

Представлено схему багаторівневої декомпозиції задач забезпечення екологічної безпеки шляхом використання інноваційних технологій для сонячної енергетики. Показано, що підвищення ККД фотоелектричних перетворювачів енергії стає можливим за рахунок використання наноструктурованих напівпровідників. Для отримання наноструктур використовували метод електрохімічного травлення

Ключові слова: наноструктуровані напівпровідники, фотоелектричні перетворювачі енергії, екологічна безпека, електрохімічне травлення, багаторівнева декомпозиція, пористі шари

Представлена схема многоуровневой декомпозиции задач обеспечения экологической безопасности путем использования инновационных технологий для солнечной энергетики. Показано, что повышение КПД фотоэлектрических преобразователей энергии становится возможным за счет использования наноструктурированных полупроводников. Для получения наноструктур использовали метод электрохимического травления

Ключевые слова: наноструктурированные полупроводники, фотоэлектрические преобразователи энергии, экологическая безопасность, электрохимическое травление, многоуровневая декомпозиция, пористые слои

УДК 621.315.592

DOI: 10.15587/1729-4061.2016.85848

ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ ЕКОЛОГІЧНОЇ БЕЗПЕКИ ШЛЯХОМ ВИКОРИСТАННЯ ПОРИСТИХ НАПІВПРОВІДНИКІВ ДЛЯ СОНЯЧНОЇ ЕНЕРГЕТИКИ

Я. О. Сичікова

Кандидат фізико-математичних наук, доцент
Кафедра професійної освіти
Бердянський державний
педагогічний університет
вул. Шмідта, 4, м. Бердянськ, Україна, 71100
E-mail: yanasuchikova@mail.ru

1. Вступ

Аналіз сучасного стану екологічної ситуації України демонструє тенденцію к погіршенню. Стрімкі темпи сучасного технологічного розвитку обумовили значне збільшення споживання енергетичних ресурсів. Енергетика є базисом для розвитку всіх галузей промисловості. У той самий час, енергетичний сектор є одним із головних джерел несприятливого впливу на навколишнє середовище, зокрема гідро-, атмо- та літосфери. Близько половини об'ємів техногенних викидів парникових газів та шкідливих речовин здійснюється сектором традиційної енергетики.

З іншого боку, Україна забезпечує свої потреби в енергетиці лише на 70 %, тобто являється енергозалежною державою. З точки зору ресурсного забезпечення вирішальне значення мають достатність і надійність забезпечення електрикою і теплом зростаючих потреб господарства і населення, з погляду якості життя – екологічна чистота виробництва енергії. Аспекти енергетики виступають в якості ключової глобальної проблеми сучасності, від характеру вирішення яких прямо залежать не тільки побудова глобальної економіки і стратегій розвитку держави, а й подолання екологічної кризи. Звідси випливає актуальність пошуку альтернативних способів забезпечення людства енергією.

Найбільш перспективним методом нетрадиційної енергетики виступає фотоелектричний метод перетворення сонячної енергії завдяки наявним перевагам:

– пряме перетворення енергії світлових квантів в електричну;

– різноманіття елементарної бази для створення сонячних елементів;

– можливість створення модульних систем різної потужності;

– можливість використання концентрованого сонячного випромінювання;

– безшумність;

– простота експлуатації;

– екологічність тощо.

Серед недоліків використання енергії сонця найчастіше виділяють наступні: висока собівартість сонячних панелей, вироблення електроенергії тільки протягом світлового дня, залежність від кліматичних умов, потреба у великих площах для встановлення фотоелектричних станцій, проблеми з акумулюванням енергії; недосконалість технології та невеликий ККД тощо.

Саме недосконалість технології створення фотоелектричних перетворювачів (ФЕП) та їх низький коефіцієнт корисної дії (ККД) є основним стримуючим фактором глобальної заміни традиційної енергетики на відновлювальну. Тобто існує потреба у розробці інноваційних технологій, що здатні підвищити ККД та інші електрофізичні характеристики сонячних панелей.

При сучасному рівні виробництва на виготовлення кремнієвих сонячних елементів загальною потужністю 100 ГВт необхідно не менше 1 млн. тонн кремнію високого ступеня чистоти [1]. Щоб досягти очікуваної потужності сонячної фотоенергетики 2030 року [2], необхідно вже зараз мати щорічне виробництво чистого кремнію не менш як 20 тис. тон, що представляє не тільки складну технологічну і фінансову, а й екологічну проблему, тому що отримання чистого кремнію здійс-

нюється екологічно шкідливим виробництвом. Іншим недоліком традиційних кремнієвих сонячних батареї є відносно мала енергетична ефективність – в середньому їх ККД становить близько 11 % [1]. Використання наноструктур дозволило в значній мірі поліпшити характеристики фотоелектричних перетворювачів.

Актуальність дослідження зумовлена необхідністю вирішення екологічних та ресурсних проблем і полягає у розробці методів забезпечення екологічної безпеки шляхом використання наноструктур для сонячної енергетики.

2. Аналіз літературних даних і постановка проблеми

В роботі [3] пропонується спосіб текстурування кремнію для підвищення ефективності перетворення сонячної енергії. Автори роботи пропонують використовувати в якості фронтальної поверхні сонячного елемента кремній мультипористої текстури. Метод «гібридної» технології на основі розвиненої кратеро- і колонообразної морфології кремнієвої поверхні дозволяє змінювати тип і розмірність мультипористої текстури в широкому діапазоні. Як хімічна, так і електрохімічна технологія, не вимагає термостабілізації, так як пористий кремній формується при кімнатній температурі.

В роботі [4] розглянута можливість застосування дво- і тришарових антивідбиваючих (ARC) покриттів на основі пористого кремнію для кремнієвих фотовольтаїчних перетворювачів за допомогою наближення оптичних матриць. На основі цього методу були розраховані спектри відображення антивідбиваючих покриттів MgF_2/ZnS , SiO_2/TiO_2 і MgF_2/CeO_2 , що зазвичай застосовуються в фотовольтаїчних перетворювачах, і результати розрахунків були порівняні з відповідним експериментальними даними. Показано, що розраховані методом наближення оптичних матриць спектри відображення і експериментальні дані збігаються. Вищезазначені багатошарові антивідбиваючі покриття призводять до поліпшення характеристик кремнієвих сонячних елементів, але вони володіють наступними недоліками: фторид магнію і сульфід цинку – відносно м'які матеріали і мають малу стійкість до агресивного середовища, з часом приводить до деградації параметрів сонячних елементів. На відміну від стандартних ARC з SiO_2/TiO_2 та інших матеріалів, що застосовуються в кремнієвих фотовольтаїчних перетворювачах, при використанні пористого кремнію вдається не тільки зберегти мале відображення у видимій та інфрачервоній областях спектру, але і розширити його в короткохвильову (УФ) область (до 400 нм).

У роботі [5] було сформовано текстуровані пірамідальні шари кремнію методом електрохімічного травлення. Авторами показано, що чим більша висота пірамідальних кластерів, тим більш низька відбивна здатність спостерігається в діапазоні коротких довжин хвиль. Доцільність використання пористого кремнію у якості матеріалу для сонячних елементів обґрунтовано дослідниками у роботі [6]. Збільшення пористості кристалів призводить до синього зсуву і зростання піків фотолюмінесценції [7].

Пористий кремній знаходить своє широке застосування для оптоелектронних пристроїв завдяки властивості антивідблиску. Цей матеріал має свої пере-

ваги, такі як: розширення забороненої зони, широкий спектр поглинання і високий діапазон оптичної передачі від 700–1000 нм. У роботі [8] представлено експериментальне дослідження електрохімічно підготовлених пористих кремнієвих структур. Було виявлено, що зі збільшенням часу травлення збільшується товщина $por-Si$, і показник заломлення зменшується відповідно. Високий ступінь шорсткості поверхні пористого кремнію передбачає можливість його застосування в якості просвітлюючого покриття, фактурна поверхня зменшує відбиття світла. Крім того, розсіювання в $por-Si$ можливе за рахунок шорсткості по відношенню до товщини пористого шару.

Автори роботи [9] отримали сонячні елементи на основі $por-Si$ з ККД 15,5 %. Поруватість зразків досягла значення 91 %, що зумовило синій зсув ФЛ. Підготовлені зразки шарів $por-Si$ з різною пористістю були використані для виготовлення сонячних елементів, використовуючи наступну процедуру. Зразки були покриті фоторезистом. Потім безпосередньо над шарами пористого кремнію була поміщена маска. Зразки піддавали дії УФ-випромінювання протягом 40сек для утворення візерункового покриття. N- і P-тип легування було досягнуто за допомогою способу нанесення покриття шляхом розміщення розчину фосфору і бору в центрі шарів $por-Si$, а потім нанесення покриття центрифугуванням при кімнатній температурі зі швидкістю 1000 обертів на хвилину протягом 10 сек. Потім шари поруватого кремнію помістили в піч при температурі 100 °C протягом 15 хв для видалення вологи.

Як бачимо, вченими світу інтенсивно досліджуються методи створення фотоелектричних перетворювачів на основі наноструктурованого кремнію. Крім того, наноструктури на основі напівпровідників групи АЗВ5 [10, 11] та А2В6 [12] все частіше розглядаються у якості матеріалів для сонячних елементів. Однак досі ще не існує єдиного механізму отримання наноструктурованих шарів напівпровідників із заданими властивостями. Недостатньо дослідженими являються аспекти кореляції параметрів пористих шарів та умов їх одержання. Крім того, недостатньо розглянуто питання забезпечення екологічної безпеки (ЕБ) шляхом впровадження нанотехнологій у галузь альтернативної енергетики.

3. Мета і задачі дослідження

Метою даного дослідження є пошук методів забезпечення екологічної безпеки шляхом використання наноструктурованих напівпровідників у якості елементарної бази для фотоелектричних перетворювачів енергії.

Для досягнення поставленої мети було виділено ряд задач:

- розробити схему задач забезпечення екологічної безпеки для сонячної енергетики;
- встановити види негативного впливу традиційної енергетики на екологічний стан навколишнього середовища, порівняти фактори впливу на навколишнє середовище традиційного та нетрадиційного секторів енергетики;
- дослідити основні закономірності формування пористого шару на поверхні напівпровідників групи АЗВ5 та кремнію;

- виділити основні технологічні етапи виробництва сонячних панелей на основі наноструктурованих напівпровідників;
- встановити та запропонувати методи підвищення ККД фотоелектричних перетворювачів енергії на основі наноструктурованих матеріалів.

4. Матеріали та методи дослідження забезпечення екологічної безпеки шляхом використання наноматеріалів для сонячної енергетики

Для вирішення складних технологічних, технічних, екологічних, економічних та інших проблем широко застосовують системний аналіз. Такий науковий підхід дозволяє раціонально формулювати та вирішувати складні проблеми, що характеризуються здатністю до структуривання та виділення окремих задач з урахуванням наявних ресурсів. Тож приймемо системний підхід у якості методологічної основи досягнення поставленої мети забезпечення екологічної безпеки.

Екологічну безпеку слід розглядати як динамічний процес, що розвивається і вдосконалюється у взаємозв'язку з науковими дослідженнями, конструкторсько-технологічною та організаційно-технічною підготовкою до управління цього процесу. Для формалізації рішення поставлених задач використано принцип багаторівневої декомпозиції. Цей принцип характеризується розвитком процесу на ієрархічні рівні функціонально завершених етапів рішення комплексу локальних задач даного рівня.

Розробка технологічних етапів виробництва сонячних панелей ґрунтувалась на принципі «від частково до загального». У даному випадку увага приділяється не лише технічній стороні цього процесу, а й науковим засадам отримання та впровадження інноваційних технологій, насамперед отримання матеріалів для фотоелектричних перетворювачів енергії.

Для отримання та дослідження можливості використання наноматеріалів для ФЕП було використано набори пластин напівпровідників кремнію (Si), арсеніду галію (GaAs), фосфіду індію (InP), фосфіду галію (GaP). Пластини проходили попередню очистку, полірування. У якості методу отримання наноструктур на поверхні напівпровідників застосовано метод фотоелектрохімічного травлення в розчинах кислот. З метою стабілізації властивостей отриманих структур використовували пасивацію аміаком. Морфологію досліджували за допомогою растрового електронного мікроскопу.

5. Результати дослідження шляхів забезпечення екологічної безпеки на основі використання наноструктурованих напівпровідників для виготовлення сонячних елементів

5.1. Системний підхід до задач забезпечення екологічної безпеки на основі використання наноструктур для виготовлення сонячних елементів

Стосовно до моделі забезпечення екологічної безпеки ієрархічна побудова її структури і встановлення структурних зв'язків між компонентами означають наступну підпорядкованість її технологічних компонентів: неможливо розробити та виготовити технологічне

оснащення або встановити номенклатуру необхідного обладнання, не розробив попередньо технологічні процеси управління екологічною безпекою [13].

Ієрархічні рівні етапів рішення комплексу задач управління екологічною безпекою, що використовує інноваційні технології для сонячної енергетики наведено у рис. 1. Для побудови схеми багаторівневої декомпозиції було використано дослідження функцій складових системи управління екологічною безпекою як невід'ємної частини роботи зі створення методологічних основ для побудови такої системи [14].

При такій побудові ієрархічної структури системи управління екологічною безпекою дотримано основні принципи багаторівневої декомпозиції:

- наявність вертикальних та горизонтальних зв'язків між рівнями та етапами;
- пріоритетність дій рівнів та етапів зверху донизу;
- взаємозв'язок рівнів, варіантність вибору та рішення задач кожного рівня.

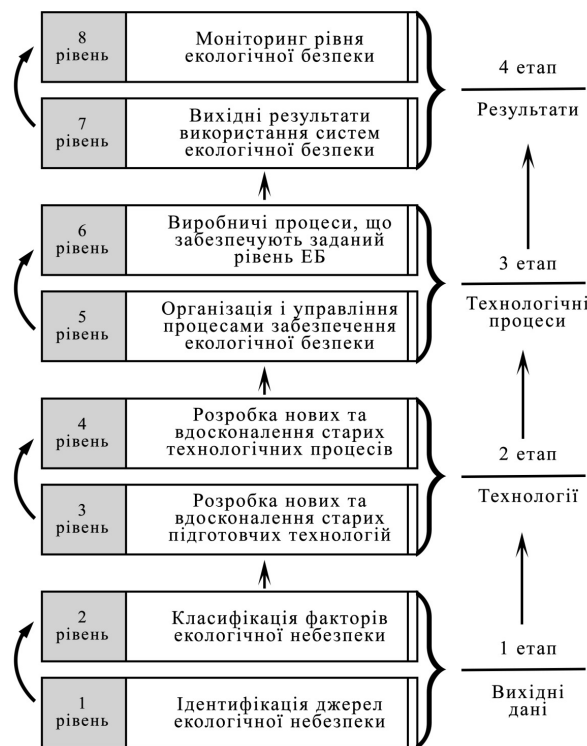


Рис. 1. Схема багаторівневої декомпозиції задач забезпечення екологічної безпеки шляхом використання інноваційних технологій для сонячної енергетики

Таким чином, узагальнена схема забезпечення екологічної безпеки складається з чотирьох етапів, кожен з яких містить по два рівні. Перший етап включає в себе ідентифікацію джерел та класифікацію факторів екологічної небезпеки. На цьому етапі необхідним є дослідження впливу сектору енергетики на навколишнє середовище.

Задачею другого етапу є розробка технологій та технологічних процесів, що здатні покращити стан екологічної безпеки. При цьому підготовчими технологіями слід розуміти методи обробки напівпровідникових пластин, що будуть застосовані для ФЕП.

Третій етап постає у організації та виконанні технологічних процесів, що забезпечують заданий рівень екологічної безпеки. Технологічні процеси включають в себе етапи виробництва сонячних панелей на основі наноструктурованих напівпровідників.

На четвертому етапі необхідно оцінити ефективність запропонованих технологій шляхом дослідження основних фізичних параметрів отриманих наноструктур та дослідити шляхи підвищення ККД фотоелектричних перетворювачів енергії.

5. 2. Ідентифікація джерел та класифікація факторів екологічної небезпеки традиційного та нетрадиційного секторів енергетики

Вважається, що відновлювальні джерела енергії – це реальні шляхи захисту від змін клімату без створення нових загроз для населення та наступних поколінь. Порівняння основних форм впливу традиційної та альтернативної енергетики на навколишнє середовище наведено у табл. 1.

Узгодити постійне зростання енергоспоживання із зростанням негативних наслідків енергетики, враховуючи, що найближчим часом людство відчує обмеженість енергетичних ресурсів, вбачається двома методами: економія енергії або розвиток екологічно чистих видів виробництва енергії, яким являється енергія Сонця.

5. 3. Наноструктуровані напівпровідники як основа для створення фотоелектричних перетворювачів енергії

Традиційно сонячні елементи виготовляються на основі монокристалічного кремнію. Їх ККД, як правило, не перевищує 15–20 %. До того ж такі елементи крихкі, потребують наявності антивідбиваючого покриття, вдосконалення технології тощо.

Подолання ряду проблем стає можливим за умови наноструктурування напівпровідників, а саме формування пористого шару на поверхні пластин [15]. Така технологія здатна значно поліпшити електрофізичні властивості сонячних елементів завдяки багаторазовому збільшенню робочої площі пластини (через присутність величезного числа пор на поверхні). Крім того, очікується значне збільшення ККД сонячних елементів, а також їх інтенсивності поглинання світла, можливість накопичення великих обсягів енергії, більш довгим терміном експлуатації (підвищення часу життя пристрою) тощо.

Як було сказано вище, порувати поверхні формувалися методом фотоелектрохімічного травлення. Використовуючи різні режими обробки, можна контролювати параметри одержуваних структур (табл. 2, рис. 2). Було обрано пластини напівпровідників Si, InP, GaP, GaAs n-типу провідності з орієнтацією поверхні (111). Час травлення для всіх зразків обирався однаковий – 10 хв, щільність струму – 150 мА/см².

Таблиця 1

Вплив різних видів енергетики на навколишнє середовище

1	Вплив	Традиційна енергетика	Сонячна енергетика
2	Ресурси	за рахунок використання невідновлюваних	джерело енергії повністю відновлювальне
3	Гідросфера	теплове забруднення водою, викиди забруднюючих речовин	не впливає на стан гідросфери
4	Атмосфера	тепловий ефект, виділення в атмосферу газів і пилу	екологічно чистий вид енергії
5	Літосфера	забруднення при транспортуванні енергоносіїв та похованні відходів, при виробництві енергії	не забруднює літосферу, однак потребує значної площі для розташування ФЕС
6	Радіоактивність	забруднення радіоактивними та токсичними відходами	не використовуються радіоактивні елементи
7	Температура атмосфери	підвищення температури	існує думка, що використання сонячної енергії здатне сильно підвищити температуру близько поверхні Землі, але ця теорія поки що не підтверджена
8	Гідрологічний режим річок	зміна режиму гідроелектростанціями і як наслідок забруднення на території водотоку.	не впливає
9	Електромагнітні поля	створення електромагнітних полів навколо ліній електропередач	не створюються
10	Техногенні катастрофи	існує ризик (і наявні безліч прикладів) аварій на станціях	цей вид ризику мінімізований. При виході зі строю однієї панелі, інші продовжують роботу без змін

Таблиця 2

Режими одержання наноструктур на поверхні напівпровідників та розміри утворених пор

Напівпровідник	Електроліт	Розмір пор, мкм	Особливості пороутворення
Si (рис. 2, а)	HF: H ₂ O=1:1	0,2–0,4	Циліндричні пори, поверхня вкрита пасивуючим шаром
	HF:H ₂ O:C ₂ H ₅ OH=2:1:1	0,4–0,8	Циліндричні пори, довжина пори досягає 100 мкм
InP (рис. 2, б)	HF: H ₂ O=1:1	0,05–0,1	Щільно упаковані циліндричні пори
	HF:H ₂ O:C ₂ H ₅ OH=2:1:1	0,1–0,4	Щільно упаковані циліндричні пори, спочатку ростуть по кристалографічним напрямкам, потім вирівнюються вздовж лінії струму, довжина пори – до 100 мкм
GaAs (рис. 2, в)	HF: H ₂ O=1:1	0,4–0,8	Нерівномірний поруватий шар з низькою поруватістю (до 20 %), поверхня вкрита шаром окислу
	HF:H ₂ O:C ₂ H ₅ OH=2:1:1	0,6–0,9	Поруватість сягає близько 50 %, довжина пори може досягати 20 мкм
GaP (рис. 2, г)	HF: H ₂ O=1:1	0,4–0,7	Пори мають «кратерну» будову, розташовані по поверхні нерівномірно, довжина пори до 3 мкм
	HF:H ₂ O:C ₂ H ₅ OH=2:1:1	0,5–0,8	Пори мають «кратерну» будову, розташовані по поверхні нерівномірно, довжина пори 10–20 мкм

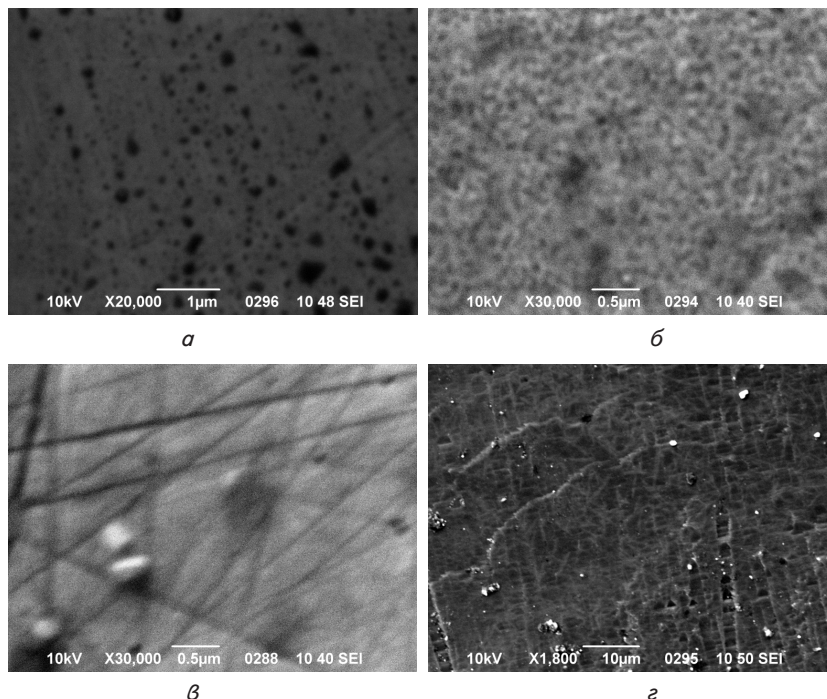


Рис. 2. Морфологія пористих структур на поверхні напівпровідників, отриманих методом електрохімічного травлення при щільності струму 150 mA/cm^2 протягом 10 хв у розчині електроліту HF: $\text{H}_2\text{O}=1:1$: а – por-Si; б – por-InP; в – por-GaAs, г – por-GaP

Отримані структури характеризуються стабільністю хімічних та електрофізичних властивостей. Пористість зразків знаходиться в широкому інтервалі від 20 до 80 %, найбільш типовим є значення 40–60 %. За результатами дослідження можна зробити висновок, що чим менший розмір пор, тим більш впорядковано розташовані пори та більшим є значення поруватості.

Аналізуючи дані табл. 3, можна стверджувати, що додавання в розчин електроліту етанолу призводить до збільшення проникності розчинника в пори. Це зумовлює більш глибоке проростання пор в товщу кристалу та утворення масивних пор.

Неоднорідність пористості і товщини пористих шарів можна пояснити наявністю бульбашок, які формуються в електроліті та приклеюються до поверхні кристалу. Щоб уникнути цієї неоднорідності, концентрація HF повинна бути локально постійною на поверхні оброблюваного зразка. Видалення бульбашок з поверхні пластини, а отже і отримання однорідних шарів пористого шару здійснюється за допомогою перемішування електроліту. Відстань між пластиною і платиновим катодом також впливає на однорідність, в той час як форма платинового катода практично не впливає на однорідність.

Слід відмітити, що вище представлено найбільш загальні закономірності формування пористих шарів на поверхні напівпровідників. Процеси пороутворення різняться для різних кристалів. На сьогодні не існує єдиної моделі формування наноструктур. Однак для усіх випадків можна зробити деякі узагальнення:

– товщина пористого шару корелює з часом травлення кристалу. При цьому існує критичний час, за якого пороутворення припиняється і відбуваються альтернативні процеси (видалення поруватого шару

з поверхні, полірування тощо). Для кожного напівпровідника цей час є індивідуальним показником;

– щільність струму, при якій спостерігаються процеси пороутворення знаходиться у діапазоні від 20 до 200 mA/cm^2 . При меншій щільності струму відбувається лише локальне розтравлювання деформованих областей пластини, при надмірно високому показнику цього параметру спостерігається полірування пластин;

– плавикова кислота не являється єдиним наявним травником для напівпровідників групи АЗВ5 та кремнію. Пори можливо формувати за допомогою соляної, бромистої, азотної та соляної кислот. При цьому морфологія пористих пластин буде значно відрізнятися в залежності від обраного типу травника та його концентрації в електроліті;

– на форму пор та густину пористого шару також сильно впливають параметри самого кристалу – тип провідності, орієнтація поверхні, ступінь легуваності пластин, кількість точкових дефектів та дислокацій тощо.

Варіюючи умови травлення для різних кристалів, можна отримувати значне розмаїття морфології пористих шарів. Основною задачею при цьому виступає можливість контролювати процеси самоорганізації наноструктур з метою формування пористих шарів з заданими властивостями. Більш докладно процеси пороутворення на поверхні напівпровідників розглянуто в роботах [16, 17]. В дослідженнях [18–20] представлено механізми формування наноструктур на інших напівпровідниках. Узагальнюючи отримані експериментальні дані, дістанемо висновок, що під час формування низьковимірних структур відбуваються процеси самоорганізації, однак, змінюючи умови експерименту можливим стає прогнозування морфологічних і, як наслідок, електронно-фізичних властивостей одержаних структур.

5. 4. Розробка технологічних етапів виробництва сонячних панелей

Технологічний маршрут визначає послідовність операцій і склад технологічного обладнання. Від того, як побудований технологічний маршрут, багато в чому залежать якість пристрою і ефективність його виготовлення. Розробка маршруту включає:

- 1) вибір технологічних баз і послідовності виготовлення елементів;
- 2) визначення заготівельних модулів і технологічних переходів;
- 3) розробку послідовності обробки заготовки;
- 4) формування операцій. Наведемо лише основні найважливіші етапи (рис. 3).

Слід відмітити, що на практиці можливі різні варіанти послідовності виготовлення однієї і тієї ж конструкції. Ця багатоваріантність є результатом впливу великого числа факторів: розмір серії, наявність тех-

нологічного обладнання, різноманітність інструменту, зручність установки, організаційні чинники та ін.

Можливості мінімізації відбивної здатності (за рахунок вилову світла в порах), збільшення ширини забороненої зони пористого шару (через квантове утримання зарядів в мікрочастинках) шляхом зміни пористості дозволяють використовувати шари пористого напівпровідника і як антивідбиваюче покриття, і як широкопasmовий світлочутливий шар.

За умови використання наноструктурованих напівпровідників, значно знижується чутливість сонячних батарей до забруднення поверхні. Це відбувається завдяки тонкому пасивуючому шару, що утворюється під час травлення напівпровідника та подальшої обробки зразків аміаком.

До економічних переваг використання пористого кремнію у сонячній енергетиці слід віднести низьку вартість одиниці площі сонячної батареї, що забезпечується вартісними параметрами базової технології виробництва пористого матеріалу.

Наведені вище переваги використання наноструктурованих напівпровідників над монокристалічними роблять їх безсуперечними кандидатами у якості основного матеріалу для ФЕП.

6. Обговорення результатів дослідження забезпечення екологічної безпеки шляхом використання наноструктур для сонячної енергетики

У результаті дослідження було забезпечено всі чотири етапи багаторівневої декомпозиції задач забезпечення екологічної безпеки шляхом використання інноваційних технологій для сонячної енергетики (рис. 1). Так, на перших двох рівнях було проаналізовано основні джерела небезпек, що виникають при використанні традиційних джерел енергії та проведено порівняльний аналіз впливу традиційного та альтернативного секторів енергетики. Третій та четвертий рівень було забезпечено шляхом розробки технології отримання наноструктур та виділення основних закономірностей формування пористих шарів на поверхні напівпровідників. У ході забезпечення п'ятого та шостого рівнів було розроблено технологічні етапи виробництва сонячних панелей на основі наноструктур. Останні два рівні характеризуються дослідженням доцільності використання наноструктур для сонячних елементів як ефективного інструменту забезпечення екологічної безпеки.

Однак, при цьому було некоректним говорити про можливість використання отриманих узагальнюючих

ОСНОВНІ ТЕХНОЛОГІЧНІ ЕТАПИ ВИГОТОВЛЕННЯ СОНЯЧНОЇ ПАНЕЛІ



Рис. 3. Технологічні етапи виробництва сонячних панелей на основі наноструктурованих напівпровідників

5.5. Оцінка доцільності використання наноструктур для фотоелектричних перетворювачів

Формування пористих шарів на поверхні напівпровідників призводить, в першу чергу, до збільшення ефективної площі у тисячі та десятки тисяч разів (в залежності від ступеня пористості). Вочевидь, цей факт призводить до збільшення ККД (від 20 % і вище) сонячних модулів за умови використання наноструктур. Фотолюмінесценція пористих структур демонструє зсув у видиму частину світла. За рахунок цього цільовий діапазон електромагнітного випромінювання розширюється на всю видиму область, включаючи її довгохвильову частину. Високий ступінь шорсткості поверхні пористого шару передбачає можливість його застосування в якості просвітлюючого покриття, так як текстурована поверхня зменшує відбиття світла. Крім того, розсіювання можливо за рахунок шорсткості по відношенню до товщини пористого шару.

результатів для формування єдиної системи управління екологічною безпекою. Для побудови системи управління екологічною безпекою, що використовує інноваційні технології для сонячної енергетики, необхідним є проведення ряду комплексних досліджень, а саме [21]:

– розробка бази вихідних даних для створення СУЕБ;

– подальше вдосконалення технологій отримання матеріалів для фотоелектричних перетворювачів та розробка технологічних регламентів для ФЕП;

– дослідження процесів, що забезпечують управління екологічною безпекою тощо.

Система управління екологічною безпекою шляхом використання інноваційних технологій для сонячної енергетики потребує детального поетапного аналізу всіх складових процесу виготовлення сонячних елементів на основі наноструктурованих пористих матеріалів, що стає підґрунтям для подальших досліджень.

Особливістю представленого дослідження являється системний підхід до вирішення задач забезпечення екологічної безпеки. Цей підхід засновано на виділенні локальних задач та їх поетапного вирішення. Такі дослідження мають міжгалузевий та міждисциплінарний характер та дозволяють комплексно підійти до питання забезпечення екологічної безпеки.

7. Висновки

1. Розроблено схему забезпечення екологічної безпеки шляхом використання інноваційних технологій для сонячної енергетики. Ця схема представляє собою багаторівневу декомпозицію задач, що включає наступні рівні: вихідні дані для створення СУЕБ, вдосконалені технології для забезпечення ЕБ, організація та виконання технологічних процесів, що забезпечують заданий рівень ЕБ та результати використання інноваційних технологій. Розбиття на рівні дає змогу комплексно та раціонально вирішити проблему забез-

печення заданого рівня екологічної безпеки і отримання продукції цільового призначення.

2. Встановлено, що традиційний сектор енергетики приносить значно більше шкоди навколишньому середовищу, ніж альтернативні джерела енергії. Зокрема, призводить до теплового ефекту, викиду пилу та газів, створює електромагнітні поля тощо. Знизити цей вплив можна за рахунок поступової заміни традиційної енергетики на нетрадиційну.

3. Досліджено основні закономірності формування пористого шару на поверхні напівпровідників групи АЗВ5 та кремнію. Для отримання наноструктур доцільно використовувати метод електрохімічного травлення у розчині плавикової кислоти. Для кожного напівпровідника технологічні умови підбираються індивідуально.

4. Представлено узагальнену схему технологічного процесу виготовлення сонячних елементів на основі наноструктурованих напівпровідників. Схема представляє собою трьохступеневу технологію, що включає отримання наноструктур, виготовлення фотоелектричних перетворювачів та безпосереднє виробництво сонячних елементів.

5. Показано, що використання наноструктур для сонячних елементів здатно підвищити їх ККД (від 20 % і вище) за рахунок збільшення ефективної площі приймаючої поверхні. Пасивуючий шар, що утворюється під час травлення напівпровідника забезпечує стабілізацію властивостей та зменшує чутливість до забруднення поверхні.

Подяка

Робота була виконана у межах наукового держбюджетного дослідження «Наноструктуровані напівпровідники для енергоефективних екологічно безпечних технологій, що підвищують рівень енергозбереження та екологічної безпеки урбосистеми» (державний реєстраційний номер 0116U006961).

Література

1. Фреїк, Д. М. Фотоелектричні перетворювачі сонячного випромінювання. Досягнення, сучасний стан і тенденції розвитку (огляд) [Текст] / Д. М. Фреїк, В. М. Чобанюк, М. О. Галушак, О. С. Криницький, Г. Д. Матеїк // Фізика і хімія твердого тіла. – 2012. – Т. 13, № 1. – С. 7–20.
2. World map of the PV Industry [Text] // Sun & Wind Energy. – 2008. – Vol. 4. – P. 120–126.
3. Ерохов, В. Ю. Кремний мультипоритой текстуры для фотоэлектрических преобразователей солнечной энергии [Текст] / В. Ю. Ерохов, А. А. Дружинин // Технология и конструирование в электронной аппаратуре. – 2009. – № 3. – С. 21–23.
4. Арутюнян, В. М. Применение пористого кремния для двух-и трехслойных антиотражающих покрытий для кремниевых фотовольтаических преобразователей [Текст] / В. М. Арутюнян, Х. С. Мартиросян, А. С. Оганнисян, П. Г. Сукиасян // Известия НАН Армении, Физика. – 2008. – Т. 43, № 2. – С. 111–119.
5. Ou, W. Optical and electrical properties of porous silicon layer formed on the textured surface by electrochemical etching [Text] / W. Ou, L. Zhao, H. Diao, J. Zhang, W. Wang // Journal of Semiconductors. – 2011. – Vol. 32, Issue 5. – P. 056002. doi: 10.1088/1674-4926/32/5/056002
6. Huang, Y. M. Porous silicon based solar cells [Text] / Y. M. Huang, Q.-L. Ma, M. Meng, B. G. Zhai // Materials Science Forum. – 2011. – Vol. 663-665. – P. 836–839. doi: 10.4028/www.scientific.net/msf.663-665.836
7. Salman, K. A. The effect of etching time of porous silicon on solar cell performance [Text] / K. A. Salman, K. Omar, Z. Hassan // Superlattices and Microstructures. – 2011 – Vol. 50, Issue 6. – P. 647–658. doi: 10.1016/j.spmi.2011.09.006
8. Dubey, R. S. Electrochemical Fabrication of Porous Silicon Structures for Solar Cells [Text] / R. S. Dubey // Nanoscience and Nanoengineering. – 2013. – Vol. 1, Issue 1. – P. 36–40.
9. Salman, K. A. Effect of Silicon Porosity on Solar Cell Efficiency [Text] / K. A. Salman, K. Omar, Z. Hassan // Int. J. Electrochem. Sci. – 2012. – Vol. 7. – P. 376–386.

10. Suchikova, Y. A. Influence of dislocations on the process of pore formation in n-InP (111) single crystals [Text] / Y. A. Suchikova, V. V. Kidalov, G. A. Sukach // *Semiconductors*. – 2011. – Vol. 45, Issue 1. – P. 121–124. doi: 10.1134/s1063782611010192
11. Suchikova, Y. A. Influence of the carrier concentration of indium phosphide on the porous layer formation [Text] / Y. A. Suchikova, V. V. Kidalov, G. A. Sukach // *Journal of Nano- and Electronic Physics*. – 2010. – Vol. 2, Issue 4. – P. 75–81.
12. Kosyachenko, L. A. Quantitative assessment of optical losses in thin-film CdS/CdTe solar cells [Text] / L. A. Kosyachenko, E. V. Grushko, X. Mathew // *Solar Energy Materials and Solar Cells*. – 2012. – Vol. 96. – P. 231–237. doi: 10.1016/j.solmat.2011.09.063
13. Кондратенко, А. Н. Функции системы управления экологической безопасностью эксплуатации энергетических установок [Текст] / А. Н. Кондратенко, С. А. Вамболь, В. В. Вамболь // *Вестн. ХНАДУ*. – 2015. – Вып. 69. – С. 95–100.
14. Вамболь, С. А. Системы управления экологической безопасностью, которые используют многофазные дисперсные структуры [Текст]: монография / С. А. Вамболь. – Х.: Нац. Аэрокосм. Ун-т «Харьк. авиац. ин-т.», 2013. – 204 с.
15. Suchikova, Y. A. Preparation of nanoporous n-InP (100) layers by electrochemical etching in HCl solution [Text] / Y. A. Suchikova, V. V. Kidalov, G. A. Sukach // *Functional Materials*. – 2010. – Vol. 17, Issue 1. – P. 131–134.
16. Suchikova, Y. A. Synthesis of indium nitride epitaxial layers on a substrate of porous indium phosphide [Text] / Y. A. Suchikova // *Journal of Nano- and Electronic Physics*. – 2015. – Vol. 7, Issue 3. – P. 03017-1–03017-3.
17. Sychikova, Y. A. Dependence of the threshold voltage in indium-phosphide pore formation on the electrolyte composition [Text] / Y. A. Sychikova, V. V. Kidalov, G. A. Sukach // *Journal of Surface Investigation. X-ray, Synchrotron and Neutron Techniques*. – 2013. – Vol. 7, Issue 4. – P. 626–630. doi: 10.1134/s1027451013030130
18. Воропаева, С. Л. Прогнозування надійності структур GaP-SnO₂ на основі 3D моделей їх поверхні [Текст] / С. Л. Воропаева // *Східно-Європейський журнал передових технологій*. – 2013. – Т. 6, № 13 (66). – С. 96–98. – Режим доступу: <http://journals.urau.ua/eejet/article/view/19683/17579>
19. Обедзинский, Ю. К. Епітаксійні структури на базі Cd_{1-x}Zn_xSb та лазерна оптимізація їх властивостей [Текст] / Ю. К. Обедзинский, А. И. Савчук, В. Н. Стребежев, И. Н. Юрийчук // *Восточно-Европейский журнал передовых технологий*. – 2013. – Т. 6, № 12 (66). – С. 103–106. – Режим доступа: <http://journals.urau.ua/eejet/article/view/19696/17581>
20. Orlov, A. Peculiarity of Seed-Layer Synthesis and Morphometric Characteristics of ZnO Nanorods [Text] / A. Orlov, V. Ulianova, G. Pashkevich, O. Bogdan // *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*. – 2013. – Vol. 6, Issue 12 (66). – P. 72–75. – Available at: <http://journals.urau.ua/eejet/article/view/19737/17573>
21. Елкина, Л. Г. Управление экологической безопасностью: принципы, способы и формы организации на предприятии [Текст] / Л. Г. Елкина, Р. Р. Набиуллина // *Вестник УГАТУ*. – 2009. – Т. 12, № 3 (32). – С. 48–56.