

АНАЛІТИЧНЕ ТА ЕКОЛОГІЧНЕ ПРИЛАДОБУДУВАННЯ

УДК 621.38

ДОСЛІДЖЕННЯ ВПЛИВУ ПАРАМЕТРІВ СИНТЕЗУ КРЕМНІЄВИХ НАНОНИТОК НА ХАРАКТЕРИСТИКИ ФОТОЧУТЛИВИХ СЕНСОРІВ

¹Ліневич Я. О., ¹Коваль В. М., ¹Душейко М. Г., ¹Сачевнік В. Л., ²Лакида М. О.¹Національний технічний університет України

«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського», Київ, Україна

²Національний університет біоресурсів і природокористування України, Київ, УкраїнаE-mail: ya.linevych-me25@iit.kpi.ua

Проблематика. Фоточутливі сенсори широко застосовуються як у повсякденному житті в клімат-системах, так і в засобах зв'язку та освітленості вулиць. Для покращення робочих параметрів фоточутливих сенсорів запропоновано використовувати кремнієві нанонитки (КНН). Велику кількість досліджень присвячено впливу технологічних параметрів синтезу на розміри КНН. Однак для ефективного використання КНН у складі сенсорів бракує дослідження впливу поверхневої морфології масиву КНН на електричні та фоточутливі параметри сенсорів на їх основі.

Мета роботи. Метою даної роботи є синтез кремнієвих нанониток методом метало-стимульованого хімічного травлення (МАСЕ), дослідження їх поверхневої морфології та виготовлення фотодіодів на їх основі для встановлення впливу параметрів синтезу КНН на характеристики фоточутливих сенсорів з огляду на особливості їх будови.

Результати досліджень. Синтезовано та досліджено фоточутливі сенсори діодного типу на основі КНН. Показано вплив наступних технологічних параметрів синтезу КНН на їх латеральну і вертикальну морфологію та робочі характеристики діодних сенсорів на їх основі: часу першого та другого етапу МАСЕ, вмісту нітриду срібла та перекису водню в розчинах першого та другого етапу МАСЕ, а також текстурування поверхні та обробки в ізотропному та анізотропному травниках. Максимальні робочі параметри одержаних фоточутливих сенсорів на основі масиву КНН були наступними: коефіцієнт випромінювання 1320 та коефіцієнт фоточутливості 3,1 мА/лмВ.

Висновки. Одержані результати свідчать про те, що технологічні параметри першої та другої стадії МАСЕ та пре- і пост- хімічна обробка мають значний вплив на збільшення шорсткості поверхні, висоти і пористості КНН, що в свою чергу впливає на електричні та фоточутливі параметри сенсорів. Встановлено оптимальні параметри синтезу КНН для одержання максимальної фоточутливості.

Ключові слова: метало-стимульоване хімічне травлення; фоточутливі сенсори; фотодіоди; кремнієві нанонитки.

Вступ

У світі швидкого технологічного розвитку наука та промисловість постійно шукають нові способи покращення функціональності та ефективності пристроїв. Одним з ключових напрямків цього пошуку є розробка високочутливих сенсорів, які забезпечують вимірювання та реєстрацію світлових сигналів. На сьогодні, дані прилади широко використовуються в повсякденному житті та в промисловості. Зокрема фоточутливі сенсори встановлюються в приміщеннях, де важливо забезпечити оптимальний рівень освітленості для виконання певних видів робіт або в клімат-системах для забезпечення комфортного проживання людини. Крім того, з настанням сутінок чи на світанку датчики освітленості вмикають або вимикають відповідно джерела штучного освітлення тротуарів, дворів, дитячих майданчиків та авто-

магістралей, що забезпечує раціональне споживання електрики в системах зовнішнього освітлення. Також фоточутливі сенсори використовуються в автоматичних системах контролю та охоронних системах для виявлення наявності або відсутності об'єктів, вимірювання відстаней, контролю руху. Фоточутливі сенсори широко використовуються в оптоволоконних системах зв'язку для прийому оптичних сигналів та перетворення їх в електричну форму, що дозволяє декодувати інформацію, що передається по волоконному кабелю на великі відстані.

У якості фоточутливих сенсорів слугують фоторезистори [1], фотодіоди [2] або фототранзистори [3]. Для виготовлення даних приладів використовуються наступні матеріали: кремній Si [4], сульфід кадмію CdS [5], нітрид галію InGaN [6], графен [7].

Кремній як основний матеріал електроніки має відмінні електронні та сенсорні властивості, а також характеризується добре відпрацьованою технологією виготовлення приладів на його основі, що робить його відносно дешевим та технологічно зручним для використання в електронних сенсорах. Сучасною тенденцією є застосування різноманітних наноструктур в фотоактивних шарах сенсорів, зокрема кремнієвих нанониток. Кремнієві нанонитки (КНН) – це одновимірні наноструктури, які мають ширину до 100 нм і довжину, яка набагато перевищує ширину, що забезпечує їм велике аспектне відношення (від 10 до 100). Перехід до нанорозмірних об'єктів дає змогу зменшити фізичну площу сенсора, але збільшити при цьому фоточутливу поверхню приладу за рахунок великої бічної поверхні одновимірних наноструктур. Також масив кремнієвих нанониток покращує поглинання світла в сенсорі завдяки багатократному відбиванню та розсіюванню світлових хвиль на структурно розвинутій поверхні. Тому в останні роки кремнієві нанодропи стали центральною частиною оптоелектронних застосувань, таких як спектральні фільтри, сонячні елементи, штучна сітківка, оптичні фільтри, дисплеї, світловипромінювальні діоди та фотодетектори [8].

На сьогодні синтез КНН в основному відбувається наступними технологічними методами: метод вирощування пара-рідина-тверде тіло (VLS) [9], метод реактивного йонного травлення (RIE) [10] у поєднанні з нанодруккованою літографією (NIL) та метод метало-стимульованого хімічного травлення (MACE) [11]. Порівняння цих трьох методів синтезу показало, що нанонитки, одержані методом вирощування пара-рідина-тверде тіло, характеризуються високим ступенем впорядкованості у розташуванні, однак невисокою їх густиною по поверхні й відносною складністю процесу. У методі реактивного йонного травлення з нанодруккованою літографією спостерігається також невисока густина КНН та значна шорсткість бічних стінок нанониток. Крім того, дана технологія передбачає використання складного технологічного обладнання високої вартості. До переваг методу метало-стимульованого хімічного травлення MACE відносять його простоту реалізації, низьку вартість та можливість синтезувати щільний масив наноструктур з високим аспектним відношенням.

На сьогодні велика кількість статей присвячена впливу технологічних параметрів синтезу на розміри КНН [12-14]. Однак для ефективного використання даних наноструктур у складі сенсорів певних фізичних чи хімічних величин бракує дослідження впливу планарної і вертикальної морфології масиву кремнієвих нанониток на параметри сенсорів на їх основі. Зокрема у нашій попередній роботі ми показали перспективність використання масиву КНН у фоточутливих сенсорах [15], однак не було встановлено взаємозв'язок між технологічними параметрами MACE, поверхневою морфологією КНН та фо-

точувливими параметрами сенсорів на їх основі. Таким чином, метою даної роботи є синтез кремнієвих нанониток методом метало-стимульованого хімічного травлення MACE, дослідження їх поверхневої морфології та виготовлення фотодіодів на їх основі для встановлення впливу параметрів синтезу КНН на характеристики фоточувливих сенсорів з огляду на особливості їх будови.

Опис структури, технології виготовлення та методики вимірювання фоточувливих сенсорів на основі КНН

В роботі були синтезовані діодні фоточувливі сенсори, у складі яких було використано кремнієві нанонитки. Для цього вихідні Si пластини були р-типу провідності з питомим опором $1 \Omega \cdot \text{см}$, текстуровані та нетекстуровані. Щоб синтезувати дослідні зразки, кремнієві підкладки очищали шляхом трьохстадійного процесу очищення, який описано у нашій попередній роботі [16]. Процес текстурування пластин проводили з метою отримання більш розвиненої поверхні за рахунок наявності пірамідок текстури. Для цього використовували розчин 970 мл H_2O / 30 г KOH / 70 мл IPA за температури 75°C протягом 15 хв. Синтез кремнієвих 1D структур проводили за допомогою методу MACE, стандартний процес виготовлення якого наведений в нашій попередній роботі [17]. В даній роботі пропонується після процесу MACE на текстурованих зразках застосувати додаткові травники для обробки та видалення порушеного шару на поверхні КНН. Кислотний травник $\text{HF}/\text{HNO}_3/\text{CH}_3\text{COOH}$ (1:4:4) за кімнатної температури протягом 10 хв здійснював ізотропне травлення поверхні, в той час, як лужний травник $\text{NaOH}/\text{IPA}/\text{H}_2\text{O}$ (2:10:88) за температури 90°C протягом 10 хв забезпечував анізотропне травлення. Після синтезу SiNWs в підкладці р-типу формується р-п перехід. Для цього фосфор вводили в SiNWs в дифузійній печі у два етапи: загонка фосфору при температурі 750°C протягом 5 хв та розгонка фосфору при температурі 830°C протягом 20 хв. В результаті утворився шар кремнію n-типу з питомим поверхневим опором 50 Ом.

Суцільний тильний алюмінієвий контакт був нанесений на підкладку за допомогою методу високочастотного (ВЧ) магнетронного розпилення. Робочі параметри вакуумної установки під час процесу осадження були наступними: напруга - 400 кВ, сила струму - 4 А, тиск аргону - 3×10^{-7} мм рт. ст., час осадження - 40 хв. Після цього, алюмінієву плівку відпалювали в дифузійній печі при температурі 650°C в атмосфері азоту. В результаті був отриманий тильний контакт товщиною 1,5 мкм. Для формування точкових фронтальних контактів Ti/Ni на боці SiNWs використовували метод електронно-променевого осадження. Параметри осадження у вакуумній установці: тиск в камері - 10^{-5} мм рт. ст., напруга - 13 кВ, струм - 120 мА. Час осадження для

титану та нікелю становив 3 та 20 хв відповідно. В результаті отримали товщину фронтального контакту близько 0,5 мкм.

Одержані фоточутливі сенсори діодного типу вимірювали в режимі із зовнішнім джерелом живлення. До сенсора прикладається зворотна напруга джерела живлення, що забезпечує зворотне зміщення р-п переходу, тому робочою характеристикою є зворотна гілка вольт-амперної характеристики (ВАХ). При дії джерела освітлення в напівпровіднику генеруються фотоносії, що вносять свій вклад в зворотній струм р-п переходу залежно від рівня освітленості. Для одержаних сенсорів вимірювались наступні характеристики: темнова ВАХ, зворотна гілка ВАХ в діапазоні рівнів освітленості (7740-20200 лк) та люкс-амперні характеристики (ЛАХ) при $U = -2$ В. З темнотної вольт-амперної характеристики був розрахований коефіцієнт випрямлення фотодіодів при напрузі 1 В. На основі люкс-амперної характеристики був розрахований коефіцієнт фоточутливості сенсора за формулою:

$$K_{\phi I} = \frac{I_{\phi 2} - I_{\phi 1}}{(E_2 - E_1) \times U \times S},$$

де E_1 , E_2 – максимальний і мінімальний рівні освітленості; $I_{\phi 1}$, $I_{\phi 2}$ – фотоструми при рівнях освітленості E_1 , E_2 відповідно; U – робоча напруга; S – площа сенсора.

На рис. 1 зображено 3D вигляд масиву синтезованих кремнієвих нанониток з різним часом осадження НЧ Ag 20 та 60 с, на якому візуально видно відмінність у поверхневій морфології таких зразків.

В роботі були виміряні темнові ВАХ фотодіодів залежно від параметрів першого етапу МАСЕ (рис. 2, а), для КНН, синтезованого методом МАСЕ, за різного часу травлення (рис. 3), другого етапу МАСЕ (рис. 4, а), для КНН, синтезованого методом МАСЕ, за різної хімічної пост обробки (рис. 5) та додаткової хімічної обробки (рис. 6, а). З наведених кривих видно, що одержані фотодіоди характеризуються випрямляючими властивостями, однак величина струмів через р-п-перехід залежить від технологічних режимів синтезу КНН. Отже, в роботі було встановлено вплив параметрів першого етапу МАСЕ (рис. 2, б), другого етапу МАСЕ (рис. 4, б) та додаткової хімічної обробки (рис. 6, б) на коефіцієнт фоточутливості сенсорів на основі масиву КНН.

Для дослідження поверхневої морфології одержаних КНН використовували атомно-силовий мікроскоп SolverPro в напівконтактному режимі. Кількісно аналіз поверхні здійснювався шляхом програмної обробки АСМ-знімків, в результаті чого було визначено середньоквадратичне значення шорсткості поверхні (с.к.з. шорсткості) та максимальний розмір КНН. Обробка зображень відбувалася в програмі Nova з площею сканування 50x50 мкм, 20x20 мкм та 10x10 мкм.

Кількісна оцінка пористості кремнієвого матеріалу здійснювалася ваговим методом. Вольт-

амперні та люкс-амперні характеристики отриманих сенсорів вимірювали за допомогою джерела живлення Power Supply HM8143 та цифрового вольтметра-амперметра MS8040.

Вплив параметрів першого етапу МАСЕ на характеристики фоточутливих сенсорів на основі КНН

Перший етап МАСЕ являє собою процес осадження наночастинок срібла (НЧ Ag) в розчині на основі нанопорошку $AgNO_3$ та HF. Ключовими технологічними параметрами на даному етапі, які впливають на структурні характеристики КНН, є концентрація $AgNO_3$ та час осадження наночастинок Ag (тривалість першого етапу t_1). Дані параметри визначають кількість осаджених наночастинок срібла на поверхні кремнію, під якими у подальшому буде здійснюватися процес травлення, що визначатиме планарну геометрію кремнієвих нанониток.

Співставлення структурних параметрів синтезованих нанониток (рис. 1) показало, що при збільшенні t_1 шорсткість поверхні КНН зростає з 226 до 753 нм, а максимальний розмір кремнієвих нанониток збільшується з 2146 до 4066 нм. Водночас, об'ємна ступінь пористості змінилася з 60 до 98 %. Очевидно, що ці закономірності пов'язані з утворенням більш розвинутої поверхні кремнію за рахунок більш тривалого часу осадження наночастинок срібла, під якими відбувається травлення. Крім того, в роботі було встановлено, що зміна кількості $AgNO_3$ в розчині з 34 до 68 мг, призводить до збільшення с.к.з. шорсткості з 182 до 226 нм та збільшення максимального розміру КНН з 1340 до 2046 нм. При цьому ступінь пористості змінилася з 52 до 82,5 %. Витримка пластики в більш концентрованому розчині $AgNO_3$ за однакового часу призводить до осадження більшої кількості наночастинок Ag на поверхні сенсора, що призводить до досягнення більш протравленої поверхні.

В роботі було проаналізовано вплив часу осадження наночастинок Ag на робочі характеристики діодних фоточутливих сенсорів. Збільшення тривалості першого етапу МАСЕ з 20 до 60 с за умови однакових всіх інших технологічних параметрів (вміст $AgNO_3$ – 34 мг, вміст H_2O_2 – 0,8 мл, t_2 – 45 хв) практично не впливає на випрямляючі характеристики сенсорів (рис. 2, а). При цьому фоточутливі характеристики покращуються: коефіцієнт фоточутливості зростає на 10 % (з 2,1 до 2,3 мА/лмВ) (рис. 2, б). Очевидно, більш шорстка поверхня масиву КНН (рис. 1), яка одержана в такому режимі МАСЕ, забезпечує збільшення фотоактивної площі сенсора.

Також встановлено вплив вмісту кількості $AgNO_3$ на робочі характеристики діодних фоточутливих сенсорів за умови однакових усіх інших технологічних параметрів (вміст H_2O_2 – 0,8 мл, t_1 – 20 с, t_2 – 90 хв). Так, зміна $AgNO_3$ з 34 до 68 мг значно зменшує коефіцієнт випрямлення (з 221,4 до 67,2). Це може бути обумовлене збільшенням шорсткості по-

верхні, що негативно впливає на якість р-п переходу, а саме: зменшує прямий та збільшує зворотній струм діода. Однак при цьому значно зросла fotocутливість з 1,2 до 2,8 мА/лмВ, що пов'язано зі збільшенням фотоактивної площі сенсора.

Зведена діаграма fotocутливості для різних комбінацій параметрів першого етапу МАСЕ

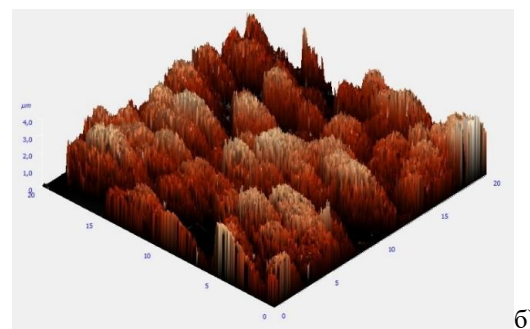
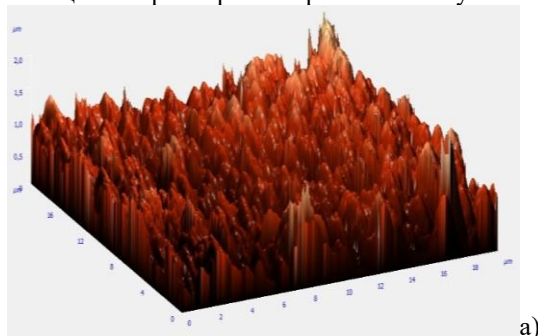


Рис. 1. АСМ-зображення масиву КНН, синтезованого методом МАСЕ, за різного часу осадження НЧ Ag: а) 20 с; б) 60 с

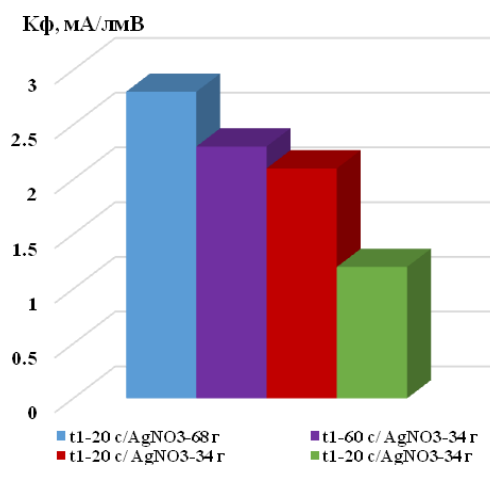
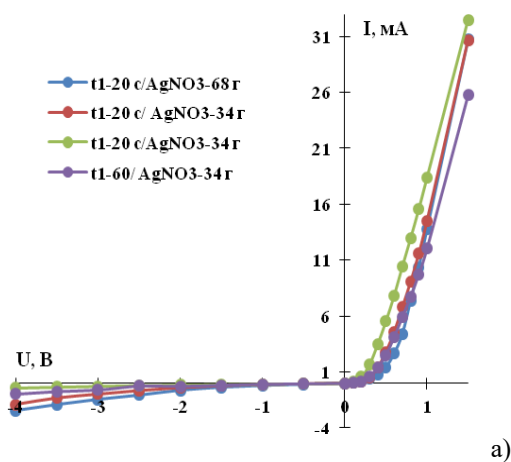


Рис. 2. Сімейство темних ВАХ (а) та коефіцієнтів fotocутливості (б) сенсорів освітленості на основі масиву КНН залежно від технологічних параметрів першого етапу МАСЕ

Вплив параметрів другого етапу МАСЕ на характеристики fotocутливих сенсорів на основі КНН

Другий етап МАСЕ являє собою процес травлення кремнію під осадженими наночастинками срібла в розчині на основі перекису водню. Ключовими параметрами на даному етапі, які впливають на структурні характеристики КНН, є концентрація H_2O_2 та тривалість процесу травлення (тривалість другого етапу t_2). Очевидно, що дані технологічні режими визначають глибину травлення кремнію, що відповідає за висоту нанониток, тобто вертикальну геометрію масиву КНН.

На рис. 3 зображено 3D вигляд масиву синтезованих кремнієвих нанониток з різним часом травлення 45 та 150 хв. Аналіз структурних параметрів нанониток показав, що при збільшенні t_2 шорсткість КНН значно збільшується з 122 до 396 нм, як і максимальний розмір кремнієвих нанониток (з 1092 до 1908 нм). Ці закономірності

пов'язані з більш глибоким травленням кремнію за довшої тривалості другого етапу МАСЕ. Однак при цьому величина пористості зразків зазнала зменшення з 84 до 62 %. Наведена закономірність візуально помітна на знімках АСМ (рис. 3): за часу травлення 45 хв формується щільний шар маси окремо взятих КНН, а при збільшенні часу травлення до 150 хв на поверхні витравлюються стінки об'єднаних нанониток. Також в роботі було встановлено, що зміна кількості H_2O_2 в розчині з 0,4 до 1,6 мл призводить до збільшення с.к.з. шорсткості з 101 до 355 нм та максимального розміру КНН з 1158 до 2220 нм. Ступінь пористості при цьому змінювалася з 54 до 82 %. Очевидно, що більша концентрація H_2O_2 в розчині травника збільшує швидкість травлення, а відтак призводить до більш розвинутої поверхні.

В роботі було проаналізовано вплив часу травлення на робочі характеристики діодних fotocутливих сенсорів за умови однакових всіх інших техно-

логічних параметрів (вміст AgNO_3 – 34 мг, вміст H_2O_2 – 0,8 мл, t_1 – 20 с). Так, зміна часу травлення з 45 до 90 хв призводить до збільшення коефіцієнту випрямлення (з 125,3 до 221,4), але подальше збільшення часу травлення викликає погіршення випрямляючих властивостей сенсора. Це пов'язано зі збільшенням зворотного струму при досягненні t_2 135 хв. Водночас, фоточувливі властивості сенсора одночасно погіршуються при зростанні часу травлення: коефіцієнт фоточувливості зменшується з 2,1 до 0,8 мА/лмВ. Встановлена закономірність може бути обумовлена тим, що не дивлячись на зростання шорсткості поверхні, ступінь пористості значно зменшився, що призводить до зменшення фотоак-

тивної площі сенсора. Дійсно, як видно з рис. 3, сукупна бічна поверхня нанониток, що об'єднані в стінки (рис. 3, б), є значно меншою, аніж окремо взятих КНН (рис. 3, а).

Також встановлено вплив вмісту кількості H_2O_2 на робочі характеристики діодних фоточувливих сенсорів за умови однакових всіх інших технологічних параметрів (вміст AgNO_3 – 34 мг, t_1 – 20с, t_2 – 90 хв). Так, при збільшенні кількості H_2O_2 з 0,4 до 1,6 мл, має місце збільшення коефіцієнта випрямлення (з 157 до 265), що обумовлено значним зменшенням зворотного та збільшенням прямого струму через р-п перехід (рис. 4).

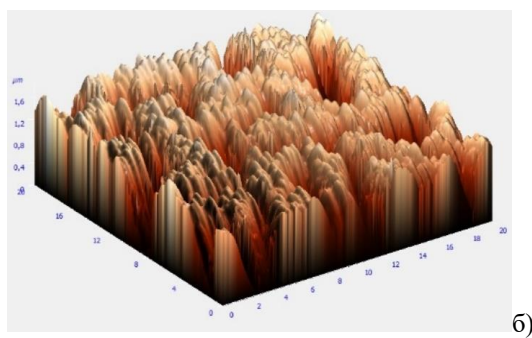
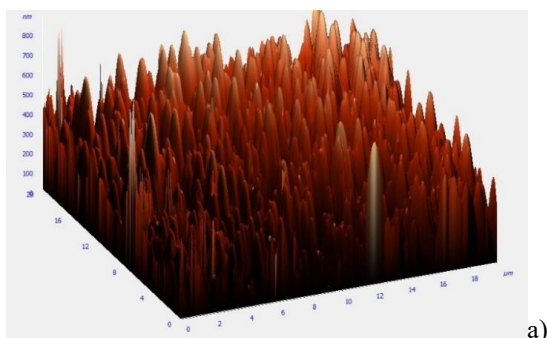


Рис. 3. АСМ-зображення масиву КНН, синтезованого методом МАСЕ, за різного часу травлення: а) 45 хв., б) 150 хв.

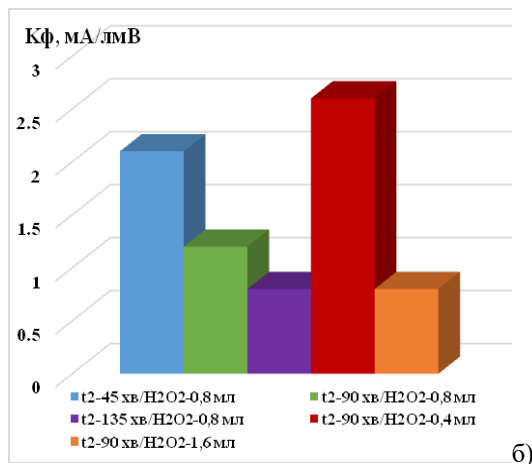
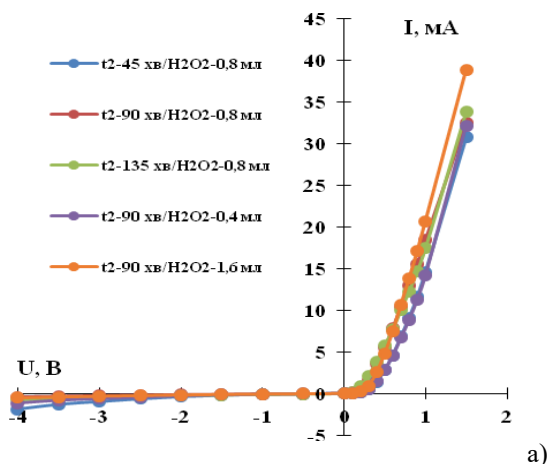


Рис. 4. Сімейство темних ВАХ (а) та коефіцієнтів фоточувливості (б) сенсорів освітленості на основі масиву КНН залежно від технологічних параметрів другого етапу МАСЕ

Водночас, зі збільшенням концентрації H_2O_2 значно зменшується фоточувливість сенсора (від 2,6 до 0,8 мА/лмВ), не дивлячись на зростання значення шорсткості та пористості поверхні. Очевидно, що позитивний вплив збільшення фотоактивної площі нівелюється зменшенням часу життя неосновних носіїв заряду під час обробки в концентрованому розчині перекису водню. Отже, щоб покращити фоточувливі характеристики сенсорів на основі масиву КНН час травлення має бути мінімальним (30-45 хв) при меншій кількості H_2O_2 (0,4 мл).

Вплив додаткової хімічної обробки на характеристики фоточувливих сенсорів на основі КНН

Додаткова хімічна обробка кремнієвих пластин включає в себе наступні операції: текстурування перед процесом МАСЕ, обробку в ізотропному або анізотропному травниках після процесу МАСЕ. Процес текстурування поверхні використовується для збільшення поглинання падаючого світла в результаті формування геометричної пастки у вигляді пірамідок текстури. Однак текстурування поверхні значно зменшує коефіцієнт пористості, тому в роботі були використані додаткові травники в пост обробці зразків. Згідно даних АСМ наявність текстурованої поверхні призводить до збільшення шорсткості поверхні в більш, ніж 2 рази (с.к.з. зросло з 226 до 590 нм) та максималь-

ного розміру КНН на 30 % (з 2146 до 2774 нм). Однак слід зазначити, що при цьому ступінь пористості зменшилась з 82,5 до 56 %. Це може бути пов'язано з тим, що на бічну поверхню пірамідок текстури гірше осаджуються наночастинки срібла, зменшуючи тим самим пористість масиву.

На рис. 5 зображено 3D вигляд масиву синтезованих кремнієвих нанониток з різним видом пост обробки: ізотропний (рис. 5, а) та анізотропний травник (рис. 5, б). Порівняння структурних параметрів масиву нанониток показало, що ізотропний травник призводить до незначних змін с.к.з шорсткості і до зменшення максимального

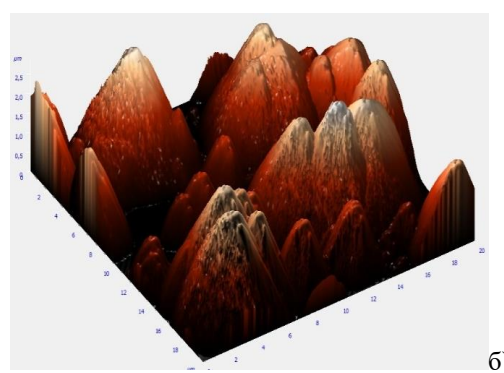
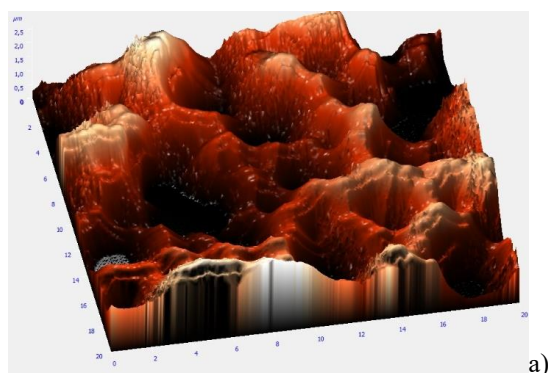


Рис. 5. АСМ-зображення масиву КНН, синтезованого методом МАСЕ, за різної хімічної пост обробки: а) ізотропний травник, б) анізотропний травник

В роботі проаналізовано вплив попереднього текстурування вихідної підкладки на електричні та фоточутливі характеристики діодних фоточутливих сенсорів за умови однакових усіх інших технологічних параметрів (вміст AgNO_3 – 34 мг, H_2O_2 – 0,8мл, t_1 – 20с, t_2 – 90 хв). Водночас, встановлено, що наявність поверхневої текстури призводить до покращення електричних характеристик: коефіцієнт випрямлення збільшився з 12,8 до 95,9. Це викликано значним зменшенням зворотного струму через р-п-перехід (рис. 6, а). При цьому текстурування поверхні перед операцією МАСЕ значно погіршує фоточутливі параметри сенсора (з 2,2 до 1,5 мА/лмВ) (рис. 6, б). Погіршення фоточутливих властивостей пояснюється різким зменшенням ступеня пористості масиву КНН з 82,5 до 56 %. Також встановлено вплив ізотропного та анізотропного травників на робочі характеристики діодних фоточутливих сенсорів за умови однакових усіх інших технологічних параметрів (вміст AgNO_3 – 34 мг, H_2O_2 – 0,8мл, t_1 – 20с, t_2 – 90 хв). Так, додавання анізотропного травника в пост обробку текстурованої поверхні викликало погіршення електричних характеристик сенсора: коефіцієнт випрямлення зменшився з 95,5 до 32,5. Це може бути пов'язано зі збільшенням зворотного струму через р-п-перехід в 3 рази. Водночас, фоточутливі характеристики помітно покращилися з 1,5 до 2,4 мА/лмВ. Це пов'язано з формуванням більш розвинутої фотоактивної поверхні як за рахунок величини шорсткості, так ступеня пористості. Дода-

вання ізотропного травника в пост обробку текстурованої поверхні призводить до покращення як випрямляючих, так і фоточутливих характеристик сенсора. Зокрема коефіцієнт випрямлення зріс більш, ніж на порядок (з 95,9 до 1268), що пов'язано зі зменшенням зворотного струму через р-п-перехід на порядок. Водночас, коефіцієнт фоточутливості зріс з 1,5 до 2,3 мА/лмВ. Не дивлячись на те, що анізотропний травник майже не впливає на шорсткість поверхні, однак ступінь пористості значно збільшується, що і призводить до покращення фоточутливості. Отже, для виготовлення високоефективних фотодіодних сенсорів на основі масиву КНН доцільно використовувати текстурування, що супроводжується обробкою в ізотропно-травнику.

Висновки

У роботі було створено діодні фоточутливі сенсори на основі кремнієвих нанониток та встановлено вплив параметрів синтезу на їх планарну та вертикальну морфологію, а відтак на робочі характеристики приладів на їх основі. Встановлено, що при зростанні технологічних параметрів першої та другої стадії МАСЕ, а також за наявності пре- і пост обробки, за виключенням ізотропного травника, має місце помітне зростання шорсткості фотоактивної поверхні сенсора.

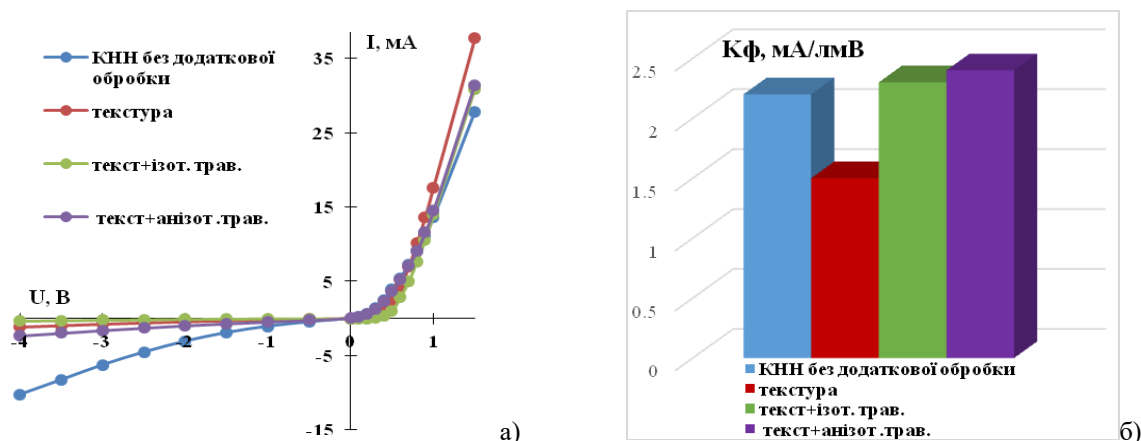


Рис. 6. Сімейство темнових ВАХ (а) та коефіцієнтів фоточутливості (б) сенсорів освітленості на основі масиву КНН в залежності від додаткової хімічної обробки

Однак в роботі було встановлено, що фоточутливі параметри сенсора значною мірою залежать від величини пористості матеріалу. Даний параметр збільшується при зростанні всіх технологічних параметрів, окрім тривалості другого етапу MACE та текстурування поверхні сенсора. Окремо слід зазначити, що зі збільшенням концентрації травника другої стадії MACE (H_2O_2) значно зменшується фоточутливість сенсора, хоча значення шорсткості та пористості поверхні зростає. Очевидно, що даний технологічний параметр впливає не на величину поглинання світла, а на величину електропереносу матеріалу. Також було показано позитивний вплив пост обробки, причому як ізотропного, так і анізотропного травників, на робочі параметри фоточутливих сенсорів. Максимальні робочі параметри одержаних фоточутливих сенсорів на основі масиву КНН були наступними: коефіцієнт випрямлення 1320 та коефіцієнт фоточутливості 3,1 мА/лмВ. Одержані результати свідчать про те, що використання простої та дешевої технології синтезу нанониток є ефективним для виробництва фоточутливих сенсорів.

Подальшим напрямком покращення фоточутливості є нанесення на поверхню сенсорів різноманітних модифікаторів, наприклад, цеолітів.

Література

- [1] Liu, Jing, and Shuaipeng Yue, "Fabrication of ZnS layer on silicon nanopillars surface for photoresistor application", *Chemical Physics Letters*, vol. 801, P. 139716, 2022.
DOI: 10.1016/j.cplett.2022.139716
- [2] Li, Chong, et al. "Influence of photonic crystals on the performance parameters of GeSn vertical-structure photodiodes", *Optics & Laser Technology*, vol. 163, P. 109375, 2023.
DOI: 10.1016/j.optlastec.2023.109375
- [3] Che, Yongli, et al. "Highly photosensitive CsPbBr₃ NCs-graphene phototransistor with memory function", *Optics Communications*, vol. 532, P. 129252, 2023.
DOI: 10.1016/j.optcom.2022.129252
- [4] Talebi, Samaneh, and Hosein Eshghi, "Achievement of high infrared photoresponse in n-MoO₃/p-Si heterostructure photodiode prepared via the thermal oxidation method, the influence of oxygen flow rate", *Materials Chemistry and Physics*, vol. 303, P. 127792, 2023.
DOI: 10.1016/j.matchemphys.2023.127792
- [5] Le Viet, Huy, Hiroyuki Miyamaru, and Takao Kojima. "Development of compact sensor with CdS photoresistor for high gamma-ray field monitoring", *Applied Radiation and Isotopes*, vol. 172, P. 109698, 2021.
DOI: 10.1016/j.apradiso.2021.109698
- [6] Hsiao, Fu-Chen, et al. "Modeling photocurrent spectra of high-indium-content InGaN disk-in-wire photodiode on silicon substrate", *Physica E: Low-dimensional Systems and Nanostructures*, vol. 144, P.115371, 2022.
DOI: 10.1016/j.physe.2022.115371
- [7] S. Aynehband, M. Mohammadi, et al. "Efficient FAPbI₃-PbS quantum dot graphene-based phototransistors", *New Journal of Chemistry*, vol. 45(34), pp. 15285-15293, 2021.
DOI: 10.1039/D1NJ03139B.
- [8] Chang, Sehui, Gil Ju Lee, and Young Min Song. "Recent advances in vertically aligned nanowires for photonics applications", *Micromachines*, vol. 11.8, P. 726, 2020. Doi: 10.3390/mi11080726
- [9] Deepu, Bagur R., et al. "Advanced VLS growth of gold encrusted silicon nanowires Mediated by porous Aluminium Oxide template", *Vacuum*, vol. 185, p. 109991, 2021.
DOI: 10.1016/j.vacuum.2020.109991
- [10] Abidin, Wan Amirah Basyarah Zainol, et al. "Femtometer Dengue Virus Type-2 DNA Detection in Back-gated Silicon Nanowire Field-effect Transistor Biosensor", *Current Nanoscience*, vol. 18.1, pp. 139-146, 2022.
DOI: 10.2174/1573413717666210226120940
- [11] Zeraati, M., Chen, T. C., Ebri, M., Chauhan, N. P. S., & Sargazi, G. "Length prediction of silicon nanowires (SiNWs) prepared by the MACE method using the ANN-COA-PSO algorithm for high

- supercapacitor applications." *Journal of Physics and Chemistry of Solids*, vol. 156, p. 110146, 2021, DOI: 10.1016/j.jpss.2021.110146
- [12] C. Canevali, M. Alia, M. Fanciulli, M. Longo, R. Ruffo, C. M. & Mari, "Influence of doping elements on the formation rate of silicon nanowires by silver-assisted chemical etching", *Surface and Coatings Technology*, vol. 280, pp. 37-42, 2015.
DOI: 10.1016/j.surfcoat.2015.08.013.
- [13] Saidi, H., Hidouri, T., Fraj, I., Saidi, F., & Bouazizi, A. "Effect of etching time and illumination on optical properties of SiNWs elaborated by metal assisted chemical etching (MACE) for organic photovoltaic applications", *Superlattices and Microstructures*, vol. 85, pp. 925-930, 2015.
DOI: 10.1016/j.spmi.2015.07.012
- [14] Sahoo, Mihir Kumar, and P. G. Kale. "Micro-Raman study of growth parameter restraint for silicon nanowire synthesis using MACE", *Superlattices and Microstructures*, vol. 135, P. 106289, 2019.
DOI: 10.1016/j.spmi.2019.106289.
- [15] Ліневич Я. О., Коваль В. М., Душейко М. Г., Лакида М. О. "Синтез та дослідження кремнієвих 1D нанорозмірних структур для застосування в сенсорах освітленості", *Вчені записки Таврійського національного університету імені В.І. Вернадського. Серія: Технічні науки*, Т. 33, № 4, с. 327-337, 2022.
DOI: 10.32838/2663-5941/2022.4/50
- [16] Yaroslav Linevych, Viktoriia Koval, Mykhailo Dusheiko, Yuriy Yakymenko, Maryna Lakyda and Valerii Barbash, "Silicon Diode Structures Based on Nanowires for Temperature Sensing Application", 2022 in *42th International Conference on Electronics and Nanotechnology (ELNANO). Conference Proceedings*, pp. 190-195, 2022.
DOI: 10.1109/ELNANO54667.2022.9927122
- [17] M. G. Dusheiko, V. M. Koval, T. Yu. Obukhova, "Silicon nanowire arrays synthesized using the modified MACE process", *Integration into chemical sensors and solar cells. Semiconductor Physics, Quantum Electronics & Optoelectronics*, vol. 25, pp. 058-067, 2022.
DOI: 10.15407.SPQEO25.01.058

UDC 621.38

¹Y. O. Linevych, ¹V. M. Koval, ¹M. G. Dusheiko, ¹V. L. Sachevnik, ²M. O. Lakyda¹National Technical University of Ukraine "Ihor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute", Kyiv, Ukraine²National University of Life and Environmental Sciences of Ukraine, Kyiv, Ukraine

INVESTIGATION OF THE INFLUENCE OF SILICON NANOWIRE SYNTHESIS PARAMETERS ON THE CHARACTERISTICS OF PHOTOSENSITIVE SENSORS

Problem. Photosensitive sensors are widely used both in everyday life in climate systems and in communication devices and street lighting. In order to improve the performance parameters of photosensitive sensors, the use of silicon nanowires (SiNWs) has been proposed. A large number of articles are dedicated to the influence of synthesis parameters on the dimensions of SiNWs. However, there is a lack of research on the impact of the surface morphology of SiNW arrays on the electrical and photosensitive parameters of sensors based on them.

The purpose of the work The aim of this work is to synthesize silicon nanowires using the metal-assisted chemical etching method, investigate their surface morphology, and fabricate photodiodes based on them to examine the influence of SiNW synthesis parameters on the characteristics of photosensitive sensors, considering the peculiarities of their structure.

Research results. Photosensitive sensors of diode type based on SiNWs were synthesized and investigated. The influence of the following synthesis parameters of SiNWs on their lateral and vertical morphology as well as on characteristics of diode sensors based on them was demonstrated: the duration of the first and second stages of metal-assisted chemical etching (MACE), the content of silver nitrate and hydrogen peroxide in the solutions of the first and second stages of MACE, as well as surface texturing and processing in isotropic and anisotropic etchants. The maximum operational parameters of the obtained photosensitivity sensors based on the SiNW array were as follows: rectification coefficient of 1320 and photosensitivity coefficient of 3.1 mA/lmV.

Conclusions. The obtained results indicate that the technological parameters of the first and second stages of MACE, as well as pre- and post- chemical treatments, have a significant influence on increasing of the surface roughness, height, and porosity of SiNWs, which in turn affect the electric and photosensitive parameters of the sensors. Optimal SiNWs synthesis parameters for achieving of maximum photosensitivity have been established.

Keywords: metal-assisted chemical etching; photosensitive sensors; photodiodes; silicon nanowires.

Надійшла до редакції
09 червня 2023 року

Рецензовано
20 липня 2023 року



© 2023 Copyright for this paper by its authors.
Use permitted under Creative Commons License Attribution 4.0 International (CC BY 4.0).