

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 РАДІАЦІЙНО–ІНДУКОВАНІ 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,
Тартачник Володимир Петрович,
Інститут ядерних досліджень НАН України,
провідний науковий співробітник
відділу радіаційної фізики

доктор фізико–математичних наук,
старший науковий співробітник,
Костильов Віталій Петрович,
Інститут фізики напівпровідників ім. В.Є. Лашкарьова
НАН України,
завідувач лабораторії фізико–технічних основ
напівпровідникової фотоенергетики

доктор фізико–математичних наук, професор,
член–кореспондент НАН України
Татаренко Валентин Андрійович,
Інститут металофізики ім. Г.В. Курдюмова
НАН України,
заступник директора з наукової роботи

Захист відбудеться “17” 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, зал №12.

Автореферат розісланий “7” серпня 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 — основа мікроелектроніки та сонячної енергетики, галузей, розвиток яких на сучасному етапі визначає загальний прогрес людства. Незважаючи на все різноманіття наявних типів фотовольтаїчних перетворювачів, на ринку промислового використання переважають моно– та полікристалічні кремнієві сонячні елементи. Загалом, серед всіх напівпровідникових систем кремнієві структури використовують найширше. Це зумовлено величезними запасами даного елемента, його нетоксичністю та високою технологічністю як вирощування самих кристалів, так і створення різноманітних структур. Зокрема кремнієві структури з контактом Шотткі застосовують при виготовленні високошвидкісних логічних та інтегральних елементів. У цьому ж сегменті високочастотних мікроелектронних пристроїв широко представлені системи на основі арсеніду галію — матеріалу, який характеризується високою рухливістю носіїв заряду. У дисертаційній роботі наводяться результати дослідження кремнієвих сонячних елементів та структур метал–напівпровідник на основі Si та GaAs, що визначає її актуальність з прикладної точки зору.

Загальною задачею матеріалознавства є створення матеріалів та структур із заданими властивостями. Для її реалізації необхідне чітке розуміння фізичних процесів, які відбуваються в матеріалах за різних умов. Зокрема, умови функціонування напівпровідникових приладів нерідко передбачають наявність різноманітного радіаційного впливу. Вивченню радіаційно–індукованих процесів у напівпровідниках присвячена значна кількість робіт, що побічно свідчить про актуальність подібних досліджень, проте окремі аспекти, наприклад немонотонність зміни характеристик діодів Шотткі при дії γ -квантів чи механізми модифікації приповерхневого шару при мікрохвильовому опроміненні, досі залишалися поза увагою. У виконаній роботі показано взаємозв’язок між ступенем неоднорідності контакту Шотткі та характером дозової немонотонності зміни висоти бар’єру, а також з’ясовано, що перетворення у дефектній структурі приповерхневого шару зумовлені збільшенням концентрації міжвузлових атомів. Іншим зовнішнім чинником, який може впливати на параметри напівпровідникових структур, є знакозмінні пружні деформації, зумовлені, наприклад, поширенням акустичних хвиль. У роботі вперше проведено дослідження перенесення заряду в кремнієвих бар’єрних структурах за умов ультразвукового навантаження. Перераховані напрямки проведених досліджень свідчать про актуальність виконаної роботи в області матеріалознавства.

Поглиблення розуміння поведінки дефектів у напівпровідниках мають фундаментальне значення для розширення можливостей відповідних пристроїв. Як видно з матеріалів останніх світових форумів, сфера інтересів фізики дефектів охоплює методи зовнішньої активації технологічно функціональних дефектів для управління властивостями напівпровідників. Найпоширенішими з

подібних способів є опромінення та термообробка, які, проте, суттєво впливають і на стан кристала загалом. Представлені результати свідчать про здатність ультразвукового навантаження навіть допорогової інтенсивності модифікувати дефекти у кремнієвих кристалах, причому до переваг такого підходу варто віднести вибірковість впливу саме на області з порушеннями періодичності та оборотність змін при кімнатних температурах. Тому виконана робота актуальна з погляду розробки нових методів керування параметрами бар'єрних структур.

Вважається, що причинами змін стану точкових дефектів у напівпровідникових кристалах під дією акустичних хвиль є вимушені коливання дислокацій, акусто-стимульована дифузія домішок та генерація дефектів при надпороговій інтенсивності пружних коливань. Проте для оборотних акусто-індукованих ефектів у малодислокаційних матеріалах подібні механізми не є визначальними. Проведене дослідження особливостей перенесення заряду при ультразвуковому навантаженні кремнієвих структур та ідентифікація «акустоактивних», тобто здатних до ефективної взаємодії з пружними коливаннями, дефектів технологічного та радіаційного походження є актуальним з погляду встановлення фізичних причин акусто-дефектної взаємодії у подібних матеріалах.

Відтак, дослідження фізичних закономірностей та встановлення механізмів акусто- та радіаційно-індукованих ефектів у поверхнево-бар'єрних напівпровідникових структурах є важливим для вирішення перелічених проблем і визначає наукову та практичну актуальність дисертаційної роботи.

Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами, грантами. Дисертаційна робота пов'язана із планами науково-дослідних робіт, які проводились у 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 основних закономірностей акусто-індукованих динамічних ефектів

у кремнієвих структурах із p – n –переходом та контактом Шотткі, вияснення фізичних механізмів впливу опромінення та ультразвукового навантаження на проходження струму в напівпровідникових поверхнево–бар’єрних структурах.

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

- Підбір бар’єрних структур для досліджень та обрання потрібних режимів опромінення (тип частинок, доза) та ультразвукового навантаження (тип акустичних хвиль, їхня інтенсивність і частота);
- З’ясування механізмів перенесення заряду в широкому температурному діапазоні як у вихідних структурах, так і в радіаційно–модифікованих, визначення характерних параметрів (висота бар’єру, фактор неідеальності, час життя неосновних носіїв заряду тощо);
- Встановлення закономірностей впливу ультразвукового навантаження на процеси проходження струму та фотоелектричного перетворення у поверхнево–бар’єрних структурах до та після опромінення;
- Проведення порівняльного аналізу та оптимізації методів визначення параметрів напівпровідникових бар’єрних структур;
- Вияснення фізичних механізмів і розробка та обґрунтування фізичних моделей акусто– та радіаційно–індукованих ефектів;
- З’ясування механізмів впливу мікрохвильового опромінення та акустичного навантаження на параметри глибоких рівнів, пов’язаних із порушеннями кристалічної структури, визначення природи основних акусто–активних дефектів.

Об’єкт дослідження – проходження струму в напівпровідникових структурах.

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

Методи дослідження. З метою вирішення поставлених задач використано комплекс експериментальних та розрахункових методів, який включає аналіз вольт–амперних і вольт–фарадних характеристик; акустоелектричну релаксаційну спектроскопію та метод диференційних коефіцієнтів ВАХ для визначення параметрів глибоких рівнів; метод стаціонарного струму короткого замикання для визначення довжини дифузії неосновних носіїв; аналітичні та числові методи визначення параметрів діодів Шотткі; еволюційні алгоритми мінімізації функцій; імпульсний метод вимірювання поглинання акустичної хвилі; резонансний метод вимірювання імпедансу навантаженого акустичного перетворювача; профілометрію; рентгенівські дифрактометрію поверхні та топографію; контрольоване радіаційне та мікрохвильове опромінення для зміни дефектного стану зразків; метод ультразвукового навантаження.

Наукова новизна отриманих результатів. У результаті виконання дисертаційної роботи отримано ряд нових науково–обґрунтованих результатів, які сприяють розв’язку актуальної проблеми фізики твердого тіла — встановлення механізмів впливу опромінення та акустичного навантаження на процеси перенесення заряду в поверхнево–бар’єрних напівпровідникових структурах.

Наукова новизна зумовлена застосуванням нових ультразвукових методів динамічного керування станом дефектів у напівпровідникових структурах, а також вперше проведеними комплексними дослідженнями низки фундаментальних процесів електроперенесення та рекомбінації нерівноважних носіїв заряду в кремнієвих та арсенід-галієвих поверхнево-бар'єрних структурах за умов керованих змін у системі дефектів кристалу як за допомогою опромінення, так і акустичного навантаження. Зіставлення отриманих експериментальних результатів із даними теоретичного аналізу та окремими результатами інших авторів, дозволили повністю якісно та, у більшості випадків, кількісно описати всі виявлені ефекти. Досягнутий рівень розуміння деталей проходження струму в поверхнево-бар'єрних структурах дозволяє надійно оцінювати ефективність роботи відповідних напівпровідникових пристроїв при дії зовнішніх чинників.

- Вперше виявлено оборотні ефекти впливу ультразвукового навантаження на електрофізичні властивості кремнієвих структур із p - n -переходом і контактом метал-напівпровідник та встановлено їхні закономірності.

- Вперше встановлено відмінності впливу акустичного навантаження на параметри неопромінених та радіаційно-опромінених кремнієвих поверхнево-бар'єрних структур, які зумовлені різницею складу дефектів; вперше визначено природу основних акустоактивних радіаційних дефектів.

- Запропоновано фізичну модель акустоактивного комплексного дефекту для пояснення особливостей виявлених акусто-індукованих ефектів.

- Проведено порівняльний аналіз аналітичних, числових та еволюційних методів розрахунку параметрів діодів Шотткі з вольт-амперних характеристик та визначено найоптимальніші з них з погляду точності та швидкодії.

- Використовуючи модель поглинання ультразвуку Брейсфорда встановлено, що акусто-індукована зміна висоти бар'єру Шотткі у кремнієвих структурах метал-напівпровідник зумовлена рухом дислокаційних перегинів.

- Вперше виявлено взаємозв'язок характеру немонотонності дозової залежності зміни висоти бар'єру Шотткі при γ -опроміненні зі ступенем неоднорідності контакту та встановлено його фізичні причини.

- Встановлено, що вплив мікрохвильового опромінення на параметри дефектів, розташованих у приповерхневих шарах кристалів GaAs, 6H-SiC та на внутрішніх межах арсенід-галієвих епітаксійних структур, зумовлений збільшення кількості міжвузлових атомів.

Практичне значення отриманих результатів. Отримані в роботі результати сприяють глибшому розумінню фізичних процесів у поверхнево-бар'єрних структурах при знакозмінних механічних навантаженнях та опроміненні нейтронами і високоенергетичними фотонами, що дозволяє підвищити точність прогнозування реальних робочих характеристик подібних систем залежно від умов функціонування. Використовуючи результати дослідження частотних, амплітудних та температурних залежностей акусто-індукованих ефектів у бар'єрних структурах, запропоновано новий метод динамічного акустичного керування струмом напівпровідникових діодів з p - n -переходом та контактом

Шотткі. Проведене тестування та порівняльне дослідження методів визначення параметрів діодів Шотткі дозволяє вибрати найефективніший з них залежно від експериментальних умов вимірювання характеристик, типу структур, вимог до швидкодії. Запропоновано новий метод оптимізації вибору діапазону експериментальних даних для побудови аналітичних функцій, який підвищує точність визначення параметрів структур метал—напівпровідник. Виявлені зміни амплітудної залежності акусто—індукованого зростання зворотного струму діодів Шотткі після дії γ -квантів можуть бути використані для створення нових сенсорів опромінення.

Особистий внесок здобувача. Внесок автора в отримання наукових результатів полягає у постановці задач та визначенні методів їхнього 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 із 25 наукових статей, опублікованих за темою дисертації, є одноосібними роботами здобувача. У наукових працях, опублікованих зі співавторами, автору належить проведення значної частини досліджень, аналіз і узагальнення отриманих даних, інтерпретація результатів, участь у написанні наукових статей. Співавторами робіт [1,3,4,6,20] є студенти Київського національного університету імені Тараса Шевченка, які виконували кваліфікаційні роботи під керівництвом здобувача. У 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. У роботі [1] автором запропоновано модель акустоактивного дефектного комплексу, в роботі [3] — встановлено можливість застосування моделі поглинання ультразвуку внаслідок руху дислокаційних перегинів до пояснення акусто—індукованих змін параметрів діодів Шотткі. Внесок здобувача у роботу [8] визначався проведенням розрахунків у межах моделей дислокаційного поглинання ультразвуку. В роботі [12] вимірювання вольт—фарадних характеристик проведені співробітником фізичного факультету, канд. фіз.—мат. наук Надточієм А. Б. У роботах [14,23] проводився пошук, аналіз та узагальнення літературних даних щодо впливу ультразвуку на параметри напівпровідникових кристалів та структур. Внесок здобувача у роботу [16] визначався постановкою дослідів по вимірюванню вольт—амперних характеристик, інтерпретацією відповідних результатів, участю в написанні статті. У роботах [21,22] автор провів дослідження параметрів глибоких рівнів, проаналізував отримані дані, 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 представлена автором особисто на вітчизняних і міжнародних конференціях та наукових семінарах.

Апробація результатів дисертації. Основні результати, викладені в роботі, доповідалися на наукових семінарах кафедри загальної фізики Київського національного університету імені Тараса Шевченка та 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 міжнародна конференція «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 міжнародна науково-технічна конференція «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); 13th International Conference on Defects – Recognition, Imaging and Physics in Semiconductors (Wheeling, USA, 2009); 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 результатами дослідження опубліковано 54 наукові праці: 25 наукових статей у фахових журналах (17 статей у виданнях, які входять до наукометричної бази даних Scopus); 29 тез доповідей на наукових конференціях.

Структура та обсяг дисертації. Дисертація складається зі вступу, шести розділів, загальних висновків, списку використаних джерел і додатків. Загальних обсяг дисертації становить 368 сторінок, включаючи 121 рисунок та 31 таблицю. Список використаних джерел містить 659 найменувань.

ОСНОВНИЙ ЗМІСТ РОБОТИ

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

У **першому розділі** стисло проаналізовані основні роботи, присвячені дослідженням взаємодії пружних хвиль із дефектами у напівпровідникових кристалах. Зокрема, вказано, що: а) високоінтенсивні акустичні хвилі (АХ) здатні стимулювати дифузію, перебудову та генерацію точкових дефектів у бінарних та однокомпонентних напівпровідникових кристалах, гетеросистемах та бар'єрних пристроях на їхній основі, що, в свою чергу, є причиною залишкових змін електричних, механічних, оптичних та люмінесцентних властивостей; б) ультразвукова обробка (УЗО) радіаційно деградованих кристалів та структур здатна викликати часткове відновлення їхніх властивостей внаслідок низькотемпературного відпалу дефектів; в) дослідження особливостей поширення АХ та акустоелектронної взаємодії використовується для характеристики власних та домішкових дефектів; г) ультразвук може бути додатковим позитивним фактором впливу під час різноманітних технологічних операцій, зокрема при іонній імплантації; д) при поширенні пружних хвиль у напівпровідникових кристалах та приладах на їхній основі виникають різноманітні оптичних та електрофізичних ефектів, причиною яких вважається коливальний рух дислокацій чи дія п'єзоелектричного поля. Водночас підкреслено, що дані щодо впливу опромінення на акусто–дефектну взаємодію в літературі відсутні, а динамічні акусто–індуковані ефекти в бар'єрних структурах на основі неп'єзоелектричних малодислокаційних напівпровідників фактично не досліджувалися.

У розділі також розглянуто використані методики дослідження параметрів бар'єрних структур при ультразвуковому навантаженні (УЗН), зокрема описано методи визначення параметрів АХ та схема експерименту, яка унеможлилювала проникнення п'єзоелектричного поля у зразок — рис. 1.

У **другому розділі** представлені результати експериментальних досліджень вперше виявлених оборотних акусто–індукованих ефектів у опроміненних та вихідних кремнієвих сонячних елементах. Виявлено, що у діапазоні $290 \div 340$ К при УЗН (частота ультразвуку $f_{\text{УС}} = 4 \div 8$ МГц, інтенсивність $W_{\text{УС}} \leq 0,4$ Вт/см²) у вихідних кремнієвих сонячних елементах відбувається деградація фотоелектричних властивостей, а саме спостерігається зменшення густини струму короткого замикання J_{sc} (до 10%), напруги холостого ходу V_{oc} (до 15%) та фактору форми вольт–амперних характеристик (ВАХ) FF (до 5%). Зміни оборотні, величини параметрів після припинення УЗН та витримки зразків при кімнатній температурі протягом декількох десятків хвилин повертаються до своїх значень перед акустичним навантаженням. Відносні величини акусто–індукованих змін слабо залежать від температури, водночас

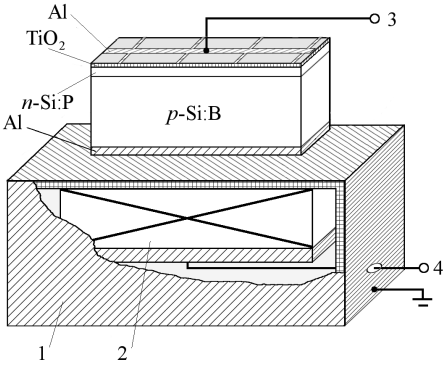


Рис. 1. Схема УЗН кремнієвих сонячних елементів:

- 1 – екран;
- 2 – п'єзoeлектричний перетворювач;
- 3 – контакти для вимірювання ВАХ;
- 4 – контакти для збудження ультразвуку

при використанні поперечних хвиль вони суттєвіші, ніж у випадку застосування повздовжніх хвиль із тією ж інтенсивністю. Останнє свідчить, що ефективність впливу ультразвуку визначається насамперед амплітудою зміщення атомів.

З метою встановлення фізичного механізму виявлених ефектів, проведено аналіз впливу УЗН на ефективний час життя носіїв в області просторового заряду τ_g , фактор неідеальності n_{id} , час життя неосновних носіїв у базі діода τ_n та опір шунтування R_{sh} . Параметри визначалися шляхом апроксимації ВАХ згідно з моделлю подвійного $p-n^+-$ діода:

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

де V – прикладена напруга, J та J_{ph} – густини струму та фотоструму, відповідно; n_i та p_p – концентрації власних носіїв заряду та основних носіїв у p -області, d – товщина області просторового заряду, R_s – послідовний опір, μ_n – рухливість електронів у базі діода. При апроксимації використовувався алгоритм диференційної еволюції та враховувалися температурні та польові залежності n_i , d , μ_n . Оцінка τ_n також проводилася за температурною залежністю J_{sc} .

Виявлені температурні залежності n_{id} та τ_g ($n_{id}(T) \sim T_{id}/T$, $\tau_g(T) \sim \exp(-E_{\tau g}/kT)$, де T_{id} та $E_{\tau g}$ – характерні параметри), а також їхні абсолютні значення ($n_{id} > 2$, $\tau_g < 4 \cdot 10^{-7}$ с), свідчать, що рекомбінація в області просторового заряду відбувається відповідно до моделі рекомбінації у системі спарених рівнів двох дефектів [1*]. УЗН викликає оборотне зростання n_{id} (до 0,04) та зменшення τ_g (до 30%). Оборотність акусто-індукованих змін та незмінність T_{id} і $E_{\tau g}$ свідчать про сталість концентрації рекомбінаційних центрів та відсутність їхньої перебудови при УЗН. Також встановлено, що: а) рекомбінація у квазі-нейтральній області описується моделлю Шоклі-Ріда-Хола; б) величина τ_n , яка визначається цими процесами, при УЗН суттєво (до 90%) зменшується, причому $\tau_n^{-1} \sim u_{us}^2$, де u_{us} – амплітуда зміщення атомів при поширенні АХ.

З метою ідентифікації основних рекомбінаційних центрів проведено дослідження впливів інтенсивного (2 кВт/м^2) довготривалого (до 15 год) освітлення та відпалу (при 200°C) на параметри сонячних елементів. Аналіз залишкових змін та перехідних процесів після припинення освітлення засвідчив, що дефектами, які приймають участь у рекомбінаційних процесах та в акусто-дефектній взаємодії є переважно кисневмісні преципітати та частково пари Fe_iB_s . Зроблений висновок підтверджено за допомогою методу диференційних коефіцієнтів ВАХ [4*], застосування якого дозволило з'ясувати, що основним рекомбінаційним центрам у області просторового заряду вихідних структур відповідають енергетичні рівні $E_c - (0,46 \div 0,48) \text{ eV}$ та $E_c - 0,40 \text{ eV}$ (кисневмісні преципітати), $E_c - 0,36 \text{ eV}$ (дислокації) і $E_c - 0,43 \text{ eV}$ (комплекс Fe_iO_i). Додатково показано, що при УЗН відбувається незначне (на $\sim 10 \text{ меВ}$) зменшення енергії активації та збільшується внесок у рекомбінацію мілкіших рівнів, зокрема пов'язаних із преципітатами; зміни відносних внесків різних центрів лінійно залежать від u_{US} .

Виявлено оборотне зменшення величини R_{sh} (на $\leq 30\%$) при УЗН. Показано, що поява R_{sh} описується моделлю дислокаційно-індукованого імпедансу [2*], а акусто-індуковані зміни викликані зростанням ефективності захоплення електронів лінійними дефектами, розташованими в області p – n -переходу.

Проведені в наближенні дводіодної моделі числові розрахунки показали, що акусто-індуковані зміни J_{sc} зумовлені зменшенням τ_n , тоді як зменшення τ_g викликає деградацію V_{oc} та FF . Останній ефект підсилюється внаслідок акусто-індукованого зменшення R_{sh} та частково компенсується зростанням n_{id} .

Для пояснення виявлених ефектів запропоновано модель акустоактивного комплексного рекомбінаційного центру, що складається із нееквівалентних компонент; ними у випадку рекомбінації Шоклі-Ріда-Хола є складові точкового комплексу, а при рекомбінації в системі спарених рівнів — близько розташовані дефекти донорного та акцепторного типів. Відомо [3*], що при поширенні АХ на точковий дефект діє періодична сила, амплітуда якої залежить від зміни об'єму кристалу, що припадає на один дефект $\Delta\Omega_d$ ($\Delta\Omega_d < 0$ для дефектів вакансійного типу). У рамках запропонованої моделі при УЗН компоненти 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 — рис. 2. Відстань між компонентами при УЗН r_{US} залежить від часу

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

де r_{in} — вихідна відстань, u_D та u_A — амплітуди коливань компонент, $u_D, u_A \sim u_{\text{US}}$; δ — зсув фаз між коливаннями компонент, φ — кут між віссю комплексу та напрямом зміщень атомів при поширенні АХ. У рамках запропонованої моделі проведено розрахунки очікуваних акусто-індукованих змін поперечного перерізу захоплення електронів σ_n та параметра зв'язку, які визначають

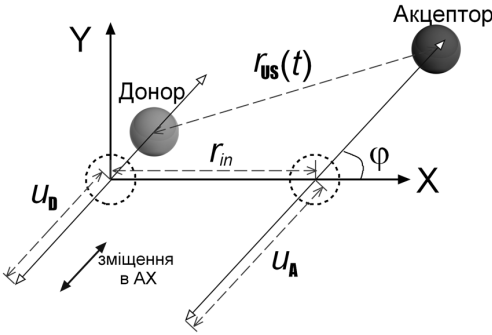


Рис. 2. Очікувана поведінка акустоактивного дефектного комплексу при УЗН відповідно до запропонованої моделі

темпи зникнення нерівноважних носіїв у зазначених рекомбінаційних моделях. Зокрема: а) розглянуто ефективність впливу УЗН при збудженні поперечних та повздовжніх хвиль із врахуванням наявності просторово орієнтованих дислокацій та показано, що найбільші зміни очікуються для комплексу з компонент міжвузлового та вакансійного типу ($\Delta\Omega_d^D \cdot \Delta\Omega_d^A < 0$) за умов поперечних коливань; б) показано, що збільшення σ_n та зменшення параметра зв'язку мають викликати зменшення τ_g та зростання n_{id} , що експериментально спостерігається при поширенні ультразвуку; в) виявлено, що час життя при УЗН $\tau_{n,us}$ пов'язаний із вихідною величиною $\tau_{n,in}$ співвідношенням

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

де кількість доданків визначається кількістю різних акустоактивних рекомбінаційних центрів з концентрацією $N_{d,j}$ кожен; $v_{th,n}$ — теплова швидкість електронів; $K_{us,j}$ описує взаємодію ультразвуку з дефектом j -го типу.

У розділі також наведені результати досліджень впливу УЗН на властивості кремнієвих сонячних елементів, опромінених γ -квантами ^{60}Co (дозы 10^6 і 10^7 рад) та реакторними нейтронами (флюєнс $4 \cdot 10^{11} \text{ см}^{-2}$). Показано, що при нейтронному опроміненні виникають пари C_iO_i , вакансійні кластери V_n та пари VO_i , γ -промені викликають появу лише C_iO_i та VO_i ; проведено оцінку концентрацій радіаційних дефектів та їхнього впливу на τ_n . Виявлено: а) характер температурних залежностей n_{id} (рис. 3) та τ_g (рис. 4) після опромінення зберігається, проте зміни T_{id} та E_{τ_g} свідчать про участь радіаційних дефектів у процесах рекомбінації в системі спарених рівнів; б) акусто-індуковані зміни n_{id} у опромінених структурах більші за модулем та протилежні за знаком відносно змін у вихідних зразках; у рамках запропонованої моделі це означає, 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) УЗН γ -опромінених структур викликає оборотні зміни величин T_{id} та E_{τ_g} , що свідчить про акусто-індуковану перебудову метастабільного радіаційного дефекту, найімовірніше — VO_i . Виявлено, що при УЗН величина τ_n^{-1} для опромінених структур також лінійно залежить від u_{us}^2 . Використовуючи співвідношення (3), визначено коефіцієнти взаємодії АХ із радіаційними дефектами

(для C_iO_i $K_{US}^{CO} = 0$, а отже дефект не акустоактивний, для дивакансії $K_{US}^{V2} = (42 \pm 15) \text{ см}^2 \text{ Вт}^{-1}$) та кисневмісними преципітатами ($K_{US}^{op} > 5 \text{ см}^2 \text{ Вт}^{-1}$).

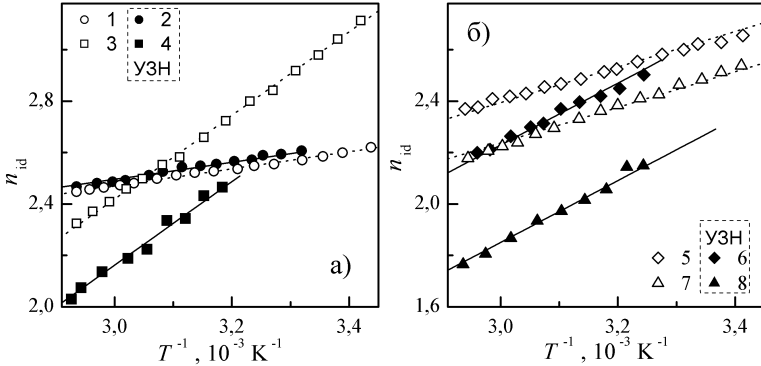


Рис. 3. Температурні залежності фактора неідеальності для неопроміненого (криві 1, 2), нейтронно-опроміненого (3, 4) та γ -опромінених (5, 6 та 7, 8 для доз 10^6 та 10^7 рад, відповідно) зразків. Криві 2, 4, 6 та 8 отримані при УЗН (поперечні хвилі; 4,2 МГц; 0,4 Вт/см²); криві 1, 3, 5 та 7 — без.

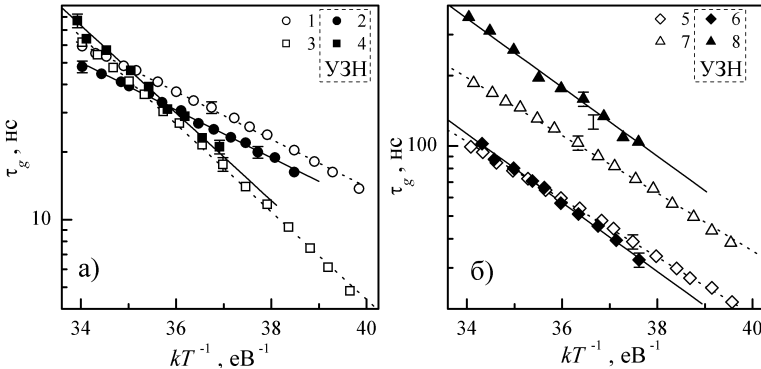


Рис. 4. Температурні залежності часу життя носіїв в області просторового заряду. Позначення кривих збігаються з позначеннями на рис. 3

Виявлено, що у нейтронно-опромінених зразках, на відміну від вихідних та γ -опромінених, УЗН слабо впливає на величину фотоструму — рис. 5. Це не узгоджується з акусто-індукованим зростанням активності рекомбінаційних центрів, про що свідчить спостережене зменшення τ_n . Дослідження температурних залежностей J_{ph} та довжини дифузії неосновних носіїв заряду, засвідчило наявність у цих структурах додаткового механізму впливу УЗН, який, ймовірно, пов'язаний з акусто-індукованою зміною заселеності рівнів вакансійних кластерів та зменшенням коефіцієнта відбивання світла.

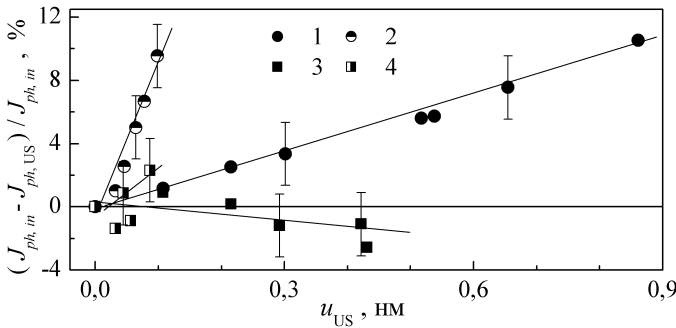


Рис. 5. Залежності акусто–індукованого зменшення фотоструму від амплітуди зміщень атомів у неопромінену (1, 2) та нейтронно–опромінену (3, 4) зразках. f_{US} , МГц: 8,0 (1, 3); 26,1 (2, 4). $J_{ph,US}$ — фотострум при УЗН, $J_{ph,in}$ — без.

У **третьому розділі** наведено результати порівняльного аналізу та оптимізації методів визначення параметрів структур метал–напівпровідник на основі їхніх ВАХ. Величини n_{id} , R_s та висота бар'єру Шотткі Φ_b визначалися на основі моделі термоелектронної емісії (TE):

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

де A — площа діода, A^* — ефективна стала Річардсона. Розглянуто: а) 10 аналітичних методів, які використовують інтегрування ВАХ (метод Kaminski I), побудову однієї чи масиву допоміжних функцій та їхню лінійну (методи Chung, Lee та Kaminski II), нелінійну (Gromov) апроксимацію або пошук екстремумів (Cibils); побудову функцій з використанням додаткових параметрів (методи Norde та Bohlin), диференційних коефіцієнтів першого (Werner) або вищого порядків (Mikhelashvili); б) 2 числові методи — метод найменших квадратів зі статистичними ваговими коефіцієнтами застосовувався безпосередньо до рівняння (4) (Ordinary LS) та до його розв'язку, вираженого через W -функцію Ламберта (Lambert LS); в) 4 еволюційні алгоритми — диференційної еволюції (DE), оптимізації зграї частинок (PSO), модифікованої штучної бджолої сім'ї (MABC) та оптимізованого викладання та навчання (TLBO). Всі методи застосовувалися для аналізу ВАХ, синтезованих за допомогою виразу (4) із врахуванням можливих випадкових похибок вимірювань для діапазону 130÷330 К, та експериментально вимірюваних у цьому ж температурному інтервалі ВАХ кремнієвих діодів Шотткі.

Для методів Norde та Bohlin визначено оптимальні величини додаткових параметрів (1,8 для Norde та 1,6 і 3,5 для Bohlin). Запропоновано модифікацію методу Mikhelashvili, яка полягає у послідовному використанні медіанного фільтру та процедури згладжування функції $\alpha(V) = d(\ln I)/d(\ln V)$ перед визначенням положення її максимуму; показано доцільність застосування запропонованої модифікації при опрацюванні масиву реальних ВАХ для підвищення точності методу. Запропоновано адаптивну процедуру вибору діапазона

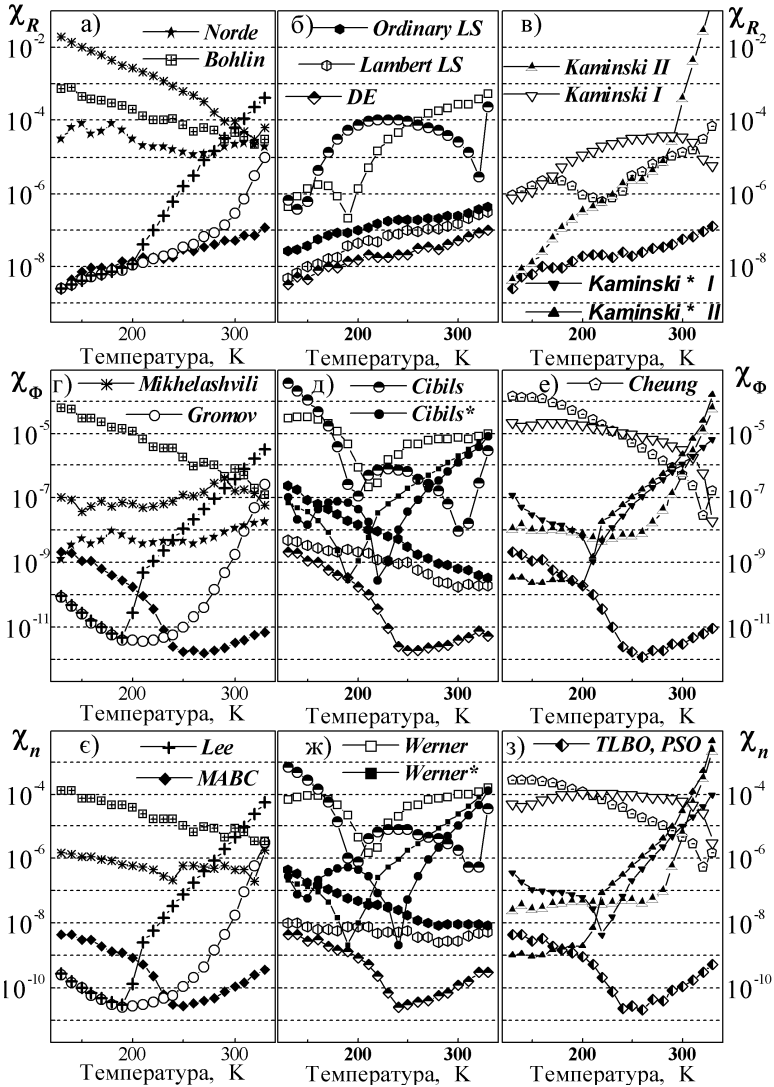


Рис. 6. Відносні похибки визначення R_s (а — в), Φ_b (г — е) та n_{id} (є — з) при застосуванні аналітичних, числових та еволюційних методів до ВАХ, синтезованих при різних температурах

Таблиця 1

Тривалість визначення параметрів діодів Шоттки з однієї ВАХ за допомогою різних методів при однаковій конфігурації комп'ютера

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	$0,057 \div 0,20$	TLBO	$5,4 \div 19,2$

ВАХ для побудови допоміжних функцій в аналітичних методах 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.

Виявлено, що відносні похибки визначення R_s , Φ_b та n_{id} лінійно залежать від величин відносних похибок вимірювання напруги та сили струму, причому в останньому випадку залежність слабша. Проведено порівняльний аналіз точності (рис. 6 та 7) та швидкодії (табл. 1) визначення параметрів різними методами. Показано, що найвища точність досягається при використанні еволюційних алгоритмів, числових методів, методу Gromov із адаптивною процедурою та методу Lee. Використання функції Ламберта при застосуванні числових методів дозволяє зменшити помилки визначення параметрів. Визначено вплив абсолютних величин кожного з параметрів на точність визначення R_s , Φ_b та n_{id} . Зокрема показано, що еволюційні алгоритми дозволяють отримати найкоректніші результати при малих значеннях R_s (декілька ом) або високих температурах, а найстійкішими до змін величин параметрів є числові методи.

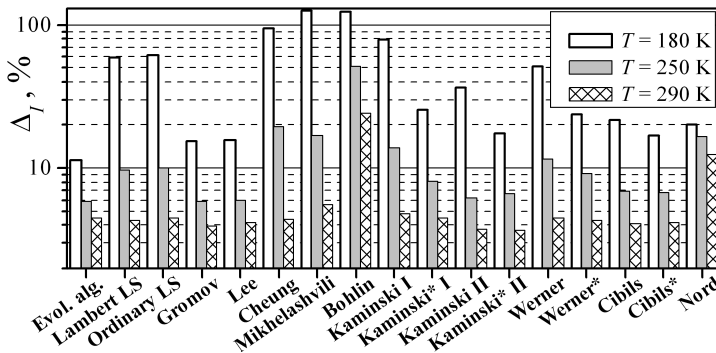


Рис. 7. Середні значення відносного відхилення виміряних значень сили струму від розрахованих за формулою (4) з використанням параметрів, отриманих при застосуванні різних методів (відкладені по горизонталі)

Наведені результати огляду, тестування та порівняльного аналізу методів визначення параметрів діодів Шотткі можуть бути корисними під час досліджень та розробок пристроїв із контактом метал—напівпровідник на основі не лише кремнію, але й інших напівпровідників.

Четвертий розділ містить результати досліджень структур $\text{Al}-n-n^+-\text{Si}$ з контактом Шотткі. А саме, розглянуто: а) вплив γ -опромінення на процеси перенесення заряду в діапазоні $130 \div 330$ К; б) вперше виявлені оборотні акусто-індуковані ефекти при кімнатних температурах.

Встановлено, що поява при низьких температурах ($T < 210$ К) додаткової компоненти прямого струму, а також температурні залежності висоти бар'єру (рис. 8) та фактору неідеальності можуть бути пояснені на основі моделі ТЕ через неоднорідний контакт [5*]. У межах моделі визначено середню висоту бар'єру Шотткі Φ_b^0 та її стандартне відхилення σ_Φ : $0,872 \pm 0,004$ В та $0,099 \pm 0,001$ В при $(130 \div 220)$ К та $0,663 \pm 0,003$ В та $0,040 \pm 0,005$ В при $(230 \div 330)$ К, відповідно. З аналізу температурної залежності додаткової компоненти струму одержано середнє значення висоти бар'єру Шотткі в області зі зниженим бар'єром (так званого патчу): 54 ± 4 мВ. Показано, що при зворотних зміщеннях струм I_R складається з двох компонент — рис. 9,а. Перша з них, I_{TE} , зумовлена процесами ТЕ через неоднорідний контакт; друга, I_{FN} , викликана процесами тунелювання за участю рівня E_c — (120 ± 5) меВ, пов'язаним, найімовірніше, з міжвузловим атомом вуглецю C_i .

Показано, що при опроміненні γ -квантами ^{60}Co із дозами $D = 10^6$ рад та $D = 10^7$ рад відбувається немонотонна зміна висоти бар'єра Шотткі — рис. 8. При зворотному зміщенні в опроміненіх структурах виникає додаткова компонента струму, I_{MPT} , пов'язана із тунельною багатогононою іонізацією глибоких центрів [6*].

Виявлено, що для зразків, опроміненіх із дозою 10^6 рад, при $120 \div 240$ К домінуючою причиною прямого та зворотного струму стає тунелювання за

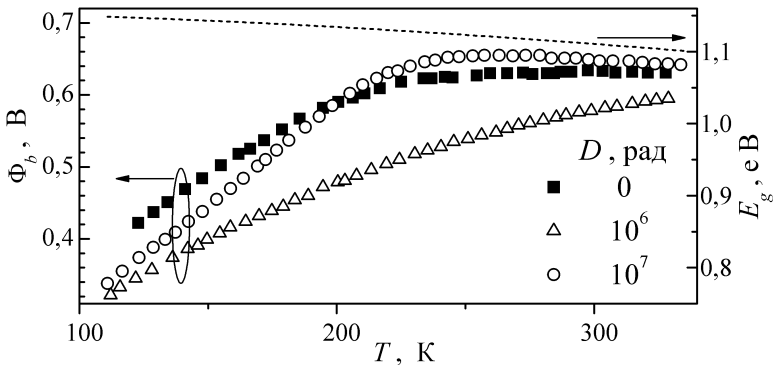


Рис. 8. Температурні залежності висот бар'єру структур $\text{Al}-n-n^+-\text{Si}$ (точки, ліва вісь) та ширини забороненої зони кремнію (пунктир, права вісь)

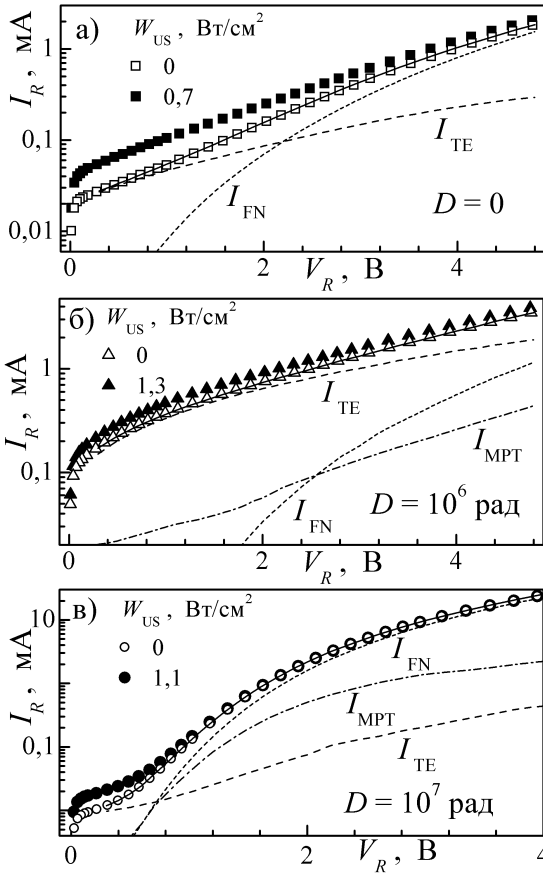


Рис. 9. Зворотні ВАХ структур $\text{Al}-n-n^+-\text{Si}$ з різним ступенем опромінення. $T = 305$ К. Заповнені та порожні точки отримані при УЗН ($f_{\text{US}} = 9,6$ МГц) та без нього, відповідно. Розривні лінії відображають окремі складові зворотного струму для акустично ненавантажених структур, суцільні — їхню суму

участю рівнів радіаційних дефектів. При $T > 260$ К та прямому змищенні 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. Також зростає висота бар'єру в області патчів (з 54 до 74 мВ), проте їхня загальна площа не змінюється. Причиною збільшення висоти бар'єра є накопичення на інтерфейсі радіаційних дефектів акцепторного типу. Радіаційно-підсилене дислокаційне ковзання викликає перегрупування патчів із утворенням скупчень більшого розміру. Останнє підсилює вплив патчів, що маскує зростання висоти бар'єру за їхніми межами і спричиняє зменшення ефективної Φ_b , яка визначається з аналізу ВАХ (рис. 8).

Показано, що при збільшенні дози до 10^7 рад тунельний струм стає основним при зворотному змищенні у всьому температурному інтервалі. При $T = 260 \div 330$ К прямий струм пов'язаний як з тунелюванням, так і з ТЕ процесами через однорідний бар'єр висотою близько 710 мВ, визначеною за

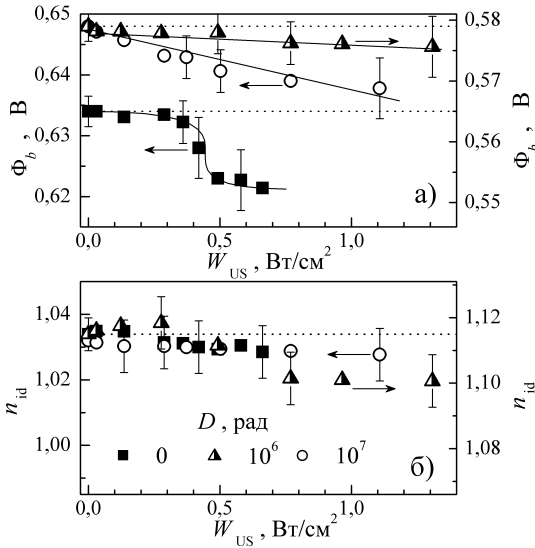


Рис. 10. Залежності висоти бар'єру Шоттки (а) та фактора неідеальності (б) від інтенсивності УЗ для структур $\text{Al}-n-n^+-\text{Si}$ з різною дозою γ -опромінення. Горизонтальні пунктирні лінії відповідають значенням параметрів, виміряних без УЗН. $T = 305 \text{ K}$. $f_{\text{US}} = 9,6 \text{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

допомогою залежності Річардсона. Зміни механізму перенесення заряду зумовлені суттєвим збільшенням концентрації радіаційних дефектів та ефективним гетеруванням патчами від'ємно заряджених центрів. Це викликає зменшення Φ_b за межами патчів, а самі вони перестають впливати на ТЕ процеси і виконують роль тунельних шунтів. Отже, як виявлено, характер немонотонної залежності $\Phi_b(D)$ залежить від ступеня неоднорідності: для однорідного контакту відбувається «зростання–спад» висоти бар'єру при збільшенні дози, проте можливе інвертування ефекту внаслідок впливу патчів. Зауважимо, що у літературі повідомляється про спостереження обох типів немонотонності («спад–зростання» та «зростання–спад»), проте причини такого різноманіття характеру радіаційно–індукованих змін Φ_b залишалися невідомими.

У розділі також розглянуто ефект оборотного зменшення Φ_b при УЗН за $T = 305 \text{ K}$ — рис. 10,а. У неопромінених структурах залежність $\Phi_b(W_{\text{US}})$ має пороговий характер; після γ -опромінення ефективність впливу УЗ знижується та змінюється характер амплітудної залежності. Зі збільшення дози величина акусто–індукованих змін Φ_b зростає. Показано, що у неопромінених структурах зменшення висоти бар'єру зумовлене зміною рівня нейтральності інтерфейсних станів внаслідок іонізації дефектів, викликаній коливаннями дислокаційних відрізків у акустичному полі. Опромінення спричинює закріплення лінійних дефектів внаслідок гетерування ними точкових дефектів та появу акустоактивних радіаційних дефектів (А–центрів, дивакансій). Незначні акусто–індуковані зміни фактора неідеальності спостерігаються лише у випадку, коли $n_{\text{id}} > 1,1$ (рис. 10,б), що зумовлено впливом УЗ на патчі внаслідок взаємодії пружних хвиль із радіаційними дефектами, захопленими в областях неоднорідності.

За умов УЗН спостерігається збільшення величини зворотного струму — рис. 9. Ефект послаблюється зі збільшенням зміщення, амплітудна

залежність як для вихідних, так і опромінених структур аналогічна акустоіндукованим змінам висоти бар'єру. Враховуючи, що акустоіндуковані зміни зворотного струму можуть сягати декількох десятків відсотків, запропоновано використовувати ефект для створення сенсора γ -опромінення. Показано, що акустоіндуковані зміни I_R зумовлені впливом пружних хвиль на ТЕ складову, тоді як незмінність при УЗН тунельних компонент струму свідчить, що відповідні дефекти (зокрема C_i) не є акустоактивними.

У **п'ятому розділі** приведені результати досліджень оборотних акустоіндукованих ($f_{US} = 4,1, 8,4$ та $27,8$ МГц) змін параметрів діодів Шотткі $Mo-n-n^+-Si$ в інтервалі температур $130 \div 330$ К.

Показано, що у досліджених структурах перенесення заряду відбувається відповідно до моделі термоелектронної емісії через неоднорідний контакт, причому для опису температурної залежності висоти бар'єру Шотткі доцільно застосовувати наближення подвійного розподілу Гауса [7*]:

$$\Phi_b = -\frac{kT}{q} \ln \left[\varrho_1 \exp \left(-\frac{q\Phi_{b,1}^0}{kT} + \frac{q^2\sigma_{\Phi,1}^2}{2k^2T^2} \right) + \varrho_2 \exp \left(-\frac{q\Phi_{b,2}^0}{kT} + \frac{q^2\sigma_{\Phi,2}^2}{2k^2T^2} \right) \right], \quad (5)$$

ϱ_1, ϱ_2 — вагові коефіцієнти кожного з розподілів. Виявлено, що ультразвук викликає оборотні збільшення фактора неідеальності та зміни Φ_b , величина і знак яких залежать від температури — рис. 11. Розрахунки, проведені відповідно до моделі [3*,7*] показали, що при УЗН відбувається зростання $\Phi_{b,i}^0, \sigma_{\Phi,i}$ та ϱ_2 . Наприклад, при $f_{US} = 4,1$ МГц та $W_{US} = 0,17$ Вт/см², $\Phi_{b,1}^0$ змінюється від 780 мВ до 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 130 мВ, а ϱ_2 збільшується у 4 рази. Встановлено, що УЗН модифікує висоту бар'єру в області патчів, причому зміни немонотонно залежать від W_{US} , та викликає зростання їхньої ефективної густини приблизно на порядок.

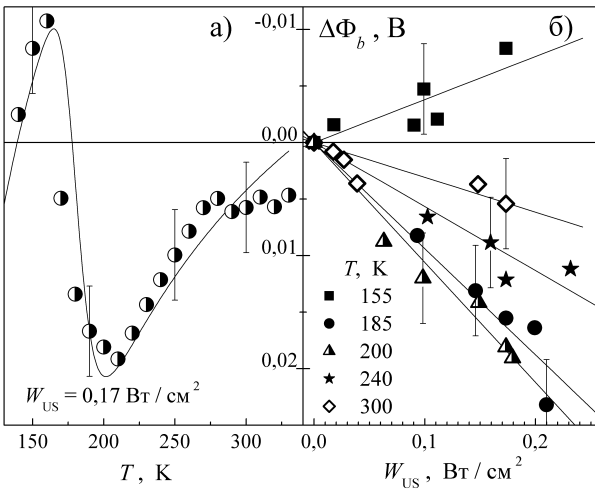


Рис. 11. Залежності акустоіндукованих змін висоти бар'єру Шотткі структур $Mo-n-n^+-Si$ від температури (а) та інтенсивності введенного УЗ (б). $f_{US} = 4,1$ МГц

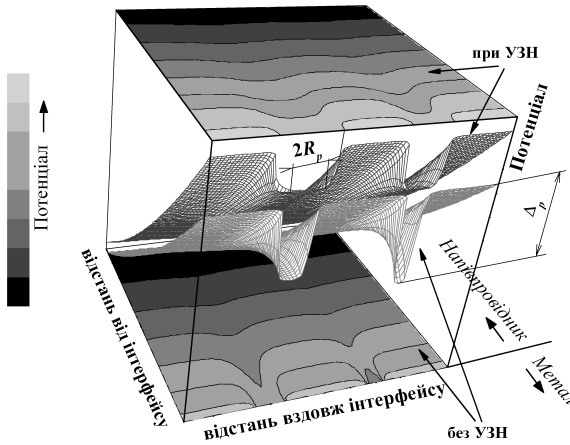


Рис. 12. Схематичне зображення просторового розподілу поверхневого потенціалу, що відображає різницю між випадком УЗН (верхні поверхня та контурна площина) та його відсутністю (нижні поверхня та контурна площина). Рисунок зроблено у припущенні, що наявні два патчі. При розрахунку використана формула (1.5.3) з [5*]

Основні виявлені особливості впливу УЗН на стан контакту метал—напівпровідник якісно узагальнено на рис.12.

Показано, що температурні та частотні залежності акусто-індукованих змін у структурах $\text{Mo}-n-n^+-\text{Si}$ (рис.13) можуть бути пояснені в рамках моделі Брейсфолда [8*], яка передбачає дифузію дислокаційних перегинів. Зокрема, зміни висоти бар'єру описуються виразом

$$\Delta\Phi_b(f_{\text{US}}, T) \sim \frac{f_{\text{US}}}{T} \frac{(f_{\text{US}}/f_k) \exp\left(\frac{W_k}{kT}\right)}{1 + (f_{\text{US}}/f_k)^2 \exp\left(\frac{2W_k}{kT}\right)} W_{\text{US}}, \quad (6)$$

де W_k — енергія активації дифузії, а параметр f_k пов'язаний з середньою довжиною дислокаційного сегмента та абсолютним значенням коефіцієнта дифузії. Визначені в рамках моделі величини становлять $W_k = (90 \pm 10)$ меВ та $f_k = (3 \pm 2) \cdot 10^9$ Гц.

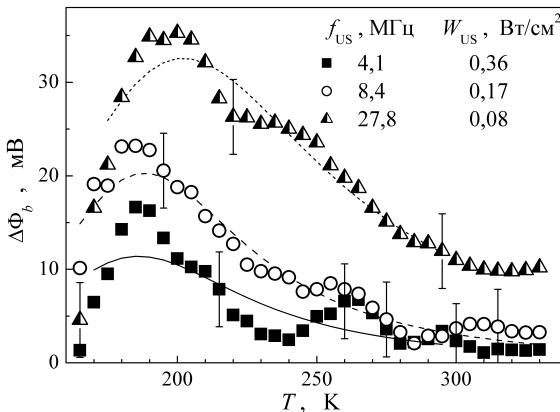


Рис. 13. Температурні залежності акусто-індукованих змін висоти бар'єру Шотткі структур $\text{Mo}-n-n^+-\text{Si}$. Точки — експеримент, лінії — апроксимація згідно з формулою (6)

Виявлено, що при зворотному зміщенні перенесення заряду зумовлене процесами ТЕ (I_{TE}) та стимульованим фононами тунелюванням з електронних станів поблизу межі розділу (I_{PAT}) [9*] і може бути описане виразом

$$I_R = I_{TE} + I_{PAT} = P_t I_0 T^2 \exp\left(-\frac{q\Phi_b}{kT}\right) \left[1 - \exp\left(-\frac{V_s}{kT}\right)\right] + \quad (7)$$

$$+ \frac{P_t q^2 F_m A N_{ss}}{\sqrt{8m^* \epsilon_t}} \left(1 - \frac{\gamma}{\gamma_1}\right)^{1/2} \exp\left\{-\frac{4\sqrt{2m^*} \epsilon_t^{3/2} (\gamma_1 - \gamma)^2}{3qF_m \hbar} \left[\gamma_1 + \frac{1}{2}\gamma\right]\right\}$$

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

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 межі напівпровідник–метал. Висота бар'єру 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 зумовлене впливом інтерфейсних станів [5*] та ефектом Пула–Френкеля. При УЗН зареєстроване оборотне зростання I_R , викликане акусто–індукованим впливом на Φ_{b0} , α_F , ϵ_{t0} та β_F (табл. 2). Показано, що можливою причиною змін I_{PAT} є модифікація розміру кластерів позитивно заряджених дефектів, викликана локальним підвищенням їхньої температури в акустичному полі [2*].

Таблиця 2

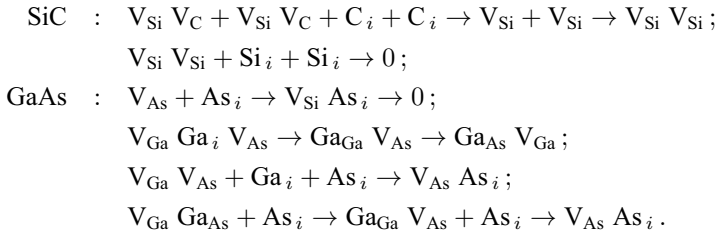
Параметри, визначені для структур Мо– n – n^+ –Si зі зворотних гілок ВАХ

W_{us} , Вт/см ²	f_{us} , МГц	$\Phi_{b0}(0)$, мВ	α_F , нм	ϵ_{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 структур GaAs, викликаних мікрохвильовою та ультразвуковою обробками.

Зокрема, досліджено вплив надвисокочастотного випромінювання (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. Виявлено, що до опромінення у зразках спостерігалися комплекси вакансійного типу: $V_{Si}V_C$ (положення рівня $E_c - 0,33$ еВ) в n -6H-SiC, V_{As} ($E_c - 0,32$ еВ) і $V_{Ga}Ga_iV_{As}$ ($E_c - 0,49$ еВ) в n -GaAs, та $V_{Ga}V_{As}$ ($E_c - 0,24$ еВ), $V_{As}As_i$ ($E_c - (0,43 - 0,46)$ еВ) і $V_{Ga}Ga_{As}$ ($E_c - 0,40$ еВ) на межі розділу епітаксійних

структур $n-n^+-\text{GaAs}$. Внаслідок мікрохвильового опромінення біля поверхні збільшується концентрація міжвузлових атомів та відбуваються перетворення в дефектній підсистемі внаслідок їхньої взаємодії з вихідними дефектами:



Мікрохвильова обробка також викликає модифікацію (у декілька разів) поперечного перерізу захоплення електронів, яка зумовлена зміною напруженості електричного поля в околі дефектів. Отримані результати корелюють із вимірами радіуса кривизни структур та деформації у приповерхневому шарі. Показано, що наявність механічних напруг сприяє радіаційно-стимульованим перетворенням точкових дефектів.

Проведено дослідження впливу ультразвукової обробки ($f_{\text{US}} = (4,1 \div 30)$ МГц, $W_{\text{US}} = (0,3 \div 3)$ Вт/см², час обробки $t_{\text{UST}} = (5 \div 15)$ год) на параметри структур $\text{Au-TiB}_x-n-n^+-\text{GaAs}$, виготовлених за технологією з інтегральним тепловідведенням. Виявлено, що при $W_{\text{US}} < 2,5$ Вт/см² УЗО викликає необоротне зменшення розкидів висоти бар'єру, фактора неідеальності та величини зворотного струму (рис. 14) діодів Шотткі, виготовлених в єдиному технологічному процесі. Встановлено, що ефект зумовлений акусто-стимульованою

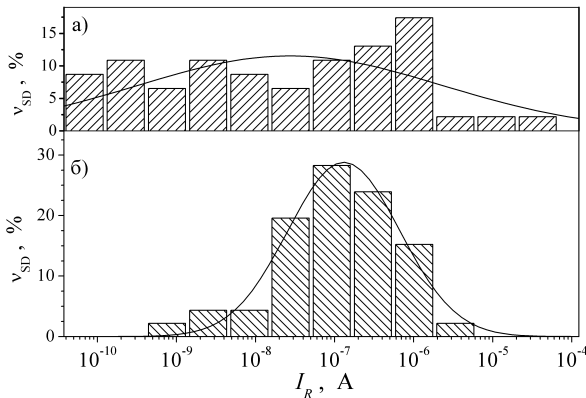


Рис. 14. Залежність частки структур $\text{Au-TiB}_x-n-n^+-\text{GaAs}$, для яких зворотній струм при $V_R = 2$ В перебуває у відповідному діапазоні від величини струму до (а) та після (б) УЗО. $W_{\text{US}} = 1,8$ Вт/см², $f_{\text{US}} = 4,1$ МГц, $t_{\text{UST}} = 10$ год. Лінії — апроксимація відповідно до розподілу Гауса. Середнє 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)

дифузією точкових дефектів, яка призводить до згладжування локальних неоднорідностей межі розділу. Виявлено, що зі збільшенням частоти ультразвуку інтенсифікуються процеси перебудови дефектів, що відображається у зміні характеристичного параметра тунельної компоненти зворотного струму. При перевищенні W_{US} порогу ($\sim 2,5 \text{ Вт/см}^2$) спостерігаються ефекти зменшення Φ_b та зростання n_{id} і зворотного струму, зумовлені акустогенерацією дефектів.

Шостий розділ містить також результати досліджень, спрямованих на з'ясування можливості відновлення характеристик структур $\text{Au-SiO}_2\text{-Si}$, деградованих внаслідок γ -опромінення ($D = 5 \cdot 10^7 \text{ рад}$). Виявлено, що опромінення суттєво змінює процеси перенесення заряду — рис. 15. Показано, що при малих прямих зміщеннях основним стає струм, обмежений просторовим зарядом:

$$I = I_0 V^{m_F}, \quad (8)$$

причому I_0 залежить від концентрації пасток N_t , $I_0 \sim N_t^{1-m_F}$; а m_F відображає енергетичний розподіл їхніх рівнів [10*]. Виникнення цієї компоненти струму зумовлене утворенням ненасичених зв'язків на межі Si-SiO_2 (P_b -центрів). Накопичення P_b -центрами від'ємного заряду на інтерфейсі створює умови для зменшення ТЕ складової струму. Крім того, γ -опромінення є причиною появи E' -центрів (вакансій кисню) і зумовлює появу при зворотному зміщенні струму втрат, пов'язаного з тунелюванням по пастках

$$I = I_{0,\text{TAT}} (U_d + V_R) \exp(-R_{\text{TAT}}/F_m), \quad (9)$$

де параметр $I_{0,\text{TAT}}$ пропорційний концентрації пасток.

Встановлено, що ультразвукова обробка ($f_{\text{US}} = 4 \text{ МГц}$, $W_{\text{US}} = 2 \text{ Вт/см}^2$, $t_{\text{UST}} = (0,5 \div 1) \text{ год}$) викликає зменшення концентрації E' -центрів (приблизно в 25 разів) та P_b -центрів (в ~ 10 разів) а також звуження енергетичного спектра останніх (m_F змінюється з 1,3 до 1,8). Показано, що ефект зумовлений акустоіндукованою дифузією атомів кисню та водню, причому ефективність пасивації останніми ненасичених зв'язків залежить від рівня механічних напруг в околі дефекту.

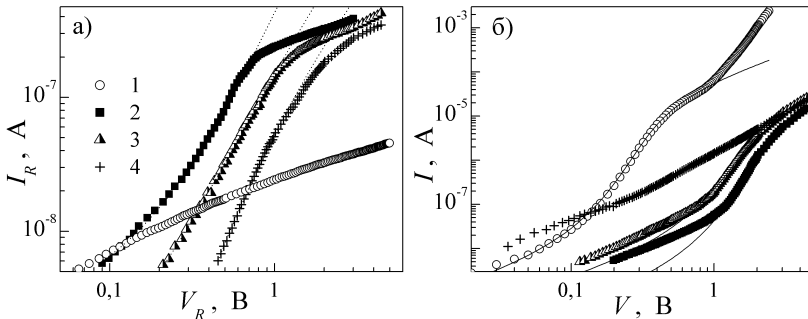


Рис. 15. Зворотні (а) та прямі (б) ВАХ структур $\text{Au-SiO}_2\text{-Si}$ до (криві 1) та після (2–4) опромінення γ -квантами. t_{UST} , хв: 0 (2), 30 (3), 60 (4). $T = 300 \text{ К}$. Лінії — апроксимація за формулами (4) (суцільні,а) та (9) (пунктир,б)

ВИСНОВКИ

1. Вперше експериментально досліджено вплив ультразвукового навантаження на параметри монокристалічних кремнієвих сонячних елементів у діапазоні температур 290÷340 К та виявлено оборотну акусто-індуковану деградацію фотоелектричних властивостей, зумовлену зменшенням часу життя носіїв заряду в акустичному полі. Виявлено, що в умовах акустичного навантаження збільшується внесок у рекомбінаційні процеси мілкіших рівнів. Встановлено, що кисневмісні преципітати ефективно впливають на процеси рекомбінації та беруть участь у акусто-дефектній взаємодії. Запропоновано модель акустоактивного комплексного дефекту для пояснення особливостей акусто-індукованих ефектів. Виявлено ефект акусто-індукованого зменшення опору шунтування та запропоновано його пояснення із залученням моделі дислокаційно-індукованого імпедансу.

2. Вперше досліджено вплив ультразвукового навантаження на параметри кремнієвих структур із p - n -переходом, опромінених реакторними нейтронами та γ -квантами ^{60}Co . Виявлено, що в опромінених структурах, порівняно з неопроміненими, спостерігається підвищення ефективності акусто-індукованого зменшення опору шунтування та часу життя неосновних носіїв заряду в базі діода. З'ясовано, що акусто-індуковані оборотні зміни фактора неідеальності та часу життя носіїв заряду в області просторового заряду мають різний знак в опромінених та неопромінених зразках. Встановлено, що в нейтронно-опромінених діодах основними акустоактивними центрами є дивакансії, а в γ -опромінених — комплекс вакансії та міжвузлового кисню. Виявлено, що комплекс із міжвузлового вуглецю та міжвузлового кисню не приймає участі в акусто-дефектній взаємодії.

3. Проведено порівняльний аналіз та тестування 16 основних методів визначення параметрів діодів Шотткі із 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 оптимізації вибору діапазону ВАХ, який використовується для побудови допоміжних функцій при застосуванні аналітичних методів визначення параметрів структур метал-напівпровідник. Показано, що така процедура дозволяє суттєво (приблизно на порядок при кімнатних температурах у випадку низького рівня похибок вимірювання) підвищити точність визначення параметрів.

4. Встановлено, що найефективнішими методами з погляду точності визначення параметрів та швидкості розрахунків є еволюційні алгоритми, метод Gtomov із адаптивною процедурою та метод Lee. Показано, що використання функції Ламберта при числовому визначенні параметрів діодів Шотткі дозволяє зменшити похибки. Розраховані залежності точності визначення послідовного опору, висоти бар'єру Шотткі та фактора неідеальності від рівня випадкових помилок при вимірюванні вольт-амперних характеристик.

5. Виявлено, що перенесення заряду в структурах $\text{Al}-n-n^+-\text{Si}$ з бар'єром Шотткі у діапазоні температур $130 \div 330$ К при прямому зміщенні відбувається внаслідок термоелектронної емісії через неоднорідний контакт. 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 Шотткі в цих областях. Виявлено, що при зворотному зміщенні в структурах $\text{Al}-n-n^+-\text{Si}$ перенесення заряду відбувається як внаслідок термоелектронної емісії через неоднорідний бар'єр, так і завдяки процесам тунелювання через глибокий центр (міжвузловий атом вуглецю).

6. Показано, що опромінення γ -квантами ^{60}Co структур $\text{Al}-n-n^+-\text{Si}$ суттєво підсилює процеси тунелювання носіїв заряду як при прямому зміщенні, так і при зворотному. При прямому зміщенні тунельний механізм перенесення заряду стає основним у низькотемпературній області ($T < 250$ К), при зворотному — виникає компонента струму, зумовлена багатофононним тунелюванням. Виявлено, що висота бар'єру, фактор неідеальності та величина зворотного струму немонотонно змінюються при збільшенні поглинутої дози. З'ясовано, що при опроміненні з дозою 10^6 рад зміна електрофізичних параметрів відбувається внаслідок накопичення дефектів акцепторного типу на межі метал—напівпровідник та укрупнення патчів, викликаного радіаційно підсиленим дислокаційним ковзанням. При 10^7 рад причинами змін властивостей діодів Шотткі є інтенсифікація процесів тунелювання внаслідок утворення значної кількості радіаційних дефектів та гетерування останніх в областях зі зниженим бар'єром. Встановлено взаємозв'язок характеру дозової немонотонності зміни висоти бар'єру Шотткі та ступеню неоднорідності контакту.

7. Вперше досліджено динамічний вплив ультразвукового навантаження при кімнатній температурі на параметри кремнієвих діодів Шотткі $\text{Al}-n-n^+-\text{Si}$. Виявлено оборотні зменшення висоти бар'єру, збільшення зворотного струму та струму насичення, тоді як фактор неідеальності практично не змінюється. З'ясовано, що акустичне навантаження не впливає на процеси прямого та багатофононного тунелювання. Встановлено, що вплив ультразвуку на термоемісійну складову струму структур пояснюється 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 Шотткі за температур $130 \div 330$ К. Виявлено акусто-індуковані оборотні зміни фактора неідеальності та висоти бар'єру Шотткі, причому зміни немонотонно залежать від температури, а найефективніший вплив ультразвуку спостерігається поблизу 200 К. Показано, що зі збільшенням частоти ультразвуку спостерігається як загальне підвищення ефективності акустичного впливу на параметри кремнієвих діодів Шотткі, так і зростання температури максимуму ефективності. Використовуючи модель

неоднорідного контакту встановлено, що при ультразвуковому навантаженні відбувається збільшення висоти бар'єру як в області розташування патчів, так і за їхніми межами, а також розширюється розподіл параметрів патчів та збільшується їхня ефективна густина. З'ясовано, що механізм акусто-індукованих змін параметрів структур $\text{Mo}/n\text{-}n^+\text{-Si}$ зумовлений рухом дислокаційних перегинів.

9. Виявлено ефект оборотного збільшення зворотного струму структур $\text{Mo}/n\text{-}n^+\text{-Si}$ при акустичному навантаженні. Встановлено, що ефект послаблюється при збільшенні температури та зміщення і 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. Виявлено вплив мікрохвильового опромінення на параметри точкових дефектів у монокристалах $n\text{-}6H\text{-SiC}$, $n\text{-GaAs}$ та епітаксійних структурах на основі арсеніду галію. Встановлено, що причинами радіаційно-індукованих змін поперечного перерізу захоплення електронів та розташування енергетичних рівнів пасток у забороненій зоні є збільшення кількості міжвузлових атомів у приповерхневому шарі. Показано, що радіаційно-індуковані процеси перетворення дефектних комплексів інтенсифікуються за наявності механічних напруг.

11. Вперше експериментально досліджено вплив ультразвукової обробки на параметри структури $\text{Au-TiB}_x\text{-}n\text{-}n^+\text{-GaAs}$ з контактом Шотткі залежно від частоти та інтенсивності акустичних хвиль. Встановлено, що при пороговій (менше $2,5 \text{ Вт/см}^2$) інтенсивності ультразвуку відбувається збільшення однорідності параметрів арсенід-галієвих діодів Шотткі, створених в єдиному технологічному процесі, зумовлене акусто-стимульованою дифузією дефектів.

12. Виявлено, що ультразвукова обробка викликає зменшення концентрації та звуження енергетичного спектра радіаційних дефектів у системі Si-SiO_2 . Показано, що причиною ефекту є акусто-індукована дифузія атомів водню та кисню.

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 / S. Steingrube, O. Breitenstein, K. Ramspeck et al. // *J. Appl. Phys.* — 2011. — Vol. 110, no. 1. — P. 014515.

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

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

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, R.T. Recent advances in Schottky barrier concept / R.T. Tung // *Materials Science and Engineering: R: Reports*. — 2001. — 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. — Vol. 61, no. 15. — P. 10361–10365.

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

8*. Brailsford, A. D. Abrupt-Kink Model of Dislocation Motion / A. D. Brailsford // *Phys. Rev.* — 1961. — 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. — Vol. 99, no. 9. — P. 093709.

10*. Jafar, M.M.A.-G. High-bias current-voltage-temperature characteristics of undoped rf magnetron sputter deposited boron carbide (B_5C)/p-type crystalline silicon heterojunctions / M.M.A.-G. Jafar // *Semicond. Sci. Technol.* — 2003. — 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. — 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. — Vol. 117. — P. 173–188.
3. Olikh, O. On the mechanism of ultrasonic loading effect in silicon-based Schottky diodes / O. Olikh, K. Voytenko // *Ultrasonics*. — 2016. — 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. — 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. — 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. — Vol. 117, no. 4. — P. 044505–1–044505–7.
7. Olikh, O.. Reversible influence of ultrasound on γ –irradiated Mo/n-Si Schottky barrier structure / O. Olikh // *Ultrasonics*. — 2015. — 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. — Vol. 60, no. 1. — P. 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–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 Шотки / 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. — Vol. 57, no. 3. — P. 1632–1639.
17. Оліх, О. Я. Изменение активности рекомбинационных центров в кремниевых р–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. *Burbelo, R. M.* The Dynamic Ultrasound Influence on the Diffusion and Drift of the Charge Carriers in Silicon p-n Structures / R. M. Burbelo, O. Y. Olikh, M. K. Hinders // *MRS Proceedings*. — 2007. — Vol. 994. — P. 0994-F03-11.
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. *Олих, 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. — P. 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. *Olikh, O.* Ultrasound influence on the recombination centers in silicon p–n–structures / O. Olikh // 13th International Conference on Defects — Recognition, Imaging and Physics in Semiconductors. Wheeling, USA. Final program. — Wheeling: 2009. — P. 9–10.

40. *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.
41. *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.
42. *Оліх, 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.
43. *Оліх, О. Я.* Вплив ультразвуку на термoeмісійні 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.
44. *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.
45. *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. — P. 101–102.
46. *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.
47. *Оліх, 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.
48. *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. — P. 439–440.
49. *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. — P. 645–646.

50. *Olix, O. Ya.* Характеризація γ -опромінених кремнієвих p - 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.
51. *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.
52. *Olix, O. Ya.* Порівняння ефективності методів визначення параметрів діодів Шоттки / О. Я. Оліх // Сучасні проблеми фізики конденсованого стану: Праці IV-ї міжнародної конференції. Київ, Україна. — Київ: 2015. — С. 32–34.
53. Ультразвукова модифікація стимульованого фононами тунелювання у кремнієвих діодах Шоттки / 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.
54. *Olix, O. Ya.* 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 радіаційно-індуковані 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.

Дисертація присвячена дослідженню впливу ультразвукового навантаження та опромінення (γ -кванти, нейтрони) на проходження струму в структурах із p - n -переходом (Si) та контактом Шоттки (Si, GaAs). У кремнієвих сонячних елементах, у тому числі опромінених, виявлено акусто-індуковане зменшення часу життя носіїв заряду, оборотне при кімнатних температурах. Для пояснення виявлених ефектів запропоновано модель акустоактивного комплексного точкового рекомбінаційного центру. Проведено порівняльний аналіз аналітичних, чисельних та еволюційних методів визначення параметрів діодів Шоттки та визначено найоптимальніші з них з погляду точності та швидкодії. Встановлено взаємозв'язок між характером зміни висоти бар'єру Шоттки при збільшенні поглинутої дози γ -квантів структур $Al-n-n^+-Si$ та ступенем неоднорідності контакту. Виявлено оборотній вплив ультразвуку на висоту бар'єру та величину зворотного струму структур кремній–метал і показано, що він зумовлений рухом дислокаційних перегинів та зміною розмірів дефектних

кластерів. Встановлено, що вплив мікрохвильового опромінення на дефектну структуру приповерхневого шару монокристалів GaAs і SiC та епітаксійних структур GaAs викликаний зростанням концентрації міжвузольних атомів. Виявлено, що ультразвукова обробка здатна підвищувати однорідність параметрів арсенід–галієвих діодів Шоттки та модифікувати концентрацію і енергетичний спектр радіаційно–індукованих пасток на інтерфейсі системи Si–SiO₂.

Ключові слова: ультразвук, γ –опромінення, кремній, бар’єрні структури, акусто–дефектна взаємодія, перенесення заряду, оборотні акусто–індуковані зміни.

АННОТАЦИЯ

Олих О. Я. Акусто– и радиационно–индуцированные явления в поверхностно–барьерных кремниевых и арсенид–галлиевых структурах. — Рукопись.

Диссертация на соискание ученой 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 ультразвуковой нагрузки (частота $2 \div 30$ МГц, интенсивность до 1 Вт/см^2) и радиационного облучения (γ –кванты, нейтроны) на прохождение тока в структурах с p – n –переходом (Si) и контактом Шоттки (Si, GaAs). В кремниевых солнечных элементах, в том числе и радиационно модифицированных, во время распространения ультразвука обнаружены уменьшение времени жизни носителей заряда и изменения величины фактора неидеальности, причем знак последнего эффекта противоположен в исходных и облученных образцах. Эффекты обратимы при комнатных температурах. Предложена модель акустоактивного комплексного точечного рекомбинационного центра, для которого в процессе ультразвуковой нагрузки изменяется расстояние между компонентами. В рамках модели объяснены обнаруженные эффекты и показано, что наиболее эффективное взаимодействие акустической волны с точечным дефектом ожидается в случае, если последний состоит из компонент вакансионного и междоузельного типов. Показано, что основными акустоактивными радиационными дефектами в кремнии являются дивакансия и А–центр. Обнаружен эффект обратимого увеличения шунтирующего сопротивления при ультразвуковой нагрузке; используя модель дислокационного импеданса показано, что его причиной связан с увеличением эффективности захвата электронов линейными дефектами. Проведен сравнительный анализ 16 аналитических, численных и эволюционных методов определения параметров диодов Шоттки из вольт–амперных характеристик. Показано, что наиболее оптимальными с точки зрения точности и быстродействия являются эволюционные алгоритмы и метод Ли, а использование функции Ламберта в численных методах позволяет увеличить точность определения параметров. Установлено, что протекание тока

в структурах $\text{Al}-n-n^+-\text{Si}-\text{Al}$ при температурах $130\div 330$ связано с процессами термоэлектронной эмиссии через неоднородный барьер и туннелирования. Облучение структур γ -квантами ^{60}Co приводит к усилению туннельной компоненты тока, в частности вследствие возникновения процессов многофононного туннелирования, а также к изменению высоты барьера, причиной которого является накопление дефектов акцепторного типа на границе металл–полупроводник. Показано, что наличие локальных неоднородностей на границе раздела вызывает уменьшение эффективной величины высоты барьера при облучении с дозой 10^6 рад, тогда как за пределами патчей при этом барьер Шоттки увеличивается. Впервые обнаружен эффект обратимого возрастания тока в процессе ультразвуковой нагрузки при 305 К; установлено, что в исходных структурах он связан с взаимодействием акустических волн с линейными дефектами, тогда как в облученных — с точечными радиационными. Обнаружен и исследован эффект динамического акусто-индуцированного влияния на высоту барьера Шоттки и величину обратного тока структур $\text{Mo}-n-n^+-\text{Si}$ в диапазоне температур $130\div 330$; показано, что он обусловлен движением дислокационных перегибов и изменением размеров кластеров дефектов. При помощи метода акустоэлектрической релаксационной спектроскопии установлено, что влияние микроволнового облучения на дефектную структуру приповерхностного слоя монокристаллов GaAs и SiC и эпитаксиальных структур GaAs вызвано увеличением концентрации междоузельных атомов. Экспериментально показано, что ультразвуковая обработка способна уменьшать как разброс параметров арсенид галлиевых диодов Шоттки, созданных в едином технологическом процессе, так и концентрацию и ширину энергетического спектра радиационно-индуцированных ловушек на интерфейсе системы Si–SiO₂.

Ключевые слова: ультразвук, γ -облучение, кремний, барьерные структуры, акусто-дефектное взаимодействие, перенесение заряда, обратимые акусто-индуцированные 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 is devoted to the study of the ultrasonic loading as well as irradiation (γ -rays, neutrons) influence on current in the p - n structures (Si) and Schottky diode (Si, GaAs). It is revealed the acoustically induced reversible decrease in the carrier lifetime in the silicon solar cells, including irradiated. A model of acoustically active complex point recombination centers is proposed for the purpose of interpretation of revealed effects. A comparative analysis of analytical, numerical and evolutionary methods for Schottky diode parameters determination has been carried out

and the most optimal ones are defined in terms of accuracy and speed. The relationship between the type of change in the Schottky barrier height of Al– n – n^+ –Si structure with the increasing of γ –rays dose and the degree of contact inhomogeneity is revealed. The reversible influence of ultrasound on the both barrier height and reverse current in the silicon–metal structures is revealed and attributed to the dislocation kinks movement and the defective clusters size changing. It is discovered that the effect of microwave irradiation on the defective structure of the near-surface layer of GaAs and SiC single crystals and as well as GaAs epitaxial structures is caused by increase in concentration of interstitial atoms. It has been found that ultrasonic treatment can causes both increase in the homogeneity of the parameters of GaAs Schottky diodes and the modification in concentration as well as energy spectrum of radiation induced interface traps in Si–SiO₂.

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