ВІДГУК

офіційного опонента,
доктора технічних наук, старшого наукового співробітника,
професора кафедри комп'ютерної інженерії та електроніки
Прикарпатського національного університету імені Василя Стефаника
ДЗУНДЗИ Богдана Степановича
на дисертацію

СКРИПНИКА Ігоря Ігоровича
«Модифікація поверхні кремнієвої підкладки з використанням нанотекстурованих шарів для підвищення ефективності фотоелектричних перетворювачів»
представлену на здобуття наукового ступеня доктора філософії в галузі знань 15 «Автоматизація та приладобудування» за спеціальністю
153 «Мікро- та наносистемна техніка»

Актуальність теми

Підвищення ефективності фотоелектричних перетворювачів (ФЕП) залишається одним із ключових завдань у сфері мікро- та наносистемної техніки, а також відновлюваної енергетики. Одним із основних чинників, що обмежує показники комерційних кремнієвих сонячних елементів, є оптичні втрати, зокрема відбивання світла від поверхні підкладки. У цьому контексті важливе значення мають підходи до нанотекстурування поверхні, які дозволяють зменшити коефіцієнт відбивання, покращити захоплення фотонів і зменшити рекомбінаційні втрати. Особливу увагу в цьому напрямі привертає технологія метал-каталітичного хімічного травлення, яка дозволяє формувати ієрархічні наноструктури, зокрема кремнієві нанодротини, з контрольованими геометричними параметрами. Такі структури мають перспективу не лише в сонячній енергетиці, а й у сенсорних системах, фотодетекторах та інших елементах оптоелектроніки.

Важливим науковим завданням є вивчення взаємозв'язку між морфологією сформованих наноструктур, оптичними характеристиками, параметрами змочуваності та електричними властивостями ФЕП. Зважаючи на це, обрана тема дисертаційного дослідження є своєчасною, має високу наукову та прикладну значущість, а також повною мірою відповідає сучасному рівню розвитку нанотехнологій та мікросистемної техніки.

Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами.

Дисертацію виконано відповідно до наукових напрямів кафедри напівпровідникової електроніки Національного університету «Львівська політехніка»: «Сенсори та перетворювальні прилади на основі напівпровідникових та діелектричних матеріалів і гетероструктур, «Фізико-хімічні процеси синтезу та контрольованої модифікації властивостей матеріалів функціональної, мікро- та наноелектроніки», а також частково в межах держбюджетної теми Міністерства освіти і науки України «Розроблення наукових і технологічних основ створення елементів мікро- і наносистемної техніки на основі базових сенсорних напівпровідникових кристалів та наноструктур» (2020–2022 рр., номер державної реєстрації 0120U102202).

Наукова новизна

У дисертаційній роботі одержано нові науково обґрунтовані результати, які в сукупності розв'язують актуальну науково-технічну задачу з підвищення ефективності фотоелектричних перетворювачів за рахунок модифікації поверхні кремнієвих підкладок нанотекстурованими шарами, сформованими методами лужного травлення та метал-каталітичного хімічного травлення.

До основних положень наукової новизни варто віднести:

- вперше досліджено вплив геометричних параметрів кремнієвих нанодротів (діаметра, довжини, ступеня кластеризації) на змочуваність, антивідбивні властивості та ефективність поглинання світла нанотекстурованою поверхнею;
- показано можливість реалізації режиму гідрофобності Кессі–Бакстера для кремнієвих наноструктур із заданими морфологічними характеристиками;
- встановлено оптимальні параметри метал-каталітичного хімічного травлення для формування структур із заданими оптичними характеристиками при збереженні технологічної сумісності з існуючими методами легування та пасивації;
- вперше проведено порівняльний аналіз ефективності пасивації структур з нанодротами за допомогою гідрогенізації та полідиметилсилоксану (ПДМС), що дозволило оцінити вплив типу пасивувального шару на рекомбінаційні втрати та час життя неосновних носіїв заряду;
- запропоновано модель обґрунтування впливу морфології нанотекстурованих структур на характеристики фотоелектричних перетворювачів, яка враховує оптичні, електричні та поверхневі параметри.

Отримані результати розширюють науково-технічні уявлення про функціональну роль кремнієвих наноструктур у пристроях перетворення сонячної енергії та можуть бути використані для оптимізації технологічних процесів створення енергоефективних ФЕП нового покоління.

Практичне значення отриманих результатів

Практичне значення результатів дисертаційної роботи полягає у розробці і впровадженні ефективних технологічних підходів до модифікації поверхні кремнієвих підкладок шляхом формування нанотекстурованих структур, що дозволяють істотно зменшити оптичні втрати та підвищити ефективність фотоелектричних перетворювачів. Зокрема, отримані результати:

- дозволяють здійснювати цілеспрямоване конструювання кремнієвих структур з низьким коефіцієнтом відбивання за рахунок оптимізації параметрів нанотекстурування методом метал-каталітичного хімічного травлення;
- забезпечують практичне застосування результатів у розробці технологій виготовлення сонячних елементів з покращеними характеристиками світлозахоплення та меншою чутливістю до кута падіння світла;
- дають змогу враховувати вплив морфології кремнієвих наноструктур на гідрофобні властивості, що може бути корисним під час проектування самоочисних або вологозахисних покриттів для фотоелектричних пристроїв;

- сприяють удосконаленню методів пасивації нанотекстурованих структур із використанням ПДМС, що дозволяє покращити електричні параметри пристрою без суттєвого ускладнення технологічного процесу;
- можуть бути враховані у виробничих умовах при створенні високоефективних елементів сонячної енергетики, а також при розробці сенсорних і оптоелектронних систем, чутливих до змін зовнішнього середовища.

Результати досліджень також можуть бути використані у навчальному процесі при викладанні курсів, пов'язаних із нанотехнологіями, фотоелектрикою, мікро- та наносистемною технікою.

Структура та зміст дисертації, її завершеність та відповідність встановленим вимогам

Дисертація Скрипника Ігоря Ігоровича «Модифікація поверхні кремнієвої підкладки з використанням нанотекстурованих шарів для підвищення ефективності фотоелектричних перетворювачів» є рукописною кваліфікаційною науковою працею, що відповідає вимогам до дисертацій на здобуття наукового ступеня доктора філософії.

Робота містить вступ, чотири розділи основного змісту, висновки, список використаних джерел. Загальний обсяг дисертації становить 123 сторінки друкованого тексту. Основний текст супроводжується 44 рисунками, 5 таблицями, список літератури охоплює 104 найменування.

У **вступі** обґрунтовано актуальність теми, сформульовано мету та завдання дослідження, визначено об'єкт, предмет, наукову новизну, практичне значення та структуру роботи.

Перший розділ присвячено аналітичному огляду літературних джерел щодо наноструктурування кремнію, механізмів зниження відбивання, способів легування та пасивації. Виявлено науково-практичні проблеми, які потребують вирішення, що й зумовило вибір напрямку дослідження.

У **другому розділі** описано методики виготовлення структур із нанотекстурованими шарами кремнію, зокрема метал-каталітичного хімічного травлення, лужного травлення, пасивації та легування. Також наведено схеми технологічних маршрутів та параметри обробки.

Третій розділ містить результати морфологічного, оптичного та електричного аналізу отриманих структур. Представлено порівняльну характеристику різних типів нанотекстур (нанодроти, пористий кремній, мікропіраміди), досліджено змочуваність, відбивну здатність та вплив пасивації на фотоелектричні властивості.

У **четвертому розділі** проведено теоретичне обґрунтування впливу морфологічних параметрів на ефективність фотоперетворення, зокрема виконано моделювання вольт-амперних характеристик, оцінено параметри ККД та розраховано основні втрати.

У **висновках** чітко підсумовано отримані результати, зазначено ступінь реалізації поставлених завдань та досягнення наукової мети.

У **додатку** представлено документ про впровадження результатів дисертації у навчальний процес.

Відсутність порушень академічної доброчесності

Дисертація є самостійною науковою працею здобувача. Основні положення, висновки та результати досліджень отримані Скрипником Ігорем Ігоровичем особисто. Порушень академічної доброчесності не виявлено. Усі запозичені матеріали належно оформлені з посиланням на джерела відповідно до вимог чинного законодавства та етичних стандартів академічної спільноти.

Ступінь обґрунтованості та достовірності наукових положень, висновків, сформульованих у дисертації

Наукові положення, висновки та рекомендації, сформульовані в дисертаційній роботі Скрипника Ігоря Ігоровича, є обґрунтованими, логічно послідовними та базуються на сучасній експериментальній базі. Достовірність отриманих результатів забезпечується застосуванням комплексу методів дослідження, зокрема морфологічного (СЕМ-аналіз), спектроскопічного (TOF-SIMS), оптичного (визначення спектрів поглинання, відбивання) та електрофізичного (вимірювання ВАХ та розрахунок часу життя неосновних носіїв заряду), що є взаємодоповнюючими. Висновки підтверджуються кількома серіями експериментів, а також співставленням із літературними даними. Результати дослідження узгоджені з сучасними уявленнями щодо впливу морфології наноструктурованих кремнієвих поверхонь на їхні оптичні та електричні характеристики.

Дискусійні положення й зауваження щодо змісту та оформлення дисертації

У процесі ознайомлення з дисертацією Скрипника Ігоря Ігоровича було виявлено низку положень, які, на мій погляд, потребують додаткового уточнення або глибшого обґрунтування.

1. У розділі 2 наведено детальний опис технології формування нанотекстурованих поверхонь кремнію методом метал-каталітичного хімічного травлення, проте було б доцільно глибше розкрити механізми впливу параметрів процесу травлення на ступінь кластеризації нанодротів.
2. Висвітлюючи результати TOF-SIMS аналізу, автор зазначає появу певних фрагментів (наприклад, CH_3^+) після модифікації поверхні, однак інтерпретація природи цих фрагментів та їх вплив на функціональні властивості поверхонь потребує уточнення.
3. У третьому розділі робота містить зіставлення експериментальних результатів із теоретичними моделями змочування (Венцеля, Кессі–Бакстера), проте кореляція між морфологією поверхні та режимом змочування описана лише якісно. Було б доцільно подати більш кількісну оцінку цих залежностей.
4. Незважаючи на достатню кількість графіків та зображень, подекуди бракує чітких підписів до осей координат та умов проведення експерименту (наприклад, температура, середовище, експозиція), що ускладнює самостійне трактування окремих графіків без звернення до тексту.
5. Окремі формулювання у висновках (зокрема, щодо «переваг комбінованої структури») мають загальний характер і можуть бути конкретизовані кількісними порівняннями або показниками ефективності.

6. У роботі подекуди зустрічаються орфографічні описки та стилістичні неточності, зокрема, "випадковаих" замість "випадкових", "дсоілдити" замість "дослідити", ст. 89. "порівнянн" замість "порівняння", ст. 107. "врховувати" замість "враховувати" та інше.

Зауважені недоліки не є принциповими і не знижують загального рівня наукової роботи.

Загальний висновок про відповідність роботи встановленим вимогам

Дисертація Скрипника Ігоря Ігоровича «Модифікація поверхні кремнієвої підкладки з використанням нанотекстурованих шарів для підвищення ефективності фотоелектричних перетворювачів» за актуальністю, науковою новизною, повнотою вирішення поставлених завдань, обґрунтованістю отриманих результатів, ступенем їх апробації та оформленням відповідає вимогам, визначеним:

- Порядком присудження ступеня доктора філософії, затвердженим Постановою Кабінету Міністрів України від 12 січня 2022 року № 44 (із змінами згідно з Постановою КМУ № 507 від 03.05.2024 року);
- Вимогами до оформлення дисертацій, затвердженими наказом МОН України від 12.01.2017 р. № 40.

Робота є завершеним самостійним науковим дослідженням, у якому автором розв'язано важливе науково-технічне завдання, пов'язане з удосконаленням структури поверхні кремнієвих підкладок з метою підвищення ефективності фотоелектричних перетворювачів шляхом застосування нанотекстурованих шарів, сформованих методами метал-каталітичного хімічного травлення, а також комбінованих підходів до структурування та пасивації.

На підставі викладеного вважаю, що Скрипник Ігор Ігорович заслуговує на присудження наукового ступеня доктора філософії за спеціальністю 153 «Мікро- та наносистемна техніка».

Офіційний опонент,
доктор технічних наук, старший науковий співробітник,
професор кафедри комп'ютерної інженерії та електроніки
Прикарпатського національного університету
імені Василя Стефаника Богдан ДЗУНДЗА

ПІДПИС Дзундзи Б.
ЗАСВІДЧУЮ
Начальник відділу кадрів
Орест СИЛЮК
«31» 07 2025

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ * Прикарпатський національний університет імені Василя Стефаника * і.к. 02125266