

DOI: 10.20535/1970.71(1).2026.361869

УДК 621.382

ФУНКЦІОНАЛІЗАЦІЯ ПОВЕРХНІ НАНОДРОТІВ ЗА ДОПОМОГОЮ НАНОМАТЕРІАЛІВ НА ОСНОВІ ВУГЛЕЦЮ ДЛЯ ФОТОВОЛЬТАЇКИ*Хомякова Д. В., Коваль В. М., Ліневич Я. О., Душейко М. Г.**Національний технічний університет України**«Київський політехнічний інститут ім. Ігоря Сікорського», Київ, Україна**E-mail: khomiakova.d.v.-dp51mn@edu.kpi.ua*

Попри розвиток фотовольтаїки, традиційні кремнієві сонячні елементи мають обмежену ефективність і схильні до деградації під час тривалої експлуатації, що зумовлює потребу в нових підходах до модифікації їхніх властивостей. Перспективним рішенням є використання масивів кремнієвих нанониток із розвиненою поверхнею для покращеного поглинання світла. Водночас така структура характеризується високою концентрацією поверхневих дефектів, які спричиняють рекомбінаційні втрати носіїв заряду та знижують ефективність пристроїв. У роботі виготовлено сонячні елементи на основі масиву кремнієвих нанониток із хімічно функціоналізованою поверхнею. Масив нанониток формували методом метало-стимульованого хімічного травлення кремнієвих підкладок із подальшою модифікацією поверхні шляхом кислотного або лужного травлення. Формування р-п переходу здійснювали методом термічної дифузії фосфору, тоді як фронтальні та тильні контакти створювали вакуумним осадженням металевих шарів. Функціоналізацію поверхні проводили шляхом нанесення вуглецевих наноматеріалів – фулерену, графену та вуглецевих нанотрубок – із використанням методів крапання та занурення з відповідних розчинів. Морфологію та елементний склад отриманих структур досліджували за допомогою сканувальної електронної мікроскопії у поєднанні з енергодисперсійним аналізом. Електричні та фотоелектричні характеристики визначали на основі темнових і навантажувальних вольт-амперних характеристик. Проведено порівняльний аналіз впливу типу попередньої хімічної обробки та способу нанесення вуглецевих наноматеріалів на властивості структур. Показано, що вибір умов хімічної обробки поверхні та тип вуглецевого модифікатора істотно впливають на бар'єрні характеристики р-п переходу, рівень поверхневої рекомбінації та фотоелектричні параметри сонячних елементів. Отримані результати дозволяють визначити технологічні чинники, що забезпечують зниження рекомбінаційних втрат і підвищення ефективності кремнієвих сонячних елементів на основі масивів нанониток.

Ключові слова: сонячний елемент, кремнієві нанонитки, вуглецеві наноматеріали, фулерен, графен, вуглецеві нанотрубки.

Вступ. Постановка проблеми

Сонячна енергетика на сучасному етапі розвитку є одним із ключових напрямів переходу до відновлюваних джерел енергії, що зумовлено зростанням глобального енергоспоживання, необхідністю зменшення негативного впливу на довкілля та прагненням до енергетичної незалежності.

Розглянемо класифікацію сонячних елементів першого, другого та третього покоління (рис. 1). До сонячних елементів першого покоління належать монокристалічні та полікристалічні кремнієві фотоелектричні перетворювачі, які характеризуються добре відпрацьованою технологією виготовлення та домінують у промисловому виробництві. Водночас ефективність і вартість фотоелектричних перетворювачів (ФЕП) залишаються визначальними проблемами фотовольтаїки, оскільки традиційні кремнієві сонячні елементи наближаються до теоретичних меж коефіцієнта корисної дії. Основними недоліками елементів першого покоління є фундаментальні

термодинамічні та спектральні втрати, а також оптичні та електричні втрати, які сумарно обмежують ККД приблизно на 70 %, що стимулює розвиток альтернативних підходів, спрямованих на зменшення втрат і підвищення ефективності фотоелектричного перетворення. Подальша еволюція фотовольтаїчних технологій призвела до формування другого та третього покоління сонячних елементів, які базуються на тонкоплівкових і наноструктурованих матеріалах [1, 2, 3].

До сонячних елементів другого покоління відносять аморфні кремнієві, CdTe та CIGS фотоелектричні елементи. Їхніми основними перевагами є менша витрата матеріалів і нижча вартість порівняно з елементами першого покоління. Основними недоліками є нижча ефективність, деградація параметрів з часом, технологічна складність виробництва та екологічні обмеження для окремих матеріалів. Сонячні елементи третього покоління включають квантово-розмірні, полімерні, сенсоризовані барвниками, гібридні перовскітні та гібридні структури на основі вуглецевих

наноматеріалів. Їхньою основною перевагою є потенційна можливість значного підвищення коефіцієнта корисної дії та суттєвого зниження вартості фотоелектричного перетворення.

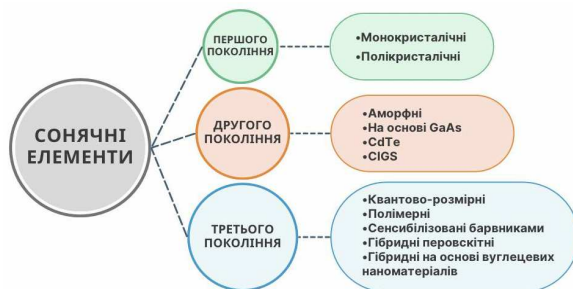


Рис. 1. Класифікація сонячних елементів

Водночас ці фотоелектричні перетворювачі характеризуються відсутністю масового комерційного впровадження, недостатньою експлуатаційною стабільністю та значним впливом структурних і поверхневих дефектів, що обмежує їх практичне застосування та зумовлює необхідність подальших досліджень і вдосконалення [1, 4].

Аналіз досліджень та рекомендацій

Для зменшення недоліків фотоелектричних перетворювачів третього покоління, зокрема для покращення електричних параметрів ФЕП на основі кремнієвих нанониток, широко застосовують пасивацію та функціоналізацію їх поверхні додатковими шарами. Одним із найбільш перспективних напрямів є використання вуглецевих наноматеріалів, зокрема фулеренів, графену та вуглецевих нанотрубок.

Фулерени являють собою алотропні модифікації вуглецю з замкненою молекулярною геометрією, найвідомішою з яких є молекула C_{60} . Просторова будова фулеренів і система спряжених зв'язків забезпечують їм високу хімічну стабільність та здатність до приймання електронів, що зумовлено делокалізацією π -електронів. Завдяки цьому фулерени легко вступають у реакції функціоналізації, а введення полярних груп дозволяє цілеспрямовано змінювати їх електронні та поверхневі властивості. Сукупність цих характеристик робить фулерени ефективними модифікаторами поверхні напівпровідникових матеріалів у фотоелектричних системах [5-6].

Графен є двовимірним матеріалом з атомів вуглецю, що поєднує високу прозорість із надзвичайно низьким електричним опором. Завдяки високій рухливості носіїв заряду він ефективно використовується як прозорий провідний шар у сонячних елементах, покращуючи збір фотогенерованих носіїв і підвищуючи коефіцієнт корисної дії. Додаткове поєднання графену з антивідбивальними структурами дозволяє зменшити оптичні втрати та збільшити фотострум [7-9].

Вуглецеві нанотрубки є циліндричними наноструктурами, які можуть мати одно- або багатостінкову будову. Поєднання високої електропровідності, механічної міцності та оптичної прозорості робить їх перспективною альтернативою традиційним прозорим електродам. У сонячних елементах нанотрубки застосовують як провідні шари або як складову гетеропереходів із кремнієм, що дозволяє знизити послідовний опір, підвищити фотострум і покращити ефективність перетворення енергії [10, 11].

Метою роботи є дослідження впливу способу нанесення та типу вуглецевих наноматеріалів на електричні й фотоелектричні характеристики сонячних елементів на основі масиву кремнієвих нанониток з урахуванням їх структурних і поверхневих особливостей.

Викладення основного матеріалу

Для дослідження розподілу вуглецевого модифікатора на поверхні масиву кремнієвих нанониток (SiNWs) використано сканувальний електронний мікроскоп VEGA3 TESCAN у поєднанні з енергодисперсійним аналізом (EDS). Цей підхід дозволяє одночасно отримати високоякісні зображення рельєфу поверхні та визначити елементний склад матеріалу. На рис. 2, а, представлено вигляд зверху на масив SiNWs, де світло-сіра пляма над масивом ймовірно відповідає краплі вуглецевого модифікатора, що утворилася при нанесенні. Рис. 2, б, демонструє тривимірну структуру масиву, дозволяючи оцінити його топографію та взаємне розташування окремих елементів поверхні.

Кольорові EDS-знімки ілюструють розподіл хімічних елементів на поверхні масиву за різного збільшення (рис. 3). Зелений колір на знімках відповідає розподілу вуглецю, червоний – кремнію, синій – кисню. За малого збільшення видно майже рівномірний розподіл вуглецевого матеріалу по поверхні масиву, що свідчить про ефективне покриття та стабільну адгезію модифікатора до основи. За великого збільшення світло-сіра пляма чітко виділяється як згусток вуглецевого модифікатора на фоні кремнієвої основи з невеликою кількістю кисню, що свідчить про локальне накопичення модифікатора.

Структура досліджуваного сонячного елемента, наведена на рис. 4, а, передбачає багатошарову архітектуру з фронтальним контактом Ti/Ni, призначеним для ефективного збору фотогенерованих електронів. Під контактним шаром розташований масив кремнієвих нанониток n-типу провідності (n-SiNWs), який забезпечує збільшену площу взаємодії з падаючим світлом та покращене розділення носіїв заряду.

Поверхня нанониток додатково модифікована вуглецевими наноматеріалами – графеном, фулеренами або вуглецевими нанотрубками.

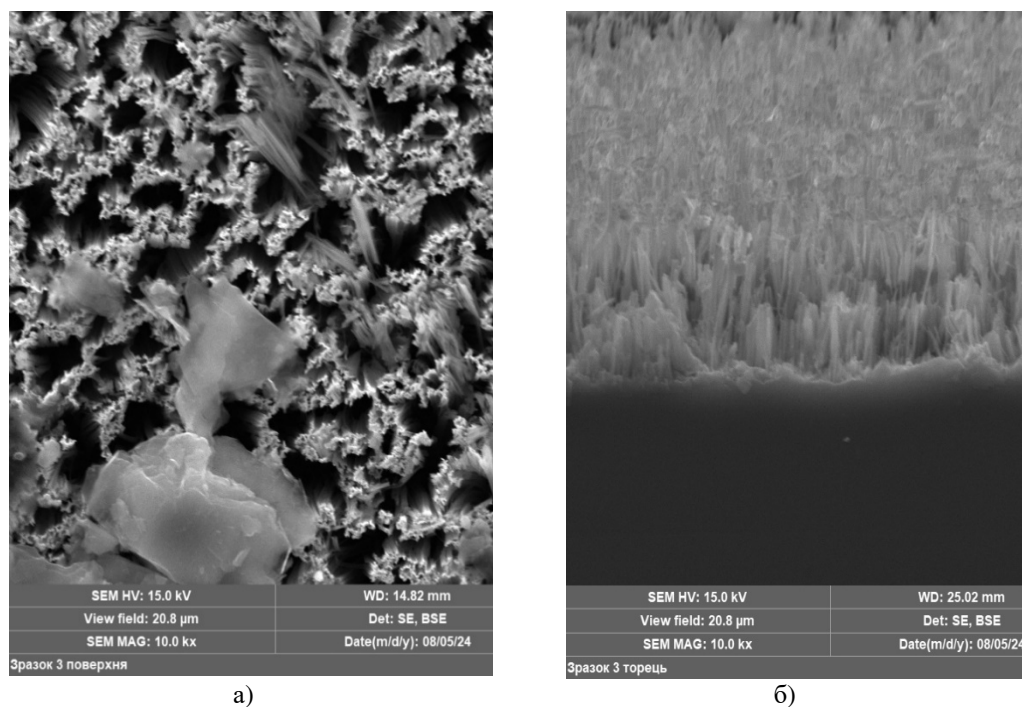


Рис. 2. СЕМ знімки поверхневої морфології модифікованого масиву SiNWs: вигляд зверху (а) та поперечний переріз (б)

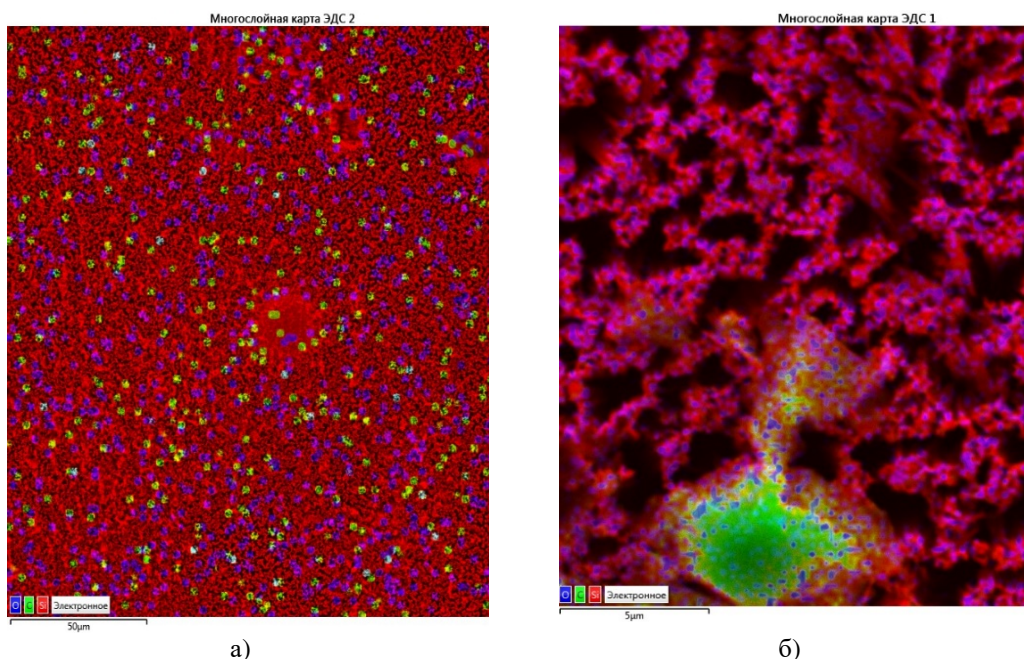


Рис. 3. Розподіл хімічних елементів по поверхні модифікованого масиву SiNWs, отриманого методом енергодисперсійного аналізу за різного збільшення: $\times 1000$ (а) та $\times 10\,000$ (б)

Основою структури слугує підкладка з кремнію р-типу (p-Si), тоді як на її тильному боці сформовано суцільний алюмінієвий контакт, що забезпечує відведення дірок. Запропонована конструкція визначає послідовність технологічних операцій формування фотоелектричного перетворювача, основні етапи яких наведені на схемі рис. 4, б.

Початковою стадією було хімічне очищення

кремнієвих підкладок із питомим опором 1 Ом·см. Видалення органічних і механічних домішок проводили у лужному перекисному розчині $\text{NH}_4\text{OH}/\text{H}_2\text{O}_2/\text{H}_2\text{O}$ при підвищеній температурі з подальшим промиванням у деіонізованій воді. Металеві забруднення усували кислотною сумішшю $\text{HCl}/\text{H}_2\text{O}_2/\text{H}_2\text{O}$, а завершальним кроком очищення було короточасне травлення у розбавленому HF для зняття природного оксидного шару.

Другим етапом була структурна модифікація поверхні методом метало-стимульованого хімічного травлення, в результаті чого на поверхні кремнієвої пластини формувалася масив кремнієвих нанониток. Розпочинався цей процес осадженням срібних наночастинок із розчину $\text{HF-H}_2\text{O}_2\text{-AgNO}_3$. Срібло виконувало каталізаторну функцію, забезпечуючи локальне окиснення кремнію з подальшим розчиненням оксиду у HF . Після завершення

травлення залишкові наночастинок срібла видаляли обробкою в концентрованій HNO_3 . Для додаткового формування морфології масиву кремнієвих нанониток застосовували кислотне або лужне травлення, що відповідно приводило до появи пор між нанонитками (кислотне травлення) або до зміни форми нанониток з утворенням загострених і пірамідальних вершин (лужне травлення). Деталі реалізації методу наведено у роботі [12].

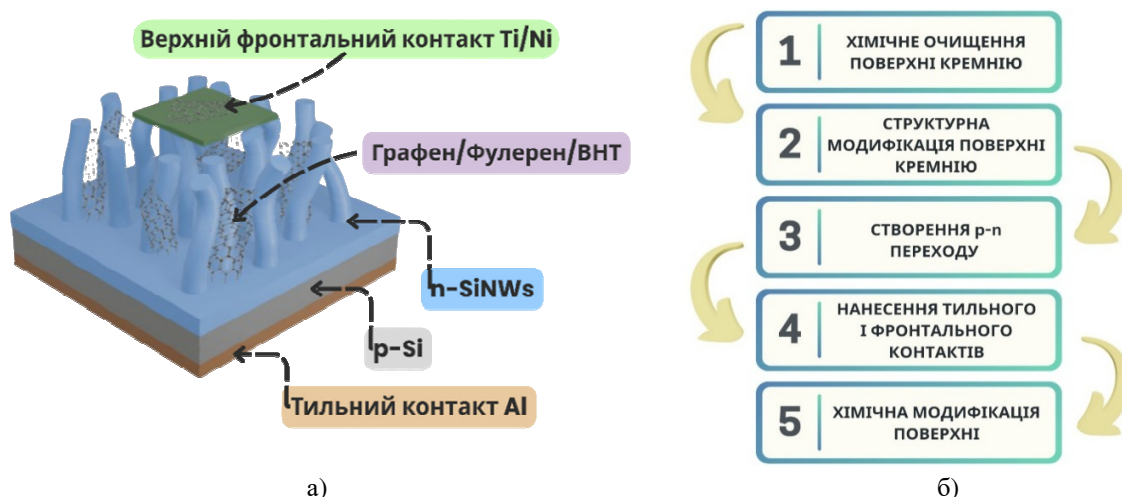


Рис. 4. Структура сонячного елемента (а) на основі кремнієвих нанониток із вуглецевою модифікацією поверхні та схема технологічних етапів його виготовлення (б)

Наступним етапом було формування $p\text{-}n$ переходу шляхом термічної дифузії фосфору. Процес включав короткочасне введення домішки з подальшим температурним «розгоном», у результаті чого формувалася тонкий n -шар із поверхневим опором близько $50 \text{ Ом}/\square$.

Формування контактів здійснювали шляхом осадження суцільного алюмінієвого шару на тильну сторону підкладки методом ВЧ-магнетронного розпилення з наступним термічним відпалом. Фронтальні контакти Ti/Ni створювали електронно-променевим випаровуванням із послідовним осадженням титану та нікелю до загальної товщини близько $0,5 \text{ мкм}$.

Завершальною стадією було хімічне модифікування поверхні кремнієвих нанониток із використанням фулеренів C_{60} , вуглецевих нанотрубок і графену. Осадження вуглецевих наноматеріалів здійснювали методом крапання або занурення зразків у відповідні розчини вуглецевих наноматеріалів, після чого проводили термічну сушку для стабілізації гібридної поверхні. Методика приготування розчинів і нанесення модифікаторів детально описана у роботі [13].

Електричні характеристики модифікованого масиву кремнієвих нанониток визначали на основі вимірювань вольт-амперних характеристик із використанням цифрового мультиметра MASTECH MS8040, програмованого джерела живлення NAMEG HM8143 та темного екрану для усунен-

ня впливу зовнішнього освітлення, що забезпечувало стабільність і відтворюваність експериментальних умов. Усі досліджені фотоелектричні перетворювачі демонстрували типу для діодів ВАХ із чітко вираженими випрямляючими властивостями (рис. 5), що підтверджує наявність сформованого $p\text{-}n$ -переходу в масиві КНН та коректність технології їх виготовлення. Коефіцієнт випрямлення визначали при напрузі $1,5 \text{ В}$ як відношення струму прямого зміщення до струму зворотного зміщення. Розраховані значення знаходилися в межах від 4 до 2991 (табл. 1), що свідчить про суттєвий вплив умов модифікації на електричні параметри структур.

Величина випрямлення суттєво залежить як від природи модифікатора, так і від способу його нанесення. Це проявляється у зміні співвідношення прямих і зворотних струмів та, відповідно, у варіюванні бар'єрних властивостей $p\text{-}n$ -переходу після поверхневої обробки. Після кислотного травлення найкращі випрямляючі властивості має масив без нанесення наноматеріалів ($K_{\text{випр}} = 2475$), що свідчить про формування достатньо якісного бар'єру вже на етапі структурної модифікації. Покриття фулеренами дещо зменшувало коефіцієнт випрямлення, застосування вуглецевих нанотрубок призводило до більш відчутного погіршення параметрів, тоді як графен демонстрував найгірший вплив, що може бути пов'язано з формуванням додаткових провідних шляхів і зменшенням

висоти потенціального бар'єру. У випадку лужного травлення ситуація дещо відрізнялась: найкращий коефіцієнт випрямлення отримано для лужно-модифікованого масиву з нанесеними фулеренами

(2991), що вказує на їх більш сприятливу електричну сумісність із такою поверхнею. Водночас графен та вуглецеві нанотрубки знову забезпечили найнижчі значення випрямлення.

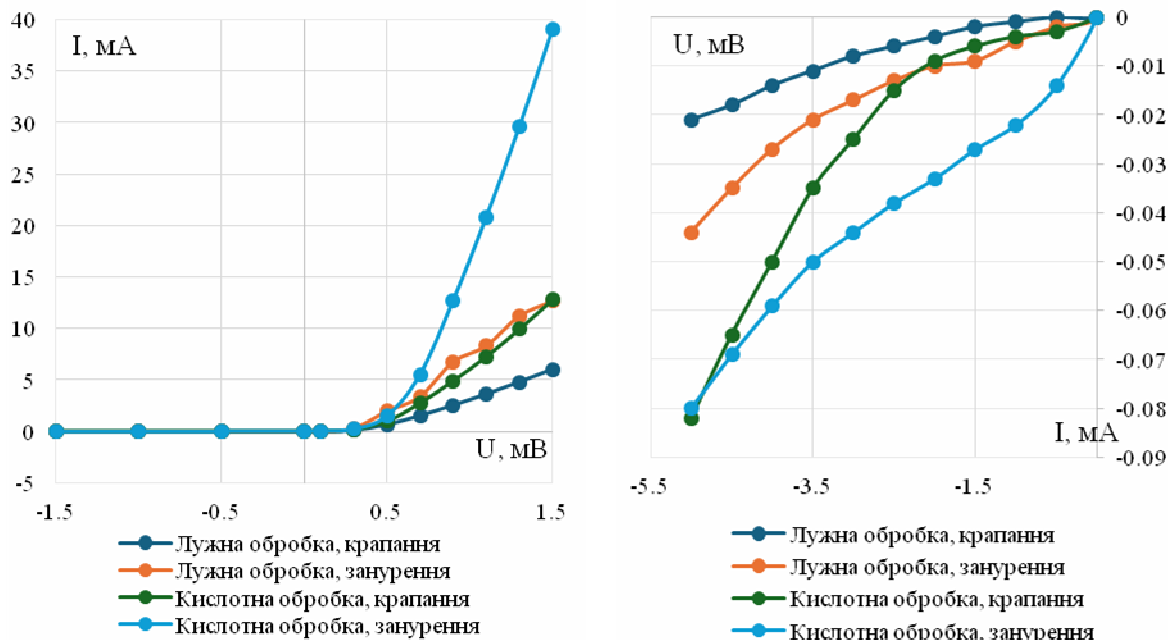


Рис. 5. Темнові ВАХ сонячних елементів, функціоналізованих фулереном: а) пряма гілка ВАХ; б) зворотна гілка ВАХ

Порівняння методів нанесення показало, що метод крапання забезпечує кращі випрямляючі властивості порівняно із методом занурення (табл. 1). Це можна пояснити більш глибоким проникненням модифікатора та можливим частковим шунтуванням переходу при тривалому контакті з розчином. При цьому найкращі випрямляючі властивості спостерігаються для структур з

лужно-модифікованою поверхнею з фулеренами, нанесеними методом крапання (коефіцієнт випрямлення становить 2991). Отже, як тип попередньої хімічної обробки, так і природа та технологія нанесення модифікатора, визначають бар'єрні властивості та ефективність випрямлення масиву КНН.

Таблиця 1. Вплив структурної та хімічної модифікації на фотоелектричні параметри ФЕП

Тип модифікації	$K_{\text{випр}}$	V_{oc} , мВ	J_{sc} , мА/см ²
Метод крапання			
Кислотна модифікація	2475	339	5,4
Кислотна модифікація / фулерен	2133	371	8,5
Кислотна модифікація / графен	1163	298	6,8
Кислотна модифікація / ВНТ	1768	297	6,8
Лужна модифікація	2558	357	6,2
Лужна модифікація / фулерен	2991	336	10,1
Лужна модифікація / графен	426	340	4,8
Лужна модифікація / ВНТ	1348	310	5,8
Метод занурення			
Кислотна модифікація / фулерен	1446	351	7,1
Лужна модифікація / фулерен	181	321	7,9
Лужна модифікація / ВНТ	870	234	4,3

Фотоелектричні властивості модифікованого масиву кремнієвих нанониток оцінювали за навантажувальними вольт-амперними характеристиками та визначеними на їх основі параметрами – напругою розімкнутого кола (V_{oc}) і густиною струму короткого замикання (J_{sc}) (рис. 6). Вимірювання проводили з використанням мультиметрів MASTECH MS8040 і DNIPRO-M SM600, магазину

опорів P33 та лампи BRILUX B-7, що імітує сонячне випромінювання спектра AM1,5. Для запобігання тепловому впливу під час освітлення застосовували водоохолоджуваний столик. Густина струму короткого замикання розраховували як відношення струму короткого замикання до фотоактивної площі. Отримані експериментальні та розрахункові дані наведені в табл. 1.

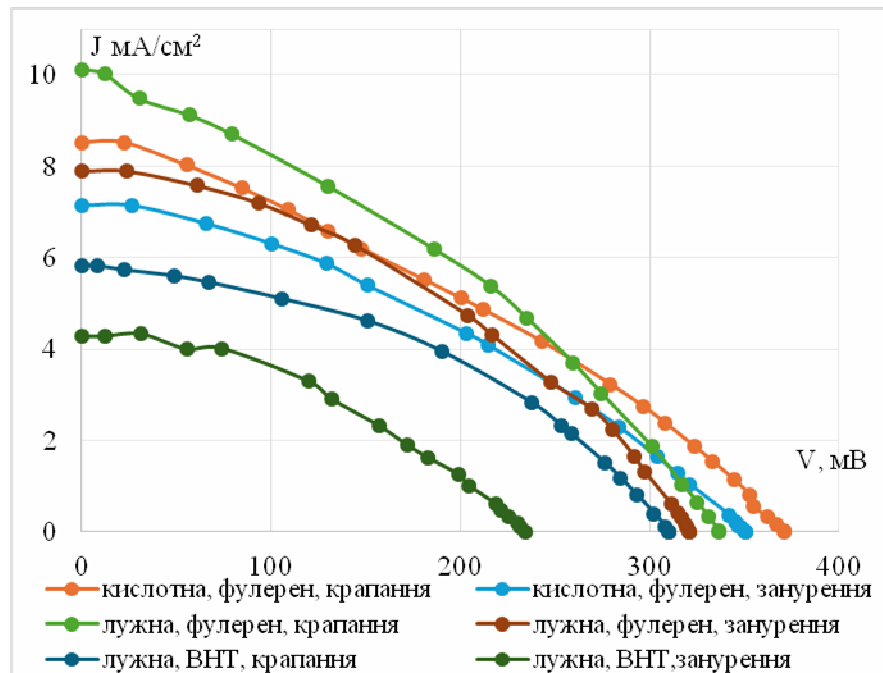


Рис. 6. Вплив природи та методу нанесення хімічного модифікатора на навантажувальні ВАХ ФЕП зі структурно-модифікованою поверхнею

Аналіз впливу хімічної модифікації показав, що для кислотно-травленої поверхні нанесення графену та вуглецевих нанотрубок призводило до зменшення фотоЕРС порівняно з немодифікованим зразком, тоді як фулерени забезпечували підвищення V_{oc} і демонстрували найкращий результат у цій серії (371 мВ). Для лужно-модифікованої поверхні нанесення будь-яких вуглецевих наноматеріалів спричиняло зниження фотоЕРС незалежно від їх природи. Щодо густини струму короткого замикання всі наноматеріали покращували J_{sc} порівняно з базовим зразком, а найбільші значення отримано при нанесенні фулеренів (8,5 та 10,1 мА/см² для кислотно- та лужно-модифікованої поверхні відповідно). Такий вплив вуглецевих матеріалів пов'язаний з тим, що вони виступають ефективними колекторами фотогенерованих носіїв заряду. При цьому фулерени є найбільш ефективними акцепторами електронів. Порівняння методів нанесення засвідчило, що метод крапання переважає метод занурення з точки зору обох фотоелектричних параметрів (табл.1). Це може бути зумовлено глибшим проникненням модифікатора та ймовірним частковим шунтуванням переходу внаслідок тривалого контакту з розчином в методи

занурення. Таким чином, як тип хімічної модифікації, так і спосіб нанесення наноматеріалу суттєво впливають на величину фотоелектричних параметрів масиву КНН.

Висновки

У роботі досліджено вплив хімічної функціоналізації поверхні масиву кремнієвих нанониток вуглецевими наноматеріалами на електричні та фотоелектричні характеристики сонячних елементів. Показано, що попередня кислотна або лужна обробка істотно змінює морфологію поверхні та визначає подальшу електронну сумісність із нанесеними модифікаторами. За результатами СЕМ та EDS-аналізу підтверджено формування покриття вуглецевого матеріалу на поверхні нанониток і його достатню адгезію до кремнієвої основи. Встановлено, що бар'єрні властивості р-п-переходу та фотоелектричні характеристики структур суттєво залежать як від природи вуглецевого наноматеріалу, так і від способу його нанесення. Показано, що метод крапання забезпечує кращі випрямляючі характеристики порівняно з методом занурення, що пов'язано з меншим ризиком проникнення модифікатора в міжнитковий простір і

часткового шунтування переходу.

Найкращі електричні та фотоелектричні параметри отримано для структур із лужно-модифікованою поверхнею масиву кремнієвих нанониток при нанесенні фулеренів методом крапання. Для такого режиму спостерігається максимальний коефіцієнт випрямлення близько 2991, густина струму короткого замикання 10,1 мА/см² та напруга розімкнутого кола 336 мВ. Отримані результати свідчать, що поєднання лужної структурної модифікації поверхні з нанесенням фулеренів методом крапання забезпечує найбільш сприятливі бар'єрні та фотоелектричні характеристики досліджених структур. Це підтверджує ефективність хімічної функціоналізації поверхні кремнієвих нанониток вуглецевими наноматеріалами як інструменту керування електричними та фотоелектричними параметрами фотоелектричних перетворювачів на їх основі.

Література

- [1] M. Aghaei, S. Damanafshan, M. Abyari, M. Imamzai, M. H. Pourdadash, Y. H. M. Thayoob, "An Overview of Solar Cells Materials Classification", *Proceedings of the 2nd National Graduate Conference (NatGrad 2013)*, 2014, pp. 1–5.
- [2] F. Saeed, A. Zohaib, "Quantification of Losses in a Photovoltaic System: A Review", *Engineering Proceedings*, vol. 11, no. 1, p. 35, 2021. DOI: 10.3390/ASEC2021-11200.
- [3] S. W. Glunz, R. Preu, D. Biro, «Crystalline Silicon Solar Cells: State-of-the-Art and Future Developments», in *Comprehensive Renewable Energy*, Elsevier, 2012, pp. 353–387. DOI: 10.1016/B978-0-08-087872-0.00117-7.
- [4] M. K. Sahoo, P. Kale, "Integration of silicon nanowires in solar cell structure for efficiency enhancement: A review", *Journal of Materiomics*, vol. 5, no. 1, pp. 34–48, 2019. DOI: 10.1016/j.jmat.2018.11.007.
- [5] O. A. Ekpete and K. J. Orié, "Fullerenes: Synthesis and Application", *FNAS-JSI*, vol. 4, no. 1, pp. 221–236, Mar. 2023.
- [6] A. Jebnoui et al., "Exploring the structural and electronic properties of fullerenes for advanced photodetectors, diodes, and solar cell applications", *Journal of Industrial and Engineering Chemistry*, 2025. DOI: 10.1016/j.jiec.2025.02.022.
- [7] X. Kong et al., "Graphene/Si Schottky solar cells: a review of recent advances and prospects", *RSC Advances*, vol. 9, no. 2, pp. 863–877, 2019. DOI: 10.1039/c8ra08035f.
- [8] A. Altuntepe, A. Seyhan, R. Zan, "Graphene for Si-based solar cells", *Journal of Molecular Structure*, vol. 1200, p. 127055, 2020. DOI: 10.1016/j.molstruc.2019.127055.
- [9] Y. Lin et al., "Graphene/semiconductor heterojunction solar cells with modulated antireflection and graphene work function", *Energy & Environmental Science*, vol. 6, no. 1, pp. 108–115, 2013. DOI: 10.1039/c2ee23538b.
- [10] I. Jeon, Y. Matsuo, S. Maruyama, "Single-Walled Carbon Nanotubes in Solar Cells", *Topics in Current Chemistry*, vol. 376, no. 1, 2018. DOI: 10.1007/s41061-017-0181-0.
- [11] X. Huang et al., "Performance enhancement of carbon nanotube/silicon solar cell by solution processable MoO₃", *Applied Surface Science*, vol. 542, p. 148682, 2021. DOI: 10.1016/j.apsusc.2020.148682.
- [12] Y. Linevych, V. Koval, M. Dusheiko, M. Lakyda, "Application of silicon nanowires in sensors of temperature, light and humidity", *Materials Science in Semiconductor Processing*, vol. 184, article no. 108773, 2024. DOI: 10.1016/j.mssp.2024.108773.
- [13] Y. Linevych, V. Koval, M. Dusheiko, M. Lakyda, N. Kavratska, V. Barbash, P. Teselko, "Carbon surface modification of silicon nanowires for sensing application", *Sensors and Actuators A: Physical*, vol. 3891, article no. 116534, 2025. DOI: 10.1016/j.sna.2025.116534.

UDC 621.382

D. Khomiakova, V. Koval, Y. Linevych, M. Dusheiko

National Technical University of Ukraine "Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute", Kyiv, Ukraine

SURFACE FUNCTIONALIZATION OF NANOWIRES USING CARBON-BASED NANOMATERIALS FOR PHOTOVOLTAICS

Despite the development of photovoltaics, traditional silicon solar cells have limited efficiency and are prone to degradation during long-term operation, which necessitates new approaches to modifying their properties. A promising solution is the use of arrays of silicon nanowires with a developed surface for improved light absorption. At the same time, such a structure is characterized by a high concentration of surface defects, which cause recombination losses of charge carriers and reduce the efficiency of devices. In this work, solar cells based on an array of silicon nanowires with a chemically functionalized surface were fabricated. The nanowire array was formed by the method of metal-assisted chemical etching of silicon substrates followed by surface modification via acid or alkaline etching. The formation of the p-n junction was carried out by the method of thermal diffusion of phosphorus, while the front and rear contacts were created by vacuum deposition of metal layers. Surface functionalization was performed by applying carbon nanomaterials – fullerene, graphene, and carbon nanotubes – using drop-casting and immersion methods from

corresponding solutions. The morphology and elemental composition of the obtained structures were studied using scanning electron microscopy in combination with energy-dispersive analysis. Electrical and photoelectric characteristics were determined based on dark and load current-voltage characteristics. A comparative analysis of the influence of the type of preliminary chemical treatment and the method of applying carbon nanomaterials on the properties of the structures was carried out. It is shown that the choice of surface chemical treatment conditions and the type of carbon modifier significantly affect the barrier characteristics of the p-n junction, the level of surface recombination, and the photoelectric parameters of the solar cells. The obtained results make it possible to determine the technological factors that ensure the reduction of recombination losses and the increase in the efficiency of silicon solar cells based on nanowire arrays.

Keywords: solar cell, silicon nanowires, carbon nanomaterials, fullerene, graphene, carbon nanotubes.

*Надійшла до редакції
3 квітня 2026 року*

*Рецензовано
20 квітня 2026 року*



© 2026 Copyright for this paper by its authors.
Use permitted under Creative Commons License Attribution 4.0 International (CC BY 4.0).