчество,
Основное место работы с длинным длинным длинным
длинным названием,
старший научный сотрудник доктор фізико–математи-
чних наук, професор,
Третій Имя Отчество,
Основное место работы с длинным длинным длинным
длинным названием,
старший научный сотрудник

Захист відбудеться “01” вересня 2018 р. о 14¹⁵ годині на засіданні спеціалізованої вченої ради Д 26.001.23 при Київському національному університеті імені Тараса Шевченка за адресою: 03022, Київ, просп. академіка Глушкова 4, корп. 1, фізичний факультет, ауд. 500.

З дисертацією можна ознайомитись у Науковій бібліотеці ім. М. Максимовича Київського національного університету імені Тараса Шевченка за адресою: 01033, Київ, вул. Володимирська, 58

Автореферат розісланий “01” вересня 2018 р..

Вчений секретар
спеціалізованої вченої ради Д 26.001.23,
доктор фізико-математичних наук,
професор



М.П. Семенько

ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

Актуальність теми. Напівпровідникові поверхнево-бар'єрні структури є основою сучасних мікроелектроніки та сонячної енергетики — галузей, розвиток яких на сучасному етапі багато в чому визначає загальний прогрес. Зокрема, незважаючи на все різноманіття існуючих типів фотоперетворювачів, ринок промислового використання належить моно- та полікристалічним сонячним елементам на основі кремнію. Загалом, кремнієві структури використовують найширше серед всіх напівпровідникових систем. Це пов'язано, насамперед, з величезними запасами даного елемента (він є другим за поширеністю у корі Землі), його нетоксичністю та високою технологічністю створення відповідних систем. Так, високошвидкісні логічні та інтегральні елементи нерідко створюються з використанням кремнієвих структур з контактом Шотки. В цьому ж самому сегменті високочастотних мікроелектронних пристроїв достатньо часто зустрічаються системи на основі арсеніду галію — матеріалу, який характеризується високою рухливістю носіїв заряду. У даній дисертаційній роботі наводяться результати дослідження процесів, що відбуваються саме в кремнієвих сонячних елементах та структурах метал-напівпровідник на основі кремнію та арсеніду галію, що і визначає її актуальність з прикладної точки зору.

Загальною задачею матеріалознавства є створення матеріалів та структур із заданими властивостями. Для її реалізації необхідне чітке розуміння процесів, які відбуваються в матеріалах за різних умов. Зокрема, умови функціонування напівпровідникових приладів нерідко передбачають наявність різноманітного радіаційного опромінення. Звичайно, вивченню радіаційно-індукованих процесів в напівпровідниках присвячено величезна кількість досліджень (що побічно свідчить про актуальність подібних робіт), проте деякі аспекти, наприклад немонотонність зміни характеристик реальних діодів Шотки при дії гамма-квантів чи причини модифікації приповерхневого шару при мікрохвильовому опроміненні, залишалися майже поза увагою. Іншим зовнішнім чинником, який може впливати на параметри напівпровідникових структур, є знакозмінні високочастотні деформації, пов'язані, наприклад з поширенням акустичних хвиль. На початок даної роботи процеси, що відбуваються в кремнієвих бар'єрних структурах фактично не вивчалися. В роботі проведено дослідження як зазначених вище радіаційно-стимульованих ефектів, так і поведінки кремнієвих структур в умовах ультразвукового навантаження, що свідчить про її актуальність з точки зору матеріалознавства.

З іншого боку, для вирішення задачі матеріалознавства необхідна розробка методів керування параметрами матеріалів та структур. Відомо, що дефекти структури є визначальними для фізичних властивостей кристалів і мають фундаментальне значення у фізиці твердого тіла. Для напівпровідникових матеріалів найпоширенішими способами впливу на дефектну підсистему є радіаційне опромінення та термообробка, які суттєво впливають на стан кристала

в цілому. Водночас, представлені результати свідчать про здатність ультразвукового навантаження навіть допорогової інтенсивності модифікувати дефекти в кремнієвих кристалах структурах, причому до переваг даного способу варто віднести вибірковість впливу саме на області з порушеннями періодичності та оборотність змін при кімнатних температурах. Тобто, дана робота є актуальною з точки зору розробки нових методів керування параметрами бар'єрних структур.

Нарешті, основними причинами змін стану точкових дефектів (ТД) у напівпровідникових кристалах під дією акустичних хвиль (АХ) вважаються вимушені коливання дислокацій, акустостимульована дифузія домішок та генерація ТД при надпороговій інтенсивності АХ. Проте в бездислокаційних матеріалах, таких як кремній, при допороговій інтенсивності ультразвуку це механізми її незастосовними для пояснення оборотних акустоіндукованих ефектів. Проведене дослідження особливостей акусто-дефектної взаємодії за цих умов та ідентифікація «акусточутливих» (тобто здатних до ефективної взаємодії з пружними коливаннями) дефектів, у тому числі і радіаційних, є актуальною задачею з наукової точки зору.

Отже, дослідження фізичних закономірностей та встановлення механізмів акусто- та радіаційностимульованих ефектів у поверхнево-бар'єрних напівпровідникових структурах є важливим для вирішення перелічених вище проблем й визначає актуальність дисертаційної роботи як з наукової, так і практичної точок зору.

Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами, грантами. Дисертаційна робота пов'язана із планами науково-дослідних робіт, які проводились в рамках держбюджетних тем та міжнародних проектів на кафедрі загальної фізики фізичного факультету Київського національного університету імені Тараса Шевченка. А саме: №01БФ051–09 «Теоретичне та експериментальне дослідження фізичних властивостей неоднорідних систем на основі матеріалів акусто-опто-електроніки та мікроелектроніки» (№ держ. реєстрації 01БФ051–09, 2001–2005рр.); №06БФ051–04 «Експериментальне та теоретичне дослідження структури та фізичних властивостей низькорозмірних систем на основі напівпровідникових структур, різних модифікацій вуглецю та композитів» (№ держ. реєстрації 0106U006390, 2006–2010рр.); №11БФ051–01 «Фундаментальні дослідження в галузі фізики конденсованого стану і елементарних частинок, астрономії і матеріалознавства для створення основ новітніх технологій» (№ держ. реєстрації 0111U004954, 2011–2015рр.); №16БФ051–01 «Формування та фізичні властивості наноструктурованих композитних матеріалів та функціональних поверхневих шарів на основі карбону, напівпровідникових та діелектричних складових» (№ держ. реєстрації 0116U004781, 2016–2018рр.) та проект УНТЦ №3555 «Дослідження та створення методів опто- акустичного контролю матеріалів» (2006–2008рр.).

Мета і завдання дослідження. Метою дисертаційної роботи є встановлення фізичних закономірностей акустоіндукованих динамічних ефектів у

кремнієвих структурах з p – n переходом та контактом Шотки, визначення механізмів впливу радіаційного опромінення та ультразвукового навантаження на процеси перенесення заряду в напівпровідникових поверхнево–бар’єрних структурах, методична розробка нових способів модифікації дефектної підсистеми кристалів з використанням ультразвуку.

Для досягнення поставленої мети вирішувалися **наступні задачі**:

- Підбір бар’єрних структур для досліджень та вибір режимів їх обробки нейтронами, γ –квантами та мікрохвильовим опроміненням.
- Дослідження закономірностей проходження струму в широкому температурному діапазоні, у тому числі і за умов ультразвукового навантаження з використанням акустичних хвиль різного типу, інтенсивності та частоти.
- Проведення порівняльного аналізу та оптимізації методів визначення параметрів напівпровідникових бар’єрних структур.
- Ідентифікація механізмів перенесення заряду як у вихідних структурах, так і в радіаційно–модифікованих; визначення характерних параметрів (висота бар’єру, фактор неідеальності, час життя неосновних носіїв заряду тощо).
- Вивчення впливу акустичного навантаження на процеси фотоелектричного перетворення в кристалічних кремнієвих сонячних елементах до та після нейтронного опромінення.
- Визначення механізмів та розробка фізичних моделей акусто– та радіаційноіндукованих ефектів.
- Дослідження впливу радіаційного опромінення та акустичного навантаження на параметри глибоких рівнів, пов’язаних з порушеннями кристалічної структури, ідентифікація основних акусто–активних дефектів.

Об’єкт дослідження – перенесення заряду в напівпровідникових бар’єрних структурах.

Предмет дослідження– вплив ультразвукового навантаження та радіаційного опромінення на процеси проходження струму та фотоелектричного перетворення у поверхнево–бар’єрних напівпровідникових структурах.

Методи дослідження. Для виконання поставлених завдань було використано комплекс технологічних, експериментальних та розрахункових методів, який включає вольт–амперні характеристики; вольт–фарадні характеристики; метод диференційних коефіцієнтів ВАХ для визначення параметрів глибоких рівнів; метод стаціонарного струму короткого замикання (SSSCC) для визначення довжини дифузії неосновних носіїв; аналітичні та чисельні методи визначення параметрів діодів Шотки; еволюційні алгоритми мінімізації функції; імпульсний метод вимірювання коефіцієнта поглинання акустичної хвилі; резонансний метод вимірювання імпедансу навантаженого акустичного перетворювача; акустоелектрична релаксаційна спектроскопія глибоких рівнів; профілометрія; метод визначення деформації приповерхневих кристалічних площин по зміні кутового положення дифракційного максимуму при трансляції зразка; контрольоване радіаційне та мікрохвильове опромінення для зміни дефектного стану зразків; метод ультразвукового навантаження.

Наукова новизна отриманих результатів. В процесі виконання дисертаційної роботи було отримано ряд нових, науково–обґрунтованих результатів, які мають важливе значення для розуміння процесів процесів перенесення заряду в поверхнево–бар’єрних структурах, у тому числі радіаційно опромінених, за умов акустичного навантаження. Наукова новизна зумовлена застосуванням нових акусто–індукованих методів керування станом дефектів у напівпровідникових структурах, а також вперше проведеними ретельними та повними дослідженнями низки фундаментальних процесів електропереносу та рекомбінації нерівноважних носіїв заряду у різних (переважно, кремнієвих) поверхнево–бар’єрних структурах в умовах керованих змін системи кристалічних дефектів, як за допомогою радіаційного опромінення, так і акустичного навантаження. Зіставлення отриманих експериментальних результатів з даними теоретичного аналізу та окремими результатами інших авторів, дозволили повністю якісно і, у більшості випадків, кількісно описати всі виявлені ефекти. Досягнутий високий рівень розуміння деталей процесів протікання струму в поверхнево–бар’єрних структурах дозволяє надійно оцінювати ефективність роботи відповідних приладів і передбачати поведінку подібних напівпровідникових пристроїв.

- Вперше виявлені та дослідженні оборотні ефекти впливу ультразвукового навантаження на електрофізичні властивості кремнієвих структур з $p - n$ –переходом та контактом метал–напівпровідник; показано, що застосування ультразвукового навантаження розширює можливості вивчення фундаментальних характеристик і параметрів подібних структур.

- Вперше проведено порівняння впливу акустичного навантаження на параметри як неопромінених, так і радіаційно–опромінених кремнієвих поверхнево–бар’єрних структур; вперше ідентифіковано основні акустоактивні радіаційні дефекти.

- Запропонована нова фізична модель акусто–активного комплексного дефекту, в рамках якої пояснено особливості виявлених акустоіндукованих ефектів.

- Вперше проведено порівняльний аналіз аналітичних, чисельних та еволюційних методів розрахунку параметрів діодів Шотки з вольт–амперних характеристик та визначено найбільш оптимальні з точки зору точності та швидкодії.

- Вперше показано доцільність застосування моделі поглинання ультразвуку Брейсфорда до пояснення динамічних акустоіндукованих ефектів в кремнієвих структурах метал–напівпровідник.

- Вперше показано взаємозв’язок характеру неопотонності дозової залежності зміни висоти бар’єру Шотки при γ –опроміненні зі ступенем неоднорідності контакту.

- Вперше досліджено вплив мікрохвильового випромінювання на параметри дефектів, розташованих у приповерхневих шарах кристалів GaAs, $6H$ –SiC та на внутрішніх границях арсенід–галієвих епітаксійних структур.

Практичне значення отриманих результатів. Отримані в роботі результати сприяють більш глибокому розумінню фізичних процесів у поверхнево-бар'єрних структурах при дії зовнішніх чинників (надвисокочастотного-, нейтронного- та гамма-опромінення, знакозмінних механічних навантажень), що дозволяє підвищити точність прогнозування реальних робочих характеристик подібних систем в залежності від умов їх функціонування. Запропоновано новий метод динамічного акустичного керування струмом напівпровідникових діодів різного типу, а саме сонячних елементів та структур з контактом Шотки. Дослідження частотних, амплітудних та температурних залежностей акустоіндукованих ефектів у бар'єрних структурах дозволяє ефективно контролювати процеси перенесення заряду. Проведене тестування та порівняльне дослідження різноманітних методів визначення параметрів діодів Шотки дозволяє вибрати найефективніший залежно від експериментальних умов вимірювання характеристик, типу структур, вимог до швидкодії. Запропоновано новий метод оптимізації вибору діапазону даних для побудови аналітичних функцій, що дозволяє підвищити точність визначення параметрів структур металл-напівпровідник. Виявлені зміни особливостей акустоіндукованих ефектів у бар'єрних структурах після опромінення можуть бути використані для створення нових сенсорів типу та дози радіації. А саме, амплітудна залежність АІ змін зворотного струму діодів Шотки дозволяє оцінити поглинуту дозу гамма-квантів, тоді як величина та знак впливу ультразвуку на фактор неідеальності та рекомбінаційний струм кремнієвих $p-n$ структур дозволяють розрізнити нейтронно- та гамма-опромінені структури.

Особистий внесок здобувача. Внесок автора у отримання наукових результатів полягає у постановці задач та визначенні методів їх вирішення, виборі об'єктів та формулюванні основних напрямків досліджень, розробці методології експериментальних досліджень та програмного забезпечення для обробки експериментальних даних. Переважна більшість експериментальних та теоретичних досліджень виконані автором особисто. 12 з 25 наукових публікацій опублікованих за темою дисертації є одноосібними роботами здобувача. У наукових працях, опублікованих зі співавторами, автору належить проведення значної частини досліджень та аналіз і узагальнення отриманих даних, інтерпретація результатів, участь у написанні наукових статей. Співавторами частини робіт ([1, 3, 4, 6, 20]) були студенти фізичного факультету Київського національного університету імені Тараса Шевченка, які виконували кваліфікаційні роботи під керівництвом здобувача. В роботах [1, 3, 4, 6, 18–20] автором здійснено підбір структур для досліджень, вибір режимів вимірювань та радіаційного опромінення, проведено переважну частину експериментальних вимірювань та аналіз механізмів перенесення заряду і впливу ультразвукових хвиль на ці процеси, підготовлено тексти статей. В роботі [1] автором запропоновано модель акустоактивного дефектного комплексу, в роботі [3] — проведено аналіз можливості застосування моделі поглинання ультразвуку внаслідок руху дислокаційних перегинів до пояснення акустоіндукованих змін

параметрів діодів Шотки. Внесок здобувача у роботу [8] визначався проведенням розрахунків в межах моделей дислокаційного поглинання ультразвуку. В роботі [12] вимірювання вольт–фарадних характеристик були проведені співробітником фізичного факультету, канд. фіз.–мат. наук Надточієм А. Б. Пошук та аналіз літературних даних щодо впливу ультразвуку на параметри напівпровідникових кристалів та структур на їх основі, а також їх узагальнення у роботах [14,23] проводилось сумісно з докт. фіз.–мат. наук Оліхом Я. М. (Інститут фізики напівпровідників ім. В. Є. Лашкарьова НАНУ). Внесок здобувача у роботу [16] визначався постановкою дослідів по вимірюванню вольт–амперних характеристик, інтерпретацією відповідних результатів (саме ця частину представлена у дисертаційній роботі), участю у написанні статті. В роботах [21,22] автор провів дослідження параметрів глибоких рівнів з використанням методу акустоелектронної релаксаційної спектроскопії, здійснив аналіз отриманих даних, взяв участь у написанні статей. Постановка наукової задачі в цих роботах, а також загальна інтерпретація результатів виконана сумісно з докт. техн. наук Конаковою Р. В.; рентгенографічні та профілометричні дослідження проводились канд. фіз.–мат. наук Литвином П. М. (обидва — Інститут фізики напівпровідників ім. В. Є. Лашкарьова НАНУ). Основна частина результатів представлялася автором особисто на вітчизняних і міжнародних конференціях та наукових семінарах кафедри загальної фізики Київського національного університету імені Тараса Шевченка.

Апробація результатів дисертації. Основні результати, викладені в роботі, доповідались на наукових семінарах кафедри загальної фізики Київського національного університету імені Тараса Шевченка і були представлені на наступних наукових конференціях: I, III, IV, V, VI та VII Українська наукова конференція з фізики напівпровідників (Одеса, Україна, 2002; Одеса, Україна, 2007; Запоріжжя, Україна, 2009; Ужгород, Україна, 2011; Чернівці, Україна, 2013; Дніпро, Україна, 2016); III міжнародная конференция «Радиационно-термические эффекты и процессы в неорганических материалах» (Томск, Россия, 2002); 1-ша та 6-та Міжнародна науково-технічна конференція «Сенсорна електроніка і мікросистемні технології СЕМСТ» (Одеса, Україна, 2004; 2014); 2004 IEEE International Ultrasonics, Ferroelectrics and Frequency Control Joint 50th Anniversary Conference (Montreal, Canada, 2004); Девятая международная научно-техническая конференция «Актуальные проблемы твердотельной электроники и микроэлектроники» (Дивноморское, Россия, 2004); 2005 та 2014 IEEE International Ultrasonics Symposium (Rotterdam, Netherlands, 2005; Chicago, USA, 2014); 2007 та 2015 International Congress on Ultrasonics (Vienna, Austria, 2007; Metz, France, 2015); MRS 2007 Spring Meeting, Symposium F: Semiconductor Defect Engineering – Materials, Synthetic Structures, and Devices II (San Francisco, USA, 2007); VI та VII Міжнародна школа-конференція «Актуальні проблеми фізики напівпровідників» (Дрогобич, Україна, 2008; 2010); XII та XIV Міжнародна конференція «Фізика і технологія тонких плівок та наносистем» (Івано–Франківськ, Україна, 2009; Буковель, Україна, 2013); Четверта

міжнародна науково–практична конференція «Матеріали електронної техніки та сучасні інформаційні технології» (Кременчук, Україна, 2010); Всеукраїнська наукова конференція «Актуальні проблеми теоретичної, експериментальної та прикладної фізики» (Тернопіль, Україна, 2012); International research and practice conference «Nanotechnology and nanomaterials» (Bukovel, Ukraine, 2013); IV міжнародна конференція «Сучасні проблеми фізики конденсованого стану» (Київ, Україна, 2015); II Всеукраїнська науково–практична конференція MEICS–2017 (Дніпро, Україна, 2017).

Публікації. За отриманими результатами опубліковано 25 наукових праць, з них 24 статті у фахових журналах і 1 у матеріалах наукової конференції.

Структура та обсяг дисертації. Дисертація складається із вступу, шести розділів, загальних висновків та списку використаних джерел. Загальних обсяг дисертації складає 351 сторінку, включаючи 123 рисунки та 31 таблицю.

ОСНОВНИЙ ЗМІСТ РОБОТИ

У вступі обґрунтовано актуальність вибраної теми, сформульовано мету і завдання дослідження, показано наукову новизну та практичну значимість отриманих результатів, а також надано інформацію стосовно зв'язку роботи з науковими темами, апробації результатів та особистого внеску здобувача.

У першому розділі стисло проаналізовані основні роботи, присвячені дослідженням взаємодії пружних хвиль з дефектами у напівпровідникових кристалах. Підкреслено, що високоінтенсивні акустичні хвилі (АХ) здатні стимулювати дифузію, перебудову та генерацію точкових дефектів у бінарних та однокомпонентних напівпровідникових кристалах, гетеросистемах та бар'єрних пристроях на їх основі, що, в свою чергу, є причиною залишкових змін електричних, механічних, оптичних та люмінесцентних властивостей. Ультразвукова обробка (УЗО) радіаційномодифікованих кристалів та структур може викликати часткове відновлення деградованих властивостей внаслідок низькотемпературного акустовідпалу. З іншого боку вказано, що дані про вплив опромінення на акусто–дефектну взаємодію в літературі відсутні. Дослідження особливостей поширення АХ та акустоелектронної взаємодії дозволяє характеризувати як власні, так і домішкові дефекти. Ультразвук (УЗ) може використовуватися як додатковий позитивний фактор впливу під час різноманітних технологічних операціях, зокрема при іонній імплантації. Виявлено, що під час поширення пружних хвиль в напівпровідникових кристалах та приладах на їх основі виникає чимало різноманітних оптичних та електрофізичних ефектів, причиною яких вважається коливальний рух дислокацій чи дія п'єзоелектричного поля. Водночас підкреслено, що на початок даної роботи динамічні акустоіндуковані ефекти в бар'єрних структурах на основі неп'єзоелектричних малодислокаційних напівпровідників фактично не досліджувалися.

У другому розділі представлені результати експериментальних досліджень вперше виявлених оборотних акустоіндукованих (АІ) ефектів у радіаційно опромінених та неопромінених кремнієвих структурах з p - n переходом (сонячних елементах, КСЕ).

На початку представлені методики дослідження параметрів бар'єрних структур за умов ультразвукового навантаження (УЗН), зокрема зосереджено увагу на схемі експерименту, яка унеможливлювала проникненню п'єзоелектричного поля у зразок (Рис. 1), методи визначення параметрів АХ та режими УЗН.

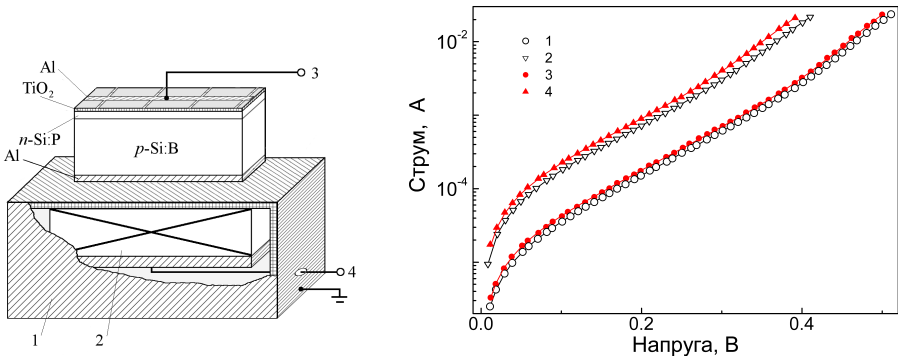


Рис. 1. Зліва — схема УЗН. 1 — екран (алюмінієва фольга, товщина 0,012 мм); 2 — п'єзоелектричний перетворювач (LiNbO_3); 3 — контакти для вимірювання ВАХ; 4 — контакти для збудження УЗ. Справа — типові ВАХ, виміряні при температурах 301 К (криві 1 та 2, кола) та 341 К (2 та 4, трикутники) за умов УЗН (2, 4, заповнені точки) та для ненавантаженого зразка (1 та 3, порожні точки) Точки — результати вимірів, лінії отримані шляхом апроксимації за формулою (1).

Експериментально виявлено, що в діапазоні $290 \div 340$ К при поширенні УЗ (частота $f_{\text{УЗ}} = 4 \div 8$ МГц, інтенсивність $W_{\text{УЗ}} \leq 0,4$ Вт/см²) в неопромінених КСЕ відбувається деградація фотоелектричних властивостей: спостерігається зменшення густини струму короткого замикання J_{sc} (до 10%), напруги холостого ходу V_{oc} (до 15%) та фактори форми ВАХ FF (до 5%). Зміни оборотні, значення параметрів після припинення УЗН та витримки зразків при кімнатній температурі протягом доби повертаються до своїх вихідних значень. Величини АІ змін слабо залежать від температури, водночас при використанні поперечних АХ зменшення параметрів більш суттєві, ніж у випадку поширення в КСЕ повздовжніх хвиль з такою $W_{\text{УЗ}}$. Останнє свідчить про те, що ефективність впливу УЗ визначається насамперед зміщеннями атомів (деформацією ґратки), а не загальною енергією коливань під час УЗН.

З метою встановлення фізичного механізму виявлених ефектів проведені дослідження поведінки електрофізичних параметрів КСЕ за умов

УЗН. Визначення параметрів проводилось шляхом апроксимації вимірюваних вольт–амперних характеристик (ВАХ) згідно з моделлю подвійного діоду:

$$J(V, T) = -J_{ph} + \frac{qn_i d}{2\tau_g} \left\{ \exp \left[\frac{q(V - JR_s)}{n_{id} kT} \right] - 1 \right\} + \frac{qn_i^2}{p_p} \sqrt{\frac{\mu_n kT}{\tau_n}} \left\{ \exp \left[\frac{q(V - JR_s)}{kT} \right] - 1 \right\} + \frac{V - JR_s}{R_{sh}}, \quad (1)$$

де J — густина струму, V — прикладена напруга, J_{ph} — густина фотогенерованого струму, n_i — концентрація власних носіїв заряду, τ_g — ефективний час життя носіїв заряду в області просторового заряду (ОПЗ), d — товщина ОПЗ, p_p — концентрація основних носіїв заряду в p -області, n_{id} — фактор неідеальності R_s та R_{sh} — послідовний та шунтуючий опори, відповідно; μ_n та τ_n — рухливість та час життя неосновних носіїв в базі діоду. При апроксимації з використанням методу диференційної еволюції (див. Рис. 1) враховувались температурні та польові залежності n_i , d , μ_n , величини τ_g , τ_n , n_{id} , R_{sh} , R_s та J_{ph} розглядалися як невідомі (шукані). Крім того, оцінка τ_n проводилася по температурній залежності струму короткого замикання.

Величини n_{id} та τ_g пов'язані з рекомбінацією в ОПЗ. Виявлені температурні залежності фактору неідеальності та часу життя в ОПЗ ($n_{id}(T) \sim T_{id}/T$, $\tau_g(T) \sim \exp(-E_{\tau g}/kT)$, де T_{id} та $E_{\tau g}$ певні характерні величини), а також їх абсолютні значення ($n_{id} > 2$, $\tau_g \approx (10^{-8} \div 10^{-7})$ с), свідчать, що для опису процесів у досліджуваних структурах доцільно застосовувати модель рекомбінації в системі спарених рівнів двох окремих дефектів (CDLR, coupled defect level recombination) [1*]. УЗН викликає оборотне зростання n_{id} (до 0,04) та зменшення τ_g (до 30%). Оборотність АІ змін та незмінність T_{id} і $E_{\tau g}$ при поширенні АХ показують, що при УЗН не відбуваються ні перебудова рекомбінаційних центрів (РЦ), ні зменшення їх концентрації. Дослідження та оцінки показали, що рекомбінація в квазі-нейтральній області може бути описана в рамках моделі Шоклі–Ріда–Хола (SRH), при цьому $\tau_n^{-1} = \sum_i N_{d,i} \sigma_{n,i} v_{th,n}$ (де кількість доданків в сумі визначається загальним числом різних РЦ, кожен з яких характеризується концентрацією $N_{d,i}$ та поперечним перерізом захоплення (ППЗ) електронів $\sigma_{n,i}$; $v_{th,n}$ — теплова швидкість електронів). При УЗН спостерігається достатньо значне (до 90%) зменшення τ_n , причому $\tau_n^{-1} \sim u_{us}^2$ (де u_{us} — амплітуда зміщень атомів при поширенні УЗ).

Було проведено дослідження впливу інтенсивного (~ 2000 Вт/м²) довготривалого (~ 15 год) освітлення на параметри КСЕ. Аналіз залишкових змін та перехідних процесів після припинення освітлення показав, що дефектами в ОПЗ та КНО, які приймають участь як у рекомбінаційних процесах, так у акусто-дефектній взаємодії є, переважно, кисневмісні преципітати (КП). Крім того, певний внесок у ці процеси пов'язаний з парами $Fe_i B_s$.

Для пояснення виявлених ефектів запропонована модель акустоактивного комплексного РЦ, який складається з двох дефектів донорного та акцепторного типів (див. Рис. 2) у випадку CDLR чи є точковим дефектом-комплексом з нееквівалентних компонент у випадку механізму SRH. При поширенні УЗ на точковий дефект дії періодична сила, амплітуда якої залежить від зміни об'єму кристалу, що припадає на один дефект $\Delta\Omega_d$ [2*]. В рамках запропонованої моделі за умов УЗН компоненти РЦ здійснюють гармонічні коливання, частота та вісь яких визначаються акустичною хвилею, тоді як амплітуди та фази залежить також і від $\Delta\Omega_d^D$ та $\Delta\Omega_d^A$ кожної з них. При цьому відстань між цими компонентами в умовах УЗН r_{us} залежить від часу

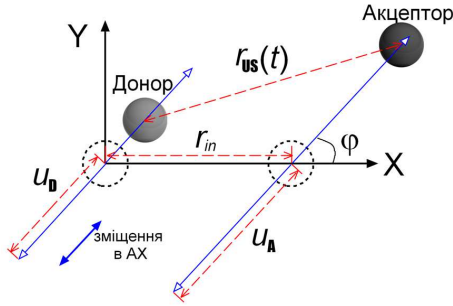


Рис. 2. Модель поведінки дефектного комплексу в умовах УЗН.

$$r_{us}(t) = \{ [r_{in} + u_A \cos(2\pi f_{us}t + \delta) - u_D \cos(2\pi f_{us}t)]^2 \cos^2 \varphi + [u_A \cos(2\pi f_{us}t + \delta) - u_D \cos(2\pi f_{us}t)]^2 \sin^2 \varphi \}^{0.5}, \quad (2)$$

де r_{in} — вихідна відстань, u_D та u_A — амплітуди коливань компонент, $u_D, u_A \sim u_{us}$, δ — зсув фаз між коливаннями компонент, φ — кут між віссю комплексу та напрямом зміщень в АХ. В рамках запропонованої моделі були проведені розрахунки АІ змін σ_n та так званого параметру зв'язку, які визначають темп рекомбінації в наближеннях SRH та CDLR. Зокрема, а) проведено аналіз ефективності УЗ впливу для різних РЦ при збудженні поперечних та повздовжніх АХ з врахуванням наявності просторово орієнтованих дислокацій та показано, що найбільші АІ зміни очікуються у випадку, коли комплекс складається з компонент міжвузольного та вакансійного типу ($\Delta\Omega_d^D \cdot \Delta\Omega_d^A < 0$) в умовах поперечних коливань; б) збільшення σ_n та зменшення параметру зв'язку має викликати зменшення τ_g та зростання n_{id} , що спостерігається на експерименті; в) для часу життя в КНО за умов УЗН $\tau_{n,us}$ справедливе співвідношення

$$\tau_{n,us}^{-1} = \tau_{n,in}^{-1} + u_{us}^2 \sum_j N_{d,j} \sigma_{n,j}^{in} K_{us,j} v_{th,n}, \quad (3)$$

де сумування здійснюється лише по акустоактивних (АА) РЦ, $K_{us,j}$ описує взаємодію УЗ з дефектом j -го типу.

Виявлено зменшення величини шунтуючого опору (до 30%) при УЗН. Спираючись на температурну залежність R_{sh} показано, що його поява може бути описана в рамках моделі дислокаційно-індукованого імпедансу [3*], а АІ зміни викликані зростанням ефективності захоплення електронів лінійними дефектами, розташованими в області p - n переходу.

Проведені в рамках дводіодної моделі чисельні розрахунки показали, що АІ зміни J_{sc} пов'язані зі зменшенням τ_n , тоді як зменшення τ_g викликає деградацію як V_{oc} , так і FF . Ефект деградації підсилюється внаслідок АІ зменшення R_{sh} та частково компенсується зростанням n_{id} .

Додатково, за допомогою методу диференціальним коефіцієнтів ВАХ [4*], проведено аналіз впливу УЗН на параметри дефектів в ОПЗ неопромінених КСЕ. Шляхом детального аналізу літературних даних проведена ідентифікація дефектів, пов'язаних з виявленими енергетичними рівнями. А саме, основними дефектами є КП (рівні $E_c - (0,46 \div 0,48)$ eВ та $E_c - 0,40$ eВ), дислокації ($E_c - 0,36$ eВ) та комплекси Fe_iO_i ($E_c - 0,36$ eВ). При УЗН відбувається незначне (близько 0,01 eВ) зменшення енергії активації та збільшується внесок у рекомбінацію більш мілких рівнів, зокрема КП, причому зміни відносних внесків різних центрів практично лінійно залежать від u_{us} .

Також представлені результати аналізу ВАХ, вимірних за умов УЗН та без нього, для КСЕ опромінених γ -квантами ^{60}Co (доза D 10^6 та 10^7 рад) та реакторними нейтронами (флюєнс $4 \cdot 10^{11}$ см $^{-2}$). Використовуючи літературні дані показано, що при нейтронному опроміненні виникають К-центри (пара C_iO_i), вакансійні кластери V_n та А-центри (пара VO_i), тоді як γ -промені мають викликати появу лише, переважно, C_iO_i та VO_i ; проведено оцінку концентрацій радіаційних дефектів та їх впливу на τ_n .

При розгляді параметрів, що характеризують рекомбінаційні процеси в ОПЗ виявлено, що а) характер температурних залежностей τ_g та n_{id} співпадає з неопроміненими структурами (Рис. 3 та 4), проте величини T_{id} та $E_{\tau g}$ інші, а отже в опромінених КСЕ в процесах CDLR приймає участь, що найменше, один інший дефект порівняно з неопроміненими; б) АІ зміни n_{id} в радіаційно модифікованих структурах більші за величиною та протилежні за знаком до АІ змін у вихідних КСЕ; в рамках моделі акустоактивного комплексного РЦ це свідчить про те, що до опромінення $\Delta\Omega_d^D \cdot \Delta\Omega_d^A > 0$, а після $\Delta\Omega_d^D \cdot \Delta\Omega_d^A < 0$; в) за умов УЗН величини T_{id} та $E_{\tau g}$ в γ -опромінених структурах оборотно змінюються, тоді як для неопромінених та нейтронно-опромінених КСЕ співпадають зі значеннями, отриманими за відсутності АХ; подібна поведінка засвідчує, що в γ -опромінених зразках відбувається акустоіндукована перебудова метастабільного дефекту, яким, найшвидше, є А-центр; В нейтронно-опромінених структурах центром, який відповідає за АІ зміни τ_g та n_{id} , є дивакансія.

Показано, що при УЗН величина τ_n^{-1} і для опромінених структур лінійно залежала від u_{us}^2 . Використовуючи співвідношення (3) та оцінені концентрації

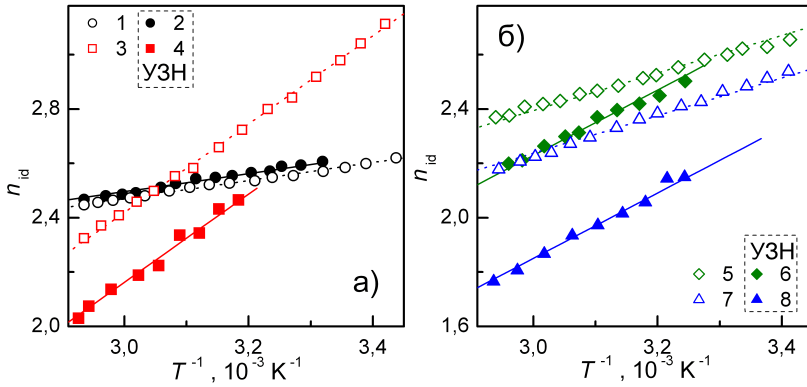


Рис. 3. Температурні залежності фактору неідеальності для неопроміненого (криві 1, 2), нейтронно-опроміненого (3, 4) та гамма-опромінених (5, 6 та 7, 8 для доз 10^6 та 10^7 рад, відповідно) зразків. Криві 1, 3, 5 та 6 отримані без УЗН, криві 2, 4, 7 та 8 відповідають УЗН (поперечні хвилі, 4,2 МГц, 0,4 Вт/см²).

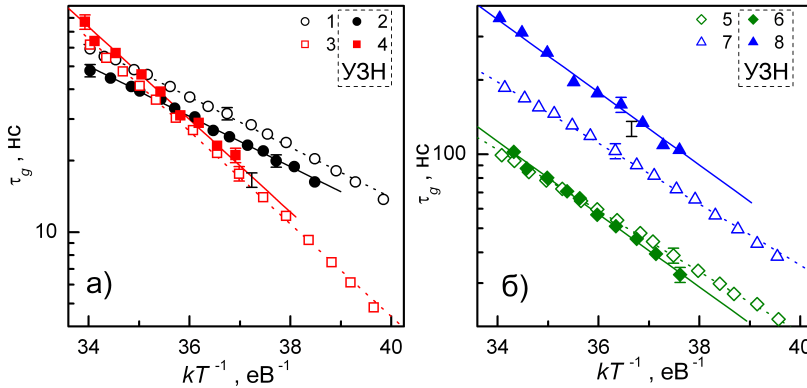


Рис. 4. Температурні залежності τ_g . Позначення кривих збігаються з Рис. 3. радіаційних дефектів, отримана система рівнянь для визначення коефіцієнтів, які характеризують акусто-дефектну взаємодію радіаційних дефектів та КП. Її розв'язок показав, що для К-центру $K_{US}^{CO} = 0$, тобто цей дефект не є акусто-активним, для дивакансії $K_{US} = (42 \pm 15) \text{ см}^2 \text{ Вт}^{-1}$, для КП $K_{US} > 5 \text{ см}^2 \text{ Вт}^{-1}$.

Повідомляється також про результати дослідження фотоелектричного перетворення в опромінених КСЕ. Виявлено, що УЗН γ -опромінених структур, як і неопромінених, викликає зменшення величини J_{ph} , що цілком узгоджується з виявленням АІ підвищенням активності рекомбінаційних центрів (зменшенням τ_n). Водночас для нейтронно-опромінених зразків АІ змін J_{ph} практично не спостерігається — Рис. 5. Встановлено, що при нагріванні за відсутності УЗН і в неопромінених, і в нейтронно-опромінених КСЕ зміна фотоструму цілком узгоджується зі змінами довжини дифузії неосновних носіїв заряду L_n (для

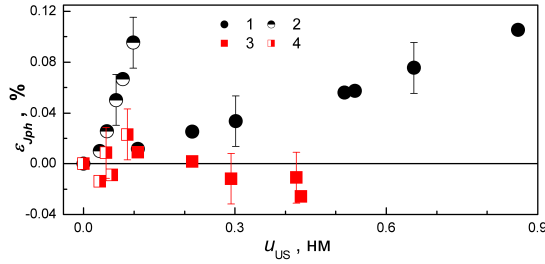


Рис. 5. Залежності AI зменшення фотоструму від амплітуди зміщень атомів в неопроміненому (1, 2) та нейтронно-опроміненому (3, 4) зразках. f_{US} , Гц: 8,0 (1, 3); 26,1 (2, 4).

визначення якої використовувався метод SSSCC). Водночас при нагріванні нейтронно-опромінених структур під час УЗН зміни J_{ph} не можуть бути пояснені лише змінами L_n на відміну від неопромінених КСЕ. Виявлені особливості свідчать про наявність додаткового механізму впливу УЗН на процеси генерації струму у нейтронно-опромінених структурах; на думку автора, причиною виявленого ефекту є AI зміна заселеності рівнів, пов'язаних з вакансійними кластерами, що викликає зменшення коефіцієнта відбивання світла.

Наведені результати підтверджують практичну перспективність динамічного акустичного керування характеристиками напівпровідникових приладів. Підкреслимо, що нерівноважний стан дефектів, який виникає при появі нерівноважних носіїв при проходженні струму, є важливим фактором підвищення ефективності акусто-дефектної взаємодії.

У **третьому розділі** представлені результати порівняльного аналізу та оптимізації методів розрахунку параметрів структур метал-напівпровідник (МН). Увага була зосереджена на визначенні струму насичення I_s (висоти бар'єру Шотки, (ВБШ) Φ_b), фактору неідеальності та послідовного опору з ВАХ, яка, як відомо, при переважанні термоелектронної емісії (ТЕ), має описуватися виразом

$$\begin{aligned}
 I &= I_s \left\{ \exp \left[\frac{q(V - IR_s)}{n_{id} kT} \right] - 1 \right\} = \\
 &= AA^* T^2 \exp \left(-\frac{q\Phi_b}{kT} \right) \left\{ \exp \left[\frac{q(V - IR_s)}{n_{id} kT} \right] - 1 \right\}, \quad (4)
 \end{aligned}$$

де A — площа діоду Шотки, A^* — ефективна стала Річардсона. Були розглянуті 10 аналітичних методів (використовують інтегрування ВАХ (метод Kaminski I), побудову різноманітних допоміжних функцій (чи їх масиву) та лінійну (методи Chung, Lee та Kaminski II) чи нелінійну (Gromov) апроксимацію або пошук екстремумів (Cibils); іноді для побудови функцій застосовують додаткові параметри (методи Norde та Bohlin) або диференційні коефіцієнти першого (Werner) або вищого порядків (Mikhelashvili)) 2 чисельних методи (метод найменших

квадратів зі статичними ваговими коефіцієнтами застосовувався безпосередньо до рівняння (4) та до його розв'язку, вираженого через W -функцію Ламберта) та 4 еволюційних алгоритми (диференційної еволюції (DE), оптимізації зграї частинок (PSO), модифікованої штучної бджолиної сім'ї (MABC) та оптимізованого викладання та навчання (TLBO)). Всі методи були застосовані до а) синтезованих за допомогою виразу (4) ідеальних BAX; б) синтезованих BAX з врахуванням можливих випадкових похибок вимірювань; в) експериментально виміряних BAX кремнієвих діодів Шотки.

Для методів Norde та Bohlin визначені оптимальні (для кремнієвих діодів Шотки при вимірюваннях в діапазоні температур $130 \div 330$ K) величини додаткових параметрів (1,8 для Norde та 1,6 і 3,5 для Bohlin). Запропоновано модифікацію методу Mikhelashvili, яка дозволяє застосовувати його в автоматичному режимі до множини BAX; вона полягає у послідовному використанні медіанного фільтру та процедури згладжування функції $\alpha(V) = d(\ln I)/d(\ln V)$ перед знаходженням положення її максимуму. Показано доцільність застосування запропонованої процедури при опрацюванні реальних BAX для підвищення точності методу. Запропоновано адаптивну процедуру вибору діапазону BAX, який використовується для побудови допоміжних функцій при застосуванні аналітичних методів визначення параметрів структур МН та показано, що вона дозволяє підвищити точність визначення параметрів (приблизно на порядок при кімнатних температурах у випадку низького рівня похибок вимірювання) і не викликає критичного збільшення часу розрахунку.

Основна задача полягала у порівнянні точності (Рис. 6 та 7) та швидкодії (Таблиця 1) визначення параметрів структур МН різними методами. Показано, що найбільша точність досягається при використанні еволюційних алгоритмів (ЕА), чисельних методів, метод Gromov з адаптивною процедурою та метод Lee. Використання функції Ламберта при застосуванні чисельних методів дозволяє зменшити помилки визначення параметрів. Проведено аналіз впливу абсолютних величин кожного з параметрів на точність визначення R_s , Φ_b та n_{id} . Зокрема показано, що ЕА дозволяють отримати найбільш коректні результати при малих (декілька Ом) значеннях R_s або високих температурах, а найбільш стійкими до величин параметрів є точності чисельних методів.

Табл. 1 — Час визначення параметрів ДШ з однієї BAX.

Метод	Час роботи, с	Метод	Час роботи, с
Norde	$(2,6 \div 3,7) \cdot 10^{-5}$	Werner	$(4,0 \div 4,5) \cdot 10^{-5}$
Cibils	$(0,2 \div 5,3) \cdot 10^{-3}$	Kaminskii I	$(4,5 \div 8,0) \cdot 10^{-5}$
Kaminskii II	$(0,3 \div 2,6) \cdot 10^{-3}$	Bohlin	$(4,0 \div 6,3) \cdot 10^{-5}$
Lee	$(0,2 \div 3,6) \cdot 10^{-3}$	Gromov	$2,2 \cdot 10^{-2}$
Cheung	$(2,0 \div 3,2) \cdot 10^{-5}$	Mikhelashvili	$(2,9 \div 4,7) \cdot 10^{-5}$
Ordinary LS	$1,8 \div 460$	Lambert LS	$7,6 \div 540$
DE	$0,36 \div 0,73$	PSO	$0,14 \div 0,35$
MABC	$5,7 \cdot 10^{-2} \div 0,20$	TLBO	$5,4 \div 19,2$

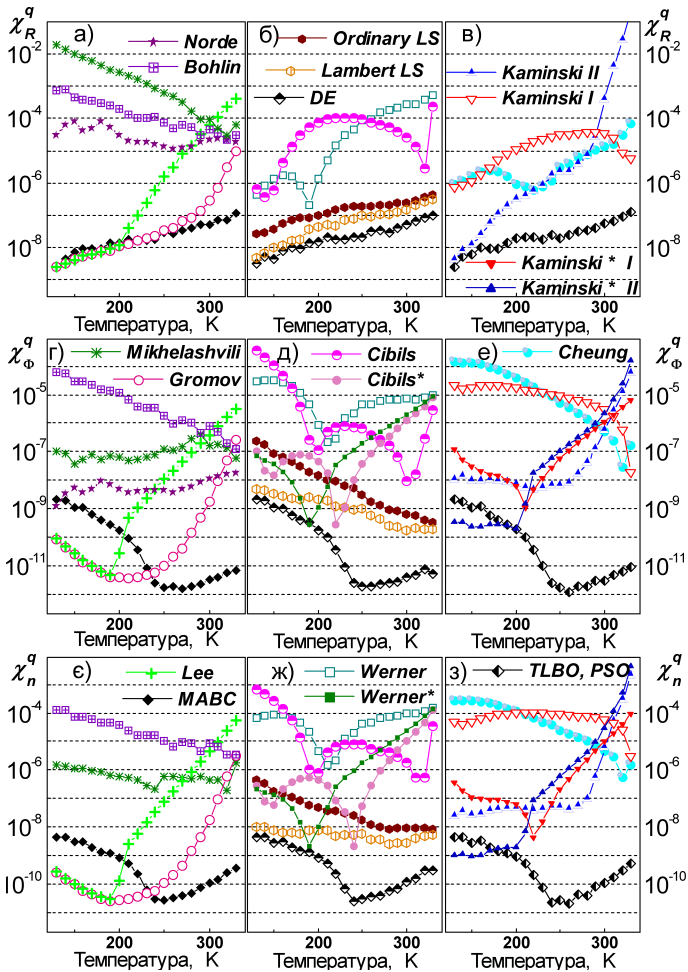


Рис. 6. Температурні залежності відносних похибок визначення R_s (а – в), Φ_b (г – е) та n_{id} (є – з) при застосуванні методів до ідеальних синтезованих ВАХ.

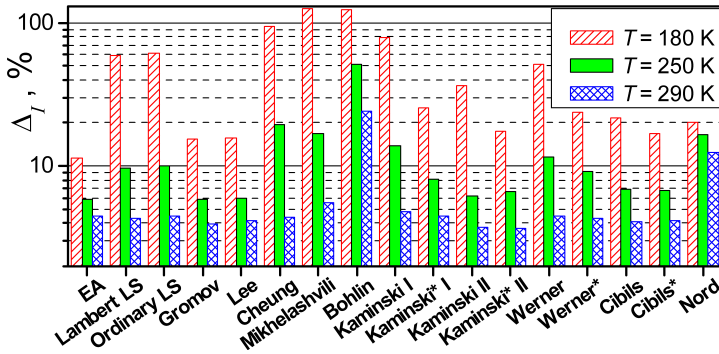


Рис. 7. Середні значення відносного відхилення розрахованих значень сили струму від експериментальних даних.

Аналіз залежності точності визначення параметрів від випадкових похибок вимірювань показав, що практично для всіх методів а) відносні похибки визначення R_s , Φ_b та n_{id} лінійно залежать як від величин відносних похибок вимірювання напруги, так і сили струму, причому в останньому випадку залежність слабша; б) помилки визначення Φ_b та n_{id} значно менші, ніж помилки визначення R_s за тих самих умов вимірювання.

Важливо підкреслити, що представлені результати огляду, тестування та порівняльного аналізу методів визначення параметрів діодів Шотки можуть бути корисними під час досліджень та розробок пристроїв з контактом МН на базі не лише кремнію, але й інших напівпровідників.

У четвертому розділі представлені результати досліджень номонотонного впливу γ -опромінення на структури $Al-n-n^+-Si-Al$ з контактом Шотки та динамічних АІ ефектів при кімнатних температурах. Основними завданнями, які вирішувались під час цих досліджень, полягали у з'ясуванні механізмів перенесення заряду при прямому та зворотному зміщеннях в широкому діапазоні температур ($130 \div 330$ K) та шляхів модифікації внаслідок γ -опромінення, а також вивчення вперше виявлених оборотних АІ ефектів в МН структурах.

Виявлено, що для неопромінених структур спостерігається поява при низьких ($T < 210$ K) температурах додаткової компоненти струму, збільшення ВБШ при зростанні температури (Рис. 8) та зменшення фактору неідеальності:

$$n_{id} = 1 + \frac{T_0}{T}, \quad (5)$$

де $T_0 = 12$ K. Показано, що всі виявлені особливості можна пояснити з точки зору моделі ТЕ через неоднорідний контакт [5*]. Про це свідчать лінійність залежностей Φ_b та $(n_{id}^{-1} - 1)$ від $q/2kT$, Φ_b від n_{id} , збіг експериментально визначеного значення T_0 та відомого з літератури значення A^* ($112 \text{ A} \cdot \text{cm}^{-2} \cdot \text{K}^{-2}$) з відповідними величинами, розрахованими в рамках цієї моделі на основі температурної залежності ВБШ. Визначені середня висота бар'єру Шотки Φ_b^0 та її стандартне відхилення σ_Φ : $0,872 \pm 0,004$ В та $0,099 \pm 0,001$ В при ($130 \div 220$) K

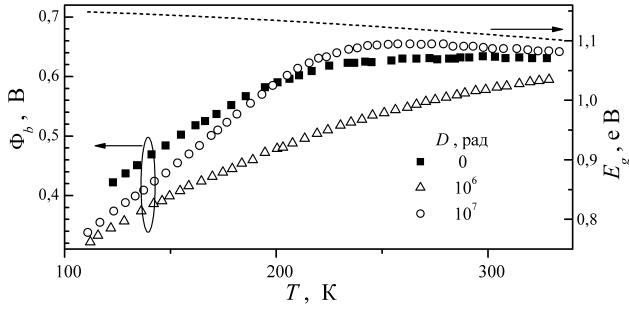


Рис. 8. Температурні залежності висоти бар'єру структур Al– n – n^+ –Si–Al. Пунктирна лінія — залежність ширини забороненої зони кремнію.

та $0,663 \pm 0,003$ В та $0,040 \pm 0,005$ В при $(230 \div 330)$ К, відповідно. Визначено середнє значення висоти бар'єру Шотки в області зі знизеним бар'єром (в області патчу) 54 ± 4 мВ.

Показано, що при зворотних зміщеннях струм I_R складається з двох компонент — Рис. 9,а). Перша з яких, I_{TE} , пов'язана з ТЕ процесами через неоднорідний контакт: $I_{TE} \sim T^2 \exp(-E_{TE}/kT)$, $E_{TE} \sim V_R^{2/3}$, V_R — зворотна напруга. Друга, I_{FN} , — не залежить від температури і пов'язана з процесами тунелювання за участю центру з енергетичним положенням $E_c - (120 \pm 5)$ меВ, пов'язаним, найімовірніше, з міжвузольним атомом вуглецю C_i . Внесок ТЕ складової зростає при підвищенні T та зменшенні V_R .

Досліджено також структури Al– n – n^+ –Si–Al, опромінені γ -квантами ^{60}Co з $D = 10^6$ рад та $D = 10^7$ рад. Виявлено, що ВБШ немонотонно змінюється зі збільшенням D — Рис. 8. Зауважимо, що в літературі і раніше повідомлялося подібні немонотонні дозові залежності Φ_b , причому зустрічаються повідомлення про немонотонності двох типів («спад-зростання» чи «зростання-спад»). При зворотному зміщенні в опроміненіх структурах з'явилась додаткова компонента струму, I_{MPT} , внесок якої зростає з підвищенням дози. Температурні та польові залежності дозволили ідентифікувати I_{MPT} як

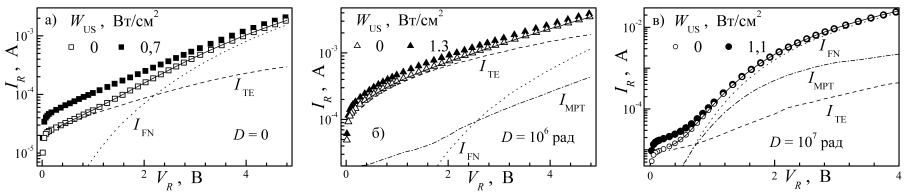


Рис. 9. Зворотні ВАХ структур Al– n – n^+ –Si–Al з різним ступенем опромінення. $T = 305$ К. Заповнені та порожні точки відповідають вимірам за умов УЗН та без нього, відповідно. $f_{US} = 9,6$ МГц. Розривні відображають окремі складові зворотного струму для ненавантажених структур, суцільні — їх суму.

струм, пов'язаний з тунельною багатофононною іонізацією глибоких домішко-вих центрів [6*]. Крім того, для структур з $D = 10^7$ рад, на відміну від меншої дози, суттєво зріс струм I_{FN} .

Показано, що при $D = 10^6$ рад домінуючим механізмом перенесення заряду при $120 \div 240$ К як при прямому зміщенні, так і при зворотному стає тунелювання за участю рівнів у забороненій, що пов'язано з утворенням радіаційних дефектів (РД). При $T > 260$ К основним механізмом залишається ТЕ через неоднорідний контакт, проте значення Φ_b^0 та σ_Φ зростають до 0,772 В та 0,1 В, відповідно. Поява при низьких температурах додаткового струму, як і для неопромінених структур, пов'язана з ефективним проходженням носіїв через області зниженого бар'єру, причому загальна площа патчів не змінилась, проте зросла висота бар'єру (з 54 до 74 мВ). Причиною змін ВБШ може бути накопичення на інтерфейсній границі РД акцепторного типу. Причиною появи патчів є лінійні дефекти; збільшення σ_Φ пов'язане з радіаційно-підси-леним дислокаційним ковзанням, яке викликає а їх часткове перегруповання з утворенням більших за розміром скупчень. Збільшення впливу патчів маскує зростання ВБШ за їх межами і викликає ефективне зменшення висоти бар'єру, яка визначається безпосередньо з ВАХ (Рис. 8).

При збільшенні дози до 10^7 рад тунельний струм стає переважаючим не лише при зворотному зміщенні практично у всьому дослідженому температур-ному інтервалі, але й при прямому зміщенні при $T = 150 \div 220$ К. При вищих температурах ($T = 260 \div 330$ К) прямий струм пов'язаний як з тунелюван-ням, так і з ТЕ процесами через однорідний бар'єр висотою близько 710 мВ. Це пов'язано з суттєвим збільшенням РД та ефективним гетеруванням патчами від'ємно заряджених дефектів. Останнє призводить до а) того, що патчі по-чали виконувати роль тунельних шунтів і перестали впливати на процеси ТЕ. б) зменшення Φ_b в однорідній області, проте ефективна ВБШ, яка визначається безпосередньо з ВАХ, збільшилась порівняно з $D = 10^6$ рад. Тобто характер немонотонності залежності $\Phi_b(D)$ залежить від ступеня неоднорідності: для переважної площі контакту області має місця «зростання–спад», проте ефект може маскуватися внаслідок впливу патчів.

Повідомляється про виявлені оборотні зміни характеристик структур $Al-n-n^+-Si-Al$ під дією УЗН при $T = 305$ К. Так УЗН викликає зменшення ВБШ (Рис. 8,а), причому а) залежність $\Phi_b(W_{US})$ в неопромінених структурах має пороговий характер; б) після γ -опромінення ефективність впливу УЗ зни-жується і змінюється характер амплітудної залежності; в) зі збільшення D зростають величини АІ змін. Показано, що в неопромінених структурах змен-шення ВБШ пов'язане зі зміною рівень нейтральності інтерфейсних станів внаслідок іонізації дефектів на границі розділу, викликане АІ коливаннями дис-локаційних відрізків. Опромінення викликає а) закріплення сегментів лінійних дефектів внаслідок гетерування РД; б) появу АА точкових РД (А–центри, дива-кансії) що і спричинює зміну механізму акусто–дефектної взаємодії. Незначні АІ зміни фактору неідеальності спостерігаються лише у випадку, коли $n_{id} > 1,1$

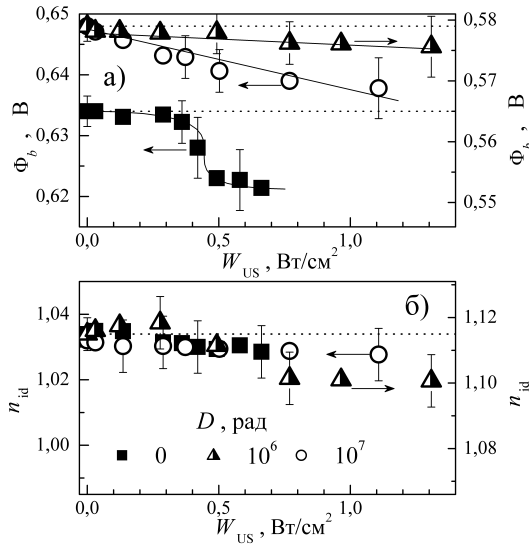


Рис. 10. Залежності висоти бар'єру Шотки (а) та фактору неідеальності (б) від інтенсивності УЗ для структур $\text{Al}-n-n^+-\text{Si}-\text{Al}$ з різним ступенем опромінення. $T = 305 \text{ K}$. $f_{\text{US}} = 9,6 \text{ МГц}$. Горизонтальні пунктирні лінії відповідають значенням параметрів, виміряних без УЗН.

(Рис. 8,б), що пов'язано з впливом УЗ та стан патчів внаслідок взаємодії з РД, захопленими в областях неоднорідності.

За умов УЗН спостерігається збільшення (до декількох десятків відсотків) величини зворотного струму — Рис. 9. Ефект послаблюється зі збільшенням зміщення, амплітудна залежність як для неопромінених, так і опромінених структур аналогічна АІ змінам ВБШ. Останнє може бути використано для створення сенсору γ -опромінення, робота якого ґрунтуватиметься на вимірюванні АІ змін величини I_R хоча б при двох значеннях W_{US} , одне з яких більше, а інше менше порогу для неопроміненого зразка. Відношення отриманих величин дозволить зробити висновок про сам факт опромінення, а безпосереднє значення зміни при більшій інтенсивності УЗ залежить від дози. Показано, що АІ зміни I_R пов'язані з впливом пружних хвиль лише на ТЕ складову, тоді як незмінність при УЗН складових струму, пов'язаних з прямим та багатофононним тунелюванням, свідчить що відповідні дефекти (зокрема C_i) не є акустоактивними.

У **п'ятому розділі** представлені результати досліджень оборотних АІ ($f_{\text{US}} = 4,1, 8,4$ та $27,8 \text{ МГц}$) змін параметрів діодів Шотки $\text{Mo}/n-n^+-\text{Si}$ в широкому ($130 \div 330 \text{ K}$) температурному діапазоні. Зауважимо, що до початку роботи бар'єрні структури на основі малодислокаційних неп'єзоелектричних напівпровідникових кристалів залишалися поза увагою науковців з точки зору дослідження низькотемпературних АІ ефектів.

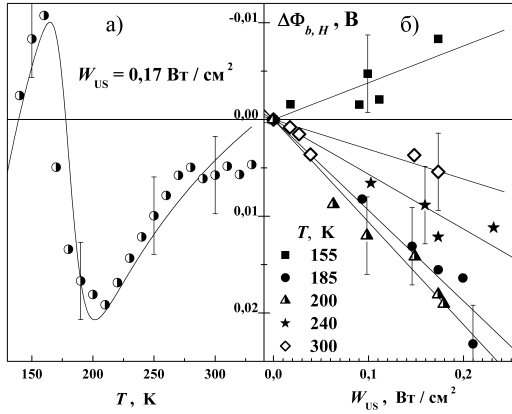


Рис. 11. Залежності АІ змін висоти бар'єру високотемпературної компоненти струму від температури (а) та інтенсивності введенного УЗ (б). $f_{US} = 4,1$ МГц.

Апроксимація (метод МАВС) прямих гілок ВАХ проводилася відповідно до виразу

$$I = I_{s,H} \left[\exp \left(\frac{qV}{n_{id,H}kT} \right) - 1 \right] + I_{s,L} \left\{ \exp \left[\frac{q(V - IR_s)}{n_{id,L}kT} \right] - 1 \right\}, \quad (6)$$

тобто струм складається з високотемпературної компоненти (ВТКС, перший доданок), яка при низьких температурах переважала лише при великих зміщеннях та низькотемпературної (НТКС, другий доданок), яка спостерігалася лише при $T < 220$ К. Показано, що перенесення заряду відбувається відповідно до моделі ТЕ через неоднорідний контакт, причому для опису ВБШ за межами патчів (пов'язаного з ВТКС) доцільно застосовувати наближення подвійного розподілу Гауса [7*]:

$$\Phi_{b,H} = -\frac{kT}{q} \ln \left[\varrho_1 \exp \left(-\frac{q\Phi_{b,1}^0}{kT} + \frac{q^2\sigma_{\Phi,1}^2}{2k^2T^2} \right) + \varrho_2 \exp \left(-\frac{q\Phi_{b,2}^0}{kT} + \frac{q^2\sigma_{\Phi,2}^2}{2k^2T^2} \right) \right], \quad (7)$$

ϱ_1 , ϱ_2 — вагові коефіцієнти кожного з розподілів. Виявлено, що для ВТКС ультразвук викликає оборотні збільшення фактору неідеальності та зміни ВБШ, величина і знак яких залежить від температури — Рис. 11. Розрахунки, проведені відповідно до моделі [3*, 7*] показали, що за умов УЗН відбувається зростання $\Phi_{b,1}^0$ (від 780 мВ до, наприклад при $f_{US} = 4,1$ МГц, $W_{US} = 0,17$ Вт/см², 810 мВ), $\Phi_{b,2}^0$ (від 1100 до 1200 мВ), $\sigma_{\Phi,1}$ (від 20 до 50 мВ), $\sigma_{\Phi,2}$ (від 120 до 13 мВ) та зростання внеску другого розподілу (в чотири рази). Аналіз НТКС показав, що УЗН викликає зміни ВБШ в області патчів, які немонотонним чином залежать від W_{US} , зростання (від від 0,2 до 2 мм⁻²) ефективної густини патчів та зменшення (від $2,7 \cdot 10^{-5}$ до $2,5 \cdot 10^{-5}$ м^{2/3}·В^{1/3}) величини $3(R_p^2\Delta_p/4)^{1/3}$, де Δ_p та R_p — зниження висоти бар'єру в області

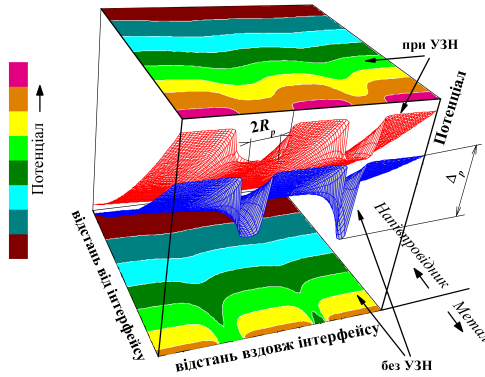


Рис. 12. Схематичне зображення просторового розподілу поверхневого потенціалу що відображає різницю між випадком УЗН (верхня площина та верхня контурна поверхня) та його відсутністю (нижня площина та нижня контурна поверхня). Рисунок зроблено у припущенні, що наявні два патчі. При розрахунку потенціальних поверхонь була використана формула (1.5.3) з [5*]. патча та його розмір, відповідно. Основні виявлені особливості впливу УЗН якісно показані на Рис.12.

Проведено аналіз можливих механізмів акусто-дефектної взаємодії і показано, що температурні та частотні залежності АІ змін в структурах $\text{Mo}/n - n^+ - \text{Si}$ (Рис.13) можуть бути пояснені в рамках моделі Брейсфолда [8*], яка передбачає акстостимульовану дифузію перегинів лінійних дефектів. Зокрема, залежності зміни ВБШ описуються виразом

$$\Delta\Phi_{b,H}(f_{us}, T) \sim \frac{f_{us}}{T} \frac{(f_{us}/f_k) \exp\left(\frac{W_k}{kT}\right)}{1 + (f_{us}/f_k)^2 \exp\left(\frac{2W_k}{kT}\right)} W_{us}, \quad (8)$$

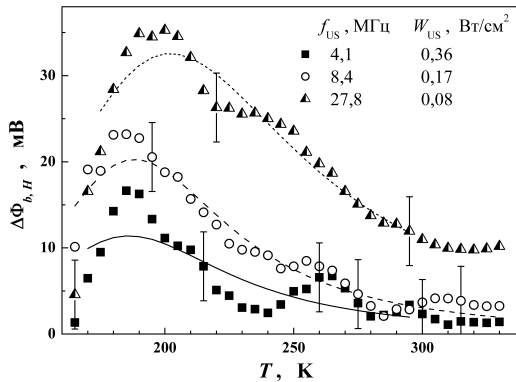


Рис. 13. Температурні залежності АІ змін ВБШ при УЗН на різних частотах. Точки — експеримент, лінії — апроксимація згідно з формулою (8).

де W_k — енергія активації дифузії, а параметр f_k пов'язаний з середньою довжиною дислокаційного сегменту та абсолютним значенням коефіцієнту дифузії. В досліджених структурах ці дефекти пов'язані з патчами, визначені в рамках моделі величини становлять $W_k = (90 \pm 10)$ меВ та $f_k = (3 \pm 2) \cdot 10^9$ Гц.

Проведені дослідження зворотного струму показали, що а) перенесення заряду пов'язане з процесами ТЕ та тунелюванням, стимульованим фононами, носіїв з електронних станів поблизу границі розділу (PAT) [9*] і може бути описане виразом

$$I_R = I_{TE} + I_{PAT} = P_t I_0 T^2 \exp\left(-\frac{q\Phi_b}{kT}\right) \left[1 - \exp\left(-\frac{V_s}{kT}\right)\right] + \frac{P_t q^2 F_m A N_{ss}}{\sqrt{8m^* \epsilon_t}} \left(1 - \frac{\gamma}{\gamma_1}\right)^{1/2} \exp\left\{-\frac{4\sqrt{2m^*} \epsilon_t^{3/2} (\gamma_1 - \gamma)^2}{3qF_m \hbar} [\gamma_1 + \frac{1}{2}\gamma]\right\}$$

$$\gamma_1 = (1 + \gamma^2)^{1/2}, \quad \gamma = \frac{a_{e-ph} \hbar \omega_{ph}^2 \sqrt{2m^*}}{qF_m \sqrt{\epsilon_t}} \left\{ \frac{\exp\left(\frac{\hbar \omega_{ph}}{kT}\right) + 1}{\exp\left(\frac{\hbar \omega_{ph}}{kT}\right) - 1} \right\},$$

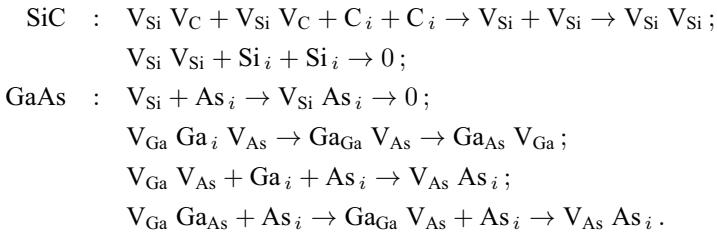
де P_t — ймовірність тунелювання через діелектричний прошарок, N_{ss} — густина заповнених рівнів поблизу інтерфейсу, $\hbar \omega_{ph}$ — енергія фонону, a_{e-ph} — константа електрон-фононної взаємодії, ϵ_t — глибина залягання рівнів, F_m — напруженість електричного поля на границі розділу МН; б) ВБШ та ϵ_t зменшуються при зростанні зворотної напруги ($\Phi_b = \Phi_{b0} - \alpha_F F_m$, $\epsilon_t = \epsilon_{t0} - \beta_F F_m^{1/2}$), що пов'язано з впливом інтерфейсних станів [5*] та ефектом Пула-Френкеля. в) за умов УЗН зареєстроване оборотне зростання I_R , викликане АІ зменшенням параметрів — див. Таблицю 2; г) причиною появи рівнів можуть бути кластери позитивно заряджених дефектів, а АІ змін I_{PAT} — модифікація розміру кластера, викликана локальне підвищення температури скупчення дефектів в акустичному полі [2*].

Табл. 2 — Параметри, визначені для структур Мо/ $n - n^+$ -Si зі зворотних гілок ВАХ за умов УЗН та без нього

$W_{us},$ Вт/см ²	$f_{us},$ МГц	$\Phi_{b0}(0),$ мВ	$\alpha_F,$ нм	$\epsilon_{t0},$ меВ	$\beta_F \cdot 10^5,$ еВ·м ^{1/2} ·В ^{-1/2}	$N_{ss},$ 10 ¹¹ см ⁻²
0	—	960 ± 10	66 ± 7	610 ± 10	10,5 ± 0,3	5,3 ± 0,7
0,17	8,4	870 ± 10	51 ± 5	540 ± 10	8,1 ± 0,5	1,2 ± 0,2
0,65	4,1	790 ± 10	36 ± 7	520 ± 10	7,1 ± 0,5	0,8 ± 0,2

У шостому розділі представлені результати досліджень необоротних змін в структурах на основі арсеніду галію, викликаних мікрохвильовою (МХО) та ультразвуковою (УЗО) обробками, а також акустувідпалу γ -опромінених кремнієвих структур метал-окис-напівпровідник (МОН).

Розглянуто вплив МХО (частота 2,45 ГГц, питома потужність 1,5 Вт/см², час обробки — до 80 с) на параметри глибоких центрів, розташованих у приповерхневій області монокристалів n -6H-SiC та n -GaAs, а також арсенід галієвих епітаксійних структур за допомогою методу акустоелектричної релаксаційної спектроскопії. Шляхом порівняння отриманих величин енергетичного положення рівнів з літературними даними проведено ідентифікацію відповідних дефектів у приповерхневому шарі монокристалів та на границі розділу епітаксійних структур. Зокрема до опромінення виявлені комплекси вакансійного типу: в n -6H-SiC $V_{Si}V_C$ (положення рівня $E_c - 0,33$ eВ), в n -GaAs V_{As} ($E_c - 0,32$ eВ) та $V_{Ga}Ga_iV_{As}$ ($E_c - 0,49$ eВ), в n - n^+ -GaAs $V_{Ga}V_{As}$ ($E_c - 0,24$ eВ), $V_{As}As_i$ ($E_c - (0,43 - 0,46)$ eВ) та $V_{Ga}Ga_{As}$ ($E_c - 0,40$ eВ). Внаслідок мікрохвильового опромінення біля поверхні збільшується концентрація міжвузольних атомів та відбуваються перетворення в дефектній підсистемі внаслідок їх взаємодії з вихідними дефектами:



Крім того, після МХО спостерігаються зміни (в декілька разів) поперечного перерізу захоплення електронів, які пов'язані зі зміною напруженості електричного поля в околі дефектів. Отримані результати щодо зміни параметрів дефектів корелюють з вимірами радіуса кривизни структур та деформації в приповерхневому шарі. Зокрема, внаслідок МХО відбувається збільшення ступеню опуклості монокристалів, а наявність напруг сприяє радіаційно стимульованим дислокаційним реакціям.

Також досліджено вплив УЗО ($f_{US} = (4,1 \div 30)$ МГц, $W_{US} = (0,3 \div 3)$ Вт/м², час обробки $t_{UST} = (5 \div 15)$ год) на параметри структур Au-TiB_x- n - n^+ -GaAs, виготовлених по технології з інтегральним тепловідведенням (кожен зі зразків містив декілька десятків окремих діодів Шотки). Виявлено, що при $W_{US} < 2,5$ Вт/м² УЗО викликає зменшення розкиду ВБШ, фактору неідеальності та величини зворотного струму (Рис. 14) діодів Шотки, виготовлених в єдиному технологічному процесі. Ефект пов'язаний акусто-стимульованою дифузією точкових дефектів, яка призводить до згладжування локальних неоднорідностей границі розділу. Зі збільшенням частоти УЗО інтенсифікуються процеси перебудови дефектів, що відображається у зміні характеристичного параметру тунельної компоненти зворотного струму. При перевищенні інтенсивністю УЗО порогу ($(2,5 \div 3,0)$ Вт/м²) спостерігається зменшення Φ_b та зростання n_{id} і зворотного струму внаслідок підсилення ТЕ складовою, що пов'язано з АІ генерацією дефектів.

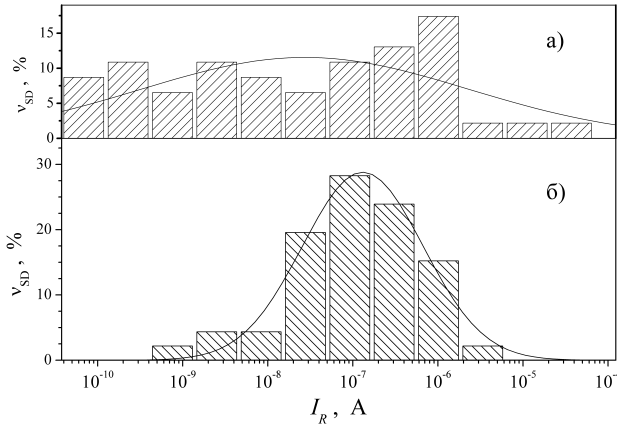


Рис. 14. Порівняльні розподіли величини зворотного струму (при $V_R = 2$ В) для структур $\text{Au-TiB}_x\text{-n-n}^+\text{-GaAs}$ до УЗО (а) та після (б). $W_{\text{US}} = 1,8 \text{ Вт/см}^2$, $f_{\text{US}} = 4,1 \text{ МГц}$, $t_{\text{UST}} = 10$ год. По вертикалі відкладена частка діодів, для яких струм знаходиться у відповідному діапазоні. Загальна кількість діодів — 40. Лінії — апроксимація відповідно до розподілу Гауса. Середні значення, А: $(2,8 \pm 0,2) \cdot 10^{-8}$ (а), $(1,31 \pm 0,01) \cdot 10^{-7}$ (б). Дисперсія: 9 ± 2 (а), $3,3 \pm 0,2$ (б).

У шостому розділі також повідомляється про результати досліджень, спрямованих на з'ясування можливості відновлення характеристик $\text{Si-SiO}_2\text{-Au}$, деградованих внаслідок γ -опромінення ($D = 5 \cdot 10^7$ рад). Виявлено, що використання подібних високих доз суттєво змінює процеси перенесення заряду в МОН-структурах — Рис. 15. Показано, що при малих прямих зміщеннях переважаючим стає струм, обмежений просторовим зарядом, для якого

$$I = I_0 V^{m_F}, \quad (10)$$

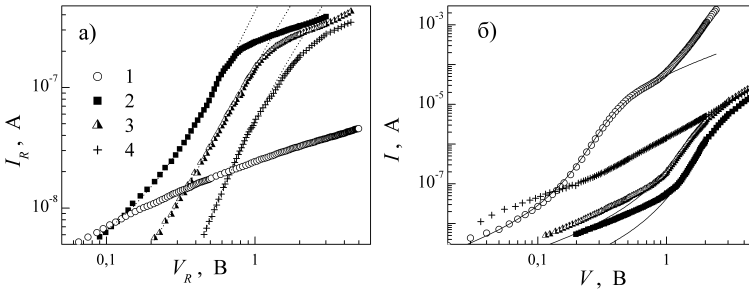


Рис. 15. Зворотні (а) та прямі (б) ВАХ структур $\text{Si-SiO}_2\text{-Au}$ до (криві 1) та після (2–4) опромінення γ -квантами. t_{UST} , хв: 0 (2), 30 (3), 60 (4). $T = 300$ К. Точки — експеримент, лінії — апроксимація за формулами (4) (суцільні) та (11) (пунктир).

причому I_0 залежить від концентрації пасток N_t ($I_0 \sim 1/N_t^{m_F-1}$), диференціальний показник ступеня m_F відображає енергетичний розподіл їх рівнів [10*]. Поява даної компоненти струму пов'язана з утворенням ненасичених зв'язків на границі Si-SiO₂ (P_b -центрів). Накопичення P_b -центрами від'ємного заряду на інтерфейсі також викликає зменшення ТЕ складової струму. Опромінення також є причиною появи E' -центрів (вакансій кисню), що викликає появу при зворотному зміщенні струму втрат, пов'язаного з тунелюванням по пасткам, для якого

$$I = I_{0,\text{TAT}} (U_d + V_R) \exp\left(-\frac{R_{\text{TAT}}}{F_m}\right), \quad (11)$$

де параметр $I_{0,\text{TAT}}$ пропорційний концентрації пасток. УЗО ($f_{\text{US}} = 4$ МГц, $W_{\text{US}} = 2$ Вт/м², $t_{\text{UST}} = (0,5 \div 1)$ год) викликає зменшення концентрації E' -центрів ($I_{0,\text{TAT}}$ зменшується в ~ 25 разів) та P_b -центрів (I_0 зростає в ~ 30 разів), а також звуження енергетичного спектру останніх (m_F змінюється з 1,3 до 1,8). Аі ефекти пов'язані з акустостимульованою дифузією атомів кисню та водню, причому ефективність пасивації останніми ненасичених зв'язків залежить від рівня механічних напруг в околі дефекту.

Основні результати представленої роботи полягають у наступному.

1. Вперше експериментально досліджено вплив ультразвукового навантаження на параметри монокристалічних кремнієвих сонячних елементів у діапазоні температур 290 ÷ 340 К та виявлена оборотна акустоіндукована деградація фотоелектричних властивостей, пов'язана зі зменшенням часу життя носіїв заряду в акустичному полі. Виявлено, що в умовах акустичного навантаження збільшується внесок у рекомбінаційні процеси більш мілких рівнів, а ефективність взаємодії ультразвукових хвиль з точковими дефектами зростає з підвищенням частоти пружних коливань. Запропонована якісна модель акустоактивного комплексного дефекту, в рамках якої пояснено особливості акустоіндукованих ефектів. Досліджено можливу роль різних комплексів у визначенні властивостей структур та показано, що саме кисневмісні преципітати ефективно впливають на процеси рекомбінації та беруть участь у акусто-дефектній взаємодії. Виявлено ефект акустоіндукованого зменшення шунтуючого опору та запропоновано його пояснення в межах моделі дислокаційно-індукованого імпедансу.

2. Вперше досліджено вплив ультразвукового навантаження на параметри кремнієвих структур з p - n переходом, які були опромінені реакторними нейтронами та γ -квантами ⁶⁰Со. Виявлено, що в опроміненіх структурах, порівняно з неопроміненіми, спостерігається підвищення ефективності акустоіндукованого зменшення шунтуючого опору та часу життя неосновних носіїв заряду в базі діоду. З'ясовано, що акустоіндуковані оборотні зміни фактору неідеальності та часу життя носіїв в області просторового заряду мають різний знак в опроміненіх та неопроміненіх структурах. Встановлено, що виявлені ефекти в

нейтронно–опромінених діодах пов’язані зі впливом ультразвуку на стан дивакансій, тоді як в гамма–опромінених діодах основним акустоактивним центром є комплекс вакансії та міжвузольного кисню. Водночас виявлено, що комплекс з міжвузольного вуглецю та міжвузольного кисню практично не приймає участі в акусто–дефектній взаємодії.

3. Проведено порівняльний аналіз та тестування 16 основних відомих методів визначення параметрів діодів Шотки з вольт–амперних характеристик. Спираючись на результати тестування методів на експериментальних та синтезованих ВАХ, запропоновано шляхи оптимізації методів Nord, Bohlin та Mikhelashvili з метою збільшення точності розрахунку. Запропоновано адаптивну процедуру для оптимізації вибору діапазону ВАХ, який використовується для побудови допоміжних функцій при застосуванні аналітичних методів визначення параметрів структур метал–напівпровідник та показано, що вона дозволяє суттєво (приблизно на порядок при кімнатних температурах у випадку низького рівня похибок вимірювання) підвищити точність визначення параметрів і не викликає критичного збільшення часу, необхідного для розрахунків.

4. Показано, що найбільш придатними методами з точки зору точності визначення параметрів є еволюційні алгоритми (особливо MABC завдяки найменшому часу розрахунку), метод Gromov з адаптивною процедурою та метод Lee. Показано, що використання функції Ламберта при чисельному визначенні параметрів діодів Шотки дозволяє зменшити похибки визначення та вплив на них інших чинників; з іншого боку, час роботи алгоритму зростає. Проаналізовано залежності точностей визначення послідовного опору, висоти бар’єру Шотки та фактора неідеальності від величин параметрів та рівня випадкових помилок вимірювання вольт–амперних характеристик.

5. Проведено експериментальне дослідження прямих і зворотних вольт–амперних характеристик структур $\text{Al}-n-n^+-\text{Si}-\text{Al}$ з бар’єром Шотки в діапазоні температур $130 \div 330$ К. Виявлено, що при підвищенні температури спостерігається збільшення висоти бар’єру та зменшення фактору неідеальності. Показано, що отримані результати можна пояснити у рамках моделі термоелектронної емісії через неоднорідний контакт у всьому діапазоні температур. Показано, що при низьких температурах ($T < 220$ К) суттєвим стає проходження заряду через області зі зниженим бар’єром і визначено середнє значення висоти бар’єру Шотки в цих областях – 54 ± 4 мВ. Виявлено, що при зворотному зміщенні в структурах $\text{Al}-n-n^+-\text{Si}-\text{Al}$ перенесення заряду відбувається як внаслідок термоелектронної емісії через неоднорідний бар’єр, так і завдяки процесам прямого тунелювання через глибокий центр, яким, імовірно, є міжвузольний атом вуглецю.

6. Проведено експериментальне дослідження впливу ^{60}Co γ –випромінювання ^{60}Co на електрофізичні параметри структур $\text{Al}-n-n^+-\text{Si}-\text{Al}$. Показано, що радіаційне опромінення суттєво підсилює процеси тунелювання носіїв заряду як при прямому зміщенні, так і при зворотному. Встановлено, що при прямому зміщенні тунельний механізм перенесення струму стає основним в

низькотемпературній області ($T < 250$ K), а при зворотному — з'являється компонента струму, пов'язана з багатофононним тунелюванням. Виявлено, що висота бар'єру, фактор неідеальності та величина зворотного струму немонотонно змінюються при збільшенні поглинутої дози. Встановлено, що для низьких значень поглинутої дози зміна електрофізичних параметрів γ -опромінених структур відбувається внаслідок накопичення дефектів акцепторного типу на границі розділу метал-напівпровідник та укрупнення патчів внаслідок радіаційно підсиленого дислокаційного ковзання, тоді як при високих значеннях поглинутої дози цей ефект маскується інтенсифікацією процесів тунелювання внаслідок утворення значної кількості радіаційних дефектів. Показано, що характер дозової немонотонності зміни висоти бар'єру Шотки різний для однорідних областей та для всього діоду загалом.

7. Вперше досліджено вплив ультразвукового навантаження у динамічному режимі при кімнатній температурі на параметри кремнієвих діодів Шотки $\text{Al}-n-n^+-\text{Si}-\text{Al}$. Виявлено, що при поширенні акустичних хвиль спостерігаються оборотні зменшення висоти бар'єру, збільшення зворотного струму та струму насичення, в той час як фактор неідеальності практично не змінюється. Встановлено, що ультразвукове навантаження практично не впливає на процеси прямого тунелювання та багатофононного тунелювання. Показано, що вплив акустичного навантаження на термоемісійну складову струму структур можна пояснити іонізацією дефектів на межі метал-напівпровідник внаслідок взаємодії ультразвуку з дислокаціями та радіаційними точковими порушеннями періодичності в неопромінених та опромінених структурах, відповідно.

8. Вперше експериментально досліджено динамічний вплив ультразвукового навантаження в діапазоні частот $8 \div 28$ МГц на електричні властивості структур $\text{Mo}/n-n^+-\text{Si}$ з бар'єром Шотки в діапазоні температур $130 \div 330$ K. Виявлено акустоіндуковані оборотні зміни фактору неідеальності та висоти бар'єру Шотки, причому зміни немонотонно залежать від температури і найбільш ефективний вплив УЗ спостерігається поблизу 200 K. Показано, що зі збільшенням частоти УЗ спостерігається як підвищення ефективності акустичного впливу на параметри кремнієвих діодів Шотки, так і зростання температури максимуму ефективності. Застосування моделі неоднорідного контакту показало, що за умов ультразвукового навантаження відбувається збільшення висоти бар'єру як в області знаходження патчів, так і за їх межами, а також уширюється розподіл параметрів патчів та збільшується їх ефективна густина. Показано, що частотні та температурні особливості акустоіндукованих змін параметрів структур $\text{Mo}/n-n^+-\text{Si}$ можуть бути пояснені в рамках моделі поглинання ультразвуку внаслідок руху дислокаційних перегинів.

9. Вперше виявлено ефект оборотного збільшення зворотного струму структур $\text{Mo}/n-n^+-\text{Si}$ за умов їх акустичного навантаження; показано, що ефект послаблюється при збільшенні температури та зміщується та посилюється при зростанні частоти ультразвуку. Показано, що основними механізмами зворотного струму є термоелектронна емісія та тунелювання, стимульоване фононами;

в умовах поширення акустичних хвиль відбувається зменшення енергії активації рівнів, що беруть участь у тунелюванні, густини заповнених інтерфейсних станів та коефіцієнта Пула–Френкеля.

10. Експериментально досліджено вплив мікрохвильового опромінення на параметри точкових дефектів в монокристалах n - $6H$ -SiC, n -GaAs та епітаксійних структурах на основі арсеніду галію. Показано, що причинами радіаційностимульованих змін поперечного перерізу захоплення електронів та розташування енергетичних рівнів пасток у забороненій зоні є збільшення кількості міжвузольних атомів у приповерхневому шарі та релаксація внутрішніх механічних напруг. Показано, що наявність стискуючих напруг у приповерхневому шарі прискорює процеси перетворення дефектних комплексів внаслідок високочастотного опромінення.

11. Вперше експериментально досліджено вплив ультразвукової обробки на параметри структури $\text{Au-TiB}_x\text{-}n\text{-}n^+\text{-GaAs}$ з контактом Шотки в залежності від частоти та потужності акустичної обробки. Встановлено, що при малій інтенсивності акустичної обробки (менше $2,5 \text{ Вт/см}^2$) характер УЗ впливу за величину зворотного струму залежить від механізму перенесення заряду: якщо домінуючим механізмом є тунельний, то ультразвукова обробка викликає збільшення зворотного струму, якщо термоємисійний — зменшення. Показано, що причиною виявлених ефектів може бути акусто-стимульована дифузія точкових дефектів.

12. Показано, що ультразвукова обробка здатна викликати гомогенізацію як параметрів арсенід галієвих діодів Шотки, створених в єдиному технологічному процесі, так і енергетичного спектру радіаційноіндукованих пасток на інтерфейсі системи Si-SiO₂.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1*. Explanation of commonly observed shunt currents in c-Si solar cells by means of recombination statistics beyond the Shockley-Read-Hall approximation / Silke Steingrube, Otwin Breitenstein, Klaus Ramspeck et al. // *J. Appl. Phys.* — 2011. — July. — Vol. 110, no. 1. — P. 014515.

2*. *Mirzade, Fikret*. Elastic wave propagation in a solid layer with laser-induced point defects / Fikret Mirzade // *J. Appl. Phys.* — 2011. — Sep. — Vol. 110, no. 6. — P. 064906.

3*. *Gopal, Vishnu*. Contribution of Dislocations to the Zero-Bias Resistance-Area Product of LWIR HgCdTe Photodiodes at Low Temperatures / Vishnu Gopal, Sudha Gupta // *IEEE Trans. Electron Devices*. — 2004. — Jul. — Vol. 51, no. 7. — P. 1078–1083.

4*. Определение параметров глубоких уровней по дифференциальным коэффициентам вольт-амперных характеристик / С.В. Булярский, М.О. Воробьев, Н.С. Грушко, А.В. Лакалин // *Письма в журнал технической физики*. — 1999. — Т. 25, № 5. — С. 22–27.

5*. Tung, Raymond T. Recent advances in Schottky barrier concept / Raymond T. Tung // *Materials Science and Engineering: R: Reports*. — 2001. — Nov. — Vol. 35, no. 1–3. — P. 1–138.

6*. Distinction between the Poole-Frenkel and tunneling models of electric-field-stimulated carrier emission from deep levels in semiconductors / S. D. Ganichev, E. Ziemann, W. Prettl et al. // *Phys. Rev. B*. — 2000. — Apr. — Vol. 61, no. 15. — P. 10361–10365.

7*. Schottky Barrier Height Inhomogeneity of Ti/n-GaAs Contact Studied by the I-V-T Technique / Yu-Long Jiang, Guo-Ping Ru, Fang Lu et al. // *Chin. Phys. Lett.* — 2002. — Apr. — Vol. 19, no. 4. — P. 553–556.

8*. Brailsford, A. D. Abrupt-Kink Model of Dislocation Motion / A. D. Brailsford // *Phys. Rev.* — 1961. — May. — Vol. 122, no. 3. — P. 778–786.

9*. Pipinys, P. Temperature dependence of reverse-bias leakage current in GaN Schottky diodes as a consequence of phonon-assisted tunneling / P. Pipinys, V. Lapeika // *J. Appl. Phys.* — 2006. — May. — Vol. 99, no. 9. — P. 093709.

10*. Jafar, M M Abdul-Gader. High-bias current-voltage-temperature characteristics of undoped rf magnetron sputter deposited boron carbide (B₅C)/p-type crystalline silicon heterojunctions / M M Abdul-Gader Jafar // *Semicond. Sci. Technol.* — 2003. — Jan. — Vol. 18, no. 1. — P. 7–22.

СПИСОК ОПУБЛІКОВАНИХ ПРАЦЬ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ

Наукові праці, в яких опубліковано основні наукові результати дисертації

1. Acousto-defect interaction in irradiated and non-irradiated silicon n^+-p structure / O. Ya. Olikh, A. M. Gorb, R. G. Chupryna, O. V. Pristay-Fenenkov // *J. Appl. Phys.* — 2018. — Apr. — Vol. 123, no. 16. — P. 161573–1–161573–12.
2. Olikh, O.Ya. Acoustically driven degradation in single crystalline silicon solar cell / O.Ya. Olikh // *Superlattices Microstruct.* — 2018. — May. — Vol. 117. — P. 173–188.
3. Olikh, Oleg. On the mechanism of ultrasonic loading effect in silicon-based Schottky diodes / Oleg Olikh, Katerina Voytenko // *Ultrasonics*. — 2016. — Mar. — Vol. 66, no. 1. — P. 1–3.
4. Effect of ultrasound on reverse leakage current of silicon Schottky barrier structure / O. Ya. Olikh, K. V. Voytenko, R. M. Burbelo, Ja. M. Olikh // *Journal of Semiconductors*. — 2016. — Dec. — Vol. 37, no. 12. — P. 122002–1–122002–7.
5. Olikh, O. Ya. Review and test of methods for determination of the Schottky diode parameters / O. Ya. Olikh // *J. Appl. Phys.* — 2015. — Jul. — Vol. 118, no. 2. — P. 024502–1–024502–14.
6. Olikh, O. Ya. Ultrasound influence on I–V–T characteristics of silicon Schottky barrier structure / O. Ya. Olikh, K. V. Voytenko, R. M. Burbelo // *J. Appl. Phys.* — 2015. — Jan. — Vol. 117, no. 4. — P. 044505–1–044505–7.

7. Olikh, Oleg. Reversible influence of ultrasound on γ -irradiated Mo/n-Si Schottky barrier structure / Oleg Olikh // *Ultrasonics*. — 2015. — Feb. — Vol. 56. — P. 545–550.
8. Особливості дислокаційного поглинання ультразвуку в безсубблочних кристалах $\text{Cd}_{0,2}\text{Hg}_{0,8}\text{Te}$ / І. О. Лисюк, Я. М. Оліх, О. Я. Оліх, Г. В. Бекетов // *УФЖ*. — 2014. — Т. 59, № 1. — С. 50–57.
9. Olikh, O. Ya. Non-Monotonic γ -Ray Influence on Mo/n-Si Schottky Barrier Structure Properties / O. Ya. Olikh // *IEEE Trans. Nucl. Sci.* — 2013. — Feb. — Vol. 60, no. 1. — P. 394–401.
10. Оліх, О. Я. Особливості впливу ультразвуку на перенесення заряду в кремнієвих структурах з бар'єром Шоттки залежно від дози γ -опромінення / О. Я. Оліх // *Сенсорна електроніка і мікросистемні технології*. — 2013. — Т. 10, № 1. — С. 47–55.
11. Оліх, О. Я. Влияние ультразвукового нагружения на протекание тока в структурах Mo/n-n⁺-Si с барьером Шоттки / О. Я. Олих // *Физика и техника полупроводников*. — 2013. — Т. 47, № 7. — С. 979–984.
12. Оліх, О. Я. Особливості перенесення заряду в структурах Mo/n-Si з бар'єром Шоттки / О. Я. Оліх // *УФЖ*. — 2013. — Т. 58, № 2. — С. 126–134.
13. Оліх, О. Я. Особенности динамических акустоиндуцированных изменений фотоэлектрических параметров кремниевых солнечных элементов / О. Я. Олих // *Физика и техника полупроводников*. — 2011. — Т. 45, № 6. — С. 816–822.
14. Оліх, Я. М. Інформаційний чинник акустичної дії на структуру дефектних комплексів у напівпровідниках / Я. М. Оліх, О. Я. Оліх // *Сенсорна електроніка і мікросистемні технології*. — 2011. — Т. 2(8), № 2. — С. 5–12.
15. Оліх, О. Я. Особливості впливу нейтронного опромінення на динамічну акустодефектну взаємодію у кремнієвих сонячних елементах / О. Я. Оліх // *УФЖ*. — 2010. — Т. 55, № 7. — С. 770–776.
16. Ultrasonically Recovered Performance of γ -Irradiated Metal-Silicon Structures / A.M. Gorb, O.A. Korotchenkov, O.Ya Olikh, A.O. Podolian // *IEEE Trans. Nucl. Sci.* — 2010. — June. — Vol. 57, no. 3. — P. 1632–1639.
17. Оліх, О. Я. Изменение активности рекомбинационных центров в кремниевых p-n-структурах в условиях акустического нагружения / О. Я. Олих // *Физика и техника полупроводников*. — 2009. — Т. 43, № 6. — С. 774–779.
18. Оліх, О. Я. Робота кремнієвих сонячних елементів в умовах акустичного навантаження мегагерцового діапазону / О. Я. Оліх, Р. М. Бурбело, М. К. Хіндерс // *Сенсорна електроніка і мікросистемні технології*. — 2007. — Т. 4, № 3. — С. 40–45.
19. Olikh, O. Ya. The Dynamic Ultrasound Influence on Diffusion and Drift of the Charge Carriers in Silicon p-n Structures / O.Ya. Olikh, R. Burbelo, M. Hinders // *Semiconductor Defect Engineering — Materials, Synthetic, Structures*

and Devices II / Ed. by S. Ashok, P. Kiesel, J. Chevallier, T. Ogino. — Vol. 994 of *Materials Research Society Symposium Proceedings*. — Warrendale, PA: 2007. — P. 269–274.

20. Олих, О. Я. Акустостимулированные коррекции вольт-амперных характеристик арсенид-галлиевых структур с контактом Шоттки / О. Я. Олих, Т. Н. Пинчук // *Письма в Журнал Технической Физики*. — 2006. — Т. 32, № 12. — С. 22–27.
21. Конакова, Р.В. Влияние микроволновой обработки на уровень остаточной деформации и параметры глубоких уровней монокристаллах карбида кремния / Р.В. Конакова, П.М. Литвин, О.Я. Олих // *Физика и химия обработки материалов*. — 2005. — № 2. — С. 19–22.
22. Конакова, Р.В. Влияние микроволновой обработки на глубокие уровни монокристаллов GaAs и SiC / Р.В. Конакова, П.М. Литвин, О.Я. Олих // *Петербургский журнал электроники*. — 2004. — № 1. — С. 20–24.
23. Olikh, Ja. M. Active ultrasound effects in the future usage in sensor electronics / Ja. M. Olikh, O.Ya. Olikh // *Сенсорна електроніка і мікросистемні технології*. — 2004. — Т. 1, № 1. — С. 19–29.
24. Olikh, O.Ya. Acoustoelectric transient spectroscopy of microwave treated GaAs-based structures / O.Ya. Olikh // *Semiconductor Physics, Quantum Electronics & Optoelectronics*. — 2003. — Vol. 6, no. 4. — P. 450–453.
25. Оліх, О.Я. Акустостимульовані динамічні ефекти в сонячних елементах на основі кремнію / О.Я. Оліх // *Вісник Київського ун-ту, Сер.: Фізико-математичні науки*. — 2003. — № 4. — С. 408–414.

Наукові праці, які засвідчують апробацію матеріалів дисертації

26. Оліх, О. Я. Ефекти активного ультразвуку в напівпровідникових кристалах / О. Я. Оліх // 1-а Українська наукова конференція з фізики напівпровідників, Одеса, Україна. — Т. 1. — Одеса: 2002. — С. 80.
27. Влияние СВЧ облучения на остаточный уровень внутренних механических напряжений и параметры глубоких уровней в эпитаксиальных структурах GaAs / Р. В. Конакова, А. Б. Камалов, О. Я. Олих и др. // Труды III международной конференции «Радиационно-термические эффекты и процессы в неорганических материалах», Томск, Россия. — Томск: 2002. — С. 338–339.
28. Оліх, О. Я. Про роль теплових і деформаційних механізмів дії ультразвуку на роботу кремнієвих сонячних елементів / О. Я. Оліх // Міжнародна науково-технічна конференція «Сенсорна електроніка і мікросистемні технології СЕМСТ-1», Одеса, Україна. Тези доповідей. — Одеса: 2004. — С. 163.
29. Olikh, O. Investigation of microwave treated epitaxial GaAs structures by acoustoelectric method / O. Olikh // 2004 IEEE International Ultrasonics, Ferroelectrics and Frequency Control Joint 50th Anniversary Conference. Montreal, Canada. Abstracts. — Montreal: 2004. — Pp. 230–231.

30. *Олих, О. Я.* Влияние СВЧ облучения на остаточный уровень внутренних механических напряжений и параметры глубоких уровней в эпитаксиальных структурах GaAs / О. Я. Олих // Труды девятой международной научно-технической конференции «Актуальные проблемы твердотельной электроники и микроэлектроники», Дивноморское, Россия. — Дивноморское: 2004. — С. 278–279.
31. Influence of acoustic wave on forming and characteristics of silicon p–n junction / J. Olikh, A. Evtukh, B. Romanyuk, O. Olikh // 2005 IEEE International Ultrasonics Symposium and Short Courses. Rotterdam, Netherlands. Abstracts. — Rotterdam: 2005. — P. 542.
32. *Olikh, O.* Dynamic ultrasound effects in silicon solar cell / O. Olikh, R. Burbelo, Hinders M. // 2007 International Congress on Ultrasonics. Program and Book of Abstracts. Vienna, Austria. — Vienna: 2007. — P. 94.
33. *Olikh, O.* Influence of the ultrasound treatment on Au-TiB–n–n⁺–GaAs structure electrical properties / O. Olikh // 2007 International Congress on Ultrasonics. Program and Book of Abstracts. Vienna, Austria. — Vienna: 2007. — P. 94.
34. *Olikh, O.* The Dynamic Ultrasound Influence on Diffusion and Drift of the Charge Carriers in Silicon p–n Structures / O. Olikh, R. Burbelo, M. Hinders // MRS 2007 Spring Meeting, Symposium F: Semiconductor Defect Engineering — Materials, Synthetic Structures, and Devices II. San Francisco, USA. — San Francisco: 2007. — P. 3.11.
35. *Олих, О. Я.* Робота кремнієвих сонячних елементів в умовах акустичного навантаження мегагерцового діапазону / О. Я. Оліх // III Українська наукова конференція з фізики напівпровідників УНКФН–3, Одеса, Україна. Тези доповідей. — Одеса: 2007. — С. 322.
36. *Оліх, О. Я.* Вплив ультразвукової обробки на вольт–амперні характеристики опромінених кремнієвих структур / О. Я. Оліх, А. М. Горб // VI Міжнародна школа–конференція «Актуальні проблеми фізики напівпровідників», Дрогобич, Україна. Тези доповідей. — Дрогобич: 2008. — С. 114.
37. *Оліх, О. Я.* Акустичні збурення дефектної підсистеми кремнієвих p–n–структур / О. Я. Оліх // VI Міжнародна школа–конференція «Актуальні проблеми фізики напівпровідників», Дрогобич, Україна. Тези доповідей. — Дрогобич: 2008. — С. 174.
38. *Оліх, О. Я.* Особливості механізму ультразвукового впливу на фото–електричний струм у нейтронно–опромінених Si–p–n–структурах / О. Я. Оліх // IV Українська наукова конференція з фізики напівпровідників, Запоріжжя, Україна. Тези доповідей. — Т. 2. — Запоріжжя: 2009. — С. 59.
39. *Оліх, Я. М.* Про можливості практичного застосування ультразвуку для керування характеристиками перетворювачів сонячної енергії / Я. М. Оліх, О. Я. Оліх // Четверта міжнародна науково–практична конференція «Матеріали електронної техніки та сучасні інформаційні технології», Кременчук, Україна. Тези доповідей. — Кременчук: 2010. — С. 147–148.

40. *Oliх, О. Я.* Немонотонний вплив γ -опромінення на електричні властивості кремнієвих структур з бар'єром Шотки / О. Я. Оліх, С. В. Онисюк // VII Міжнародна школа-конференція «Актуальні проблеми фізики напівпровідників», Дрогобич, Україна. Тези доповідей. — Дрогобич: 2010. — С. 171–172.
41. *Oliх, О. Я.* Особливості динамічного ультразвукового впливу на γ -опромінені кремнієві $m-s$ -структури / О. Я. Оліх, С. В. Онисюк // Збірник тез V Української наукової конференції з фізики напівпровідників УНКФН-5, Ужгород, Україна. — Ужгород: 2011. — С. 339–340.
42. *Oliх, О. Я.* Вплив ультразвуку на термоемісійні процеси в $\text{Mo}/n\text{-}n^+\text{-Si}$ структурах / О. Я. Оліх // Матеріали Всеукраїнської наукової конференції «Актуальні проблеми теоретичної, експериментальної та прикладної фізики», Тернопіль, Україна. — Тернопіль: 2012. — С. 101–103.
43. *Olikh, O. Ya.* Reversible Alteration of Reverse Current in $\text{Mo}/n\text{-Si}$ Structures Under Ultrasound Loading / O. Ya. Olikh, Ya. M. Olikh // Фізика і технологія тонких плівок та наносистем. Матеріали XIV Міжнародної конференції / Під ред. Д.М. Фреїка. — Івано-Франківськ: Видавництво Прикарпатського національного університету імені Василя Стефаника, 2013. — С. 322.
44. *Olikh, O. Ya.* Modification of reverse current in the $\text{Mo}/n\text{-Si}$ structures under conditions of ultrasonic loading / O. Ya. Olikh, K. V. Voytenko // VIII International school-conference «Actual problems of semiconductor physics», Drohobych, Ukraine. Abstract book. — Drohobych: 2013. — Pp. 101–102.
45. *Olikh, Ya. M.* About acoustical-stimulated a self-organization defect structures in semiconductor during ion implantation / Ya. M. Olikh, O. Ya. Olikh // International research and practice conference «Nanotechnology and nanomaterials», Bukovel, Ukraine. Abstract book. — Bukovel: 2013. — P. 240.
46. *Oliх, О. Я.* Вплив γ -опромінення на механізм перенесення заряду в структурах $\text{Mo}/n\text{-Si}$ / О. Я. Оліх // VI Українська наукова конференція з фізики напівпровідників УНКФН-6. Чернівці, Україна. Тези доповідей. — Чернівці: 2013. — С. 121–122.
47. *Olikh, Ya.* New approach to ultrasonic absorption in subgrain-free $\text{Cd}_{0,2}\text{Hg}_{0,8}\text{Te}$ crystals / Ya. Olikh, I. Lysyuk, O. Olikh // 2014 IEEE International Ultrasonics Symposium. Chicago, Illinois, USA. Abstract book. — Chicago: 2014. — Pp. 439–440.
48. *Olikh, O.* Ultrasonically induced effects in Schottky barrier structure depending on a γ -irradiation / O. Olikh // 2014 IEEE International Ultrasonics Symposium. Chicago, Illinois, USA. Abstract book. — Chicago: 2014. — Pp. 645–646.
49. *Oliх, О. Я.* Характеризація γ -опромінених кремнієвих $p\text{-}n$ -структур методом диференційних коефіцієнтів / О. Я. Оліх, О. В. Пристай // 6-та Міжнародна науково-технічна конференція «Сенсорна електроніка і мікросистемні технології», Одеса, Україна. Тези доповідей. — Одеса: 2014. — С. 193.

50. *Olikh, O.Ya.* Ultrasonic Loading Effects on Silicon-based Schottky Diodes / O.Ya Olikh, K. V. Voytenko // 2015 International Congress on Ultrasonics. Metz, France. Abstract book. — Metz: 2015. — P. 225.
51. *Olix, O. Я.* Порівняння ефективності методів визначення параметрів діодів Шотки / О. Я. Оліх // Сучасні проблеми фізики конденсованого стану: Праці IV-ї міжнародної конференції. Київ, Україна. — Київ: 2015. — С. 32–34.
52. Ультразвукова модифікація стимульованого фононами тунелювання у кремнієвих діодах Шотки / О. Я. Оліх, К. В. Войтенко, Р. М. Бурбело, Я. М. Оліх // VII Українська наукова конференція з фізики напівпровідників УНКФН-7. Дніпро, Україна. Тези доповідей. — Дніпро: 2016. — С. 190–191.
53. *Olix, O. Я.* Акусто-керована модифікація властивостей кремнієвих фотоелектроперетворювачів / О. Я. Оліх // Перспективні напрямки сучасної електроніки, інформаційних і комп'ютерних систем. Тези доповідей на II Всеукраїнській науково-практичній конференції MEICS-2017. Дніпро, Україна. — Дніпро: 2017. — С. 302–303.

АНОТАЦІЯ

Оліх О. Я. Акусто– та радіаційноіндуковані явища в поверхнево–бар’єрних кремнієвих та арсенід галієвих структурах. — Рукопис.

Дисертація на здобуття наукового ступеня доктора фізико-математичних наук за спеціальністю 01.04.07– фізика твердого тіла. – Київський національний університет імені Тараса Шевченка, МОН України, Київ, 2018.

У дисертаційній роботі проведено дослідження впливу ультразвукового навантаження на процеси перенесення заряду в кремнієвих сонячних елементах, у тому числі і радіаційно опромінених. Виявлено оборотні процеси зменшення ефективності фотоелектричного перетворення, пов’язані з акустоіндукованою перебудовою точкових рекомбінаційних центрів. Запропонована модель акустоактивного комплексного дефекту. Показано, що основними акустоактивними радіаційними дефектами в кремнії є дивакансія та А–центр. Проведено порівняльний аналіз аналітичних, чисельних та еволюційних методів визначення параметрів діодів Шотки. Визначено механізми перенесення заряду та оборотного зростання струму при ультразвуковому навантаженні в структурах $Al-n-n^+-Si-Al$ та їх модифікацію внаслідок γ –опромінення. Виявлено та досліджено ефект оборотного акустоіндукованого впливу на властивості структур $Mo/n-n^+-Si$ в широкому діапазоні температур та показано, що вони пов’язані з рухом дислокаційних перегинів та зміною розмірів дефектних кластерів. Досліджено вплив мікрохвильового опромінення на дефектну структуру приповерхневого шару монокристалів GaAs і SiC та епітаксійних структур GaAs; показано, що її зміни пов’язані зі зростанням концентрації міжвузольних атомів. Експериментально показано, що ультразвукова обробка

здатна викликати гомогенізацію як параметрів арсенід галієвих діодів Шотки, створених в єдиному технологічному процесі, так і енергетичного спектру радіаційноіндукованих пасток на інтерфейсі системи Si-SiO₂.

Ключові слова: ультразвук, гамма-опромінення, кремній, бар'єрні структури, акусто-дефектна взаємодія, перенесення заряду, оборотні акустоіндуковані зміни.

АННОТАЦИЯ

Олих О. Я. Акусто- и радиационноиндуцированные явления в поверхностно-барьерных кремниевых и арсенид галиевых структурах. — Рукопись.

Диссертация на соискание научной степени доктора физико-математических наук по специальности 01.04.07 – физика твердого тела. – Киевский национальный университет имени Тараса Шевченко МОН Украины, Киев, 2018.

В диссертационной работе проведено исследование влияния ультразвукового нагружки на процессы переноса заряда в кремниевых солнечных элементах, в том числе и радиационно облученных. Выявлено обратимые процессы уменьшения эффективности фотоэлектрического преобразования, связанные с акустоиндукованной перестройкой точечных рекомбинационных центров. Предложенная модель акустоактивного комплексного дефекта. Показано, что основными акустоактивными радиационными дефектами в кремнии являются дивакансии и А-центр. Проведен сравнительный анализ аналитических, численных и эволюционных методов определения параметров диодов Шоттки. Определены механизмы переноса заряда и обратимого возрастания тока при ультразвуковом нагружении в структурах Al-n - n⁺-Si-Al и их модификация вследствие γ-облучения. Обнаружены и исследованы эффект обратимого акустоиндуцированного влияния на свойства структур Mo/n-n⁺-Si в широком диапазоне температур и показано, что они связаны с движением дислокационных перегибов и изменением размеров дефектных кластеров. Исследовано влияние микроволнового облучения на дефектную структуру приповерхностного слоя монокристаллов GaAs и SiC и эпитаксиальных структур GaAs; показано, что ее изменения связаны с ростом концентрации междоузельных атомов. Экспериментально показано, что ультразвуковая обработка способна вызвать гомогенизацию как параметров арсенид галлиевых диодов Шоттки, созданных в едином технологическом процессе, так и энергетического спектра радиационноиндуцированных ловушек на интерфейсе системы Si-SiO₂.

Ключевые слова: ультразвук, гамма-облучение, кремний, барьерные структуры, акусто-дефектное взаимодействие, перенесение заряда, обратимые акустоиндуцированные изменения.

ABSTRACT

Olikh O.Ya. Acoustically and radiation induced phenomena in surface barrier silicon and gallium arsenide structures. — Manuscript.

Thesis for the Doctor's of Science Degree (Physics and Mathematics) by specialty 01.04.07 – Solid-state Physics. - Kyiv National Taras Shevchenko University, Ministry of Education and Science of Ukraine, Kyiv, 2018.

The thesis concerns the research of ultrasonic loading influence on charge transfer processes in silicon solar cells, including radiation irradiated. It has been revealed the reversible decreasing in the photoelectric transformation efficiency, which is related to acoustically induced rebuilding of point recombination centers. A model of acoustic complex defect is proposed. It is shown that the main acoustically active radiation defects are divacancy and A-center. A comparative analysis of analytical, numerical and evolutionary methods for Schottky diode parameters determination has been carried out. The mechanisms of charge transfer and reversible current arising under ultrasound loading are determined for the $\text{Al}-n-n^+-\text{Si}-\text{Al}$ structures; the mechanisms modification after γ -irradiation was examined as well. The effect of reversible acoustically induced influence on the properties of $\text{Mo}/n-n^+-\text{Si}$ structures was discovered and investigated in a wide temperature range; and it is shown that this effect is associated with the dislocation overhangs movement and the defective clusters size change. The influence of microwave irradiation on the defect structure of the near-surface layer of GaAs and SiC single crystals as well as GaAs epitaxial structures has been investigated. It is shown that defect structure changes are deals with the increase of interstitial atoms concentration. It has been shown experimentally that ultrasonic treatment can causes increase in the homogeneity of both the parameters of GaAs Schottky diodes, manufactured in the same technological cycle, and the energy spectrum of radiation induced interface traps in $\text{Si}-\text{SiO}_2$.

Key words: ultrasound, gamma-rays, silicon, barrier structures, acousto-defect interaction, charge transport, reversible acoustically induced change

Список використаних джерел

1. Acousto-defect interaction in irradiated and non-irradiated silicon n^+p structure / O. Ya. Olikh, A. M. Gorb, R. G. Chupryna, O. V. Pristay-Fenenkov // *J. Appl. Phys.* — 2018. — Apr. — Vol. 123, no. 16. — P. 161573.
2. *Olikh, O.Ya.* Acoustically driven degradation in single crystalline silicon solar cell / O.Ya. Olikh // *Superlattices Microstruct.* — 2018. — May. — Vol. 117. — Pp. 173–188.
3. *Olikh, Oleg.* On the mechanism of ultrasonic loading effect in silicon-based Schottky diodes / Oleg Olikh, Katerina Voytenko // *Ultrasonics.* — 2016. — Mar. — Vol. 66, no. 1. — Pp. 1–3.
4. Effect of ultrasound on reverse leakage current of silicon Schottky barrier structure / O. Ya. Olikh, K. V. Voytenko, R. M. Burbelo, Ja. M. Olikh // *Journal of Semiconductors.* — 2016. — Dec. — Vol. 37, no. 12. — P. 122002.
5. *Olikh, O. Ya.* Review and test of methods for determination of the Schottky diode parameters / O. Ya. Olikh // *J. Appl. Phys.* — 2015. — Jul. — Vol. 118, no. 2. — P. 024502.
6. *Olikh, O. Ya.* Ultrasound influence on I–V–T characteristics of silicon Schottky barrier structure / O. Ya. Olikh, K. V. Voytenko, R. M. Burbelo // *J. Appl. Phys.* — 2015. — Jan. — Vol. 117, no. 4. — P. 044505.
7. *Olikh, Oleg.* Reversible influence of ultrasound on γ –irradiated Mo/n-Si Schottky barrier structure / Oleg Olikh // *Ultrasonics.* — 2015. — Feb. — Vol. 56. — Pp. 545–550.
8. Особливості дислокаційного поглинання ультразвуку в безсубблочних кристалах $\text{Cd}_{0,2}\text{Hg}_{0,8}\text{Te}$ / І. О. Лисюк, Я. М. Оліх, О. Я. Оліх, Г. В. Бекетов // *УФЖ.* — 2014. — Т. 59, № 1. — С. 50–57.
9. *Olikh, O. Ya.* Non-Monotonic γ –Ray Influence on Mo/n-Si Schottky Barrier Structure Properties / O. Ya. Olikh // *IEEE Trans. Nucl. Sci.* — 2013. — Feb. — Vol. 60, no. 1. — Pp. 394–401.
10. *Оліх, О. Я.* Особливості впливу ультразвуку на перенесення заряду в кремнієвих структурах з бар'єром Шотки залежно від дози γ –опромінення / О. Я. Оліх // *Сенсорна електроніка і мікросистемні технології.* — 2013. — Т. 10, № 1. — С. 47–55.
11. *Оліх, О. Я.* Влияние ультразвукового нагружения на протекание тока в структурах Mo/n- p^+ -Si с барьером Шоттки / О. Я. Олих // *Физика и техника полупроводников.* — 2013. — Т. 47, № 7. — С. 979–984.

12. Оліх, О. Я. Особливості перенесення заряду в структурах Мо/п-Si з бар'єром Шотки / О. Я. Оліх // *УФЖ*. — 2013. — Т. 58, № 2. — С. 126–134.
13. Олих, О. Я. Особенности динамических акустоиндуцированных изменений фотоэлектрических параметров кремниевых солнечных элементов / О. Я. Олих // *Физика и техника полупроводников*. — 2011. — Т. 45, № 6. — С. 816–822.
14. Оліх, Я. М. Інформаційний чинник акустичної дії на структуру дефектних комплексів у напівпровідниках / Я. М. Оліх, О. Я. Оліх // *Сенсорна електроніка і мікросистемні технології*. — 2011. — Т. 2(8), № 2. — С. 5–12.
15. Оліх, О. Я. Особливості впливу нейтронного опромінення на динамічну акустодефектну взаємодію у кремнієвих сонячних елементах / О. Я. Оліх // *УФЖ*. — 2010. — Т. 55, № 7. — С. 770–776.
16. Ultrasonically Recovered Performance of γ -Irradiated Metal-Silicon Structures / A.M. Gorb, O.A. Korotchenkov, O.Ya Olikh, A.O. Podolian // *IEEE Trans. Nucl. Sci.* — 2010. — June. — Vol. 57, no. 3. — Pp. 1632–1639.
17. Олих, О. Я. Изменение активности рекомбинационных центров в кремниевых p–n-структурах в условиях акустического нагружения / О. Я. Олих // *Физика и техника полупроводников*. — 2009. — Т. 43, № 6. — С. 774–779.
18. Оліх, О. Я. Робота кремнієвих сонячних елементів в умовах акустичного навантаження мегагерцового діапазону / О. Я. Оліх, Р. М. Бурбело, М. К. Хіндерс // *Сенсорна електроніка і мікросистемні технології*. — 2007. — Т. 4, № 3. — С. 40–45.
19. Olikh, O.Ya. The Dynamic Ultrasound Influence on Diffusion and Drift of the Charge Carriers in Silicon p–n Structures / O.Ya. Olikh, R. Burbelo, M. Hinderers // *Semiconductor Defect Engineering — Materials, Synthetic, Structures and Devices II* / Ed. by S. Ashok, P. Kiesel, J. Chevallier, T. Ogino. — Vol. 994 of *Materials Research Society Symposium Proceedings*. — Warrendale, PA: 2007. — Pp. 269–274.
20. Олих, О. Я. Акустостимулированные коррекции вольт–амперных характеристик арсенид–галлиевых структур с контактом Шоттки / О. Я. Олих, Т. Н. Пинчук // *Письма в Журнал Технической Физики*. — 2006. — Т. 32, № 12. — С. 22–27.
21. Конакова, Р.В. Влияние микроволновой обработки на уровень остаточной деформации и параметры глубоких уровней монокристаллах карбида кремния / Р.В. Конакова, П.М. Литвин, О.Я. Олих // *Физика и химия обработки материалов*. — 2005. — № 2. — С. 19–22.

22. *Конакова, Р.В.* Влияние микроволновой обработки на глубокие уровни монокристаллов GaAs и SiC / Р.В. Конакова, П.М. Литвин, О.Я. Олих // *Петербургский журнал электроники*. — 2004. — № 1. — С. 20–24.
23. *Olikh, Ja. M.* Active ultrasound effects in the future usage in sensor electronics / Ja. M. Olikh, O.Ya. Olikh // *Сенсорна електроніка і мікросистемні технології*. — 2004. — Т. 1, № 1. — С. 19–29.
24. *Olikh, O.Ya.* Acoustoelectric transient spectroscopy of microwave treated GaAs-based structures / O.Ya. Olikh // *Semiconductor Physics, Quantum Electronics & Optoelectronics*. — 2003. — Vol. 6, no. 4. — Pp. 450–453.
25. *Оліх, О.Я.* Акустостимульовані динамічні ефекти в сонячних елементах на основі кремнію / О.Я. Оліх // *Вісник Київського ун-ту, Сер.: Фізико-математичні науки*. — 2003. — № 4. — С. 408–414.
26. *Оліх, О. Я.* Эффекты активного ультразвуку в напівпровідникових кристалах / О. Я. Оліх // 1-а Українська наукова конференція з фізики напівпровідників, Одеса, Україна. — Т. 1. — Одеса: 2002. — С. 80.
27. Влияние СВЧ облучения на остаточный уровень внутренних механических напряжений и параметры глубоких уровней в эпитаксиальных структурах GaAs / Р. В. Конакова, А. Б. Камалов, О. Я. Олих и др. // Труды III международной конференции «Радиационно-термические эффекты и процессы в неорганических материалах», Томск, Россия. — Томск: 2002. — С. 338–339.
28. *Оліх, О. Я.* Про роль теплових і деформаційних механізмів дії ультразвуку на роботу кремнієвих сонячних елементів / О. Я. Оліх // Міжнародна науково-технічна конференція «Сенсорна електроніка і мікросистемні технології СЕМСТ-1», Одеса, Україна. Тези доповідей. — Одеса: 2004. — С. 163.
29. *Olikh, O.* Investigation of microwave treated epitaxial GaAs structures by acoustoelectric method / O. Olikh // 2004 IEEE International Ultrasonics, Ferroelectrics and Frequency Control Joint 50th Anniversary Conference. Montreal, Canada. Abstracts. — Montreal: 2004. — Pp. 230–231.
30. *Олих, О. Я.* Влияние СВЧ облучения на остаточный уровень внутренних механических напряжений и параметры глубоких уровней в эпитаксиальных структурах GaAs / О. Я. Олих // Труды девятой международной научно-технической конференции «Актуальные проблемы твердотельной электроники и микроэлектроники», Дивноморское, Россия. — Дивноморское: 2004. — С. 278–279.
31. Influence of acoustic wave on forming and characteristics of silicon p-n junction / J. Olikh, A. Evtukh, B. Romanyuk, O. Olikh // 2005 IEEE International

- Ultrasonics Symposium and Short Courses. Rotterdam, Netherlands. Abstracts. — Rotterdam: 2005. — P. 542.
32. *Olikh, O.* Dynamic ultrasound effects in silicon solar cell / O. Olikh, R. Burbelo, Hinders M. // 2007 International Congress on Ultrasonics. Program and Book of Abstracts. Vienna, Austria. — Vienna: 2007. — P. 94.
 33. *Olikh, O.* Influence of the ultrasound treatment on Au-TiB–n–n⁺–GaAs structure electrical properties / O. Olikh // 2007 International Congress on Ultrasonics. Program and Book of Abstracts. Vienna, Austria. — Vienna: 2007. — P. 94.
 34. *Olikh, O.* The Dynamic Ultrasound Influence on Diffusion and Drift of the Charge Carriers in Silicon p–n Structures / O. Olikh, R. Burbelo, M. Hinders // MRS 2007 Spring Meeting, Symposium F: Semiconductor Defect Engineering — Materials, Synthetic Structures, and Devices II. San Francisco, USA. — San Francisco: 2007. — P. 3.11.
 35. *Оліх, О. Я.* Робота кремнієвих сонячних елементів в умовах акустичного навантаження мегагерцового діапазону / О. Я. Оліх // III Українська наукова конференція з фізики напівпровідників УНКФН–3, Одеса, Україна. Тези доповідей. — Одеса: 2007. — С. 322.
 36. *Оліх, О. Я.* Вплив ультразвукової обробки на вольт–амперні характеристики опромінених кремнієвих структур / О. Я. Оліх, А. М. Горб // VI Міжнародна школа–конференція «Актуальні проблеми фізики напівпровідників», Дрогобич, Україна. Тези доповідей. — Дрогобич: 2008. — С. 114.
 37. *Оліх, О. Я.* Акустичні збурення дефектної підсистеми кремнієвих p–n–структур / О. Я. Оліх // VI Міжнародна школа–конференція «Актуальні проблеми фізики напівпровідників», Дрогобич, Україна. Тези доповідей. — Дрогобич: 2008. — С. 174.
 38. *Оліх, О. Я.* Особливості механізму ультразвукового впливу на фото–електричний струм у нейтронно–опромінених Si–p–n–структурах / О. Я. Оліх // IV Українська наукова конференція з фізики напівпровідників, Запоріжжя, Україна. Тези доповідей. — Т. 2. — Запоріжжя: 2009. — С. 59.
 39. *Оліх, Я. М.* Про можливості практично–го застосування ультразвуку для керування характеристиками перетворювачів сонячної енергії / Я. М. Оліх, О. Я. Оліх // Четверта міжнародна науково–практична конференція «Матеріали електронної техніки та сучасні інформаційні технології», Кременчук, Україна. Тези доповідей. — Кременчук: 2010. — С. 147–148.
 40. *Оліх, О. Я.* Немонотонний вплив γ –опромінення на електричні властивості кремнієвих структур з бар'єром Шотки / О. Я. Оліх, С. В. Онисюк //

- VII Міжнародна школа–конференція «Актуальні проблеми фізики напівпровідників», Дрогобич, Україна. Тези доповідей. — Дрогобич: 2010. — С. 171–172.
41. *Olix, O. Ya.* Особливості динамічного ультразвукового впливу на γ -опромінені кремнієві $m-s$ -структури / О. Я. Оліх, С. В. Онисюк // Збірник тез V Української наукової конференції з фізики напівпровідників УНКФН-5, Ужгород, Україна. — Ужгород: 2011. — С. 339–340.
 42. *Olix, O. Ya.* Вплив ультразвуку на термоемісійні процеси в $\text{Mo}/n\text{-}n^+\text{-Si}$ структурах / О. Я. Оліх // Матеріали Всеукраїнської наукової конференції «Актуальні проблеми теоретичної, експериментальної та прикладної фізики», Тернопіль, Україна. — Тернопіль: 2012. — С. 101–103.
 43. *Olikh, O. Ya.* Reversible Alteration of Reverse Current in $\text{Mo}/n\text{-Si}$ Structures Under Ultrasound Loading / O. Ya. Olikh, Ya. M. Olikh // Фізика і технологія тонких плівок та наносистем. Матеріали XIV Міжнародної конференції / Під ред. Д.М. Фреїка. — Івано–Франківськ: Видавництво Прикарпатського національного університету імені Василя Стефаника, 2013. — С. 322.
 44. *Olikh, O. Ya.* Modification of reverse current in the $\text{Mo}/n\text{-Si}$ structures under conditions of ultrasonic loading / O. Ya. Olikh, K. V. Voytenko // VIII International school–conference «Actual problems of semiconductor physics», Drohobych, Ukraine. Abstract book. — Drohobych: 2013. — Pp. 101–102.
 45. *Olikh, Ya. M.* About acoustical–stimulated a self–organization defect structures in semiconductor during ion implantation / Ya. M. Olikh, O. Ya. Olikh // International research and practice conference «Nanotechnology and nanomaterials», Bukovel, Ukraine. Abstract book. — Bukovel: 2013. — P. 240.
 46. *Olix, O. Ya.* Вплив γ -опромінення на механізм перенесення заряду в структурах $\text{Mo}/n\text{-Si}$ / О. Я. Оліх // VI Українська наукова конференція з фізики напівпровідників УНКФН-6. Чернівці, Україна. Тези доповідей. — Чернівці: 2013. — С. 121–122.
 47. *Olikh, Ya.* New approach to ultrasonic absorption in subgrain–free $\text{Cd}_{0,2}\text{Hg}_{0,8}\text{Te}$ crystals / Ya. Olikh, I. Lysyuk, O. Olikh // 2014 IEEE International Ultrasonics Symposium. Chicago, Illinois, USA. Abstract book. — Chicago: 2014. — Pp. 439–440.
 48. *Olikh, O.* Ultrasonically induced effects in Schottky barrier structure depending on a γ -irradiation / O. Olikh // 2014 IEEE International Ultrasonics Symposium. Chicago, Illinois, USA. Abstract book. — Chicago: 2014. — Pp. 645–646.
 49. *Olix, O. Ya.* Характеризація γ -опромінених кремнієвих $p\text{-}n$ -структур методом диференційних коефіцієнтів / О. Я. Оліх, О. В. Пристай // 6-та

Міжнародна науково-технічна конференція «Сенсорна електроніка і мікросистемні технології», Одеса, Україна. Тези доповідей. — Одеса: 2014. — С. 193.

50. *Olikh, O.Ya.* Ultrasonic Loading Effects on Silicon-based Schottky Diodes / O.Ya Olikh, K. V. Voytenko // 2015 International Congress on Ultrasonics. Metz, France. Abstract book. — Metz: 2015. — P. 225.
51. *Оліх, О. Я.* Порівняння ефективності методів визначення параметрів діодів Шотки / О. Я. Оліх // Сучасні проблеми фізики конденсованого стану: Праці IV-ї міжнародної конференції. Київ, Україна. — Київ: 2015. — С. 32–34.
52. Ультразвукова модифікація стимульованого фононами тунелювання у кремнієвих діодах Шотки / О. Я. Оліх, К. В. Войтенко, Р. М. Бурбело, Я. М. Оліх // VII Українська наукова конференція з фізики напівпровідників УНКФН-7. Дніпро, Україна. Тези доповідей. — Дніпро: 2016. — С. 190–191.
53. *Оліх, О. Я.* Акусто-керована модифікація властивостей кремнієвих фотоелектроперетворювачів / О. Я. Оліх // Перспективні напрямки сучасної електроніки, інформаційних і комп'ютерних систем. Тези доповідей на II Всеукраїнській науково-практичній конференції MEICS-2017. Дніпро, Україна. — Дніпро: 2017. — С. 302–303.