

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

Спеціальність 01.04.07– фізика твердого тіла

Автореферат  
дисертації на здобуття наукового ступеня  
доктора фізико-математичних наук

Київ – 2018

Дисертацією є рукопис.

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

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

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

Захист відбудеться “01” вересня 2018 р. о 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 “01” вересня 2018 р..

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



М.П. Семенько

## ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

- Вперше показано взаємозв’язок характеру непотонності дозової залежності зміни висоти бар’єру Шотки при  $\gamma$ –опроміненні зі ступенем неоднорідності контакту.

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

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

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

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

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



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

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

**Структура та обсяг дисертації.** Дисертація складається із вступу, шести розділів, загальних висновків та списку використаних джерел. Загальних обсяг дисертації складає 363 сторінки, включаючи 123 рисунки та 30 таблиць.

## ОСНОВНИЙ ЗМІСТ РОБОТИ

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

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

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

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

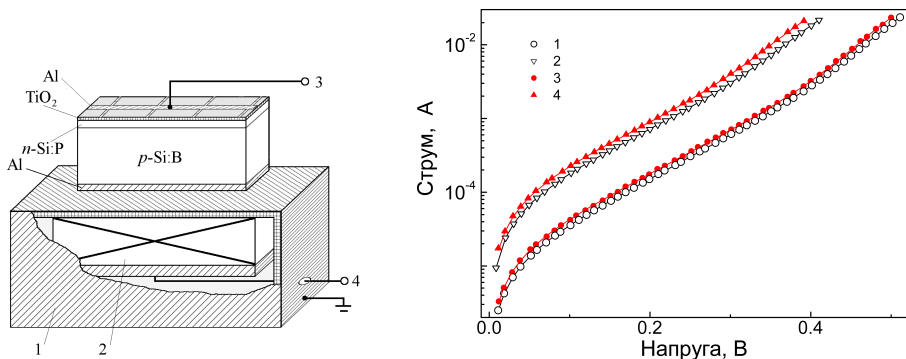


Рис. 1. Зліва — схема УЗН. 1 — екран (алюмінієва фольга, товщина 0,012 мм); 2 — п'єзoeлектричний перетворювач ( $\text{LiNbO}_3$ ); 3 — контакти для вимірювання ВАХ; 4 — контакти для збудження УЗ. Справа — типові ВАХ, виміряні при температурах 301 К (криві 1 та 2, кола) та 341 К (2 та 4, трикутники) за умов УЗН (2, 4, заповнені точки) та для ненавантаженого зразка (1 та 3, порожні точки) Точки — результати вимірів, лінії отримані шляхом апроксимації за формулою (1).

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

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

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

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

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

Величини  $n_{id}$  та  $\tau_g$  пов'язані з рекомбінацією в ОПЗ. Виявлені температурні залежності фактору неідеальності та часу життя в ОПЗ ( $n_{id}(T) \sim T_{id}/T$ ,  $\tau_g(T) \sim \exp(-E_{\tau g}/kT)$ , де  $T_{id}$  та  $E_{\tau g}$  певні характерні величини), а також їх абсолютні значення ( $n_{id} > 2$ ,  $\tau_g \approx (10^{-8} \div 10^{-7})$  с), свідчать, що для опису процесів у досліджуваних структурах доцільно застосовувати модель рекомбінації в системі спарених рівнів двох окремих дефектів (CDLR, coupled defect level recombination) [54]. УЗН викликає оборотне зростання  $n_{id}$  (до 0,04) та зменшення  $\tau_g$  (до 30%). Оборотність АІ змін та незмінність  $T_{id}$  і  $E_{\tau g}$  при поширенні АХ показують, що при УЗН не відбуваються ні перебудова рекомбінаційних центрів (РЦ), ні зменшення їх концентрації. Дослідження та оцінки показали, що рекомбінація в квазі-нейтральній області може бути описана в рамках моделі Шоклі–Ріда–Хола (SRH), при цьому  $\tau_n^{-1} = \sum_i N_{d,i} \sigma_{n,i} v_{th,n}$  (де кількість доданків в сумі визначається загальним числом різних РЦ, кожен з яких характеризується концентрацією  $N_{d,i}$  та поперечним перерізом захоплення (ППЗ) електронів  $\sigma_{n,i}$ ;  $v_{th,n}$  — теплова швидкість електронів). При УЗН спостерігається достатньо значне (до 90%) зменшення  $\tau_n$ , причому  $\tau_n^{-1} \sim u_{US}^2$  (де  $u_{US}$  — амплітуда зміщень атомів при поширенні УЗ).

Було проведено дослідження впливу інтенсивного ( $\sim 2000$  Вт/м<sup>2</sup>) довготривалого ( $\sim 15$  год) освітлення на параметри КСЕ. Аналіз залишкових змін та перехідних процесів після припинення освітлення показав, що дефектами в ОПЗ та КНО, які приймають участь як у рекомбінаційних процесах, так у акусто-дефектній взаємодії є, переважно, кисневмісні преципітати (КП). Крім того, певний внесок у ці процеси пов'язаний з парами  $Fe_i B_s$ .

Для пояснення виявлених ефектів запропонована модель акустоактивного комплексного РЦ, який складається з двох дефектів донорного та акцепторного типів (див. Рис. 2) у випадку CDLR чи є точковим дефектом–комплексом з нееквівалентних компонент у випадку механізму SRH. При поширенні УЗ на точковий дефект дії періодична сила, амплітуда якої залежить від зміни об'єму кристалу, що припадає на один дефект  $\Delta\Omega_d$  [55]. В рамках запропонованої моделі за умов УЗН компоненти РЦ здійснюють гармонічні коливання, частота та вісь яких визначаються акустичною хвилею, тоді як амплітуди та фази залежить також і від  $\Delta\Omega_d^D$  та  $\Delta\Omega_d^A$  кожної з них. При цьому відстань між цими компонентами в умовах УЗН  $r_{US}$  залежить від часу

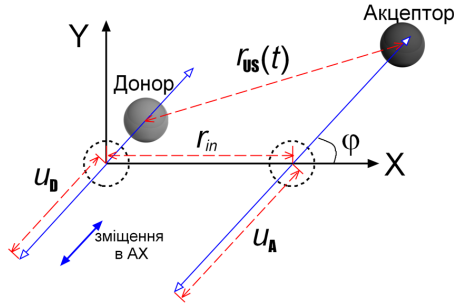


Рис. 2. Модель поведінки дефектного комплексу в умовах УЗН.

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

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

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

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

Виявлено зменшення величини шунтуючого опору (до 30%) при УЗН. Спираючись на температурну залежність  $R_{sh}$  показано, що його поява може бути описана в рамках моделі дислокаційно-індукованого імпедансу [56], а АІ зміни викликані зростанням ефективності захоплення електронів лінійними дефектами, розташованими в області  $p$ - $n$  переходу.

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

Додатково, за допомогою методу диференціальним коефіцієнтів ВАХ [57], проведено аналіз впливу УЗН на параметри дефектів в ОПЗ неопромінених КСЕ. Шляхом детального аналізу літературних даних проведена ідентифікація дефектів, пов'язаних з виявленими енергетичними рівнями. А саме, основними дефектами є КП (рівні  $E_c - (0,46 \div 0,48)$  eВ та  $E_c - 0,40$  eВ), дислокації ( $E_c - 0,36$  eВ) та комплекси  $Fe_iO_i$  ( $E_c - 0,36$  eВ). При УЗН відбувається незначне (близько 0,01 eВ) зменшення енергії активації та збільшується внесок у рекомбінацію більш мілких рівнів, зокрема КП, причому зміни відносних внесків різних центрів практично лінійно залежать від  $u_{us}$ .

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

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

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

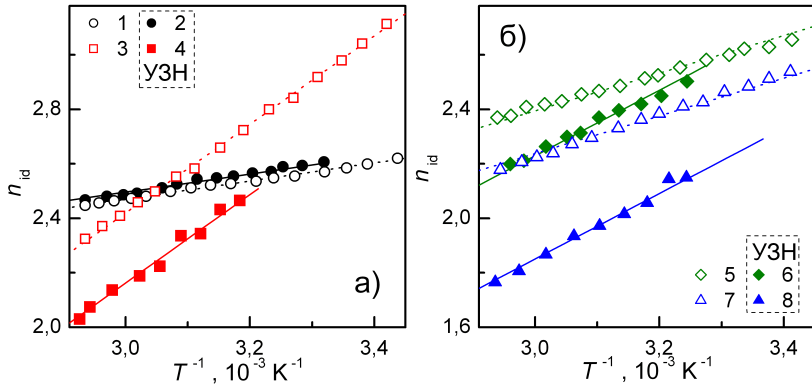


Рис. 3. Температурні залежності фактору неідеальності для неопроміненого (криві 1, 2), нейтронно-опроміненого (3, 4) та гамма-опромінених (5, 6 та 7, 8 для доз  $10^6$  та  $10^7$  рад, відповідно) зразків. Криві 1, 3, 5 та 6 отримані без УЗН, криві 2, 4, 9 та 8 відповідають УЗН (поперечні хвилі, 4,2 МГц, 0,4 Вт/см<sup>2</sup>).

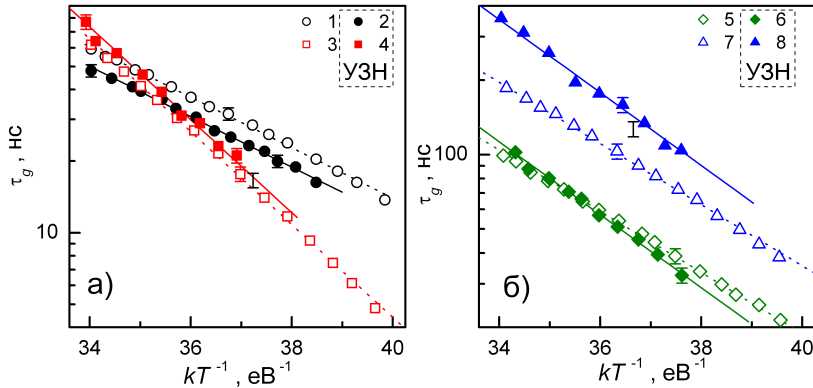


Рис. 4. Температурні залежності  $\tau_g$ . Позначення кривих збігаються з Рис. 3. радіаційних дефектів, отримана система рівнянь для визначення коефіцієнтів, які характеризують акусто-дефектну взаємодію радіаційних дефектів та КП. Її розв'язок показав, що для К-центру  $K_{US}^{CO} = 0$ , тобто цей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

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

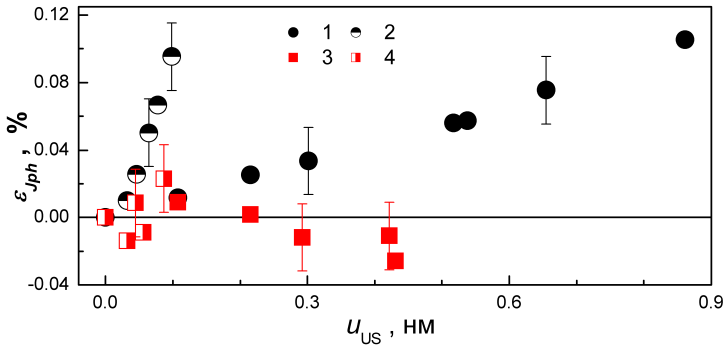


Рис. 5. Залежності АІ зменшення фотоструму від амплітуди зміщень атомів в неопроміненому (1, 2) та нейтронно–опроміненому (3, 4) зразках. Частота УЗН, Гц: 8,0 (1, 3), 26,1 (2, 4).

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

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

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

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

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

або вищого порядків (Mikhelashvili)) 2 чисельних методи (метод найменших квадратів зі статичними ваговими коефіцієнтами застосовувався безпосередньо до рівняння (4) та до його розв'язку, вираженого через  $W$ -функцію Ламберта) та 4 еволюційних алгоритми (диференційної еволюції (DE), оптимізації зграї частинок (PSO), модифікованої штучної бджолоїної сім'ї (MABC) та оптимізованого викладання та навчання (TLBO)). Всі методи були застосовані до а) синтезованих за допомогою виразу (4) ідеальних BAX; б) синтезованих BAX з врахуванням можливих випадкових похибок вимірювань; в) експериментально виміряних BAX кремнієвих діодів Шотки.

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

Основна задача полягала у порівнянні точності (Рис. 6 та 7) та швидкодії (Таблиця 1) визначення параметрів структур МН різними методами. Показано, що найбільша точність досягається при використанні еволюційних алгоритмів (ЕА), чисельних методів, метод Gromov з адаптивною процедурою та метод Lee. Використання функції Ламберта при застосуванні чисельних методів дозволяє зменшити помилки визначення параметрів. Проведено аналіз впливу абсолютних величин кожного з параметрів на точність визначення  $R_s$ ,  $\Phi_b$  та  $n_{id}$ . Зокрема показано, що ЕА дозволяють отримати найбільш коректні результати Табл. 1 — Час визначення параметрів ДШ з однієї BAX.

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



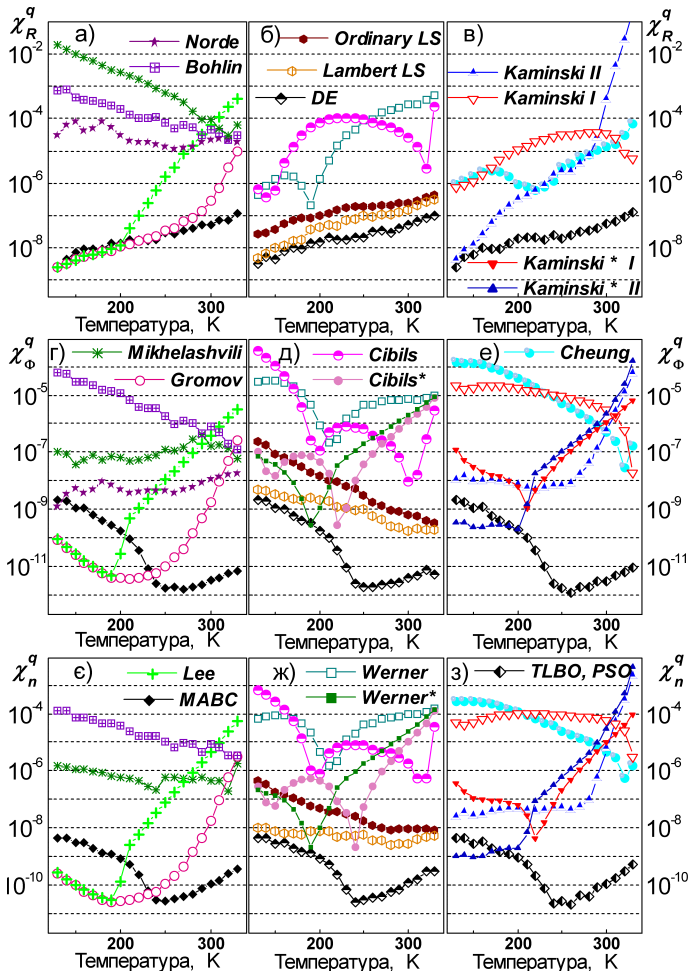


Рис. 6. Температурні залежності відносних похибок визначення  $R_s$  (а — в),  $\Phi_b$  (г — е) та  $n_{id}$  (є — з) при застосуванні різних методів до ідеальних синтезованих BAX.

при малих (декілька Ом) значеннях  $R_s$  або високих температурах, а найбільш стійкими до величин параметрів є точності чисельних методів.

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

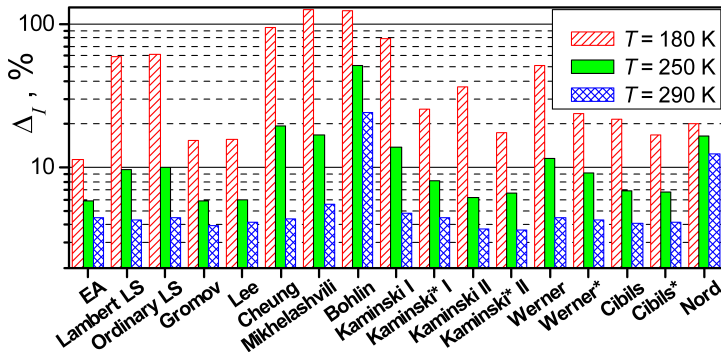


Рис. 7. Середні значення відносного відхилення розрахованих значень сили струму від експериментальних даних.

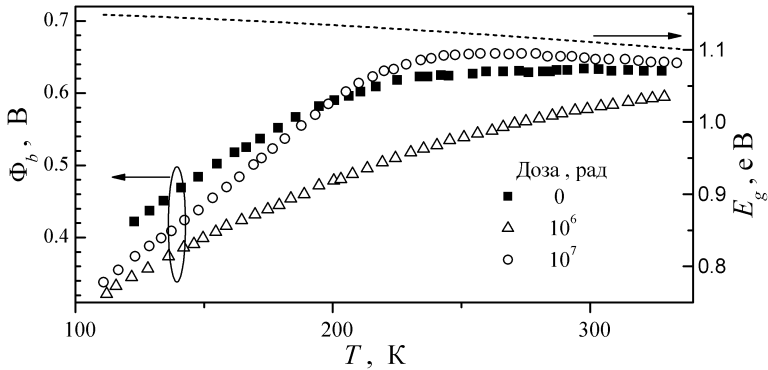


Рис. 8. Температурні залежності висоти бар'єру структур Al–n – n<sup>+</sup>–Si–Al. Пунктирна лінія — залежність ширини забороненої зони кремнію.

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

У четвертому розділі представлені результати досліджень номонотонного впливу  $\gamma$ -опромінення на структури Al–n – n<sup>+</sup>–Si–Al з контактом Шотки та динамічних АІ ефектів при кімнатних температурах.

У п'ятому розділі представлені результати досліджень

У шостому розділі представлені результати досліджень

Во введенні обосновується актуальність досліджень, проводимих в рамках данної дисертаційної роботи, приводиться огляд наукової літератури по изучаємій проблемі, формулюється цель, ставляться задачі роботи, излагається научная новизна и практическая значимость представляемой работы. В последующих главах сначала описывается общий принцип, позволяющий ..., а потом идёт апробация на частных примерах: ... и ... .

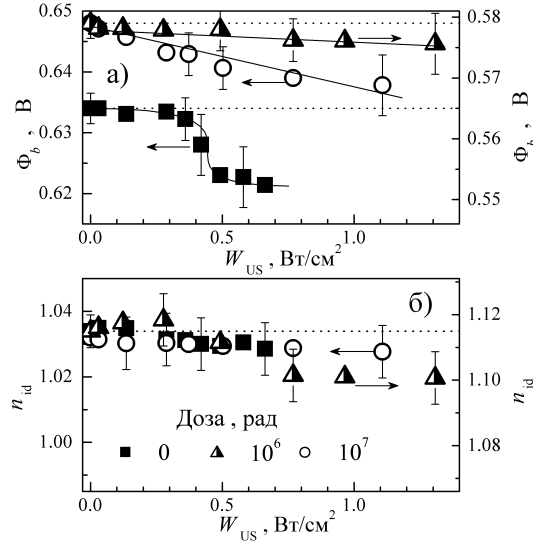


Рис. 9. Залежності висоти бар'єру Шотки (а) та фактору неідеальності (б) від інтенсивності УЗ для структур  $\text{Al}-n-n^+-\text{Si}-\text{Al}$  з різним ступенем опромінення.  $T = 305$  К. Частота УЗН 9,6 МГц. Горизонтальні пунктирні лінії відповідають значенням параметрів, виміряних без УЗН.

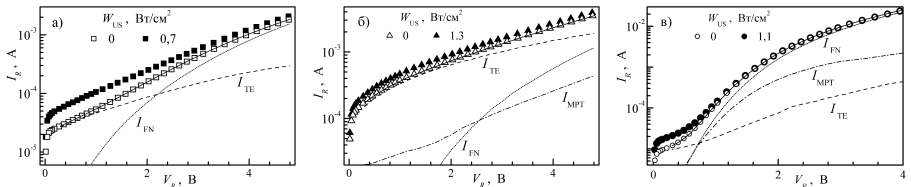


Рис. 10. Зворотні BAX структур SSDA (а), g6SSDA (б) та g7SSDA (в), виміряні при  $T = 305$  К. Заповнені та порожні точки відповідають вимірам за умов УЗН та без нього, відповідно.  $f_{US} = 9,6$  МГц. Суцільні лінії — апроксимація відповідно до формули (??), розривні відображають окремі складові зворотного струму для ненавантажених структур.

Первая глава посвящена ...  
картинку можно добавить так:

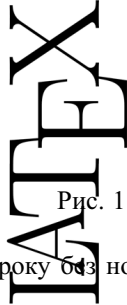


Рис. 11. Подпись к картинке.

Формулы в строку без номера добавляются так:

$$\lambda_{T_s} = K_x \frac{dx}{dT_s}, \quad \lambda_{q_s} = K_x \frac{dx}{dq_s},$$

Вторая глава посвящена исследованию

Третья глава посвящена исследованию

Можно сослаться на свои работы в автореферате. Для этого в файле Synopsis/setup.tex необходимо присвоить положительное значение счётчику \setcounter{usefootcite}{1}. В таком случае ссылки на работы других авторов будут подстрочными. Использование подстрочных ссылок внутри таблиц может вызывать проблемы.

В четвертой главе приведено описание

Основні результати представленої роботи полягають у наступному.

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

2. Вперше досліджено вплив ультразвукового навантаження на параметри кремнієвих структур з  $p$ - $n$  переходом, які були опромінені реакторними нейтронами та  $\gamma$ -квантами  $^{60}\text{Co}$ . Виявлено, що в опроміненних структурах, порівняно з неопроміненними, спостерігається підвищення ефективності акустоіндукowanego зменшення шунтуючого опору та часу життя неосновних носіїв заряду в базі діоду. З'ясовано, що акустоіндуковані оборотні зміни фактору неідеальності та часу життя носіїв в області просторового заряду мають різний знак в опроміненних та неопроміненних структурах. Встановлено, що виявлені ефекти в нейтронно-опроміненних діодах пов'язані зі впливом ультразвуку на стан дивакансій, тоді як в гамма-опроміненних діодах основним акустоактивним центром є комплекс вакансії та міжвузольного кисню. Отримані результати свідчать, що ультразвукове навантаження викликає перебудову комплексу  $\text{VO}_i$ . Водночас виявлено, що комплекс з міжвузольного вуглецю та міжвузольного кисню практично не приймає участі в акусто-дефектній взаємодії.

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

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

5. Проведено експериментальне дослідження прямих і зворотних вольт-амперних характеристик структур  $\text{Al}-n-n^+-\text{Si}-\text{Al}$  з бар'єром Шотки в діапазоні температур  $130 \div 330$  К. Виявлено, що при підвищенні температури спостерігається збільшення висоти бар'єру та зменшення фактору неідеальності. Показано, що отримані результати можна пояснити у рамках моделі термоелектронної емісії через неоднорідний контакт у всьому діапазоні температур. Показано, що при низьких температурах ( $T < 220$  К) суттєвим стає проходження заряду через області зі зниженим бар'єром і визначено середнє значення висоти бар'єру Шотки в цих областях —  $54 \pm 4$  мВ. Виявлено, що

при зворотному зміщенні в структурах  $\text{Al}-n-n^+-\text{Si}-\text{Al}$  перенесення заряду відбувається як внаслідок термоелектронної емісії через неоднорідний бар'єр, так і завдяки процесам прямого тунелювання через глибокий центр, яким, імовірно, є міжвузольний атом вуглецю.

6. Проведено експериментальне дослідження впливу  $^{60}\text{Co}$   $\gamma$ -випромінювання  $^{60}\text{Co}$  на електрофізичні параметри структур  $\text{Al}-n-n^+-\text{Si}-\text{Al}$ . Показано, що радіаційне опромінення суттєво підсилює процеси тунелювання носіїв заряду як при прямому зміщенні, так і при зворотному. Встановлено, що при прямому зміщенні тунельний механізм перенесення струму стає основним в низькотемпературній області ( $T < 250 \text{ K}$ ), а при зворотному — з'являється компонента струму, пов'язана з багатофоновим тунелюванням. Виявлено, що висота бар'єру, фактор неідеальності та величина зворотного струму немонотонно змінюються при збільшенні поглинутої дози. Встановлено, що для низьких значень поглинутої дози зміна електрофізичних параметрів  $\gamma$ -опромінених структур відбувається внаслідок накопичення дефектів акцепторного типу на границі розділу метал-напівпровідник та укрупнення патчів внаслідок радіаційно підсиленого дислокаційного ковзання, тоді як при високих значеннях поглинутої дози цей ефект маскується інтенсифікацією процесів тунелювання внаслідок утворення значної кількості радіаційних дефектів. Показано, що характер дозової немонотонності зміни висоти бар'єру Шотки різний для однорідних областей та для всього діоду загалом.

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

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

а також уширюється розподіл параметрів патчів та збільшується їх ефективна густина. Показано, що частотні та температурні особливості акустоіндукованих змін параметрів структур  $\text{Mo}/n\text{-}n^+\text{-Si}$  можуть бути пояснені в рамках моделі поглинання ультразвуку внаслідок руху дислокаційних перегинів.

9. Вперше виявлено ефект оборотного збільшення зворотного струму структур  $\text{Mo}/n\text{-}n^+\text{-Si}$  за умов їх акустичного навантаження; показано, що ефект послаблюється при збільшенні температури та зміщеня та посилюється при зростанні частоти ультразвуку. Показано, що основними механізмами зворотного струму є термоелектронна емісія та тунелювання, стимульоване фононами; в умовах поширення акустичних хвиль відбувається зменшення енергії активації рівнів, що беруть участь у тунелюванні, густини заповнених інтерфейсних станів та коефіцієнта Пула–Френкеля.

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

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

12. Показано, що ультразвукова обробка здатна викликати гомогенізацію як параметрів кремнієвих діодів Шотки, створених в єдиному технологічному процесі, так і енергетичного спектру радіаційноіндукованих пасток на інтерфейсній системі  $\text{Si-SiO}_2$ .

## СПИСОК ОПУБЛІКОВАНИХ ПРАЦЬ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ

*Наукові праці, в яких опубліковано основні наукові результати дисертації*

1. Acousto-defect interaction in irradiated and non-irradiated silicon  $n^+-p$  structure / O. Ya. Olikh, A. M. Gorb, R. G. Chupryna, O. V. Pristay-Fenenkov // *J. Appl. Phys.* — 2018. — Apr. — Vol. 123, no. 16. — P. 161573–1–161573–12.

2. Olikh, O.Ya. Acoustically driven degradation in single crystalline silicon solar cell / O.Ya. Olikh // *Superlattices Microstruct.* — 2018. — May. — Vol. 117. — P. 173–188.
3. Olikh, Oleg. On the mechanism of ultrasonic loading effect in silicon-based Schottky diodes / Oleg Olikh, Katerina Voytenko // *Ultrasonics.* — 2016. — Mar. — Vol. 66, no. 1. — P. 1–3.
4. Effect of ultrasound on reverse leakage current of silicon Schottky barrier structure / O. Ya. Olikh, K. V. Voytenko, R. M. Burbelo, Ja. M. Olikh // *Journal of Semiconductors.* — 2016. — Dec. — Vol. 37, no. 12. — P. 122002–1–122002–7.
5. Olikh, O. Ya. Review and test of methods for determination of the Schottky diode parameters / O. Ya. Olikh // *J. Appl. Phys.* — 2015. — Jul. — Vol. 118, no. 2. — P. 024502–1–024502–14.
6. Olikh, O. Ya. Ultrasound influence on I–V–T characteristics of silicon Schottky barrier structure / O. Ya. Olikh, K. V. Voytenko, R. M. Burbelo // *J. Appl. Phys.* — 2015. — Jan. — Vol. 117, no. 4. — P. 044505–1–044505–7.
7. Olikh, Oleg. Reversible influence of ultrasound on  $\gamma$ -irradiated Mo/n-Si Schottky barrier structure / Oleg Olikh // *Ultrasonics.* — 2015. — Feb. — Vol. 56. — P. 545–550.
8. Особливості дислокаційного поглинання ультразвуку в безсубблочних кристалах  $\text{Cd}_{0,2}\text{Hg}_{0,8}\text{Te}$  / І. О. Лисюк, Я. М. Оліх, О. Я. Оліх, Г. В. Бекетов // *УФЖ.* — 2014. — Т. 59, № 1. — С. 50–57.
9. Olikh, O. Ya. Non-Monotonic  $\gamma$ -Ray Influence on Mo/n-Si Schottky Barrier Structure Properties / O. Ya. Olikh // *IEEE Trans. Nucl. Sci.* — 2013. — Feb. — Vol. 60, no. 1. — P. 394–401.
10. Оліх, О. Я. Особливості впливу ультразвуку на перенесення заряду в кремнієвих структурах з бар'єром Шотки залежно від дози  $\gamma$ -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  $\text{Mo}/\text{n-n}^+\text{-Si}$  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 Шотки / О. Я. Оліх // *УФЖ.* — 2013. — Т. 58, № 2. — С. 126–134.
13. Олих, О. Я. Особенности динамических акустоиндуцированных изменений фотоэлектрических параметров кремниевых солнечных элементов / О. Я. Олих // *Физика и техника полупроводников.* — 2011. — Т. 45, № 6. — С. 816–822.
14. Оліх, Я. М. Інформаційний чинник акустичної дії на структуру дефектних комплексів у напівпровідниках / Я. М. Оліх, О. Я. Оліх // *Сенсорна електроніка і мікросистемні технології.* — 2011. — Т. 2(8), № 2. — С. 5–12.



15. Оліх, О. Я. Особливості впливу нейтронного опромінення на динамічну акустодефектну взаємодію у кремнієвих сонячних елементах / О. Я. Оліх // *УФЖ*. — 2010. — Т. 55, № 7. — С. 770–776.
16. Ultrasonically Recovered Performance of  $\gamma$ -Irradiated Metal-Silicon Structures / A.M. Gorb, O.A. Korotchenkov, O.Ya Olikh, A.O. Podolian // *IEEE Trans. Nucl. Sci.* — 2010. — June. — Vol. 57, no. 3. — P. 1632–1639.
17. Оліх, О. Я. Изменение активности рекомбинационных центров в кремниевых р–п–структурах в условиях акустического нагружения / О. Я. Оліх // *Физика и техника полупроводников*. — 2009. — Т. 43, № 6. — С. 774–779.
18. Оліх, О. Я. Робота кремнієвих сонячних елементів в умовах акустичного навантаження мегагерцового діапазону / О. Я. Оліх, Р. М. Бурбело, М. К. Хіндерс // *Сенсорна електроніка і мікросистемні технології*. — 2007. — Т. 4, № 3. — С. 40–45.
19. Olikh, O.Ya. The Dynamic Ultrasound Influence on Diffusion and Drift of the Charge Carriers in Silicon p–n Structures / O.Ya. Olikh, R. Burbelo, M. Hinderers // *Semiconductor Defect Engineering — Materials, Synthetic, Structures and Devices II* / Ed. by S. Ashok, P. Kiesel, J. Chevallier, T. Ogino. — Vol. 994 of *Materials Research Society Symposium Proceedings*. — Warrendale, PA: 2007. — P. 269–274.
20. Оліх, О. Я. Акустостимулированные коррекции вольт–амперных характеристик арсенид–галлиевых структур с контактом Шоттки / О. Я. Оліх, 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. Оліх // *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. Оліх // *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.

26. *Oliх, 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. *Oliх, 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. — Pp. 230–231.
30. *Oliх, 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, Hinder 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. Hinder // MRS 2007 Spring Meeting, Symposium F: Semiconductor Defect Engineering — Materials, Synthetic Structures, and Devices II. San Francisco, USA. — San Francisco: 2007. — P. 3.11.

35. Оліх, О. Я. Робота кремнієвих сонячних елементів в умовах акустичного навантаження мегагерцового діапазону / О. Я. Оліх // III Українська наукова конференція з фізики напівпровідників УНКФН-3, Одеса, Україна. Тези доповідей. — Одеса: 2007. — С. 322.
36. Оліх, О. Я. Вплив ультразвукової обробки на вольт-амперні характеристики опромінених кремнієвих структур / О. Я. Оліх, А. М. Горб // VI Міжнародна школа-конференція «Актуальні проблеми фізики напівпровідників», Дрогобич, Україна. Тези доповідей. — Дрогобич: 2008. — С. 114.
37. Оліх, О. Я. Акустичні збурення дефектної підсистеми кремнієвих p-n-структур / О. Я. Оліх // VI Міжнародна школа-конференція «Актуальні проблеми фізики напівпровідників», Дрогобич, Україна. Тези доповідей. — Дрогобич: 2008. — С. 174.
38. Оліх, О. Я. Особливості механізму ультразвукового впливу на фото-електричний струм у нейтронно-опромінених Si-p-n-структурах / О. Я. Оліх // IV Українська наукова конференція з фізики напівпровідників, Запоріжжя, Україна. Тези доповідей. — Т. 2. — Запоріжжя: 2009. — С. 59.
39. Оліх, Я. М. Про можливості практичного застосування ультразвуку для керування характеристиками перетворювачів сонячної енергії / Я. М. Оліх, О. Я. Оліх // Четверта міжнародна науково-практична конференція «Матеріали електронної техніки та сучасні інформаційні технології», Кременчук, Україна. Тези доповідей. — Кременчук: 2010. — С. 147–148.
40. Оліх, О. 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.
41. Оліх, О. 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.
42. Оліх, О. Я. Вплив ультразвуку на термoeмісійні процеси в Mo/n-n<sup>+</sup>-Si структурах / О. Я. Оліх // Матеріали Всеукраїнської наукової конференції «Актуальні проблеми теоретичної, експериментальної та прикладної фізики», Тернопіль, Україна. — Тернопіль: 2012. — С. 101–103.
43. Olikh, O. Ya. Reversible Alteration of Reverse Current in Mo/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.

44. *Olikh, O. Ya.* Modification of reverse current in the Mo/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. — Pp. 101–102.
45. *Olikh, Ya. M.* About acoustical-stimulated a self-organization defect structures in semiconductor during ion implantation / Ya. M. Olikh, O. Ya. Olikh // International research and practice conference «Nanotechnology and nanomaterials», Bukovel, Ukraine. Abstract book. — Bukovel: 2013. — P. 240.
46. *Olix, O. Я.* Вплив  $\gamma$ -опромінення на механізм перенесення заряду в структурах Mo/n-Si / О. Я. Оліх // VI Українська наукова конференція з фізики напівпровідників УНКФН-6. Чернівці, Україна. Тези доповідей. — Чернівці: 2013. — С. 121–122.
47. *Olikh, Ya.* New approach to ultrasonic absorption in subgrain-free  $\text{Cd}_{0,2}\text{Hg}_{0,8}\text{Te}$  crystals / Ya. Olikh, I. Lysyuk, O. Olikh // 2014 IEEE International Ultrasonics Symposium. Chicago, Illinois, USA. Abstract book. — Chicago: 2014. — Pp. 439–440.
48. *Olikh, O.* Ultrasonically induced effects in Schottky barrier structure depending on a  $\gamma$ -irradiation / O. Olikh // 2014 IEEE International Ultrasonics Symposium. Chicago, Illinois, USA. Abstract book. — Chicago: 2014. — Pp. 645–646.
49. *Olix, O. Я.* Характеризація  $\gamma$ -опромінених кремнієвих р-n-структур методом диференційних коефіцієнтів / О. Я. Оліх, О. В. Пристай // 6-та Міжнародна науково-технічна конференція «Сенсорна електроніка і мікросистемні технології», Одеса, Україна. Тези доповідей. — Одеса: 2014. — С. 193.
50. *Olikh, O.Ya.* Ultrasonic Loading Effects on Silicon-based Schottky Diodes / O.Ya Olikh, K. V. Voytenko // 2015 International Congress on Ultrasonics. Metz, France. Abstract book. — Metz: 2015. — P. 225.
51. *Olix, O. Я.* Порівняння ефективності методів визначення параметрів діодів Шотки / О. Я. Оліх // Сучасні проблеми фізики конденсованого стану: Праці IV-ї міжнародної конференції. Київ, Україна. — Київ: 2015. — С. 32–34.
52. Ультразвукова модифікація стимульованого фононами тунелювання у кремнієвих діодах Шотки / О. Я. Оліх, К. В. Войтенко, Р. М. Бурбело, Я. М. Оліх // VII Українська наукова конференція з фізики напівпровідників УНКФН-7. Дніпро, Україна. Тези доповідей. — Дніпро: 2016. — С. 190–191.
53. *Olix, O. Я.* Акусто-керована модифікація властивостей кремнієвих фотоелектроперетворювачів / О. Я. Оліх // Перспективні напрямки сучасної електроніки, інформаційних і комп'ютерних систем. Тези доповідей на II Всеукраїнській науково-практичній конференції MEICS-2017. Дніпро, Україна. — Дніпро: 2017. — С. 302–303.

## АНОТАЦІЯ

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

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

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

## АННОТАЦИЯ

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

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

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

## ABSTRACT

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

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

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

## Список використаних джерел

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

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

22. Конакова, Р.В. Влияние микроволновой обработки на глубокие уровни монокристаллов GaAs и SiC / Р.В. Конакова, П.М. Литвин, О.Я. Олих // *Петербургский журнал электроники*. — 2004. — № 1. — С. 20–24.
23. Olikh, Ja. M. Active ultrasound effects in the future usage in sensor electronics / Ja. M. Olikh, O.Ya. Olikh // *Сенсорна електроніка і мікросистемні технології*. — 2004. — Т. 1, № 1. — С. 19–29.
24. Olikh, O.Ya. Acoustoelectric transient spectroscopy of microwave treated GaAs-based structures / O.Ya. Olikh // *Semiconductor Physics, Quantum Electronics & Optoelectronics*. — 2003. — Vol. 6, no. 4. — Pp. 450–453.
25. Оліх, О.Я. Акустостимульовані динамічні ефекти в сонячних елементах на основі кремнію / О.Я. Оліх // *Вісник Київського ун-ту, Сер.: Фізико-математичні науки*. — 2003. — № 4. — С. 408–414.
26. Оліх, О. Я. Эффекты активного ультразвуку в напівпровідникових кристалах / О. Я. Оліх // 1-а Українська наукова конференція з фізики напівпровідників, Одеса, Україна. — Т. 1. — Одеса: 2002. — С. 80.
27. Влияние СВЧ облучения на остаточный уровень внутренних механических напряжений и параметры глубоких уровней в эпитаксиальных структурах GaAs / Р. В. Конакова, А. Б. Камалов, О. Я. Олих и др. // Труды III международной конференции «Радиационно-термические эффекты и процессы в неорганических материалах», Томск, Россия. — Томск: 2002. — С. 338–339.
28. Оліх, О. Я. Про роль теплових і деформаційних механізмів дії ультразвуку на роботу кремнієвих сонячних елементів / О. Я. Оліх // Міжнародна науково-технічна конференція «Сенсорна електроніка і мікросистемні технології СЕМСТ-1», Одеса, Україна. Тези доповідей. — Одеса: 2004. — С. 163.
29. Olikh, O. Investigation of microwave treated epitaxial GaAs structures by acoustoelectric method / O. Olikh // 2004 IEEE International Ultrasonics, Ferroelectrics and Frequency Control Joint 50<sup>th</sup> Anniversary Conference. Montreal, Canada. Abstracts. — Montreal: 2004. — Pp. 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. *Оліх, О. Я.* Робота кремнієвих сонячних елементів в умовах акустичного навантаження мегагерцового діапазону / О. Я. Оліх // III Українська наукова конференція з фізики напівпровідників УНКФН-3, Одеса, Україна. Тези доповідей. — Одеса: 2007. — С. 322.
  36. *Оліх, О. Я.* Вплив ультразвукової обробки на вольт-амперні характеристики опромінених кремнієвих структур / О. Я. Оліх, А. М. Горб // VI Міжнародна школа-конференція «Актуальні проблеми фізики напівпровідників», Дрогобич, Україна. Тези доповідей. — Дрогобич: 2008. — С. 114.
  37. *Оліх, О. Я.* Акустичні збурення дефектної підсистеми кремнієвих p-n-структур / О. Я. Оліх // VI Міжнародна школа-конференція «Актуальні проблеми фізики напівпровідників», Дрогобич, Україна. Тези доповідей. — Дрогобич: 2008. — С. 174.
  38. *Оліх, О. Я.* Особливості механізму ультразвукового впливу на фото-електричний струм у нейтронно-опромінених Si-p-n-структурах / О. Я. Оліх // IV Українська наукова конференція з фізики напівпровідників, Запоріжжя, Україна. Тези доповідей. — Т. 2. — Запоріжжя: 2009. — С. 59.
  39. *Оліх, Я. М.* Про можливості практичного застосування ультразвуку для керування характеристиками перетворювачів сонячної енергії / Я. М. Оліх, О. Я. Оліх // Четверта міжнародна науково-практична конференція «Матеріали електронної техніки та сучасні інформаційні технології», Кременчук, Україна. Тези доповідей. — Кременчук: 2010. — С. 147–148.
  40. *Оліх, О. 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.

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

- Міжнародна науково-технічна конференція «Сенсорна електроніка і мікросистемні технології», Одеса, Україна. Тези доповідей. — Одеса: 2014. — С. 193.
50. *Olikh, O.Ya.* Ultrasonic Loading Effects on Silicon-based Schottky Diodes / O.Ya Olikh, K. V. Voytenko // 2015 International Congress on Ultrasonics. Metz, France. Abstract book. — Metz: 2015. — P. 225.
  51. *Оліх, О. Я.* Порівняння ефективності методів визначення параметрів діодів Шотки / О. Я. Оліх // Сучасні проблеми фізики конденсованого стану: Праці IV-ї міжнародної конференції. Київ, Україна. — Київ: 2015. — С. 32–34.
  52. Ультразвукова модифікація стимульованого фононами тунелювання у кремнієвих діодах Шотки / О. Я. Оліх, К. В. Войтенко, Р. М. Бурбело, Я. М. Оліх // VII Українська наукова конференція з фізики напівпровідників УНКФН-7. Дніпро, Україна. Тези доповідей. — Дніпро: 2016. — С. 190–191.
  53. *Оліх, О. Я.* Акусто-керована модифікація властивостей кремнієвих фотоелектроперетворювачів / О. Я. Оліх // Перспективні напрямки сучасної електроніки, інформаційних і комп'ютерних систем. Тези доповідей на II Всеукраїнській науково-практичній конференції MEICS-2017. Дніпро, Україна. — Дніпро: 2017. — С. 302–303.
  54. Explanation of commonly observed shunt currents in c-Si solar cells by means of recombination statistics beyond the Shockley-Read-Hall approximation / Silke Steingrube, Otwin Breitenstein, Klaus Ramspeck et al. // *J. Appl. Phys.* — 2011. — July. — Vol. 110, no. 1. — P. 014515.
  55. *Mirzade, Fikret.* Elastic wave propagation in a solid layer with laser-induced point defects / Fikret Mirzade // *J. Appl. Phys.* — 2011. — Sep. — Vol. 110, no. 6. — P. 064906.
  56. *Gopal, Vishnu.* Contribution of Dislocations to the Zero-Bias Resistance-Area Product of LWIR HgCdTe Photodiodes at Low Temperatures / Vishnu Gopal, Sudha Gupta // *IEEE Trans. Electron Devices.* — 2004. — Jul. — Vol. 51, no. 7. — Pp. 1078–1083.
  57. 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.