

ВІДГУК

офіційного опонента,
доктора технічних наук, професора,
завідувача кафедри процесів та апаратів харчової інженерії
Львівського національного університету ветеринарної медицини та
біотехнологій імені С.З. Гжицького

ЦІЖА Богдана Романовича

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 дисертації

Зменшення оптичних втрат і покращення поглинання світла у кремнієвих структурах є одними з основних завдань під час розроблення сучасних фоточутливих елементів. Незважаючи на широке використання мікротекстурованих поверхонь, зокрема пірамідальних, у промислових фотоелементах, їх ефективність обмежена в короткохвильовому діапазоні спектра. Тому розробка нових способів текстурування поверхні кремнію з покращеними антивідбивними властивостями залишається актуальним напрямом досліджень.

Одним із перспективних підходів є використання нанотекstur, зокрема кремнієвих нанодротів, які можуть значно зменшити середній коефіцієнт відбивання у широкому спектральному діапазоні. Формування таких структур методом метал-каталітичного хімічного травлення дозволяє отримувати високорівневу впорядкованість, керовану морфологію та регульовану глибину проникнення. Це робить їх особливо привабливими для застосування у високоефективних сонячних елементах, фотодетекторах, а також у сенсорних пристроях і системах.

Крім текстурування, важливою проблемою залишається пасивація поверхні, оскільки збільшення площі поверхні внаслідок наноструктуризації супроводжується збільшенням рекомбінаційних втрат. Застосування хімічної гідрогенізації чи покриття полімером дозволяє зменшити поверхневу швидкість рекомбінації і покращити електричні характеристики елементів.

Таким чином, тематика дослідження поданої дисертації, що охоплює формування нанотекстурованих структур на поверхні кремнію, їх морфологічну оптимізацію та подальшу пасивацію, відповідає сучасним науковим та прикладним викликам у сфері твердотільної електроніки, зокрема фотоелектричних і сенсорних пристроїв.

Наукова новизна одержаних результатів

У дисертаційній роботі запропоновано та реалізовано підходи до формування нанотекстурованих шарів на кремнієвих підкладках, що дозволяють

знизити оптичні втрати, оптимізувати морфологічні параметри та зменшити поверхневу рекомбінацію у фоточутливих структурах.

До нових результатів, які одержано в межах виконаного дослідження, належить:

- встановлено вплив геометричних параметрів кремнієвих нанодротів (довжини, діаметра, щільності розміщення) на антивідбивні властивості та змочуваність поверхні;
- обґрунтовано ефективність застосування комбінованої нанотекстуризації на основі мікропірамід і нанодротин кремнію для покращення поглинання в широкому спектральному діапазоні;
- вперше проведено порівняння ступеня гідрофобності різних наноструктур (нанодроти, пористий кремній, мікропірамід), що сформовані методом метал-каталітичного хімічного травлення;
- проаналізовано вплив різних типів пасивації на параметри поверхневої рекомбінації;
- запропоновано технологічну послідовність виготовлення фоточутливих структур із використанням нанотекстурованих шарів та твердопланарного джерела легування;
- отримано аналітичні залежності, які дозволяють оцінити ефективність структур з різним ступенем кластеризації нанодротів на основі моделей Венцеля та Кессі–Бакстера.

Практичне значення одержаних результатів

Одержані у дисертаційній роботі результати мають прикладний характер та можуть бути використані під час розробки фоточутливих структур із покращеними параметрами. Зокрема:

- запропонована технологія комбінованої текстури кремнієвої підкладки (мікропірамід+нанодроти) може бути впроваджена для зниження оптичних втрат у сонячних елементах і фотодетекторах;
- виявлений вплив морфології нанодротин Si на змочуваність поверхні дозволяє цілеспрямовано регулювати гідрофобність, що є корисним для створення антизабруднювальних або самоочисних покриттів;
- результати порівняльного аналізу методів пасивації поверхні можуть бути застосовані при виборі способів зниження поверхневої рекомбінації у мікро- та оптоелектронних структурах;
- реалізований підхід до формування *p-n*-переходів із використанням твердопланарних джерел легування дозволяє спростити процес створення фоточутливих елементів без складних високотемпературних етапів;
- рекомендації з моделювання та оцінки ефективності текстурованих структур можуть бути застосовані для оптимізації технологічних маршрутів у лабораторних і дослідно-промислових умовах.

Запропоновані технологічні рішення можуть бути використані у виробничих умовах для створення експериментальних партій фотоелементів, фотодетекторів або сенсорів на основі наноструктурованого кремнію з метою подальшого впровадження у галузі альтернативної енергетики та мікросистемної електроніки.

Структура та зміст дисертації, її завершеність та відповідність встановленим вимогам

Дисертація Скрипника Ігоря Ігоровича є кваліфікаційною науковою працею на правах рукопису і складається з анотації, вступу, чотирьох розділів, висновків та списку використаних джерел. Загальний обсяг роботи складає 123 сторінки друкарського тексту, містить 44 рисунки, 5 таблиць та список використаних джерел із 104 найменувань.

У **вступі** дисертації обґрунтовано актуальність теми, сформульовано мету і завдання дослідження, визначено об'єкт і предмет, окреслено наукову новизну, практичне значення, методи дослідження, а також структуру роботи. Наведено інформацію про публікації за темою дисертації та апробацію результатів.

У **першому розділі** наведено аналіз літературних джерел щодо методів наноструктурування кремнію, зокрема формування мікро- та наноструктур (пірамід, нанодротів, пористих шарів), досліджено вплив морфології на оптичні та електричні властивості, а також проаналізовано сучасні підходи до моделювання елементів фотоелектричних перетворювачів на їх основі.

Другий розділ присвячено опису технології виготовлення кремнієвих фоточутливих структур із використанням методів анізотропного лужного травлення, метал-каталітичного хімічного травлення, дифузійного легування з твердопланарного джерела та пасивації полідиметилсилоксаном (ПДМС). Наведено послідовність операцій, умови процесів, морфологічні параметри отриманих наноструктур, а також результати їх СЕМ-аналізу та вимірювань контактного кута змочування.

У **третьому розділі** представлено результати морфологічного, оптичного та гідрофобного аналізу зразків з різними структурами поверхні. Досліджено вплив довжини, діаметра та кластеризації кремнієвих нанодротів на відбивальну здатність, змочуваність та час життя неосновних носіїв заряду. Проведено порівняння пасивацій за допомогою ПДМС, а також воднем, проаналізовано ефективність структури «мікропіраміди + нанодроти».

У **четвертому розділі** виконано моделювання електричних характеристик фоточутливих структур з урахуванням морфології, типу легування, глибини пасивації та рекомбінаційних втрат. Оцінено вплив типу наноструктурування на значення напруги неробочого ходу, струму короткого замикання, коефіцієнта заповнення та ККД. Наведено порівняння ВАХ для гладких, пірамідальних, пористих та наноструктурованих поверхонь.

У **висновках** узагальнено основні результати дисертаційної роботи відповідно до поставлених завдань.

Повнота викладення матеріалу дисертації у наукових публікаціях

Основні результати досліджень представлено й обговорено на наступних міжнародних наукових конференціях: 16th International Conference on Advanced Trends in Radioelectronics, Telecommunications and Computer Engineering (Lviv-Slavske, Ukraine, February 22–26, 2022); International research and practice conference “Nanotechnology and nanomaterials” (Lviv, Ukraine, August 25–27, 2022); International research and practice conference “Nanotechnology and nanomaterials” (Bukovel, Ukraine, 16–19 August 2023); International research and practice conference “Nanotechnology and nanomaterials” (Uzhhorod, 21–24 of August 2024).

Основні результати дисертації опубліковано у 7 друкованих працях, з них: 3 наукові статті у періодичних виданнях (2 статті у фахових виданнях України, 1 стаття у виданні, що індексується у НМБД Scopus, квартиль Q3), 4 публікації в матеріалах міжнародних конференцій (1 публікація у виданні, що індексується у НМБД Scopus).

Відсутність порушень академічної доброчесності

Робота є результатом самостійного наукового дослідження. Основні положення, висновки та пропозиції, які становлять наукову новизну, сформульовані автором на основі власних теоретичних узагальнень та експериментальних результатів. У дисертації не виявлено фактів академічної недоброчесності. Усі використані джерела та дані інших авторів наведено з відповідними посиланнями та коректним цитуванням.

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

Обґрунтованість і достовірність наукових положень, висновків та рекомендацій, сформульованих у дисертаційній роботі Скрипника Ігоря Ігоровича, підтверджується коректним застосуванням сучасних методів експериментального дослідження та відповідною інтерпретацією отриманих результатів. У роботі наведено порівняльний аналіз морфології, оптичних властивостей і змочуваності різних типів нанотекстурованих кремнієвих поверхонь. Отримані дані узгоджуються між собою та логічно підтримують сформульовані висновки.

Дискусійні положення й зауваження щодо змісту та оформлення дисертації

Попри високий рівень виконання дисертації, низка положень роботи може викликати наукову дискусію або потребує додаткових уточнень:

1. У розділі 2 наведено опис технології формування наноструктур, однак варто було б детальніше обґрунтувати вибір конкретних параметрів травлення та методів пасивації, а також вказати їхній вплив на стабільність властивостей отриманих структур.
2. У підрозділі, присвяченому змочуваності структур у вигляді нанодротин, бажано чіткіше пояснити вибір моделі Венцеля або Кессі-Бакстера для інтерпретації результатів – деякі припущення залишаються не повністю розкритими.
3. При описі методів TOF-SIMS-аналізу було б доцільно вказати похибки або межі чутливості методу щодо виявлення домішок та залишкових речовин.
4. Частина рисунків (наприклад, СЕМ-зображення) потребує уточнень у підписах, зокрема щодо масштабів або умов знімання.
5. У деяких розділах спостерігаються незначні стилістичні повторення, які не впливають на зміст, але можуть бути усунені для підвищення загальної академічної виразності тексту.

Зазначені зауваження не знижують загального позитивного враження від роботи і мають рекомендаційний характер.

Загальний висновок про відповідність роботи встановленим вимогам

Дисертаційна робота Скрипника Ігоря Ігоровича «Модифікація поверхні кремнієвої підкладки з використанням нанотекстурованих шарів для підвищення ефективності фотоелектричних перетворювачів» за своєю актуальністю, науковою новизною, змістовним наповненням, ступенем обґрунтованості положень і висновків, а також рівнем апробації та наукових публікацій повністю відповідає вимогам «Порядку присудження ступеня доктора філософії та скасування рішення разової спеціалізованої вченої ради закладу вищої освіти, наукової установи про присудження ступеня доктора філософії», затвердженого постановою Кабінету Міністрів України від 12 січня 2022 року №44 (із змінами, внесеними постановою КМ №507 від 03.05.2024 року), а також «Вимогам до оформлення дисертацій», затвердженим наказом Міністерства освіти і науки України від 12.01.2017 р. №40. Автор роботи Скрипник Ігор Ігорович заслуговує на присудження наукового ступеня доктора філософії у галузі знань 15 «Автоматизація та приладобудування» за спеціальністю 153 «Мікро- та наносистемна техніка».

Офіційний опонент:

доктор технічних наук, професор
завідувач кафедри процесів та апаратів
харчової інженерії Львівського
національного університету
ветеринарної медицини та біотехнологій
імені С.З. Гжицького,

Підпис д.т.н., проф. Ціжа Б.Р. **засвідчую:**
Проректор з науки
Львівського національного університету
ветеринарної медицини та біотехнологій
імені С.З. Гжицького, к.с.-г.н., доцент


Богдан ЦІЖ


Олег ФЕДЕЦЬ