

УДК: 621.396

DOI 10.36910/6775.24153966.2020.70.7

О.М. Яремко¹, В.Т. Адамів², І.М. Теслюк², Б. Ольховик¹, А.С. Андрущак¹, Я.Й. Щур³НУ «Львівська політехніка»¹Інститут фізичної оптики імені О.Г. Влоха²Інститут фізики конденсованих систем³**ДОСЛІДЖЕННЯ НАНОКРИСТАЛІТІВ, ОТРИМАНИХ НА ОСНОВІ НАНОПОРИСТИХ
МЕМБРАН Al_2O_3 ІЗ НАСИЧЕНИХ ВОДНИХ РОЗЧИНІВ KH_2PO_4**

Розглядається питання отримання та використання нанокompозитних матеріалів для радіомереж оптичної та терагерцової смуг частот. Приготовлені нанопористі структури анодированого оксиду алюмінію Al_2O_3 (АОА) діаметром пор 40 та 75 нм. Отримано та проведено дослідження кристалічного матеріалу KH_2PO_4 (KDP) у вигляді нанопроводів та нанотрубок при різних варіантах росту на основі мембрани Al_2O_3 і насиченого водного розчину KDP.

Ключові слова: нанокompозит, нанокристаліт із KH_2PO_4 , мембрана Al_2O_3 .

**А.Н. Яремко, В.Т. Адамів, І.М. Теслюк, Б. Ольховик, А.С. Андрущак, Я.Й. Щур
ИССЛЕДОВАНИЕ НАНОКРИСТАЛЛИТОВ, ПОЛУЧЕННЫХ НА ОСНОВЕ
НАНОПОРИСТЫХ МЕМБРАН Al_2O_3 ИЗ НАСЫЩЕННЫХ ВОДНЫХ РАСТВОРОВ
 KH_2PO_4**

Рассматривается вопрос получения и использования нанокompозитных материалов для радиосетей оптической и терагерцового полос частот. Приготовленные нанопористые структуры анодированного оксида алюминия Al_2O_3 (АОА) диаметром пор 40 и 75 нм. Получено и проведено исследование кристаллического материала KH_2PO_4 (KDP) в виде нанопроводов и нанотрубок при различных вариантах роста на основе мембраны Al_2O_3 из насыщенного водного раствора KDP.

Ключевые слова: нанокompозит, нанокристаллитиз KH_2PO_4 , мембрана Al_2O_3 .

**A.N. Yaremko, V.T. Adamiv, I.M. Teslyuk, B. Olkhovik, A.S. Andrushchak, Ya.Y. Schur
RESEARCH OF NANOCRYSTALLITES OBTAINED ON THE BASIS OF NANOPOROUS
 Al_2O_3 MEMBRANES FROM SATURATED AQUEOUS KH_2PO_4 SOLUTIONS**

The issue of obtaining and using nanocomposite materials for radio networks of optical and terahertz frequency bands is considered. Nanoporous structures of anodized alumina Al_2O_3 (AOA) with a pore diameter of 40 and 75 nm were prepared. The study of crystalline material KH_2PO_4 (KDP) in the form of nanowires and nanotubes at different growth variants based on Al_2O_3 membrane and saturated aqueous KDP solution was obtained and performed.

Keywords: nanocomposite, KH_2PO_4 nanocrystallite, Al_2O_3 membrane.

Постановка проблеми. Розвиток сучасних технологій відкриває нові можливості для об'єднання досягнень у різних галузях виробництва та досліджень. Передача мультимедійних даних призвела до появи мереж зі стандартами 100G та 40G Ethernet. Сучасні безпроводні радіомережі практично повністю використовують як ліцензовані, так і неліцензовані смуги пропускання. Для забезпечення високошвидкісної передачі даних по радіоканалу використання багатопозиційної модуляції було недостатньо. Розробники прийнятно-передаючого обладнання все більше орієнтуються на субтерагерцеві і терагерцеві діапазони (від 60 ГГц до 3000 ГГц), що не вимагає ліцензування. Ще недавно не було технологічної бази для випуску таких пристроїв. Специфіка розповсюдження радіохвиль у цій смузі тягне за собою ряд обмежень, пов'язаних зі швидкістю потоку та погодними умовами. Значне ослаблення радіохвиль у повітрі зменшує діапазон прийому. Вищі вимоги до антен також зростають завдяки стабілізації положення основної частини. До переваг можна віднести зниження інтерференційних та дифракційних рівнів, через зменшення діапазону прийому можливе збільшення кількості станцій у комірці, зменшення розміру антен. Представлені проблеми вказують на необхідність розробки нових матеріалів для антен, модуляторів та перетворювачів з використанням нанотехнологій [1].

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Великий інтерес до наноструктур є результатом їх численних потенційних застосувань у різних областях, таких як біомедичні науки, електроніка, оптика, магнетизм, накопичення енергії та електрохімія. Виявлено, що ультрамалі наноструктурні блоки мають широкий спектр посиленних механічних, оптичних, магнітних і електричних властивостей порівняно з грубозернистою речовиною того ж хімічного складу.

Ряд робіт, що стосуються нанопористого оксиду алюмінію Al_2O_3 (АОА), пропонують різні шляхи до його застосування [2-8]. Ці застосування беруть до уваги різні особливості АОА: упорядкована структура, оптичні та фізичні властивості, біосумісність. Великий прикладний

інтерес структури, засновані на АОО, представляють в галузі біомедицини, створення датчиків і фільтрів, оптики, мікро- і наноелектроніки.

Матричний синтез є популярним підходом до отримання наноматеріалів через свою простоту і дешевизну [3-9]. В якості матриці АОО має кілька переваг: можливість контролю геометричних параметрів пористої структури, періодичність і висока пористість, циліндрична форма пор і високе аспектне співвідношення, АОО можна легко розчинити, не пошкоджуючи наноструктури всередині пор [9]. Залежно від того, які умови будуть підібрані, можна домогтися часткового або повного заповнення пор, отже можна отримувати квантові точки і нанотрубки / наностержні різних форм і розмірів [10,11] (рис. 1). Процес впровадження в пори частинок металів, оксидів металів, напівпровідників, полімерів або біологічних сполук і подальше розчинення підкладки оксиду алюмінію є одним з найбільш простих методів створення масивів наноматеріалів. Ряд технологій дозволяють досягти подібних результатів [9,12].

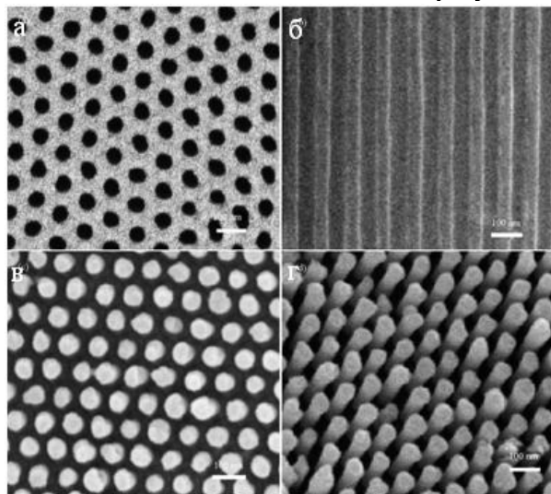


Рис. 1. Фотографії із електронного мікроскопа: а) зверху і б) збоку матриці АОО та масиву платинових нанониток - в) зверху і г) під нахилом, отриманих електроосадженням в пори матриці АОО [9].

Постановка завдань. Нові вимоги, які встановлюють сучасні стандарти телекомунікаційних мереж, змушують розробляти нові матеріали та пристрої для суб- і терагерцових діапазонів [13,14]. Це стало можливим завдяки технологічному прориву у виробництві нанокompозитних матеріалів і стосується створення та випробування елементів та технології для електронних, фотонних та гібридних пристроїв нового покоління. Існують усталені методи створення наноструктур, які дозволяють задавати форму, геометричні розміри, хімічний склад та легування конструкцій. Але все ще існують проблеми нерівномірного утворення наноматриць, росту нанокристалів, появи внутрішніх домішок та домішок, що може призвести до виникнення різних дефектів на поверхні та в товщі нанокompозитів. Важко заздалегідь визначити вихідні характеристики та особливості нанокompозитів за рахунок використання нових методів їх виробництва. Тому необхідно вивчити механічні, електричні, магнітні, частотні, оптичні та акустичні властивості нанокompозитів, що є актуальною проблемою, що визначає сфери їх подальшого використання. Наприклад, особливий інтерес представляє розробка нових матеріалів і методів генерування та виявлення суб- та терагерцевих випромінювань у нових безпровідних стандартах. Існуючі джерела випромінювання не можуть повністю вирішити проблему [15].

Для імпульсного когерентного генерування електромагнітних хвиль діапазону терагерцового діапазону використовуються лінійні ефекти в напівпровідниках, а також ефект нелінійного оптичного випрямлення.

Ефект оптичної реформації було виявлено на кристалі KN_2PO_4 (KDP) [16] і пізніше у нелінійних оптичних кристалах SiO_2 [17], LiNbO_3 [18] та LiTaO_3 [19].

Значні результати були досягнуті за допомогою нанопроводів, квазівимірних наноструктур, довжина яких значно перевищує їх діаметр, для фотонних і оптоелектронних пристроїв, таких як світлодіоди [20], лазери [21-23], електронні випромінювачі [24] та фотоприймачі [25].

Як відзначено вище, пористий Al_2O_3 часто використовується як наноматриця для нанопроводів. Цей матеріал відрізняється високою якістю, що дозволяє використовувати його в

субміліметрових і міліметрових діапазонах. Кристали KDP у порах наноматриці вносять зміни до вже відомих властивостей кожного компонента.

Розробка ефективних під- і терагерцевих приймачів та джерел, заснованих на здатності керувати електромагнітними полями при використанні нанокомпозитів, часто обмежується технологічними проблемами [12].

Утворення наноматриць залежить від технологічного процесу їх виготовлення, що забезпечує періодичності структури, відкритість або закритість нанопор, їх форму. Матеріал наноматриці визначає не тільки діапазон застосування, оптичний чи радіо, але й лінійні або нелінійні властивості, придатність до того чи іншого способу наповнення кристалами.

Для проведення досліджень оптичних властивостей, має бути дотримано ряд вимог, щодо геометричних розмірів та чистоти обробки поверхні. В результаті утворені структури можуть бути використані в якості активного середовища в оптичному діапазоні.

Нанокомпозити заслуговують уваги у квазіоптичному діапазоні, де за допомогою внесення неоднорідностей, наприклад зміни діелектричної провідності, можливе утворення сповільнюючих структур, що створює умови для побудови антен та фільтрів.

В дослідженнях було використано водорозчинний кристал сегнетоелектрик KH_2PO_4 , наноматрицю було виготовлено з тонких листів алюмінію методом анодування [1].

Викладення основного матеріалу. Існує зв'язок між геометрією структури нанопористого Al_2O_3 з його фізичними характеристиками. У зв'язку з цим найбільше АОА знаходить застосування в якості матриці для створення елементів мікро- і оптоелектроніки. Змінюючи режими анодування і варіанти подальшої модифікації структур, можна отримувати АОА з різними характеристиками і властивостями [12,26-29].

Нами були приготовлені нанопористі структури Al_2O_3 із полірованого японського алюмінію з діаметром пор 40 та 75 нм. Існують різні методики отримання впорядкованих структур шляхом анодування поверхні алюмінію. Для того, щоб отримувати оксидні шари в контрольованих умовах застосовують анодне окислення (анодування) [1]. Це електрохімічний процес, що забезпечує утворення оксиду на поверхні металів за рахунок анодної поляризації в кисневмісних водних середовищах з іонною провідністю [12].

Отже, мембрани АОА виготовляються шляхом електролітичної пасивації тонких (0,2 – 1 мм) листів високої чистоти (> 99,999%) алюмінію в кислому розчині. Заготовки вирізаються відповідно до форм, які в подальшому використовуються при проведенні хімічних маніпуляцій для отримання нанопористої структури. Поверхні заготовок проходять очистку. Проводиться електрохімічне полірування алюмінію з використанням розчину HClO_4 та $\text{C}_2\text{H}_5\text{OH}$.

В подальшому застосовується процес двоступеневого анодування. Процес використовується для досягнення високо впорядкованих і глибоких пор без необхідності попереднього нанесення картини на поверхню. Обидва кроки анодування виконуються в однакових умовах. Перший крок закінчується, коли струм анодування наближається до стійкого стану. Після анодування вимірюється товщина оксидного шару за допомогою інфрачервоного вимірювача товщини. Якщо товщина не достатня, анодування продовжується. Коли анодування завершується, шар алюмінію під оксидом видаляють, використовуючи водний розчин CuCl_2 та HCl . Оскільки реакція з алюмінієм надзвичайно екзотермічна, розчин постійно охолоджують, використовуючи криогенну установку.

Оксидний шар після вилучення алюмінію виглядає, як матриця з порами із одного боку, що проникають через більшу частину її товщини, але закривається із сторони, що контактувала з алюмінієм. Ця сторона матриці протравлюється 10% H_3PO_4 при 30°C . Мембрани ретельно промиваються у деіонізованій воді та просушуються [30].

Для прикладу нижче приведені зображення приготовленої пористої структури Al_2O_3 в полі зору силового електронного мікроскопа (СЕМ) (рис. 2).

Процес підготовки насичених водних розчинів, для росту нанокристалів KDP у пористих матрицях Al_2O_3 , полягає у перекристалізації закупленої сировини KH_2PO_4 (KDP) і подальшого отримання насиченого розчину при температурі росту.

Отримані в результаті перекристалізації кристали KDP засипалися у скляну ємність з деіонізованою водою. Після цього ємність з розчином розміщала на магнітній мішалці з контрольованим підігрівом при $T=57^\circ\text{C}$, до повного розчинення кристалів [1]. Далі розчин переміщався у водяний термостат (температура стабілізації $\pm 0,05^\circ\text{C}$) при температурі 54°C для випаровування зі швидкістю менше 1 мм/добу, до випадання в осад перших кристалів.

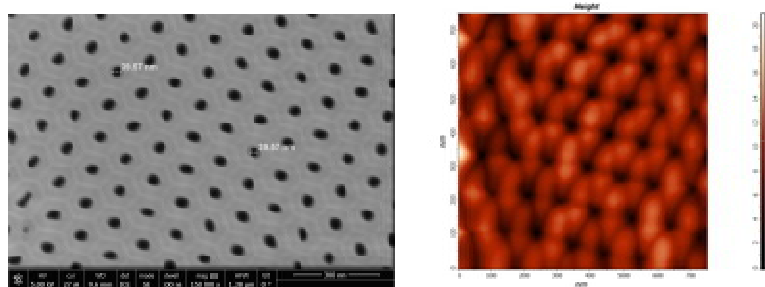


Рис. 2. Мембрана Al_2O_3 з діаметром нанопор 40 нм, виготовлена із полірованого алюмінію (фото із СЕМ)

В отриманий насичений розчин були занурені дві пористі матриці Al_2O_3 з діаметром пор 40 та 75 нм в окремих контейнерах. Стабілізуємо всю систему по температурі впродовж 4-5 год. Понижаємо температуру розчину на 4°C до 50°C . В розчині спостерігалось наростання вже зароджених кристалів KDP. Через 3 години мембрани вийняли, протерли двічі тканиною, змоченою деіонізованою водою і витерли насухо. Отримані зразки витримали при $80-100^\circ\text{C}$ впродовж доби [12].

Після ростових операцій, проведених із мембранами АОА у насиченому водному розчині KDP, було здійснено цикл досліджень по візуалізації та контролю наповненості пор кристалами KDP на скануючому електронному мікроскопі марки FEI з роздільною здатністю від 0,8 нм.

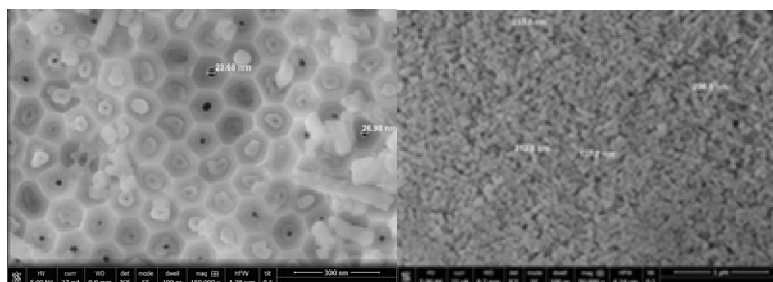


Рис. 3. Фото наноструктур, зроблені на СЕМ: KDP - Al_2O_3 - 40 нм – 3 год росту

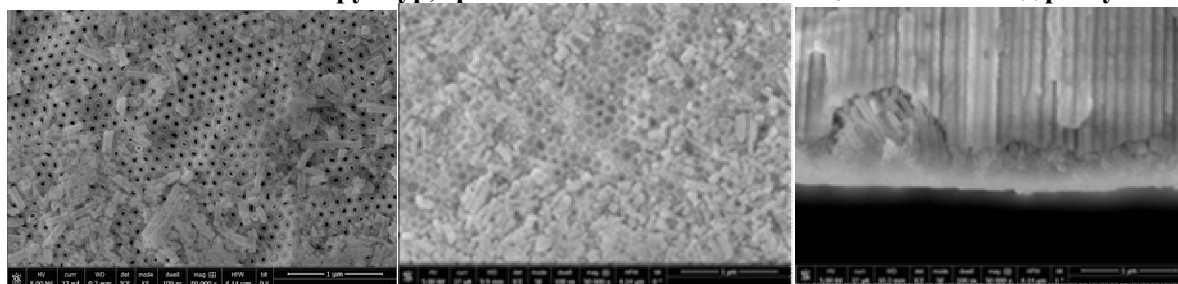


Рис. 4. Фото наноструктур зроблені на СЕМ: KDP - Al_2O_3 - 75 нм – 3 год росту.

В результаті досліджень підтверджено отримання структур у вигляді наностержнів/нанотрубок на електронному мікроскопі – рис. 3 і 4. Використані режими такого наповнення нанопористих структур Al_2O_3 із насичених водних розчинів KDP призводять до утворення наностержнів/нанотрубок, що і є підтвердженням на вказаних рисунках.

Проведені також дослідження зразків, отриманих при більших часах росту нанокристалітів KDP. Морфологія поверхні та якість всіх зразків досліджувалися на скануючому електронному мікроскопі. На рис. 5 (а) зображена поверхня чистого оксиду алюмінію Al_2O_3 .

Поверхня Al_2O_3 складається з кластерів з квазіперіодичною структурою пор. У зразку $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{KDP}$ - 4.5 год. (рис. 5, б), який був у насиченому розчині KDP протягом 4.5 годин, діаметр пор стає трохи меншим в порівнянні з чистим зразком Al_2O_3 . У зразку $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{KDP}$ - 24 год. (рис. 5, в), який був у насиченому розчині KH_2PO_4 протягом 24 год, діаметр пори стає меншим навіть в порівнянні з $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{KDP}$ - 4,5 год., протягом доби вдалося провести повне заповнення структури. У той же час на поверхні зразка з'являється багато мікрочисталів. Грунтуючись на нашому досвіді

росту кристалів, можна запропонувати наступний шлях утворення нанокристалів KDP. На початковому етапі, після занурення мембрани Al_2O_3 в насичений розчин KH_2PO_4 , деякі зародки кристалів KDP, що з'являються поблизу стінок пор, утворюючи таким чином нанотрубки KDP з порожнинами у центрі. Як видно з рис. 6, а, нанотрубки циліндричної форми ростуть перпендикулярно пластині Al_2O_3 . На цьому етапі нанотрубки ізольовані одна від одної і не створюють загальної агрегації. Цей процес значно змінюється при збільшенні часу витримки. Після приблизно 20 годин витримки мембран Al_2O_3 в насиченому розчині KH_2PO_4 утворені кристали (KDP) заповнюють весь простір в порах, тим самим створюючи практично рівномірну агрегацію. У той же час внутрішній діаметр порожніх нанотрубок стає меншим, зменшуючись в деяких з них практично до нуля, перетворюючи таким чином нанотрубки в наностержні/нанопроводи (рис. 6, б) [12].

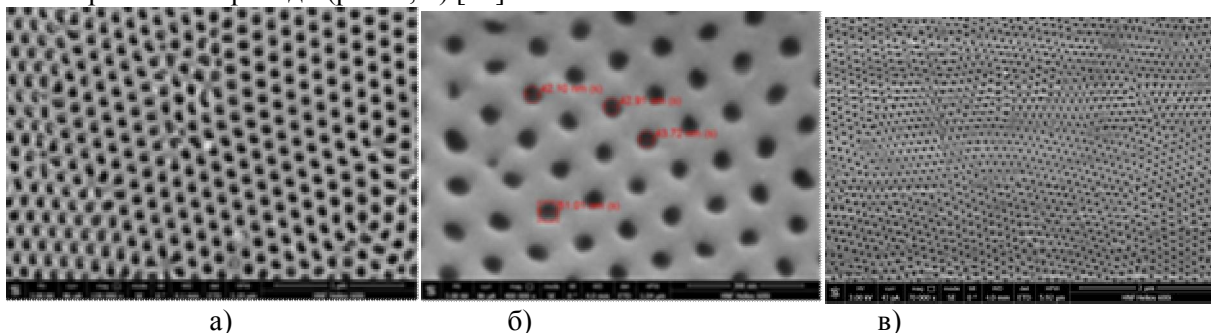


Рис. 5. Типові структури у трьох зразках на знімках з СЕМ: (а) Al_2O_3 , (б) $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{KDP}$ - 4,5 год., (в) $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{KDP}$ - 24 год.

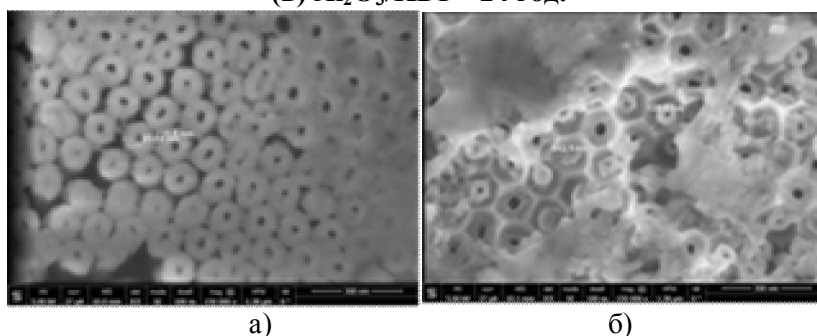


Рис. 6. Динаміка росту нанотрубок KDP в пористій матриці з анодованого алюмінію: (а) після 4,5 годин витримки в насиченому розчині KH_2PO_4 , (б) після 24 годин витримки в насиченому розчині KH_2PO_4 .

Для дослідження не тільки поверхні наноконкомпозиту $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{KDP}$, але і його просторової внутрішньої морфології було застосовано технологію фокусованого іонного пучка (ФІП).

Замість електронів в техніці СЕМ, метод ФІП використовує сфокусований пучок іонів, в нашому випадку високоенергетичних атомів галію, щоб візуалізувати внутрішню морфологію досліджуваного матеріалу. Пучок високої енергії атомів галію потрапляє на зразок і руйнує/подрібноє поверхню. Знищення поверхні матеріалу залежить від енергії іонного пучка і часу експозиції. Проводячи сканування іонним пучком в вибраних місцях поверхні, можна отримати унікальну інформацію про морфологію внутрішньої структури досліджуваного матеріалу. Значення цього методу особливо велике для зондування композиційних матеріалів, що складаються з речовин різного хімічного і агрегатного стану (в нашому випадку аморфного анодованого алюмінію і кристалічного KH_2PO_4) [12].

На рис. 7 чітко видно наявність нанотрубок KDP, утворених в процесі витримування матриці АОА в насиченому водному розчині KH_2PO_4 протягом 24 годин. Те, що в процесі створення наноконкомпозиту $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{KDP}$ утворюються саме нанотрубки чи наностержні KDP (в залежності від часу витримування зразка АОА в насиченому розчині KDP) яскраво свідчить рис. 7 (а) [12]. Як бачимо зі сколу зразка (рис. 7 (б)), він складається з конгломерату нанотрубок/наностержнів діаметр і просторове розташування яких задаються структурою пор “материнської” матриці АОА. При цьому, тривале витримування (>20 годин) матриці АОА в насиченому розчині KDP приводить до руйнування самої матриці АОА.

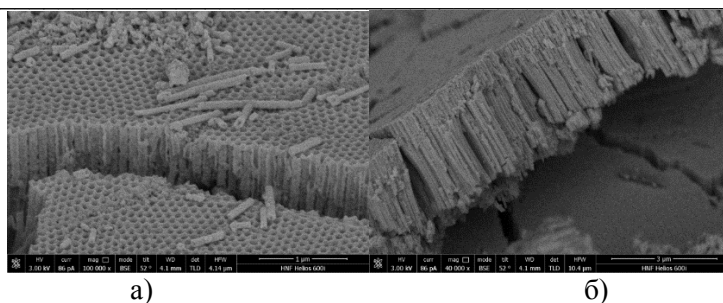


Рис. 7. (а), (б) - СЕМ-зображення нанокompозита $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{KDP}$ після 24 годин витримання матриці анодованого алюмінію Al_2O_3 в насиченому розчині KH_2PO_4 .

Висновки. Отримані доброї якості наноструктури анодованого оксиду алюмінію із розміром пор 40 та 75 нм. Регулюючи час витримки нанопористих матриць АOA у насиченому водному розчині KH_2PO_4 можна практично отримувати кристалічні сполуки у вигляді наностержнів чи нанотрубок, що підтверджується отриманими зображеннями на електронному мікроскопі та з допомогою методики фокусованого іонного пучка. Збільшення часу кристалізації призводить до отримання в основному наностержнів відповідної структури (KDP). Залежно від того, які умови будуть підібрані, можна домогтися часткового або повного заповнення пор, а, отже, можна отримувати нанотрубки/наностержні різних форм і розмірів. В результаті утворені структури можуть бути використані в ролі активного середовища в оптичному діапазоні. Саме нанокompозити варті уваги у квазіоптичному діапазоні, де за допомогою внесення неоднорідностей, наприклад зміни діелектричної провідності, можливе утворення сповільнюючих структур, що створює умови для побудови антенно-фідерних пристроїв радіомереж.

Подяка. Дані результати досліджень є частиною проекту, який отримав фінансування від програми досліджень та інновацій Європейського Союзу "Горизонт 2020" в рамках грантової угоди Марії Склодовської-Кюрі № 778156, а також від Міністерства освіти і науки України в рамках проекту "Нанокристаліт" № 0119U002255.

Література

1. Yaremko O., Andrushchak N., Adamiv V., Rosa T., Lelonek M., Andrushchak A. / Research of Nanocomposite Materials for Telecommunication Networks // 3rd International Conference on Advanced Information and Communications Technologies, AICT 2019 – Proceedings, Pages 96-100.
2. Atkinson R., Hendren W.R., Wurtz G.A. [etal.] / Anisotropic optical properties of arrays of gold nanorod embedded in alumina // Proceedings of SPIE. – 2006. – Vol. 73. – №23. – P.2354021–235402-8.
3. Li J.-B., Yu Y., Peng X.-N. [etal.] / Controlled growth of multi-photon luminescence of hexagonal arrays of Au nanoparticles on anodized aluminum oxide templates // Journal of Applied Physics. – 2012. – Vol. 111. – №12. – P.123110.
4. Sangar A., Merlen A., Torchio P. [etal.] / Fabrication and characterization of large metal nanodots on porous organic/inorganic hybrid solar cells using anodic aluminum oxide templates // Solar Energy Materials and Solar Cells. – 2013. – Vol. 117. – P.657–662.
5. Giallongo G., Durante C., Pilot R. [etal.] / Growth and optical properties of silver nanostructures obtained on connected anodic aluminum oxide templates // Nanotechnology. – 2012. – Vol. 23. – №32. – P.325604.
6. Yuan Z.H., Huang H., Fan S.S. / Regular Aluminan nanorod arrays // Advanced Materials. – 2002. – Vol. 14. – №4. – P.303–306.
7. Huczko A. / Template-based synthesis of nanomaterials // Applied Physics A. – 2000. – Vol. 70. – P.365–376.
8. Lai M., Riley D.J. / Templated electrochemical synthesis of nanomaterials and porous structures // Journal Colloid Interface Science. – 2008. – Vol. 323. – №2. – P.203–212.
9. MdJani A.M., Lolic D., Voelcker N.H. / Nanoporous anodic aluminum oxide: Advances in surface engineering and emerging applications // Progress in Materials Science. – 2013. – Vol. 58. – №5. – P.636–704.
10. Gerein N.J., Haber J.A. / Effect of electrodeposition conditions on the growth of high aspect ratio copper nanowires in porous aluminum oxide templates // The Journal of Physical Chemistry B. – 2005. – Vol. 109. – №37. – P.17372–17385.
11. Piao Y., Lim H., Chang J.Y. [etal.] / Nanostructure material synthesis by use of ordered porous alumina membranes // Electrochimica Acta. – 2005. – Vol. 50. – №15. – P.2997–3013.

12. Yaremko O., Kyryk M., Adamiv V., Zhukovska D., Teslyuk I., Vistak M., ShchurYa., Vitusevich S., Neumann E., Andrushchak A. / Manufacture technology of nanocrystallite sbase don Al_2O_3 nanoporous membranes with saturate daqueous solution KH_2PO_4 fortele communication systems // 2020 IEEE 15th International Conferenceon Advanced Trendsin Radioelectronics, Telecommunications and Computer Engineering (TCSET), Pages 882-885, 2020.
13. Mittleman D.M., Ma J., Karl N.J., Bretin S., Ducournau G. / Frequency- division multiplex erand demultiplexer forterahe rtzwire lesslinks // Nature Communications, 2017, V. 8, - P. 729.
14. Singh P.K., Sonkusale S. / High Speed Terahertz Modulatoron the Chip Basedon Tunable Terahertz Slot Waveguide // Scientific Reports, 2017, V. 7, - P.40933.
15. Tamaro S. / High densi tyterahertz frequency combproduce dby coherent synchro tronradiation // Nat. Commun, 2015, V. 6. - P. 7733.
16. Bass M. / Opticalrectification // Phys. Rev. Lett, 1962, V. 9, № 11. - P. 446-448.
17. Zernike F., Berman P.R. / Generation off arinfrare das a difference frequency // Phys. Rev. Lett. - 1965. - T. 15. - № 26. - P. 999-1001.
18. Yang K.H., Richards P.L., Shen Y.R. / Generation of Far-inf raredradiation bypicosec on dlightpulsesin $LiNbO_3$ // Appl. Phys. Lett, 1971, V. 19, № 9, - P. 320-323.
19. Hu B.B. / Free-spaceradiationfromelectro-opticcrystals // Appl. Phys. Lett, 1990, V. 56, № 6, - P. 506-508.
20. Bao W., etal. / Carrier Localization Effectsin In GaN/GaN Multiple-Quantum-Wells LED Nanowires: Luminescence Quantum Efficiency Improvementand “Negative” ThermalActivationEnergy // Sci. Rep, 2016, V. 6, - P. 34545.
21. Sidiropoulos P.H., Röder, R. Geburt S., Hess O., Maier S.A., Ronning C., Oulton R.F. / Ultrafastp lasmonic an owirelas ersnear the surface plasmon frequency // Nature Physics, 2014, V. 10. - P. 870-876.
22. Yan R., Gargas D., Yang P. / Nanowirephotonics // NaturePhotonics, 2009, V. 3, - P. 569-576.
23. Vlokh R., DyachokYa., Krupych O., BurakYa., Martynuk-Lototska I., Andrushchak A., Adamiv V. / Studyoflaser-induceddamageoffboratecrystals // Ukr. J. Phys.Opt.-2003, V.4, N.2, - P.101-104.
24. Zhang H., etal. / Anultrabrightandmonochromaticelectronpointsourcemadeof a LaB_6 nanowire // Nat. Nanotechnol, 2015, V. 11, № 3, - P. 273-279.
25. Fan P., Chettiar U.K., Cao L., Afshinmanesh F., Engheta N., Brongersma M.L. / Aninvisible metal-semicon ductor photodetector // Nature Photonics, 2012, V.6, -P. 380-385.
26. Ильин Д.О. / Синтез и люминесцентны есвойства нанопористых структур анодированного оксида алюминия // Магистерская диссертация. Екатеринбург – 2015.
27. Kityk A.V., Andrushchak A., ShchurYa., Adamiv V.T., Yaremko O., Lelonek M., Vitusevich S.A., Kityk O., Wielgosz R., Piecek W., Busch M., Sentker K., Huber P. / Mesoporous Alumina-and Silica-Based Crystalline Nanocomposites with Tailored Anisotropy: Methodology, Structure and Properties // 2019 IEEE 21st International Conferenceon Transparent Optical Networks (ICTON), Pages 1-4.
28. ShchurYa., Andrushchak A.S., Strelchuk V.V., Nikolenko A.S., Adamiv V.T., Andrushchak N.A., Göring P., Huber P., Kityk A.V. / KH_2PO_4 + HostMatrix (Alumina / SiO_2) Nanocomposite: RamanScatteringInsight // 2019 IEEE 21st International Conferenceon Transparent Optical Networks (ICTON) Pages 1-4.
29. ShchurYa., Adamiv V., Andrushchak A., Strelchuk V., Nikolenko A., Andrushchak N., Goering P., Huber P., Kityk A. / Ramanscatteringstudyof KH_2PO_4 + hostmatrix Al_2O_3 of SiO_2 nanocomposite // Conference programand boo kofabstracts P. 2-5, “1st International Conferenceon Innovative Materials and Nanoengineering (IMNE-2019)”, August, 2019, Brenna, Poland.
30. Андрущак А.С., Адамів В.Т., Щур Я.Й., Яремко О.М., Андрущак Н.А., Гьорінг П., Вітусевич С., Кітик А.В. / До проблеми синтезу кристалічних нанокompозитів на основі пористих матриць Al_2O_3 заповнених нанокристалітами KH_2PO_4 // Матеріали III міжнародної наукової конференції Актуальні проблеми фундаментальних наук, Луцьк_Світязь 01-05 червня 2019, - С.13-16.

Рецензент:

Провідний науковий співробітник Національного університету «Львівська політехніка», д.х.н., доцент Заїченко Олександр Сергійович/