

Б.К. Остафійчук¹, Г.М. Колковська¹, І.П. Яремій¹, Б.І. Рачій¹,
П.І. Колковський¹, Н.Я. Іванічок¹, С.І. Яремій²

Синтез та електрохімічні властивості нанорозмірного перовскитного матеріалу LaMnO_3

¹ДВНЗ “Прикарпатський національний університет імені Василя Стефаника”, Івано-Франківськ, Україна,
Pkolkovskyy@gmail.com

²Івано-Франківський національний медичний університет, вул. Галицька, 2, Івано-Франківськ, 76018, Україна

В даній роботі було приготовлено перовскитний матеріал LaMnO_3 за допомогою золь-гель методу за участі автогоріння. Згідно X-променевого фазового аналізу встановлено, що отриманий матеріал складається з однієї фази LaMnO_3 (просторова група Rm-3m). Середній розмір ОКР досліджуваного матеріалу 24 нм. За наближенням, що частинки сферичної форми розрахований середній розмір частинки становить 40 - 60 нм. Питома площа поверхні матеріалу складає 42 м²/г. Здійснено електрохімічні дослідження з використанням нанорозмірного порошку LaMnO_3 у якості катодного матеріалу для електрохімічних конденсаторів. Досліджуваний матеріал LaMnO_3 показав питому ємність 40 Ф/г при розряді джерела до 1 В.

Ключові слова: золь-гель метод, структура перовскиту, КОН електроліт, питома ємність.

Подано до редакції 30.04.2020; прийнято до друку 15.06.2020.

Вступ

Велика увага на сьогоднішній день приділена розробці нових та вдосконаленні вже існуючих електрохімічних джерел струму. Одними з найоптимальніших накопичувачів електричної енергії є електрохімічні конденсатори (ЕК). Для того щоб використовувати ЕК на практиці потрібно значно збільшити значення їх питомих енергій та потужностей і здешевити технологічну вартість системи. Цим вимогам відповідають гібридні електрохімічні конденсатори, які являють собою батарейно-конденсаторну електрохімічну систему, що дозволяє вирішити проблеми збільшення питомої енергії ЕК та питомої потужності і обмеженості циклів заряд/розряду у літій-іонних джерелах струму [1, 2].

Збільшення ємності та стабільності заряд-розрядного циклу є основними причинами для пошуку нових електродних матеріалів для електрохімічних конденсаторів. Одними з матеріалів,

які відповідають цим якостям є матеріали зі структурою перовскиту загальної формули ABO_3 , де в позиції А слугують лужноземельні метали, наприклад такі як Лантан, а в позиції В – перехідні метали, що мають 6-кратну координацію [3]. Особливістю перовскитної структури є її здатність до можливих комбінацій із фрагментами інших структур, в результаті чого можуть виникати нові каркасні або шаруваті композитні структури і суттєво покращуватися їхні характеристики [4]. Також матеріали цього типу широко вивчаються як функціональні матеріали електронної техніки, лазерні матеріали, сенсори, каталізатори [5] та матеріали для сонячних елементів [6].

Стан окиснення катіонів А і В залежить від структури перовскитного матеріалу і дозволяє змінювати властивості даного матеріалу [7]. Зміна стану окиснення оксиду металу в структурі перовскиту дозволяє використовувати ці матеріали як електродні матеріали для суперконденсаторів [8]. Одними з кращих оксидів перехідних металів є

наночастинки MnO_2 , які володіють високою термічною та структурною стійкістю, низькою вартістю та простотою обробки. [8, 9, 10]. Останнім часом значна увага приділяється перовскитам, як електродним матеріалам для суперконденсаторів, завдяки механізмам накопичення заряду киснево-аніонної інтеркаляції, що суттєво впливає на електрохімічні показники електродів [11]. Серед найбільш перспективних катодних матеріалів цього типу є $LaMnO_3$, який характеризується екологічною й економічною доступністю та достатньо високими електрохімічними показниками [12, 13]. Вакансія кисню є важливою характеристикою структури перовскитного матеріалу і значно впливає на показники питомої ємності наночастинок $LaMnO_3$ [12]. Тому ці матеріали завдяки кисневим вакансіям та швидкій іонній дифузії набули застосування в якості електродного матеріалу у накопичувачах енергії [14].

Також виявлено, що незначне заміщення позиції А в перовскитних системах $LaMnO_3$ катіоном нижчої валентності (Sr^{2+}) створює електронні діри в позиції В. В перовскитних системах $LaMnO_3$ для підтримки умови електронейтральності Mn^{3+} можна окислити до Mn^{4+} , що призводить до підвищення електронної провідності [15, 16] і покращує електрохімічні показники.

Електрохімічні властивості перовскитного матеріалу залежать також від концентрації та типу іонів електроліту. При збільшенні концентрації іонів електроліту спостерігається збільшення вакансій кисню, що в свою чергу посилює псевдоконденсаторну властивість матеріалів зі структурою перовскиту. [17, 18].

Матеріали зі структурою перовскиту здатні добре зберігати енергію завдяки оборотним фарадеївським процесам [12, 19]. Проте, основним недоліком цих матеріалів, зокрема $LaMnO_3$, як електродного матеріалу для електрохімічних конденсаторів є низька провідність та короткий цикл заряд/розряд [13, 19].

I. Методика експерименту

Складний оксид $LaMnO_3$ був отриманий золь-гель методом за участі автогоріння. В якості реагентів для синтезу виступали нітрат лантану ($La(NO_3)_3 \cdot 6H_2O$), нітрат марганцю ($Mn(NO_3)_2 \cdot 6H_2O$) та лимонна кислота ($C_6H_8O_7 \cdot H_2O$). Для проходження стехіометричної окислювально-відновної реакції між паливом та окислювачем, молярне співвідношення нітратів металів до лимонної кислоти становило 1:1.

На першому етапі синтезу відповідну кількість нітратів металів та лимонної кислоти розчиняли в дистильованій воді. Для встановлення рівня $pH = 7$ в отриманий розчин додавали невелику кількість 25 %-го водного розчину аміаку, отримуючи при цьому розчин молочно-рожевого кольору. Отриманий золь поміщали в піч при 400 К впродовж 10 - 12 годин до повного висихання. Під час процесу зневоднення між лимонною кислотою та нітратами

металів відбулася реакція поліконденсації з утворенням гелю. Потім отриманий матеріал нагрівали до 570 К. Через кілька хвилин відбувся процес автогоріння ксерогелю, в результаті чого було отримано сипучий продукт $LaMnO_3$.

Мікроструктуру зразків $LaMnO_3$ досліджували за допомогою скануючого електронного мікроскопа (СЕМ).

Х-променевий структурний аналіз проводився за допомогою дифрактометра ДРОН 3.0 з використанням $Cu(K\alpha)$ -випромінювання. Обробка дифрактограм проводилась шляхом повнопрофільного аналізу методом Рітвельда за допомогою програми «FullProf». З аналізу даних Х-променевого структурного аналізу визначено розмір нанокристалітів досліджуваного зразка та його фазовий склад.

Морфологічні характеристики зразків визначались за допомогою аналізатора сорбції газів NOVA Quantachrome 2200e шляхом аналізу ізотерм сорбції азоту при температурі $T = 77$ К. Суть досліджень полягає у визначенні об'єму адсорбованого (десорбованого) азоту досліджуваним зразком при температурі його кипіння і подальшому розрахунку його морфологічних характеристик різними методами. Зразки заздалегідь дегазували у вакуумній камері із залишковим тиском $\sim 1,3$ Па при температурі 470 К протягом 18 годин.

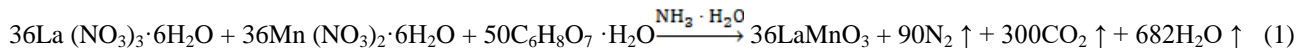
Для досліджень поведінки електродного матеріалу у водному розчині електроліту використовували трьохелектродну комірку. В якості робочого електроду слугував матеріал $LaMnO_3$ зі структурою перовскиту. Допоміжним слугував платиновий електрод, а електродом порівняння - хлор-срібний електрод ($Ag/AgCl$). В якості електроліту використовувався 6 М КОН.

Вихідною композицією для електрода служила суміш активний матеріал $LaMnO_3$ / ацетиленова сажа / полівініліденфторид (розчин у етанолі) у масовому співвідношенні 85:10:5 (%) відповідно. Суміш була запресована в нікелеву сітку; розмір робочого електроду $0,5 \times 0,5$ см².

Електрохімічні дослідження проводились з використанням спектрометра Autolab PGSTAT/FRA-2. Визначення питомих ємнісних параметрів перовскитного матеріалу $LaMnO_3$ здійснювалося методом вольтамперометрії при швидкості зміни потенціалу від 1 до 20 мВ/с та гальваностатичним методом при робочих струмах від 1 до 20 мА.

II. Результати та їх обговорення

Золь-гель метод за участі автогоріння, який використовують для синтезу нанорозмірних порошків має ряд переваг порівняно з іншими методами, оскільки він не потребує складного та дорогавартісного обладнання чи рідкісних реагентів для синтезу. Технологія та особливості синтезу досліджуваного матеріалу описані в роботі [20]. Сполука $LaMnO_3$ утворюється внаслідок проходження хімічної реакції:



Типові СЕМ зображення поверхні отриманого матеріалу при різних збільшеннях показані на рис. 1.

Встановлено, що синтезований LaMnO₃ має мезопористу структуру з розмірами частинок 40 -

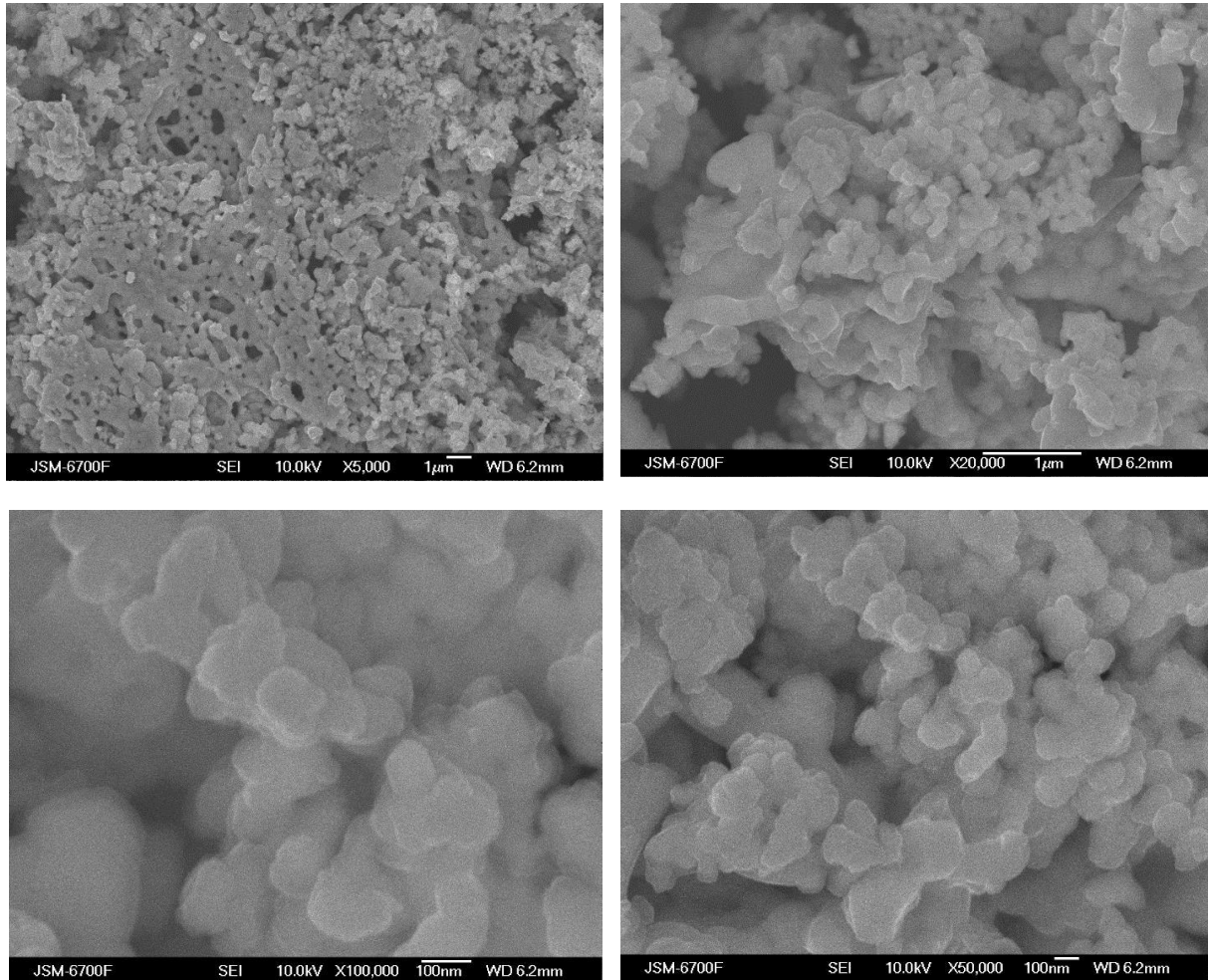


Рис. 1. СЕМ мікрофотографії LaMnO₃.

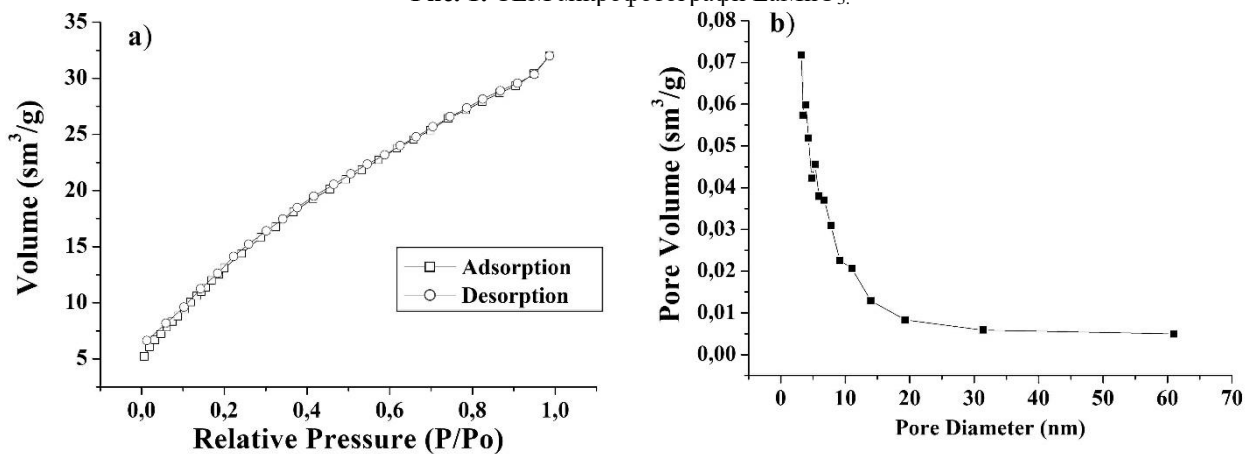


Рис. 2. Ізотерна адсорбції-десорбції N₂ а) і розподіл пор за розмірами зразка LaMnO₃ б).

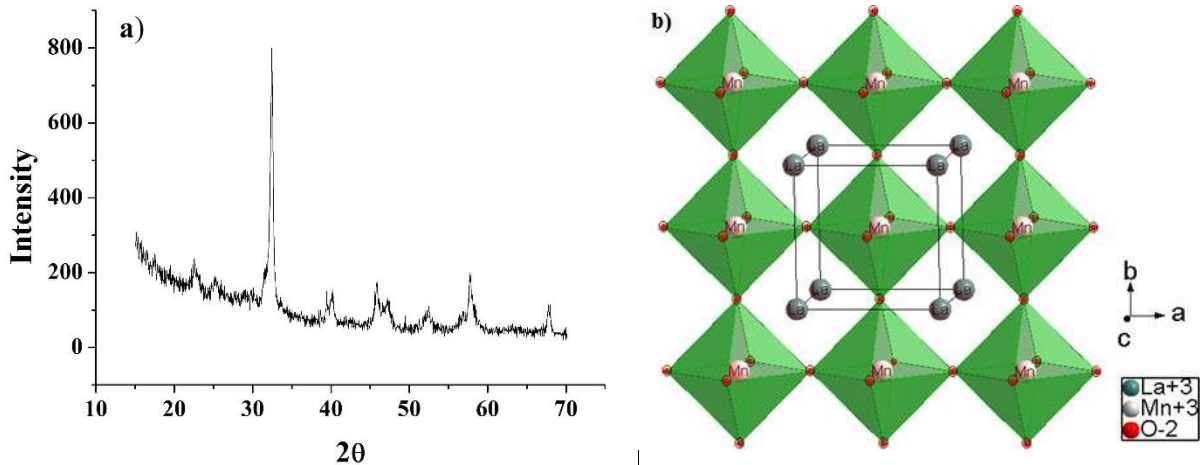


Рис. 3. Дифрактограми матеріалу LaMnO_3 (a) та модель кристалічної структури LaMnO_3 (вигляд вздовж осі c) (b).

60 нм. Із SEM зображень високої роздільної здатності видно чітку кристалічність отриманого матеріалу. На рис. 2а представлено ізотерми адсорбції-десорбції азоту матеріалом LaMnO_3 . За допомогою методу BET визначено питому площу поверхні синтезованого матеріалу, яка становить $42 \text{ м}^2/\text{г}$. Розподіл пор за розміром згідно методу ВЖН представлено на рис. 2б. Матеріал є мезопористим з розміром порожнин від 5 до 12 нм. Отримані результати свідчать про те, що мезопориста структура матеріалу LaMnO_3 сприятлива для дифузії іонів електроліту.

Якщо припустити, що частинки утвореної фази мають сферичну форму, то середній діаметр частинок d_c і питома площа поверхні S_n пов'язані співвідношенням:

$$d_c = \frac{6}{\rho S_n},$$

де ρ – густина матеріалу. З отриманої рентгенівської густини синтезованого матеріалу та вимірної питомої площі поверхні методом BET встановлено, що середній розмір частинок становить $22 \pm \text{нм}$. Таким чином можна вважати, що синтезований матеріал складається з частинок розміром 20 нм, які агрегуються у частинки розміром 50 - 60 нм.

На рис. 3а показані дифрактограми отриманого LaMnO_3 . З експериментальної X-променевої дифрактограми встановлено, що пікова дифракція ($2\theta = 23, 32, 40, 46, 52, 58, 68$) для отриманого матеріалу добре індексується з кубічною фазою чистого LaMnO_3 . Таким чином, можна вважати, що досліджуваний матеріал має структуру перовскиту просторової групи $\text{Pm} - 3\text{m}$. На рис.3б зображено модель кристалічної структури синтезованого LaMnO_3 (вигляд вздовж осі c), з якої видно, що катіон Mn перебуває в октаедричному оточенні аніонів O^{2-} . Згідно даних моделювання, встановлено, що сформовані зв'язки Mn-O в екваторіальній площині та аксіальних вершинах мають довжину близько $1,944 \text{ \AA}$, а довжина зв'язків O-O через аксіальні вершини становить близько $2,7492 \text{ \AA}$. Йони

La розміщені між однаково орієнтованими октаедрами. Координаційний многогранник має форму кубооктаедра.

Стала ґратки синтезованого матеріалу становить $a = 3,945 \text{ \AA}$, а об'єм – $V = 61.38 \text{ \AA}^3$. Згідно X-променевого аналізу густина матеріалу становить $\rho = 6,54 \text{ г/см}^3$. Середній розмір областей когерентного розсіяння 24 нм .

Електрохімічні характеристики синтезованого матеріалу LaMnO_3 досліджувалися за допомогою циклічної вольтамперометрії у потенціальному діапазоні 0 - 1 В відносно Ag/AgCl електроду порівняння в діапазоні швидкостей сканування 1 - 20 мВ/с. При циклюванні електроду на основі досліджуваного матеріалу LaMnO_3 в потенціальному діапазоні (0 - 1 В), його ємність забезпечується негативними йонами електроліту (OH -групами).

На рис. 4 представлені отримані криві ЦВА для зразка LaMnO_3 при швидкості сканування 1 мВ/с, які є асиметричними. Криві характеризуються піками,

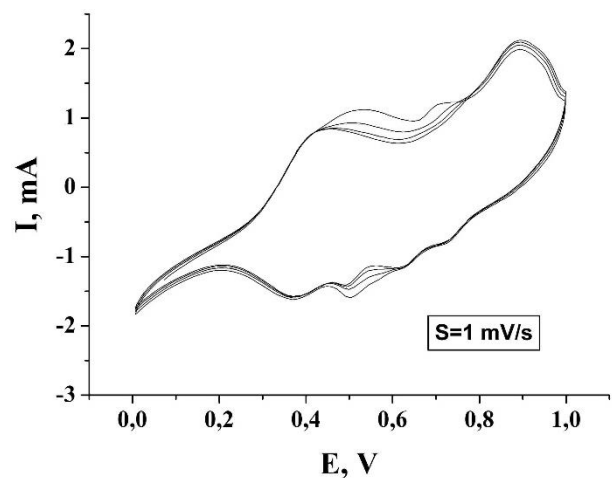


Рис. 4. Потенціодинамічні криві для системи $\text{LaMnO}_3/\text{KOH}$ при $s = 1 \text{ мВ/с}$.

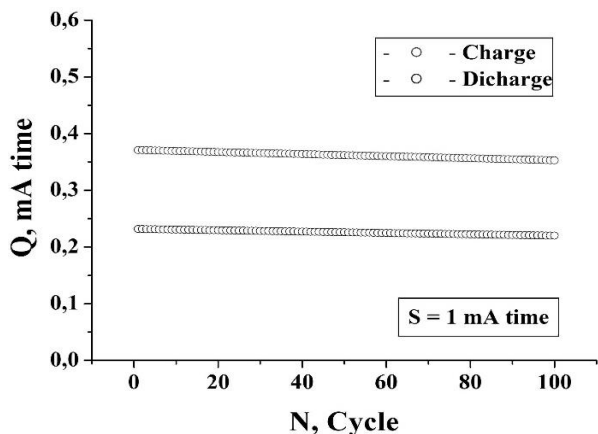


Рис. 5. Питома ємність LaMnO_3 залежно від кількості заряд/розрядних циклів.

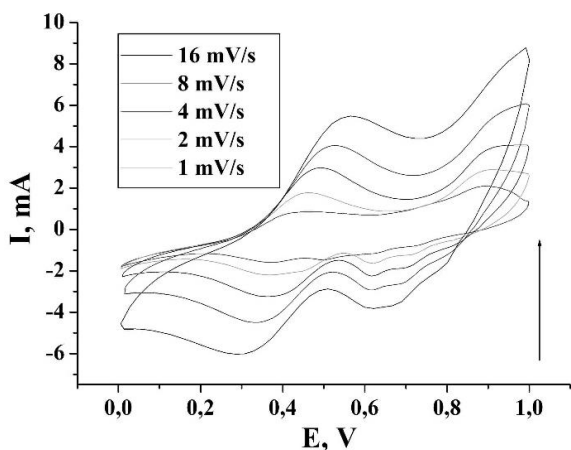


Рис. 6. Потенціодинамічні криві системи $\text{LaMnO}_3/\text{KOH}$ при різних швидкостях сканування.

які відповідають за процеси окислення йонів Mn. Піки, що відповідають процесам окислення та відновлення, спостерігаються як на анодній, так і на катодній гілках відповідно. Пік при 0,4 В відповідає окисленню Mn^{2+} до Mn^{3+} завдяки інтеркаляції йонів кисню в кисневій вакансії [12].

Пік, що спостерігається при 0,85 В є наслідком інтеркаляції надлишку кисню в структуру, під час якої Mn^{3+} окислюється до Mn^{4+} . Таким чином, можна стверджувати, що вклад у ємність досліджуваного матеріалу забезпечується переважно редокс-реакціями і незначним вкладом заряду, який акумулюється внаслідок утворення ПЕШ.

Із вольтамперограм визначено залежність значень питомої ємності матеріалу LaMnO_3 від номеру циклу (рис. 5). Структура є стабільною, про що свідчить незалежність величини накопиченого заряду протягом довготривалого циклювання. При збільшенні швидкості сканування від 2 до 16 мВ/с (рис. 6) на вольтамперограмах анодні піки зміщуються у сторону більших потенціалів близько на 0,15 В, зсув катодних піків є незначним і становить 0,02 - 0,05 В. При максимальних

швидкостях сканування на вольтамперограмах зберігається наявність піків, що свідчить про перебіг у системі швидких оборотних фарадеївських окисно/відновних процесів, проте зростає внутрішній електроопір системи, що виникає за рахунок рухливості йонів електроліту.

Залежність питомої ємності отриманого матеріалу LaMnO_3 від швидкості сканування наведено на рис 7. Максимальне значення питомої ємності досліджуваної системи становить 40 Ф/г при швидкості сканування 1 мВ/с.

Із рисунку 7 видно, що із збільшенням швидкості сканування зменшується ємність матеріалу. Використовуючи отриману залежність C від s , загальну ємність досліджуваного матеріалу можна розділити на ємність подвійного електричного шару ($C_{\text{ПЕШ}}$) і дифузійно-контрольовану окисно-відновну ємність за рахунок фарадеївських оборотних редокс реакцій (C_{Φ}): $C = C_{\text{ПЕШ}} + C_{\Phi}$ [21]. У кінетичній моделі [21], припущено, що швидкість сканування впливає на загальну питому електрохімічну ємність системи, оскільки дифузійна складова ємності (C_{Φ}) є функцією від часу проходження реакції.

Отже швидкість сканування можна вважати оберненою до часу протікання дифузії. Таким чином у випадку протікання напівнескінченної лінійної

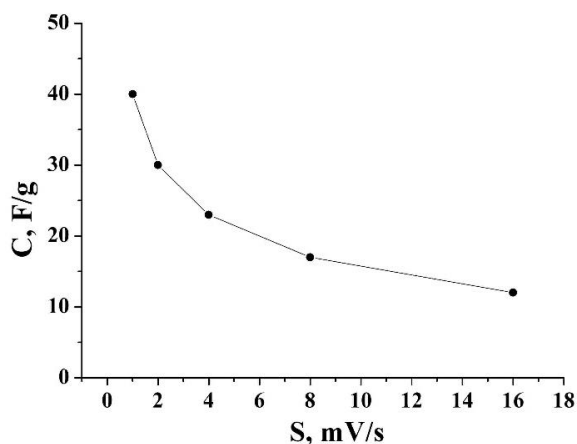


Рис. 7. Питома ємність системи $\text{LaMnO}_3/\text{KOH}$.

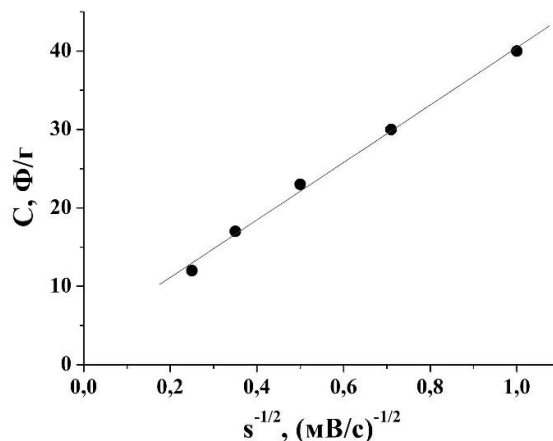


Рис. 8. Залежність питомої ємності від $s^{-1/2}$.

Таблиця 1

Питомі ємнісні характеристики системи
LaMnO₃/KOH

C_F , Ф/Г	180
C_{max} , Ф/Г	185
C_F/C_{max}	0,97

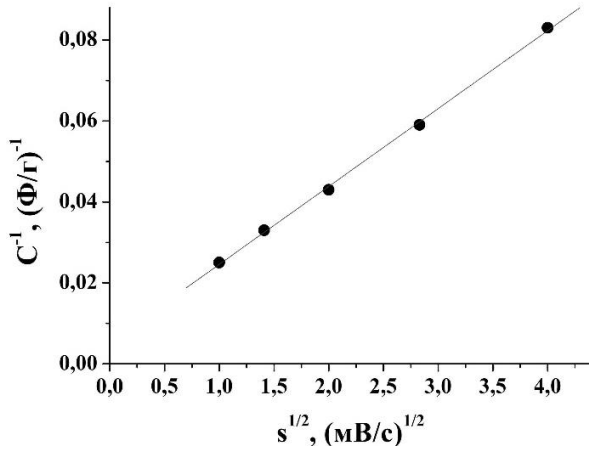


Рис. 9. Залежність C^{-1} від $s^{1/2}$ для LaMnO₃.

дифузії загальна ємність пов'язана із швидкістю сканування наступним рівнянням: $C = C_{s \rightarrow \infty} + a \frac{1}{\sqrt{s}}$, де

a – стала величина, а $C_{ПЕШ} = C_{s \rightarrow \infty}$. Як слідує із рис. 8, питома ємність матеріалу LaMnO₃ лінійно залежить від $s^{-1/2}$. Екстраполяція залежностей C від $s^{-1/2}$ до осі Y (рис. 8) дала можливість визначити питому ємність ПЕШ досліджуваних матеріалів (табл. 1).

Залежність питомої ємності від швидкості сканування також можна екстраполювати в іншу сторону до $s = 0$, використовуючи функціональну залежність від s . Оскільки C лінійно зростає з $s^{-1/2}$, тоді $1/C$ повинна лінійно зменшуватися із $s^{1/2}$. Тоді $\frac{1}{C} = \frac{1}{C_{s=0}} + b\sqrt{s}$, де $C_{s=0}$ – максимальна питома

ємність яку можна отримати, b – стала величина (рис. 9).

Як слідує із рис. 9 величина обернена до питомої ємності лінійно залежить від $s^{1/2}$. Екстраполяція залежностей C^{-1} від $s^{1/2}$ до осі Y (рис. 9) дала можливість визначити максимальну питому ємність досліджуваного матеріалу (табл. 1).

Заряд-розрядні криві електрохімічної системи з електродами на основі LaMnO₃ представлені на рис 10. Розрядні криві характеризуються двома лінійними ділянками з різними кутами нахилу, що свідчить про два різних механізми накопичення електричної енергії. Для належного оцінювання кількості заряду, що зберігається на електроді використовують питому ємність C_m , яку можна обчислити за формулою :

$$C_m = \frac{C}{m} = \frac{I \cdot \Delta t}{\Delta U \cdot m}$$

де C_m (Ф/г) – питома ємність, I (мА) – струм заряд -

розряду, Δt (с) – час розряду, ΔU (В) – потенціал під час розряду, а m (мг) – маса активного матеріалу всередині електрода.

Характеристики ємності електродного матеріалу LaMnO₃ при різних струмах розряду наведені на рис. 11. При струмі розряду 1 мА питома ємність становить 62 Ф/г. З рисунка видно, що зі збільшенням струму розряду ємність електродного матеріалу LaMnO₃ суттєво зменшується. Це, можливо, пов'язано з тим, що при великих струмах розряду не вистачає часу, щоб іони електроліту повністю проникали всередину електродних матеріалів і входили у вакансії.

Висновки

Золь-гель методом за участі автогоріння отримано складний оксид LaMnO₃. Встановлено, що отриманий матеріал має перовскитну структуру просторової групи Pm-3m з параметром ґратки 3,945 Å. Густина матеріалу становить 6,54 г/см³. Визначено, що середній розмір областей когерентного розсіювання рівний 24 нм.

Питома площа поверхні синтезованого матеріалу, визначена за допомогою ВЕТ методу становить

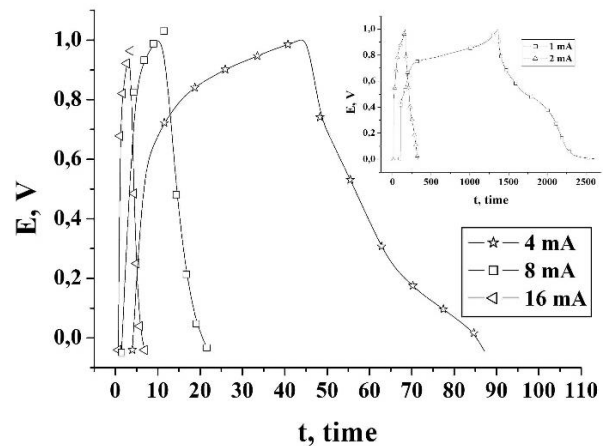


Рис. 10. Криві заряду-розряду в потенційному вікні від 0 до 1 В при різних струмах.

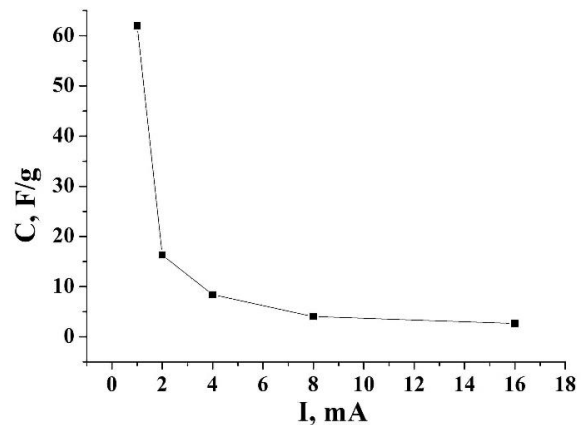


Рис. 11. Залежність питомої ємності матеріалу LaMnO₃, виміряної із заряд-розрядних кривих від струму розряду.

42 м²/г. Досліджено морфологію матеріалу та встановлено, що синтезований LaMnO₃ формується частинками розмірами 40 - 60 нм, між якими утворюються порожнини від 5 до 12 нм.

Проведено електрохімічні дослідження системи LaMnO₃/електроліт та встановлено залежність питомої ємності отриманого матеріалу від швидкості зміни потенціалу. Показано, що загальна ємність матеріалу забезпечується протіканням окисно-відновних реакцій. Значення питомої ємності матеріалу LaMnO₃, обчислене згідно даних потенціодинамічного методу становить 40 Ф/г при швидкості сканування 1 мВ/с. Отримані дані підтверджено хронопотенціометричним методом.

Остафійчук Б.К. – член кореспондент НАН України, професор, д.ф.-м.н., завідувач кафедри матеріалознавства і новітніх технологій;
Колковська Г.М. – аспірант кафедри матеріалознавства і новітніх технологій;
Яремій І.П. – професор кафедри матеріалознавства і новітніх технологій, д.ф.-м.н.;
Рачій Б.І. – професор кафедри матеріалознавства і новітніх технологій, д.ф.-м.н.;
Колковський П.І. – докторант кафедри матеріалознавства і новітніх технологій;
Іванічок Н.Я. – к.ф.-м.н., старший спеціаліст кафедри матеріалознавства і нових технологій;
Яремій С.І. – к.ф.-м.н., викладач кафедри медичної інформатики медичної та біологічної фізики.

- [1] W. Zhe, Y. Su, D. Wang, F. Li, J. Du, H. Cheng, *Advanced Energy Materials* 1(5), 917 (2011) (<https://doi.org/10.1002/aenm.201100312>).
- [2] R. Lisovsky, B. Ostafiychuk, I. Budzulyak, V. Kotsyubynsky, A. Boychuk, B. Rachiy, *Acta Physica Polonica A* 133(4), 876 (2018) (<https://doi.org/10.12693/APhysPolA.133.876>).
- [3] E. Arendt, A. Maione, A. Klisinska, O. Sanz, M. Montes, S. Suarez, J. Blanco, P. Ruiz, *Applied Catalysis A: General* 339(1), 1 (2008) (<https://doi.org/10.1016/j.apcata.2008.01.016>).
- [4] D. Munoz, N.M. Harrison, F. Illas, *Physical Review B*, 69, 8 (2004) (<https://doi.org/10.1103/PhysRevB.69.085115>).
- [5] S.A. Veldhuis, P.P. Boix, N. Yantara, M. Li, T.C. Sum, N. Mathews, S.G. Mhaisalkar, *Advanced Materials* 28(32), 6804 (2016) (<https://doi.org/10.1002/adma.201600669>).
- [6] N. G. Park, *Materials today* 8(2), 65-72 (2015) (<https://doi.org/10.1016/j.mattod.2014.07.007>).
- [7] P.M. Wilde, T.J. Guther, R. Oesten, J. Garche, *Journal of Electroanalytical Chemistry* 461(1-2), 154 (1999) ([https://doi.org/10.1016/S0022-0728\(98\)00179-X](https://doi.org/10.1016/S0022-0728(98)00179-X)).
- [8] L. Hehe, X. Zhang, R. Ding, L. Qi, H. Wang, *Electrochimica Acta* 108, 497 (2013) (<https://doi.org/10.1016/j.electacta.2013.07.066>).
- [9] B.K. Ostafiychuk, M.I. Kolkovskiy, B.I. Rachiy, P.I. Kolkovskiy, N.Y. Ivanichok, R.V. Ilnitsky, *Physics and Chemistry of Solid State* 21(1), 19 (2020) (<https://doi.org/10.15330/pcss.21.1.19-34>).
- [10] Y. Hu, J. Wang, *Journal of Power Sources* 286, 394 (2015) (<https://doi.org/10.1016/j.jpowsour.2015.03.177>).
- [11] H. Nan, X. Hu, H. Tian, *Materials Science in Semiconductor Processing* 94, 35 (2019) (<https://doi.org/10.1016/j.mssp.2019.01.033>).
- [12] J.T. Mefford, W.G. Hardin, S. Dai, K.P. Johnston, K.J. Stevenson, *Nature Materials* 13, 726 (2014) (<https://doi.org/10.1038/nmat4000>).
- [13] X. Wang, Q. Zhu, X. Wang, H. Zhang, J. Zhang, L. Wang, *Journal of Alloys and Compounds* 675, 195 (2016) (<https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2016.03.048>).
- [14] K. Zhang, X. Han, Z. Hu, X. Zhang, Z. Tao, J. Chen, *Chemical Society Reviews* 44 (3), 699 (2015) (<https://doi.org/10.1039/C4CS00218K>).
- [15] A. Mahata, P. Datta, R.N. Basu, *Ceramics International* 43(1), 433 (2017) (<https://doi.org/10.1016/j.ceramint.2016.09.177>).
- [16] Z.A. Elsiddig, H. Xu, D. Wang, W. Zhang, X. Guo, Y. Zhang, Zh. Sun, J. Chen, *Electrochimica Acta* 253, 422 (2017) (<https://doi.org/10.1016/j.electacta.2017.09.076>).
- [17] K.C. Tsay, L. Zhang, J. Zhang, *Electrochimica Acta* 60, 428 (2012) (<https://doi.org/10.1016/j.electacta.2011.11.087>).
- [18] B.K. Ostafiychuk, I.M. Budzulyak, B.I. Rachiy, R.P. Lisovsky, V.I. Mandzyuk, P.I. Kolkovsky, R.I. Merena, M.V. Berkeshchuk, L.V. Golovko, *Journal of Nano- and Electronic Physics* 9(5), 05001 (2017) ([https://doi.org/10.21272/jnep.9\(5\).05001](https://doi.org/10.21272/jnep.9(5).05001)).
- [19] Y. Cao, B. Lin, Y. Sun, H. Yang, X. Zhang, *Electrochimica Acta* 174, 41 (2015) (<https://doi.org/10.1016/j.electacta.2015.05.131>).
- [20] Y. Li, L. Xue, L. Fan, Y. Yan, *Journal of Alloys and Compounds* 478(1-2), 493 (2009) (<https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2008.11.068>).
- [21] M.W. Xu, L.B. Kong, W.J. Zhou, H.L. Li, *Journal of Physical Chemistry C* 111(51), 19141 (2007) (<https://doi.org/10.1021/jp076730b>).

B.K. Ostafiychuk¹, H.M. Kolkovska¹, B.I. Rachiy¹, P.I. Kolkovskyi¹,
I.P. Yaremiy¹, N.Ya. Ivanichok¹, S.I. Yaremiy²

Synthesis and Electrochemical Properties of LaMnO₃ Perovskite Nanoparticles

¹Vasyl Stefanyk Precarpathian National University, Ivano-Frankivsk, Ukraine, Pkolkovskyy@gmail.com

²Ivano-Frankivsk National Medical University, Ivano-Frankivsk, Ukraine

In this work, the perovskite LaMnO₃ material has been prepared based on the sol-gel process of synthesis with the participation of combustion. According to the X-ray phase analysis, it was determined that the obtained material consists of LaMnO₃ one phase (space group Pm-3m). Nevertheless, it has been determined that the average size of the coherent scattering region of the obtained material is about 24 nm. Moreover, the average particle size is 40 - 60 nm in case the approximation that the particles are spherical shape. Thus, it has been determined that the specific surface area of the material is 42 m²/g. The electrochemical investigations have been performed using nanosized LaMnO₃ powder as a cathode material for electrochemical capacitors. The LaMnO₃ material under research showed a specific capacity of 40 F/g at a discharge of up to 1V.

Keywords: sol-gel process, perovskite structure, KOH electrolyte, specific capacity.