

РЕЦЕНЗІЯ

професора кафедри напівпровідникової електроніки
Національного університету «Львівська політехніка»,

доктора технічних наук, професора

БУРОГО Олега Анатолійовича

на дисертацію

СКРИПНИКА Ігоря Ігоровича

**«Модифікація поверхні кремнієвої підкладки з використанням
нанотекстурованих шарів для підвищення ефективності
фотоелектричних перетворювачів»,**

подану на здобуття наукового ступеня доктора філософії в галузі знань

15 «Автоматизація та приладобудування» за спеціальністю

153 «Мікро- та наносистемна техніка»

Актуальність теми дисертації

Підвищення ефективності фотоелектричних перетворювачів (ФЕП) на основі кремнію є одним з основних пріоритетів у розвитку відновлюваної енергетики та сучасної мікро- і наносистемної техніки. Попри значний прогрес у комерціалізації кремнієвих сонячних елементів, суттєвими залишаються проблеми, пов'язані з оптичними втратами, зумовленими відбиванням світла на межі повітря–напівпровідник, а також з поверхневою рекомбінацією носіїв заряду, що значно обмежує кінцевий коефіцієнт корисної дії (ККД) пристроїв. Одним із ефективних напрямів вирішення цих проблем є впровадження методів нанотекстурування поверхні з метою створення антирефлексних структур. Особливий інтерес становить формування ієрархічних поверхонь типу «мікропіраміди+кремнієві нанодроти», які поєднують переваги макро- та нанорельєфу, забезпечуючи глибоке поглинання світла у широкому спектрі довжин хвиль без використання складних багат шарових покриттів. Водночас подібні нанотекстури створюють додаткові поверхневі стани, що можуть інтенсифікувати рекомбінаційні процеси. Для зменшення відповідних втрат перспективними є методи пасивації, зокрема полімерними та діелектричними плівками, здатними суттєво знизити щільність поверхневих дефектів.

Дисертаційна робота Скрипника Ігоря Ігоровича спрямована на вивчення та оптимізацію процесів формування нанотекстурованих поверхонь на основі кремнієвих підкладок шляхом застосування метал-каталітичного хімічного травлення. Важливою складовою дослідження є аналіз впливу морфологічних параметрів нанодротів (довжини, діаметра, ступеня впорядкування) на оптичні властивості, змочуваність та електрофізичні характеристики отриманих структур. У роботі також розглянуто важливе прикладне питання

– підвищення ефективності фоточутливих структур на основі нанотекстурованого кремнію за рахунок подальшої пасивації та легування.

Таким чином, тематика дисертації є актуальною як у контексті фундаментальних досліджень фізичних властивостей наноструктурованих поверхонь, так і з погляду розробки високоефективних технологій для сонячної енергетики та сенсорних застосувань.

Ступінь обґрунтованості та достовірності наукових положень і висновків

Наукові положення, сформульовані у дисертації, мають належний рівень обґрунтованості та логічної узгодженості. Їх достовірність забезпечується системним поєднанням експериментальних досліджень морфологічних, оптичних та електрофізичних властивостей нанотекстурованих структур кремнію з аналізом даних, отриманих за допомогою сучасних методів – сканувальної електронної мікроскопії (SEM), вторинної іонної мас-спектроскопії, контактного змочування, вимірювання характеристик фоточутливості тощо.

У роботі чітко простежується зв'язок між параметрами процесу метал-каталітичного хімічного травлення і морфологією отриманих наноструктур, а також продемонстровано, як ці параметри впливають на оптичні характеристики зразків (зменшення відбивання, підвищення поглинання), змочуваність поверхні та електричні показники сформованих структур. Коректність отриманих висновків підтверджується багаторазовим повторенням експериментів та внутрішньою узгодженістю результатів між різними типами зразків (гладкі, пірамідальні, нанодротяні та комбіновані поверхні).

Додаткову вагу достовірності результатів надає застосування якісної обробки експериментальних даних та порівняння з актуальними літературними джерелами, що дозволило авторів критично оцінити власні результати у ширшому науковому контексті.

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 Скрипника Ігоря Ігоровича удосконалено підхід до формування ієрархічних нанотекстурованих структур типу «мікропіраміди+кремнієві нанодрооти» на монокристалічних кремнієвих підкладках. На основі комплексного експериментального дослідження вперше встановлено зв'язок між морфологічними параметрами кремнієвих нанодротів (довжина, діаметр, щільність розміщення) та показниками шорсткості поверхні, що мають істотний вплив на оптичні характеристики структур. Вперше для такого типу текстур проведено порівняльний аналіз ефективності різних варіантів пасивації поверхні із застосуванням полімерного шару на основі полідиметилсилоксану, що дало змогу зменшити втрати, пов'язані з поверхневою рекомбінацією, без ускладнення технологічного процесу. Оптимізовано параметри процесу метал-каталітичного хімічного травлення для створення структур із заданими геометричними характеристиками нанодротів як на площинах, так і на бокових гранях мікропірамід, що дозволяє забезпечити відтворюваність результатів і високу просторову однорідність текстурованої поверхні. Проведено систематичне порівняння оптичних та фотоелектричних характеристик різних типів нанотекстурованих поверхонь кремнію (пористий шар, мікропіраміди, нанодрооти, комбіновані структури), що дозволило обґрунтувати доцільність використання саме ієрархічних структур у складі фотоелектричних перетворювачів.

Практичне значення одержаних результатів

Практичне значення одержаних результатів полягає у можливості їх застосування для розроблення високоефективних кремнієвих фотоелектричних перетворювачів із зниженими оптичними втратами. У межах дисертаційної роботи запропоновано технологічні підходи до відтворюваного формування кремнієвих нанодротів як на плоских монокристалічних підкладках, так і на текстурованих поверхнях з мікропірамідами методом метал-каталітичного хімічного травлення.

Отримані результати дають змогу здійснювати прогнозування оптичних і електричних характеристик структур на основі кремнію з урахуванням морфологічних параметрів поверхні. Це створює науково-технічні передумови для впровадження розроблених методик нанотекстурування у виробництво фотоелектричних перетворювачів, а також в оптоелектронні

сенсорні системи, вимірювальні прилади й інші пристрої, для яких критичним є зниження відбивання та ефективна пасивація поверхні.

Відповідність теми дисертації профілю спеціальності, відсутність порушень академічної доброчесності

Представлена дисертація повністю відповідає профілю спеціальності 153 «Мікро- та наносистемна техніка». Тематика дослідження охоплює актуальні аспекти розробки та вдосконалення мікро- і нанотекстурованих структур для застосування у фотоелектричних перетворювачах, що безпосередньо корелює з основними напрямками спеціальності, зокрема технологією мікро- та наноструктурування, фоточутливими елементами та сенсорною електронікою.

Методи, використані в дисертації, є характерними для сучасних досліджень у галузі мікро- та наносистемної техніки: метал-каталітичне хімічне травлення, дифузійне легування, пасивація поверхні, аналіз морфологічних та оптичних характеристик, вимірювання електричних параметрів. Це підтверджує відповідність як змісту, так і підходів до дослідження обраній науковій спеціальності.

Порушень академічної доброчесності в роботі не виявлено. Дисертаційне дослідження є самостійною науковою працею автора. Усі положення, висновки, а також експериментальні дані викладено у відповідності до вимог академічної етики. Результати інших авторів належним чином процитовано відповідно до наукових стандартів, що підтверджується оформленням списку використаних джерел.

Дискусійні положення й зауваження щодо змісту та оформлення дисертації

Попри високий рівень виконання роботи, варто відзначити окремі зауваження, які мають переважно уточнюючий або технічний характер:

1. У дисертації доцільно було б детальніше розкрити механізм метал-каталітичного хімічного травлення кремнієвих підкладок, особливо з урахуванням впливу типу каталізатора, концентрацій реагентів та часу обробки на морфологію наноструктур.
2. В окремих експериментальних серіях використовувався перекис водню (H_2O_2) як окисник. Було б корисно ширше обґрунтувати вплив активного кисню на фізико-хімічні властивості поверхні та на оптоелектронні характеристики фоточутливих структур.
3. У тексті роботи подекуди трапляються незначні граматичні та стилістичні неточності, що, втім, не впливають на розуміння основного змісту.

4. Частина ілюстративного матеріалу (рисунок, графіки) потребує кращої візуалізації – зокрема, збільшення шрифтів підписів, осей та умовних позначень для полегшення сприйняття наведених результатів.

Зазначені зауваження не знижують наукової цінності виконаної роботи.

Висновок про відповідність дисертації вимогам, які пред’являються до наукового ступеня доктора філософії

Дисертація Скрипника Ігоря Ігоровича «Модифікація поверхні кремнієвої підкладки з використанням нанотекстурованих шарів для підвищення ефективності фотоелектричних перетворювачів», представлена на здобуття наукового ступеня доктора філософії за спеціальністю 153 «Мікро- та наносистемна техніка», є актуальним та завершеним науковим дослідженням, в якому матеріал викладено послідовно, логічно і в доступній формі. Робота повністю відповідає вимогам наказу МОН України №40 від 12.01.17р. «Про затвердження вимог до оформлення дисертації» та постанови КМ від 12 січня 2022 р. №44 «Порядку присудження ступеня доктора філософії та скасування рішення разової спеціалізованої вченої ради закладу вищої освіти, наукової установи про присудження доктора філософії» з останніми змінами, внесеними постановою КМ №341 від 21.03.2022 р., а її автор, Скрипник Ігор Ігорович, може бути рекомендований для присудження йому наукового ступеня доктора філософії за спеціальністю 153 «Мікро- та наносистемна техніка».

Рецензент
професор кафедри напівпровідникової електроніки
Національного університету
«Львівська Політехніка»,
д.т.н., проф.

Олег БУРИЙ