

tools in technological systems, KhNTU "KhPI". – 2020. – No. 92. – P. 107-121.
doi: <https://doi.org/10.20998/2078-7405.2020.92.12>

2. Вибір технологічних параметрів лазера для отримання зміцнюючих покриттів з наноструктурами на інструментальній сталі У12А [Текст] / Ю. В. Широкий, Ю. О. Сисоєв, О. В. Торосян, Г. Д. Торосян-Жидєєва // Відкриті інформаційні та комп'ютерні інтегровані технології. – 2023. – Вип. 97. – С. 111-125.
doi: <https://doi.org/10.32620/oikit.2023.97.07>

БЕЗШАБЛОННИЙ РІСТ ТРИВИМІРНИХ НАНОСТРУКТУР ОКСИДУ МІДІ У ТЛІЮЧОМУ РОЗРЯДІ: ШЛЯХ ДО ЕФЕКТИВНИХ ЕЛЕКТРОДНИХ МАТЕРІАЛІВ

М. А. Луценко, А. О. Бреус, О. О. Баранов

*Національний аерокосмічний університет ім. М. Є. Жуковського
«Харківський авіаційний інститут»*

Отримані тривимірні (3D) наноструктури оксиду міді (CuO), що характеризуються розгалуженою пористою морфологією і мають значний потенціал для використання в широкому спектрі електрохімічних та сенсорних застосувань. Завдяки високій питомій площі поверхні, структурованості на мікро- та нано-рівнях, а також напівпровідниковій природі CuO (р-тип провідності), ці наноструктури є перспективними електродними матеріалами для суперконденсаторів та акумуляторів, зокрема літій-іонних, де важливою є як висока ємність, так і стабільність при багаторазовому циклуванні [1]. Така архітектура сприяє ефективній дифузії електроліту та покращеній передачі заряду. Крім того, CuO наноструктури широко досліджуються як активні елементи для газових сенсорів. Їх поверхнева чутливість до молекул таких як H₂S, NH₃, NO₂ та CO дозволяє використовувати ці матеріали в системах моніторингу якості повітря [2]. Розвинена наноморфологія забезпечує швидкий відгук, низьку межу виявлення та хорошу стабільність. У контексті фотокаталізу CuO демонструє активність у процесах окиснення органічних сполук та деградації забруднювачів у воді. Висока активна площа та наявність реакційно здатних поверхневих центрів сприяють ефективному поглинанню світла та міжфазовому переносу заряду, що є критичним для фотохімічних і електрохімічних застосувань [3].

Для синтезу наноструктур CuO був застосований тліючий розряд. Мікρο-структурний аналіз отриманих зразків показує (рис. 1), що наноструктури CuO формуються у вигляді вертикально орієнтованих, пористих, стрижнеподібних утворень, які локально переплітаються в каркасоподібні 3D структури. Ця морфологія є наслідком самоорганізованого росту, що відбувається без використання жорстких аналітичних шаблонів чи поверхневого патернування. Тліючий розряд створює просторово неоднорідне електричне поле та градієнт активних плазмових частинок, які ініціюють анізотропне осадження та локальне окиснення міді з подальшим зростанням наноструктур вгору, від поверхні субстрату. Відсутність сторонніх органічних матриць або жорстких фізичних обмежень дозволяє наноструктурам CuO рости вільно, формуючи нерівномірну, природну зернистість поверхні, що суттєво підвищує питому активну площу. Саме така



архітектура є оптимальною для електродів без зв'язуючих речовин, а також для сенсорних або фотокаталітичних застосувань, де важливе повне використання активної поверхні. Таким чином, отриманий матеріал є результатом безшаблонного, самоорганізованого росту наноструктур оксиду міді у тліючій плазмі.

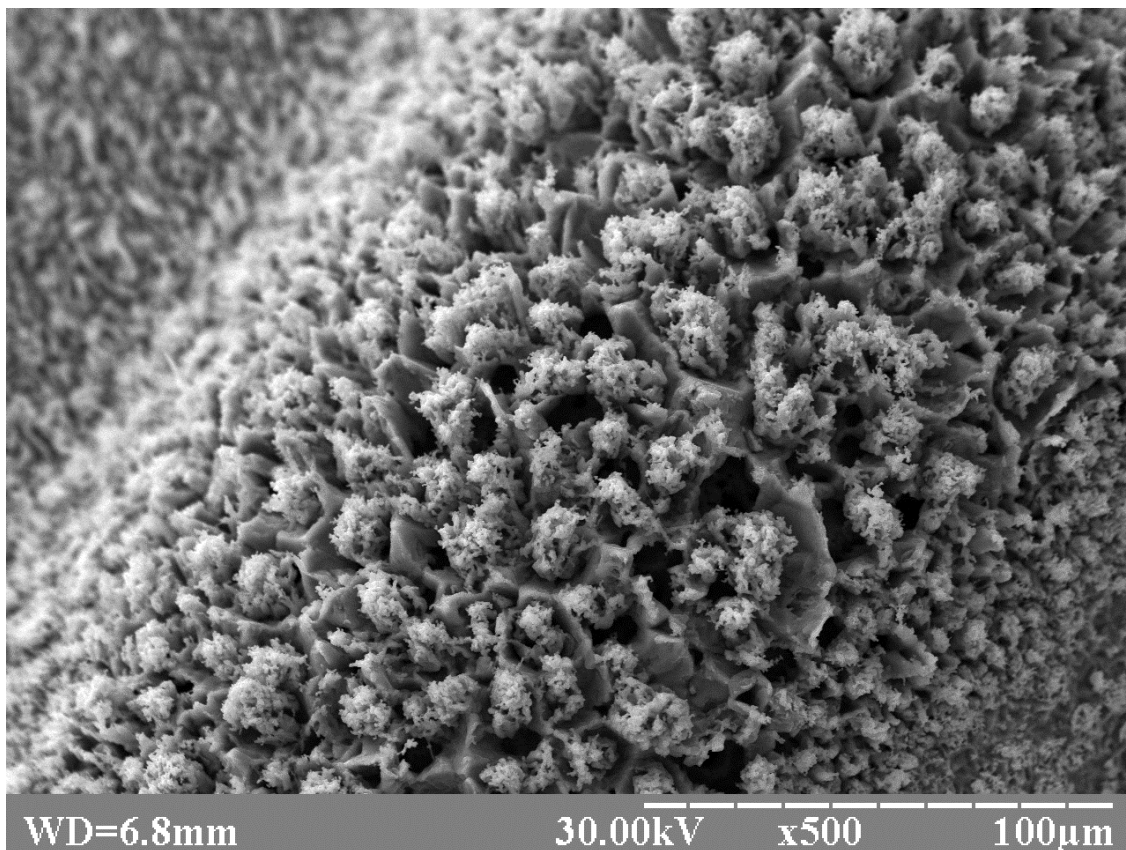


Рис. 1 – Самоорганізовані тривимірні наноструктури CuO з розвиненою пористою архітектурою – перспективний матеріал для електродів без зв'язуючих речовин

У результаті експерименту показано, що отримання тривимірних (3D) наноструктур оксиду міді (CuO) за допомогою тліючого розряду є перспективною та енергоефективною стратегією для плазмохімічного синтезу функціональних оксидних матеріалів. Тліючий розряд, як різновид низькотемпературної плазми, забезпечує енергійне, але контрольоване середовище, у якому іони, активовані радикали та електрони взаємодіють із поверхнею матеріалу, ініціюючи хімічні реакції та формування наноструктур при низьких або помірних температурах порівняно з традиційними методами (PVD, CVD, термічне окиснення).

Переваги тліючого розряду у цьому контексті включають:

- 1 безпосередній контроль над морфологією: завдяки локальному електричному полю та напрямленому транспорту іонів можна отримати анізотропні структури, як у випадку з 3D наноконусами та пористими мікроострівцями CuO;
- 2 формування оксидів *in situ*: окиснення відбувається прямо під час осадження або рекристалізації міді, що знижує кількість стадій обробки;
- 3 високу чистоту структури: у процесі тліючого розряду немає потреби у зв'язуючих речовинах чи сторонніх каталізаторах, що дозволяє отримати



чисті й функціонально активні поверхні – критично важливий аспект для електрохімічних і сенсорних застосувань;

- 4 можливість масштабування: метод легко адаптується до різних геометрій та субстратів, відкриваючи шлях до масового виробництва наноматеріалів;

Таким чином, застосування тліючого розряду для синтезу CuO наноструктур є не лише технічно вигідним, а й науково обґрунтованим підходом, який забезпечує структурну складність, функціональну активність і технологічну гнучкість, необхідну для подальшої інтеграції у пристрої накопичення енергії, сенсорні платформи та каталізatori.

У подальших дослідженнях планується здійснити розширену електрохімічну характеристику зразків з метою визначення питомої ємності, стабільності під час циклування та електрохімічного імпедансу. Ці експерименти дозволять підтвердити придатність наноструктур CuO як активного матеріалу для електродів у суперконденсаторах або акумуляторах. Також передбачається тестування отриманих структур у якості чутливих шарів для газових сенсорів (наприклад, до NO₂, NH₃, CO), що дасть змогу оцінити чутливість, швидкість відгуку та селективність матеріалу. Для кількісної оцінки доступної поверхні будуть проведені дослідження пористості, а також розподілу пор за розміром. Додаткову увагу буде приділено поглибленому аналізу фазового складу (XPS, SAED, розширене XRD) з акцентом на ступінь окиснення Cu та фазову чистоту. Крім того, планується функціоналізація поверхні наноструктур шляхом нанесення благородних металів або органічних молекул для розширення можливостей у біосенсорних та фотокаталітичних застосуваннях. З метою забезпечення довготривалої стабільності наноструктур буде проведено термічний аналіз (TGA/DSC) та SEM/TEM-дослідження після електрохімічних і термічних навантажень. Таким чином, подальші експерименти мають на меті повноцінно охарактеризувати функціональні властивості отриманого матеріалу та оптимізувати його для цільових практичних застосувань.

Перелік посилань

1. Controlled synthesis of uniform ultrafine CuO nanowires as anode material for lithium-ion batteries [Text] / F. Wang, W. Tao, M. Zhao et al. // Journal of Alloys and Compounds. – 2011. – Vol. 509, No. 41. – P. 9798–9803. doi: <https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2011.07.109>.
2. Steinhauer, S. Gas Sensors Based on Copper Oxide Nanomaterials [Text] : A Review / S. Steinhauer // Chemosensors. – 2021. – Vol. 9, No. 3. – Article No. 51. doi: <https://doi.org/10.3390/chemosensors9030051>.
3. Kumar, S. G. Zinc oxide based photocatalysis: tailoring surface-bulk structure and related interfacial charge carrier dynamics for better environmental applications [Text] / S. G. Kumar, K. S. Rao // RSC Advances. – 2015. – Vol. 5. – P. 3306–3351. doi: <https://doi.org/10.1039/C4RA13299H>.