

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ

КИЇВСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ  
імені ТАРАСА ШЕВЧЕНКА

На правах рукопису

**ОЛІХ 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 “ ” 2018 р. о 14<sup>15</sup> 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 “ ” 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. Незважаючи на все різноманіття наявних типів фотовольтаїчних перетворювачів, ринок промислового використання належить моно- та полікристалічним кремнієвим сонячним елементам. Загалом, серед всіх напівпровідникових систем кремнієві структури використовують найширше. Це зумовлено величезними запасами даного елемента (він є другим за поширеністю у корі Землі), 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 процесів, які відбуваються в матеріалах за різних умов. Зокрема, умови функціонування напівпровідникових приладів нерідко передбачають наявність різноманітного радіаційного впливу. Звичайно, 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  $\gamma$ -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 високочастотні 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.

Вирішення матеріалознавчих задач потребує розробки методів керування параметрами матеріалів та структур. Відомо, що дефекти структури є визначальними для фізичних властивостей кристалів і мають фундаментальне значення у фізиці твердого тіла. Найпоширенішими способами впливу на дефектну підсистему напівпровідників залишаються опромінення швидкими частинками та термообробка, які суттєво впливають на стан кристала в

цілому. Водночас представлені результати свідчать про здатність ультразвукового навантаження навіть допорогової інтенсивності модифікувати дефекти у кремнієвих кристалах, причому до переваг такого способу 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 пояснення оборотних акусто-індукованих ефектів у малодислокаційних матеріалах, таких як кремній, при допороговій інтенсивності ультразвука подібні механізми незастосовні. Проведене дослідження особливостей акусто-дефектної взаємодії при ультразвуковому навантаженні та ідентифікація «акустоактивних» (тобто здатних до ефективної взаємодії з пружними коливаннями) дефектів технологічного та радіаційного походження є актуальним з наукового погляду.

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 актуальність дисертаційної роботи як у науковому плані, так і з погляду практичного застосування.

**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 фізичних закономірностей акусто-індукованих динамічних ефектів у кремнієвих структурах із  $p-n$ -переходом та контактом Шотткі, виявлення

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, частота, інтенсивність);
- 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 та розробка 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 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.** Для виконання поставлених завдань використано комплекс технологічних, експериментальних та розрахункових методів, який включає аналіз вольт-амперних і вольт-фарадних характеристик; акустоелектрична релаксаційна спектроскопія та метод диференціальних 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; профілометрія; рентгенівська дифрактометрія поверхні; рентгенівська топографія; контрольоване радіаційне та мікрохвильове опромінення для зміни дефектного стану зразків; метод ультразвукового навантаження.

**Наукова новизна отриманих результатів.** У процесі виконання дисертаційної роботи отримано ряд нових науково-обґрунтованих результатів, які сприяють розв'язку актуальної проблеми фізики твердого тіла — встановлення причин 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 ретельними та повними дослідженнями низки фундаментальних процесів електроперенесення та рекомбінації нерівноважних носіїв заряду у кремнієвих та арсенід–галієвих поверхнево–бар’єрних структурах за умов змін у системі кристалічних дефектів як за допомогою опромінення, так і акустичного навантаження. Зіставлення отриманих експериментальних результатів із даними теоретичного аналізу та окремими результатами інших авторів, дозволили повністю якісно і, у більшості випадків, кількісно описати всі виявлені ефекти. Досягнутий рівень розуміння деталей проходження струму в поверхнево–бар’єрних структурах дозволяє надійно оцінювати ефективність роботи і передбачати поведінку відповідних напівпровідникових пристроїв.

- 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, зумовлені різницею дефектного складу; вперше визначено основні акустоактивні радіаційні дефекти.

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

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

- Використовуючи модель поглинання ультразвука Брейсфорда, встановлено механізми акусто–індукованих ефектів у кремнієвих структурах метал–напівпровідник.

- Вперше виявлено взаємозв’язок характеру немонотонності дозової залежності зміни висоти бар’єру Шотткі при  $\gamma$ -опроміненні зі ступенем неоднорідності контакту.

- Встановлено, що вплив мікрохвильового випромінювання 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 дії зовнішніх чинників (надвисокочастотного–, нейтронного– та  $\gamma$ -опромінення, знакозмінних механічних навантажень), що дозволяє підвищити точність прогнозування реальних робочих характеристик подібних систем залежно від умов функціонування. Запропоновано новий метод динамічного акустичного керування струмом напівпровідникових діодів різного типу, а саме сонячних елементів та структур із контактом Шотткі. Дослідження частотних, амплітудних та температурних залежностей

акусто-індукованих ефектів у бар'єрних структурах дозволяє ефективно контролювати процеси перенесення заряду. Проведене тестування та порівняльне дослідження методів визначення параметрів діодів Шотткі 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 метал-напівпровідник. Виявлені зміни амплітудної залежності акусто-індукованого зростання зворотного струму діодів Шотткі після дії  $\gamma$ -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 та 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 із вступу, шести розділів, загальних висновків та списку використаних джерел. Загальних обсяг дисертації становить 367 сторінок, включаючи 124 рисунки та 31 таблицю. Список використаних джерел містить 657 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 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) ряд методів характеристики власних та домішкових дефектів базується на дослідженні особливостей поширення акустичних хвиль та акустоелектронної взаємодії; г) ультразвук використовується як додатковий позитивний фактор впливу під час різноманітних технологічних операцій, зокрема при іонній імплантації; д) при поширенні пружних хвиль у напівпровідникових кристалах та приладах на їхній основі виникає чимало різноманітних 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 методики дослідження параметрів бар'єрних структур при ультразвукового навантаження (УЗН), зокрема зосереджено увагу на методах визначення параметрів акустичних хвиль та схемі експерименту, яка унеможливила проникнення п'єзоелектричного поля у зразок — рис. 1.

У **другому розділі** представлені результати експериментальних досліджень вперше виявлених оборотних акусто-індукованих ефектів у опромінених та вихідних кремнієвих структурах із  $p-n^+$ —переходом (сонячних елементах).

Виявлено, що у діапазоні 290÷340 К при УЗН (частота ультразвуку  $f_{us} = 4 \div 8$  МГц, інтенсивність  $W_{us} \leq 0,4$  Вт/см<sup>2</sup>) 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 при використанні поперечних хвиль зменшення параметрів суттєвіші, ніж у випадку застосування повздовжніх хвиль із тією ж інтенсивністю. Останнє свідчить, що ефективність впливу ультразвуку визначається насамперед зміщеннями атомів.

З метою встановлення фізичного механізму, який лежить в основі виявлених ефектів, проведено аналіз впливу УЗН на ефективний час життя носіїв в області просторового заряду  $\tau_g$ , фактор неідеальності  $n_{id}$ , час життя неосновних носіїв у базі діода  $\tau_n$  та опір шунтування  $R_{sh}$ . Параметри визначалися шляхом апроксимації ВАХ згідно з моделлю подвійного діода:

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

де  $V$  — 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,  $\mu_n$  — рухливість неосновних носіїв у базі діода. При апроксимації (рис. 1) використовувався метод диференційної еволюції та враховувалися температурні та польові залежності  $n_i$ ,  $d$ ,  $\mu_n$ . Крім того, оцінка  $\tau_n$  проводилася за температурною залежністю струму короткого замикання.

Виявлені температурні залежності  $n_{id}$  та  $\tau_g$  ( $n_{id}(T) \sim T_{id}/T$ ,  $\tau_g(T) \sim \exp(-E_{\tau g}/kT)$ , де  $T_{id}$  та  $E_{\tau g}$  певні характерні параметри), а також їхні абсолютні значення ( $n_{id} > 2$ ,  $\tau_g \approx (10^{-8} \div 10^{-7})$  с), свідчать, що рекомбінація в області просторового заряду досліджених структур відбувається відповідно до

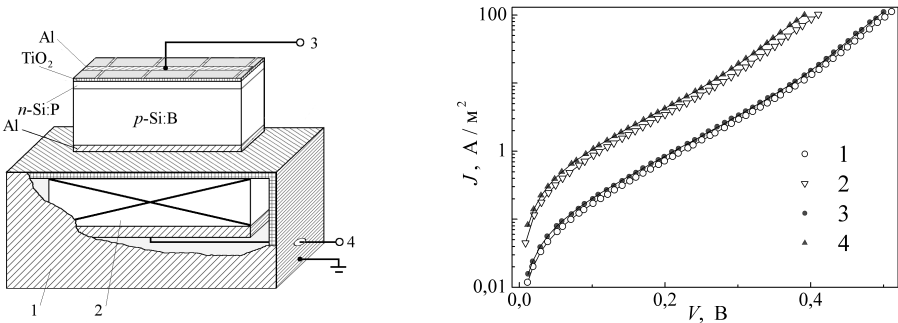


Рис. 1. Ліворуч — схема УЗН. 1 — екран; 2 — п'єзоелектричний перетворювач; 3 — контакти для вимірювання ВАХ; 4 — контакти для збудження ультразвуку. Праворуч — типові ВАХ кремнієвих сонячних елементів, виміряні для акустично ненавантаженого зразка (криві 1 та 2) та при УЗН (3, 4).  $T$ , К: 301 (1, 3); 341 (2, 4). Точки — експеримент, лінії — апроксимація згідно з (1)

моделі рекомбінації у системі спарених рівнів двох дефектів [1\*]. УЗН викликає оборотне зростання  $n_{id}$  (до 0,04) та зменшення  $\tau_g$  (до 30%). Оборотність акустоіндукованих змін та незмінність  $T_{id}$  і  $E_{\tau g}$  свідчать про сталість концентрації рекомбінаційних центрів та відсутність їхньої перебудови при УЗН. Дослідження також показали, що а) рекомбінація у квазі-нейтральній області може бути описана в рамках моделі Шоклі-Ріда-Хола, б) величина  $\tau_n$ , яка безпосередньо пов'язана з цими процесами, при УЗН суттєво (до 90%) зменшується, причому  $\tau_n^{-1} \sim u_{US}^2$  (де  $u_{US}$  — амплітуда зміщень атомів при поширенні ультразвука).

З метою з'ясування природи основних рекомбінаційних центрів проведено дослідження впливів інтенсивного (2 кВт/м<sup>2</sup>) довготривалого (до 15 год) освітлення та відпалу (при 200 °С) на параметри сонячних елементів. Аналіз залишкових змін та перехідних процесів після припинення освітлення засвідчив, що дефектами, які приймають участь у рекомбінаційних процесах та в акустодефектній взаємодії є переважно кисневмісні преципітати та пари  $Fe_iB_s$  (частково). 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  $E_c - (0,46 \div 0,48)$  еВ та  $E_c - 0,40$  еВ (кисневмісні преципітати)  $E_c - 0,36$  еВ (дислокації) і  $E_c - 0,43$  еВ (комплекс  $Fe_iO_i$ ). Додатково показано, що при УЗН відбувається незначне (близько 10 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 опору шунтування (до 30%) при УЗН. Показано, що поява  $R_{sh}$  описується моделлю дислокаційноіндукованого імпедансу [2\*], а акустоіндуковані зміни викликані зростанням ефективності захоплення електронів лінійними дефектами, розташованими в області  $p-n$ -переходу.

Проведені в наближенні дводіодної моделі числові розрахунки показали, що акустоіндуковані зміни  $J_{sc}$  зумовлені зменшенням  $\tau_n$ , тоді як зменшення  $\tau_g$  викликає деградацію як  $V_{oc}$ , так і  $FF$ . Ефект деградації підсилюється внаслідок акустоіндукованого зменшення  $R_{sh}$  та частково компенсується зростанням  $n_{id}$ .

Для пояснення виявлених ефектів запропоновано модель акустоактивного комплексного рекомбінаційного центру, який складається із нееквівалентних компонент. При поширенні акустичної хвилі на точковий дефект діє періодична сила, амплітуда якої залежить від зміни об'єму кристалу, що припадає на один дефект  $\Delta\Omega_d$  [3\*] ( $\Delta\Omega_d < 0$  для дефектів вакансійного типу). У рамках запропонованої моделі при УЗН компоненти (якими у випадку рекомбінації в системі спарених рівнів є дефекти донорного та акцепторного типу, а при рекомбінації Шоклі-Ріда-Хола — частини комплексного точкового рекомбінаційного центру) здійснюють гармонічні коливання, частота і 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

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

де  $r_{in}$  — вихідна відстань,  $u_D$  та  $u_A$  — амплітуди коливань компонент,  $u_D, u_A \sim u_{US}$ ;  $\delta$  — зсув фаз між коливаннями компонент,  $\varphi$  — кут між віссю комплексу та напрямом зміщень в акустичній хвилі. У рамках запропонованої моделі проведено розрахунки очікуваних акусто-індукованих змін поперечного перерізу захоплення електронів  $\sigma_n$  та параметра зв'язку, які визначають темп 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  $\sigma_n$  та зменшення параметра зв'язку мають викликати зменшення  $\tau_g$  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 типів акустоактивних рекомбінаційних центрів, кожний з яких характеризується концентрацією  $N_{d,j}$ ;  $v_{th,n}$  — теплова швидкість електронів;  $K_{US,j}$  описує взаємодію ультразвуку із дефектом  $j$ -го типу.

У розділі також розглянуто результати досліджень впливу УЗН на властивості кремнієвих сонячних елементів, опромінених  $\gamma$ -квантами  $^{60}\text{Co}$  (доза  $10^6$

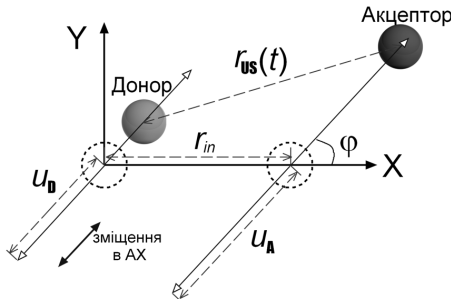


Рис. 2. Модель поведінки дефектного комплексу при УЗН

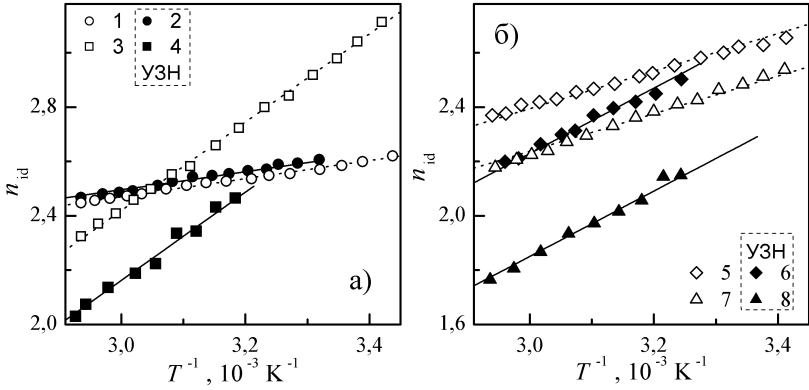


Рис. 3. Температурні залежності фактора неідеальності для неопроміненого (криві 1, 2), нейтронно-опроміненого (3, 4) та  $\gamma$ -опромінених (5, 6 та 7, 8 для доз  $10^6$  та  $10^7$  рад, відповідно) зразків. Криві 2, 4, 6 та 8 отримані при УЗН (поперечні хвилі; 4,2 МГц; 0,4 Вт/см<sup>2</sup>), криві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

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  $VO_i$ ,  $\gamma$ -промені викликають появу лише  $C_iO_i$  та  $VO_i$ ; проведено оцінку концентрацій радіаційних дефектів та їхнього впливу на  $\tau_n$ . Виявлено, що а) характер температурних залежностей  $n_{id}$  (рис. 3) та  $\tau_g$  (рис. 4) збігається з вихідними структурами, проте зміни  $T_{id}$  та  $E_{Tg}$  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 моделі акустоактивного комплексного рекомбінаційного центру це може означати, 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  $\gamma$ -опромінених структур

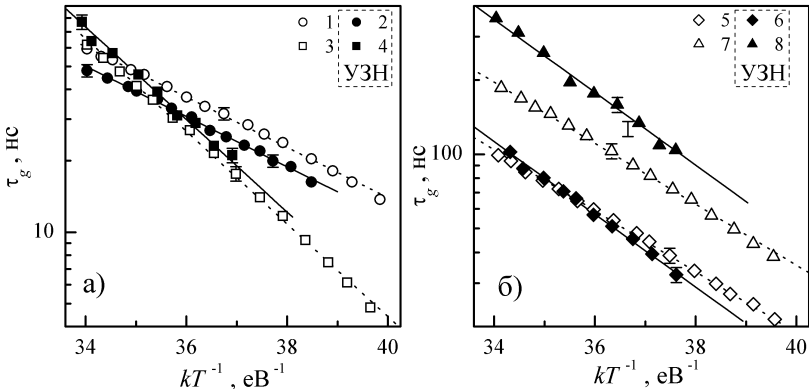


Рис. 4. Температурні залежності часу життя носіїв в області просторового заряду. Позначення кривих збігаються з рис. 3

викликає оборотні зміни величин  $T_{id}$  та  $E_{\tau g}$ , що свідчить про акусто–індуковану перебудову метастабільного радіаційного дефекту (найімовірніше,  $VO_i$ ). Виявлено, що при УЗН величина  $\tau_n^{-1}$  для опромінених структур також лінійно залежить від  $u_{US}^2$ . Використовуючи співвідношення (3), визначено коефіцієнти взаємодії акустичних хвиль 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 ( $K_{US}^{OP} > 5 \text{ см}^2 \text{ Вт}^{-1}$ ).

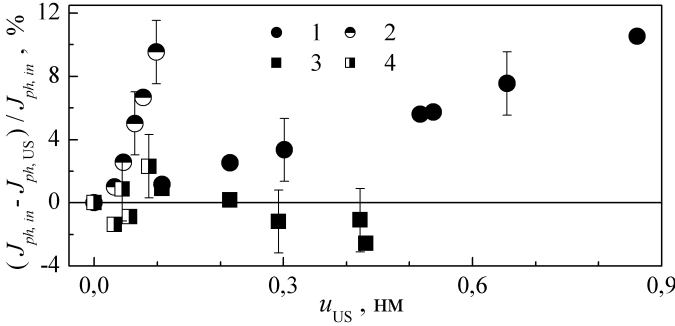


Рис. 5. Залежності акусто–індукованого зменшення фотоструму від амплітуди зміщень атомів у неопроміненому (1, 2) та нейтронно–опроміненому (3, 4) зразках.  $f_{US}$ , МГц: 8,0 (1, 3); 26,1 (2, 4).  $J_{ph,US}$  — фотострум при УЗН,  $J_{ph,in}$  — без.

Виявлено, що у нейтронно–опромінених зразках, на відміну від вихідних та  $\gamma$ -опромінених, УЗН практично не впливає на величину фотоструму — рис. 5. Це не узгоджується з акусто–індукованим підвищенням активності рекомбінаційних центрів (зменшенням  $\tau_n$ ). Дослідження температурних залежностей  $J_{ph}$  та довжини дифузії неосновних носіїв заряду, засвідчило наявність у нейтронно–опромінених структурах додаткового механізму впливу УЗН (ймовірно — акусто–індукованої зміни заселеності рівнів, пов'язаних із вакансійними кластерами, що викликає зменшення коефіцієнта відбивання).

У **третьому розділі** наведено результати порівняльного аналізу та оптимізації методів визначення параметрів структур метал–напівпровідник на основі ВАХ. Використовувалася модель термоелектронної емісії (ТЕ):

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

де  $A$  — площа діода,  $A^*$  — ефективна стала Річардсона,  $\Phi_b$  — висота бар'єру Шотткі; розраховувалися величини  $n_{id}$ ,  $R_s$  та  $\Phi_b$ . Розглянуто 10 аналітичних методів (інтегрування ВАХ (метод Kaminski I), побудова допоміжних функції (однієї чи масиву) та їхня лінійна (методи Chung, Lee та Kaminski II) чи нелінійна (Gromov) апроксимація або пошук екстремумів (Cibils); побудова функцій з використанням додаткових параметрів (методи Norde та Bohlin), диференціальних коефіцієнтів першого (Werner) або вищого порядків (Mikhelashvili)); 2 числові

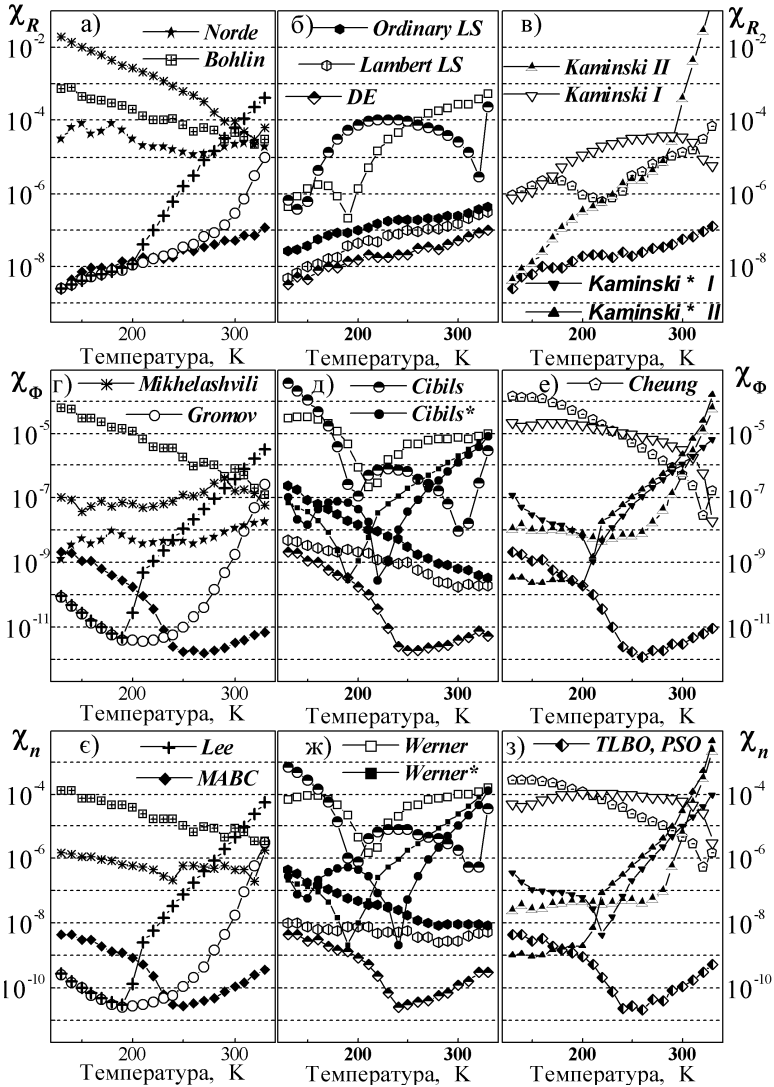


Рис. 6. Температурні залежності відносних похибок визначення  $R_s$  (а — в),  $\Phi_b$  (г — е) та  $n_{id}$  (є — з), одержані при застосуванні розглянутих методів (вказані на рисунку) до синтезованих ВАН

методи (метод найменших квадратів зі статистичними ваговими коефіцієнтами застосовувався безпосередньо до рівняння (4) та до його розв'язку, вираженого через  $W$ -функцію Ламберта); 4 еволюційних алгоритми (диференційної еволюції (DE), оптимізації зграї частинок (PSO), модифікованої штучної бджолоїної сім'ї (MABC) та оптимізованого викладання та навчання (TLBO)). Всі методи застосовувалися для аналізу ВАХ як синтезованих за допомогою виразу (4) з врахуванням можливих випадкових похибок вимірювань, так і експериментально виміряних для 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 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  $R_s$ ,  $\Phi_b$  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  $R_s$ ,  $\Phi_b$  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.

Таблиця 1

Час визначення параметрів діодів Шотткі

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	$5,4 \div 19,2$



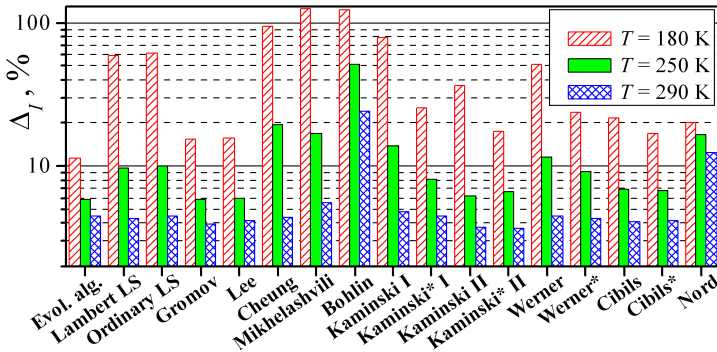


Рис. 7. Середні значення відносного відхилення вимірних значень сили струму від розрахованих за формулою (4) з використанням параметрів, отриманих при застосуванні розглянутих методів

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 Al– $n$ – $n^+$ –Si з контактом Шотткі. А саме, розглянуто а) вплив  $\gamma$ -опромінення на процеси перенесення заряду у діапазоні 130÷330 K; б) вперше виявлені динамічні акусто-індукованих ефекти при кімнатних температурах.

Встановлено, що поява при низьких температурах ( $T < 210$  K) додаткової компоненти прямого струму, а також температурні залежності висоти бар'єру та фактору неідеальності можуть бути пояснені з погляду моделі ТЕ через неоднорідний контакт [5\*]. Визначено середню висоту бар'єру Шотткі  $\Phi_b^0$  та її стандартне відхилення  $\sigma_\Phi$ :  $0,872 \pm 0,004$  В та  $0,099 \pm 0,001$  В при (130÷220) K та  $0,663 \pm 0,003$  В та  $0,040 \pm 0,005$  В при (230÷330) K, відповідно. Одержано середні значення висоти бар'єру Шотткі в області зі зниженим бар'єром (так званого патчу):  $54 \pm 4$  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 центру з енергетичним положенням  $E_c - (120 \pm 5)$  меВ, пов'язаним, найімовірніше, з міжвузловим атомом вуглецю  $C_i$ .

Дослідження показали, що при опроміненні  $\gamma$ -квантами  $^{60}\text{Co}$  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 з тунельною багатофононою іонізацією глибоких домішкових центрів [6\*].

Виявлено, що для зразків, опроміненіх із дозою  $10^6$  рад, при 120÷240 K домінуючим механізмом перенесення заряду як при прямому, так і при зворотному зміщеннях стає тунелювання за участю рівнів, пов'язаних з радіаційними

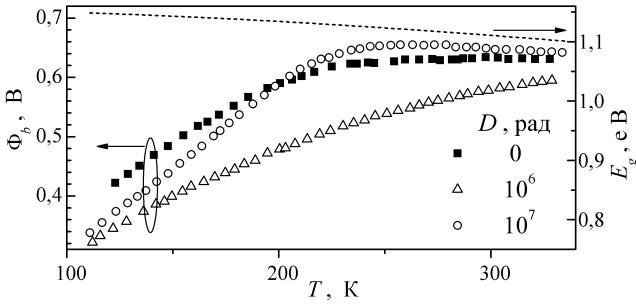


Рис. 8. Температурні залежності висоти бар'єру структур Al– $n$ – $n^+$ –Si. Пунктирна лінія — залежність ширини забороненої зони кремнію  $E_g(T)$

дефектами. При  $T > 260$  К основним механізмом залишається ТЕ через неоднорідний контакт, проте значення  $\Phi_b^0$  та  $\sigma_\Phi$  зростають до 0,772 В та 0,1 В, відповідно. Також зростає висота бар'єру в області патчів (з 54 до 74 мВ). Причиною змін бар'єру Шотткі є накопичення на інтерфейсі радіаційних дефектів акцепторного типу. Радіаційно-підсилене дислокаційне ковзання викликає перегрупування патчів із утворенням скупчень більшого розміру. Останнє збільшує вплив патчів, що маскує зростання висоти бар'єру за їхніми межами і викликає зменшення ефективної  $\Phi_b$ , яка визначається з аналізу ВАХ (рис. 8).

Показано, що при збільшенні дози до  $10^7$  рад тунельний струм стає основним при прямому зміщенні ( $T = 150 \div 220$  К) і при зворотному (у всьому дослідженому 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. Виявлені зміни механізму перенесення заряду зумовлені суттєвим збільшенням концентрації радіаційних дефектів та ефективним гетеруванням патчами від'ємно заряджених центрів. Це викликає зменшення  $\Phi_b$  за межами патчів, а самі вони починають виконувати роль тунельних шунтів і перестають впливати на процеси ТЕ. Отже, як виявлено, характер немонотонної залежності  $\Phi_b(D)$  залежить від ступеня неоднорідності: для переважної частини контакту відбувається «зростання–спад» висоти бар'єру при збільшенні дози, проте можливе маскування ефекту внаслідок впливу

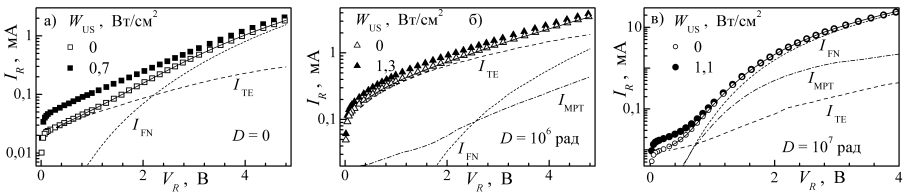


Рис. 9. Зворотні ВАХ структур Al– $n$ – $n^+$ –Si з різним ступенем опромінення.  $T = 305$  К. Заповнені та порожні точки отримані при УЗН та без нього, відповідно.  $f_{US} = 9,6$  МГц. Розривні лінії відображають окремі складові зворотного струму для ненавантажених структур, суцільні — їхню суму

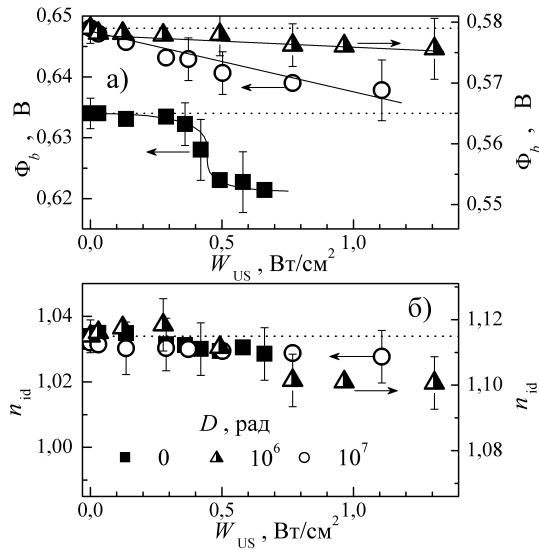


Рис. 10. Залежності висоти бар'єру Шоттки (а) та фактора неідеальності (б) від інтенсивності УЗ для структур  $\text{Al-n-n}^+\text{-Si}$  з різною дозою  $\gamma$ -опромінення.  $T = 305 \text{ K}$ .  $f_{US} = 9,6 \text{ МГц}$ . Горизонтальні пунктирні лінії відповідають значенням параметрів, виміряних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

патчів. Зауважимо, що в літературі повідомляється про спостереження обох типів немонотонності («спад-зростання» та «зростання-спад»), проте причини подібного різноманіття характеру радіаційно-індукованих змін висоти бар'єру залишалися невідомими.

У розділі також повідомляється про виявлені оборотні зміни характеристик структур  $\text{Al-n-n}^+\text{-Si}$  під дією УЗН при  $T = 300 \text{ K}$ . УЗН викликає зменшення  $\Phi_b$  (рис. 10,а), причому в неопромінених структурах залежність  $\Phi_b(W_{US})$  має пороговий характер. Після  $\gamma$ -опромінення ефективність впливу УЗ знижується, змінюється також характер амплітудної залежності. Зі збільшення дози зростають величини акусто-індукованих змін  $\Phi_b$ . Показано, що в неопромінених структурах зменшення висоти бар'єру зумовлене зміною рівня нейтральності інтерфейсних станів внаслідок іонізації дефектів на межі розділу, викликаной коливаннями дислокаційних відрізків у акустичному полі. Опромінення спричинює закріплення сегментів лінійних дефектів внаслідок гетерування точкових дефектів та появу акустоактивних точкових радіаційних дефектів (А-центрів, дивакансій). Незначні акусто-індуковані зміни фактора неідеальності спостерігаються лише у випадку, коли  $n_{id} > 1,1$  (рис. 10,б), що зумовлено впливом УЗ на патчі внаслідок взаємодії з радіаційними дефектами, захопленими в областях неоднорідності.

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

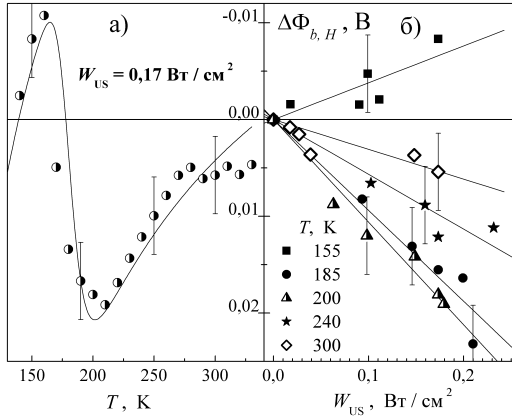


Рис. 11. Залежності акусто-індукованих змін висоти бар'єру Шотки структур Мо– $n$ – $n^+$ –Si від температури (а) та інтенсивності введенного УЗ (б).  $f_{US} = 4,1 \text{ МГц}$

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

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

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

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

$\varrho_1, \varrho_2$  — вагові коефіцієнти кожного з розподілів. Виявлено, що ультразвук викликає оборотні збільшення фактора неідеальності та зміни  $\Phi_b$ , величина і знак яких залежить від температури — рис. 11. Розрахунки, проведені відповідно до моделі [3\*, 7\*] показали, що при УЗН відбувається зростання  $\Phi_{b,1}^0$  (від 780 мВ до, наприклад при  $f_{US} = 4,1 \text{ МГц}$ ,  $W_{US} = 0,17 \text{ Вт/см}^2$ , 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) та зростання внеску другого розподілу (в чотири рази). Також виявлено, що УЗН викликає

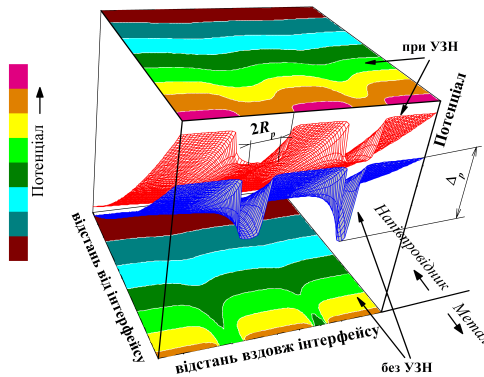


Рис. 12. Схематичне зображення просторового розподілу поверхневого потенціалу що відображає різницю між випадком УЗН (верхня площина та верхня контурна поверхня) та його відсутністю (нижня площина та нижня контурна поверхня). Рисунок зроблено у припущенні, що наявні два патчі.

зміни висоти бар'єру в області патчів, які немонотонно залежать від  $W_{US}$ ; зростання ефективної густини патчів (від від  $0,2$  до  $2 \text{ мм}^{-2}$ ) та зменшення (від  $2,7 \cdot 10^{-5}$  до  $2,5 \cdot 10^{-5} \text{ м}^2/3 \cdot \text{В}^{1/3}$ ) величини  $3(R_p^2 \Delta_p/4)^{1/3}$ , де  $\Delta_p$  та  $R_p$  — зниження висоти бар'єру в області патча та його розмір, відповідно. Основні виявлені особливості впливу УЗН на стан контакту метал—напівпровідник якісно узагальнено на рис.12.

Встановлено, що температурні та частотні залежності акусто-індукованих змін в структурах  $\text{Mo}-n-n^+-\text{Si}$  (рис.13) можуть бути пояснені в рамках

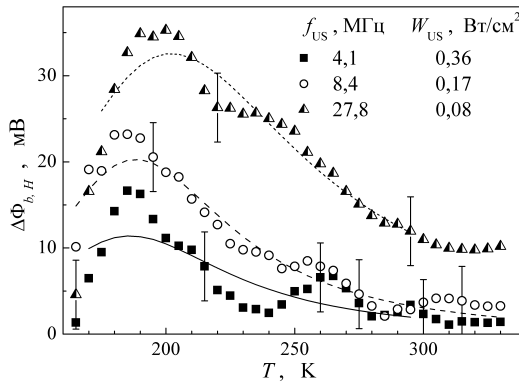


Рис. 13. Температурні залежності змін висоти бар'єру Шотткі при УЗН на різних частотах. Точки — експеримент, лінії — апроксимація згідно з формулою (6)

моделі Брейсфолда [8\*], яка передбачає актостимульовану дифузію дислокаційних перегинів. Зокрема, зміни висоти бар'єру описуються виразом

$$\Delta\Phi_{b,H}(f_{us}, T) \sim \frac{f_{us}}{T} \frac{(f_{us}/f_k) \exp\left(\frac{W_k}{kT}\right)}{1 + (f_{us}/f_k)^2 \exp\left(\frac{2W_k}{kT}\right)} W_{us}, \quad (6)$$

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.

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

$$\begin{aligned} I_R &= I_{TE} + I_{PAT} = P_t I_0 T^2 \exp\left(-\frac{q\Phi_b}{kT}\right) \left[1 - \exp\left(-\frac{V_s}{kT}\right)\right] + \\ &+ \frac{P_t q^2 F_m A N_{ss}}{\sqrt{8m^* \epsilon_t}} \left(1 - \frac{\gamma}{\gamma_1}\right)^{1/2} \exp\left\{-\frac{4\sqrt{2m^*} \epsilon_t^{3/2} (\gamma_1 - \gamma)^2}{3qF_m \hbar} \left[\gamma_1 + \frac{1}{2}\gamma\right]\right\} \\ \gamma_1 &= (1 + \gamma^2)^{1/2}, \quad \gamma = \frac{a_{e-ph} \hbar \omega_{ph}^2 \sqrt{2m^*}}{qF_m \sqrt{\epsilon_t}} \left\{ \frac{\exp\left(\frac{\hbar \omega_{ph}}{kT}\right) + 1}{\exp\left(\frac{\hbar \omega_{ph}}{kT}\right) - 1} \right\}, \end{aligned} \quad (7)$$

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,  $\epsilon_t$  — глибина залягання рівнів,  $F_m$  — напруженість електричного поля на межі напівпровідник-метал. Висота бар'єру та  $\epsilon_t$  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 зменшенням ряду параметрів (табл. 2). Виявлено, що причиною тунелювання є кластери позитивно заряджених дефектів, а акусто-індукованих змін  $I_{PAT}$  — модифікація розміру кластера, викликана локальним підвищенням температури скупчення дефектів у акустичному полі [2\*].

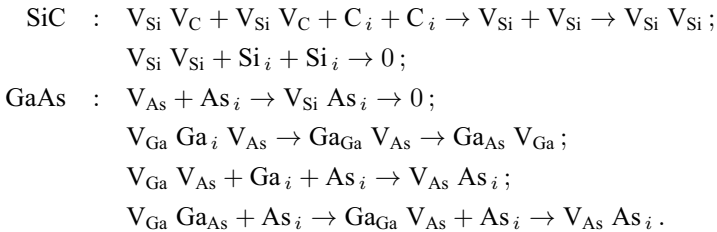
Таблиця 2

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

$W_{us}$ , Вт/см <sup>2</sup>	$f_{us}$ , МГц	$\Phi_{b0}(0)$ , мВ	$\alpha_F$ , нм	$\epsilon_{t0}$ , меВ	$\beta_F \cdot 10^5$ , еВ·м <sup>1/2</sup> ·В <sup>-1/2</sup>	$N_{ss}$ , 10 <sup>11</sup> см <sup>-2</sup>
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 арсенід-галієвих структур, викликаних мікрохвильовою та ультразвуковою обробками.

Зокрема, досліджено вплив надвисокочастотного випромінювання (частота 2,45 ГГц, питома потужність 1,5 Вт/см<sup>2</sup>, 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  $E_c - 0,33$  eB) в  $n$ -6H-SiC,  $V_{As}$  ( $E_c - 0,32$  eB) і  $V_{Ga}Ga_iV_{As}$  ( $E_c - 0,49$  eB) в  $n$ -GaAs, та  $V_{Ga}V_{As}$  ( $E_c - 0,24$  eB),  $V_{As}As_i$  ( $E_c - (0,43 - 0,46)$  eB) і  $V_{Ga}Ga_{As}$  ( $E_c - 0,40$  eB) на межі розділу епітаксійних структур  $n$ - $n^+$ -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 щодо зміни параметрів дефектів корелюють із вимірами радіуса кривизни структур та деформації у приповерхневому шарі. Показано, що наявність механічних напруг сприяє радіаційно-стимульованим перетворенням точкових дефектів.

Проведені дослідження впливу ультразвукової обробки ( $f_{US} = (4,1 \div 30)$  МГц,  $W_{US} = (0,3 \div 3)$  Вт/м<sup>2</sup>, час обробки  $t_{UST} = (5 \div 15)$  год) на параметри структур Au-TiB<sub>x</sub>- $n$ - $n^+$ -GaAs, виготовлених за технологією з інтегральним тепловідведенням показали, що при  $W_{US} < 2,5$  Вт/м<sup>2</sup> УЗО викликає зменшення розкиду висоти бар'єру, фактора неідеальності та величини зворотного струму (рис. 14) діодів Шоттки, виготовлених в єдиному технологічному процесі. Ефект зумовлений акусто-стимульованою дифузією точкових дефектів, яка призводить до згладжування локальних неоднорідностей межі розділу. Виявлено, що зі збільшенням частоти ультразвука інтенсифікуються процеси перебудови дефектів, які відображається у зміні характеристичного параметра тунельної компоненти зворотного струму. При перевищенні  $W_{US}$  порогу ( $\sim 2,5$  Вт/см<sup>2</sup>) спостерігається зменшення  $\Phi_b$  та зростання  $n_{id}$  і зворотного струму, зумовлені генерацією дефектів акустичною хвилею.

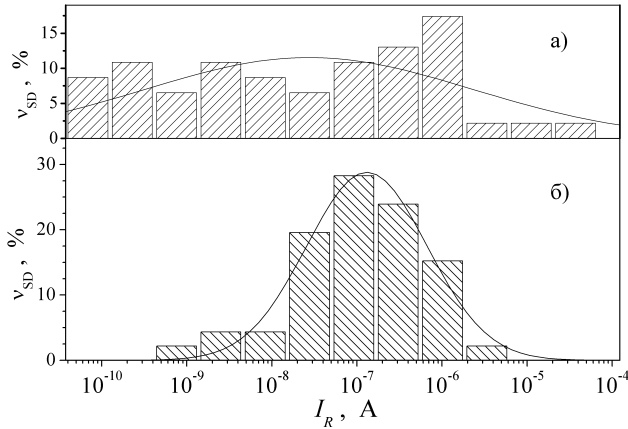


Рис. 14. Порівняльні розподіли величини зворотного струму (при  $V_R = 2$  В) для структур  $\text{Au-TiB}_x\text{-n-n}^+\text{-GaAs}$  до ультразвукової обробки (а) та після неї(б).  $W_{\text{US}} = 1,8 \text{ Вт/см}^2$ ,  $f_{\text{US}} = 4,1 \text{ МГц}$ ,  $t_{\text{UST}} = 10$  год. По вертикалі відкладена частка діодів, для яких струм перебуває у відповідному діапазоні. Загальна кількість діодів — 40. 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:  $9 \pm 2$  (а),  $3,3 \pm 0,2$  (б)

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

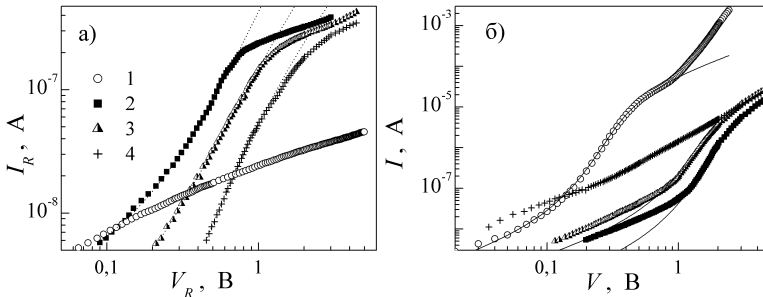


Рис. 15. Зворотні (а) та прямі (б) ВАХ структур  $\text{Au-SiO}_2\text{-Si}$  до (криві 1) та після (2–4) опромінення  $\gamma$ -квантами.  $t_{\text{UST}}$ , хв: 0 (2), 30 (3), 60 (4).  $T = 300$  К. Точки — експеримент, лінії — апроксимація за формулами (4) (суцільні) та (9) (пунктир)



для якого

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

причому  $I_0$  залежить від концентрації пасток  $N_t$  ( $I_0 \sim 1/N_t^{m_F-1}$ ), а  $m_F$  відображає енергетичний розподіл їхніх рівнів [10\*]. Виникнення цієї компоненти струму зумовлене утворенням ненасичених зв'язків на межі Si-SiO<sub>2</sub> ( $P_b$ -центрів). Накопичення  $P_b$ -центрами від'ємного заряду на інтерфейсі створює умови для зменшення ТЕ складової струму. Водночас опромінення є причиною появи  $E'$ -центрів (вакансій кисню) і зумовлює появу при зворотному зміщенні струму втрат, пов'язаного з тунелюванням по пастках

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

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

Виявлено, що ультразвукова обробка ( $f_{\text{УС}} = 4$  МГц,  $W_{\text{УС}} = 2$  Вт/м<sup>2</sup>,  $t_{\text{УСТ}} = (0,5 \div 1)$  год) приводить до зменшення концентрації  $E'$ -центрів ( $I_{0,\text{ТАТ}}$  зменшується в  $\sim 25$  разів) та  $P_b$ -центрів ( $I_0$  зростає в  $\sim 30$  разів), а також до звуження енергетичного спектра останніх ( $m_F$  змінюється з 1,3 до 1,8). Ефект зумовлений акусто-індукованою дифузією атомів кисню та водню, причому ефективність пасивації останніми ненасичених зв'язків залежить від рівня механічних напруг в околі дефекту.

## 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  $\gamma$ -квантами <sup>60</sup>Со. 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 ди-вакансії, а в  $\gamma$ -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 Gromov із адаптивною процедурою та метод Lee. Показано, що використання функції Ламберта при числовому визначенні параметрів діодів Шотткі дозволяє зменшити похибки. Встановлено залежності точності визначення послідовного опору, висоти бар'єру Шотткі та фактора неідеальності від рівня випадкових помилок при вимірюванні вольт-амперних характеристик.

5. Виявлено, що при прямому зміщенні перенесення заряду в структурах  $\text{Al}-n-n^+-\text{Si}$  з бар'єром Шотткі у діапазоні температур  $130 \div 330$  К 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  $\gamma$ -квантами  $^{60}\text{Co}$  структур  $\text{Al}-n-n^+-\text{Si}$  суттєво підсилює процеси тунелювання носіїв заряду як при прямому зміщенні, так і при зворотному. Встановлено, що при прямому зміщенні тунельний механізм перенесення заряду стає основним у низькотемпературній області ( $T < 250$  К), при зворотному — виникає компонента струму, зумовлена багатофоновим тунелюванням. Виявлено, що висота бар'єру, фактор неідеальності та величина зворотного струму немонотонно змінюються при збільшенні поглинутої дози. З'ясовано, що при поглинутій дозі  $10^6$  рад зміна електрофізичних параметрів відбувається внаслідок накопичення дефектів акцепторного типу на межі метал-напівпровідник та укрупнення патчів, викликаного радіаційно підсиленим дислокаційним ковзанням. При дозі  $10^7$  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, що при поширенні акустичних хвиль спостерігаються 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 багатофоновного 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 в діапазоні 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  $\text{Mo}/n-n^+-\text{Si}$  зумовлений рухом дислокаційних перегинів.

9. Виявлено ефект зворотного збільшення зворотного струму структур  $\text{Mo}/n-n^+-\text{Si}$  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  $n-6H-\text{SiC}$ ,  $n-\text{GaAs}$  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 процеси перетворення дефектних комплексів, викликані надвисокочастотним опроміненням, інтенсифікуються за наявності механічних напруг.

11. Вперше експериментально досліджено вплив ультразвукової обробки на параметри структури  $\text{Au-TiB}_{x-n-n^+}\text{-GaAs}$  з контактом Шотткі залежно від частоти та інтенсивності акустичних хвиль. Встановлено, що при допороговій (менше  $2,5 \text{ Вт/см}^2$ ) інтенсивності ультразвука 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 системи  $\text{Si-SiO}_2$ . Показано, що причиною акустовідпалу 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  $\gamma$ –irradiated Mo/n–Si Schottky barrier structure / O. Olikh // *Ultrasonics.* – 2015. – Vol. 56. – P. 545–550.
8. Особливості дислокаційного поглинання ультразвуку в безсубблочних кристалах  $Cd_{0,2}Hg_{0,8}Te$  / 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  $\gamma$ –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  $\gamma$ –опромінення / О. Я. Оліх // *Сенсорна електроніка і мікросистемні технології.* – 2013. – Т. 10, № 1. – С. 47–55.

11. Олих, О. Я. Влияние ультразвукового нагружения на протекание тока в структурах  $\text{Mo}/\text{n-p}^+\text{-Si}$  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  $\text{Mo}/\text{n-Si}$  з бар'єром Шоттки / 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  $\gamma$ -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. 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. 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. 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 50<sup>th</sup> Anniversary Conference. Montreal, Canada. Abstracts. — Montreal: 2004. — P. 230–231.
30. Оліх, 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<sup>+</sup>-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. *Olix, O. 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. *Olix, O. 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. *Olix, O. 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. *Olix, O. 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. *Olix, 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. *Olix, O. Я.* Немонотонний вплив  $\gamma$ –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. *Olix, O. Я.* Особливості динамічного ультразвукового впливу на  $\gamma$ –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. *Oliх, О. Я.* Вплив ультразвуку на термоемісійні процеси в  $\text{Mo}/\text{n-n}^+\text{-Si}$  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  $\text{Mo}/\text{n-Si}$  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  $\text{Mo}/\text{n-Si}$  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. *Oliх, О. Я.* Вплив  $\gamma$ -опромінення на механізм перенесення заряду в структурах  $\text{Mo}/\text{n-Si}$  / 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  $\gamma$ -irradiation / O. Olikh // 2014 IEEE International Ultrasonics Symposium. Chicago, Illinois, USA. Abstract book. — Chicago: 2014. — P. 645–646.
50. *Oliх, О. Я.* Характеризація  $\gamma$ -опромінених кремнієвих р–п-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. *Oliх, 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.
53. 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.

54. 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.

## 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.

Досліджено вплив ультразвукового навантаження на проходження струму в кремнієвих сонячних елементах, у тому числі опромінених. Виявлено оборотні процеси зменшення ефективності фотоелектричного перетворення, зумовлені акусто–індукованою перебудовою точкових рекомбінаційних центрів. Запропонована модель акустоактивного комплексного дефекту. Проведено порівняльний аналіз аналітичних, чисельних та еволюційних методів визначення параметрів діодів Шотки. Показано взаємозв'язок між характером немонотонності дозової залежності зміни висоти бар'єру Шотки та ступенем неоднорідності контакту. Виявлено оборотній вплив ультразвука на властивості структур кремній–метал, встановлено його закономірності та показано, що він зумовлений рухом дислокаційних перегинів. Показано, 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 Шотки та енергетичного спектру радіаційно–індукованих пасток на інтерфейсі системи Si–SiO<sub>2</sub>.

**Ключові слова:** ультразвук,  $\gamma$ –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 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, обусловленные акусто–индуцированной перестройкой точечных рекомбинационных центров. Предложенная модель комплексного акустоактивного дефекта, для которого при распространении акустической волны изменяется расстояние между компонентами. Обнаружен эффект обратимого увеличения шунтирующего сопротивления при ультразвуковом нагружении; используя модель дислокационного импеданса показано, что эффект связан с увеличением эффективности захвата электронов линейными дефектами. Показано, что основными акустоактивными радиационными дефектами в кремнии являются дивакансия и А–центр. Проведено сравнительный анализ аналитических, численных и эволюционных методов определения параметров диодов Шоттки. Показано, что наиболее приемлемыми методами с точки зрения точности и быстродействия являются эволюционные алгоритмы и метод Ли. Показано, что использование функции Ламберта в численных методах позволяет увеличить точность определения параметров. Определены механизмы переноса заряда и обратимого возрастания тока при ультразвуковом нагружении в структурах  $\text{Al}-n-n^+-\text{Si}-\text{Al}$  и их модификация вследствие  $\gamma$ –облучения. Обнаружены и исследованы эффект обратимого акусто–индуцированного влияния на свойства структур  $\text{Mo}/n-n^+-\text{Si}$  в широком диапазоне температур и показано, что они обусловлены 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 вызваны увеличением концентрации междоузельных атомов. Экспериментально показано, что ультразвуковая обработка способна повышать однородность как параметров арсенид галлиевых диодов Шоттки, созданных в едином технологическом процессе, так и энергетического спектра радиационно–индуцированных ловушек на интерфейсе системы Si–SiO<sub>2</sub>.

**Ключевые слова:** ультразвук,  $\gamma$ –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 concerns the research of ultrasonic loading influence on current in silicon solar cells, including 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. A comparative analysis of analytical, numerical and evolutionary methods for Schottky diode parameters determination has been carried out. The relationship between the type of the non-monotonicity of the Schottky barrier height dose dependence and the contact inhomogeneity degree is revealed. The reversible influence of ultrasound on the properties of silicon–metal structures is revealed and its features are established. 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 dealt with the increase of interstitial atoms concentration. It has been found that ultrasonic treatment can cause increase in the homogeneity of both the parameters of GaAs Schottky diodes and the energy spectrum of radiation induced interface traps in Si–SiO<sub>2</sub>.

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