

PACS: 81.16.-c, 82.47.Uv, 73.40.Ns, 81.40.Tv
DOI: <https://doi.org/10.18524/1815-7459.2025.1.325655>

ОПТИМІЗАЦІЯ МІЖФАЗНОГО ОПОРУ СУПЕРКОНДЕНСАТОРІВ ШЛЯХОМ ФОРМУВАННЯ ЛАЗЕРНО-ІНДУКОВАНИХ ПЕРІОДИЧНИХ СТРУКТУР НА СТРУМОЗБИРАЧАХ

О. В. Кузнєцов^{1,2}, Я. М. Гніліцький^{1,2}

¹ Національний університет «Львівська політехніка», вул. Степана Бандери, 12,
м. Львів, 79013, Україна

oleksandr.v.kuznietsov@lpnu.ua, yaroslav.m.hnilitskyi@lpnu.ua

² ТОВ «НовіНано Лаб», вул. Пастернака, 5, м. Львів, 79018, Україна
oleksandr.v.kuznietsov@lpnu.ua, yaroslav.m.hnilitskyi@lpnu.ua

Анотація. Об'єктом дослідження є суперконденсатори, зокрема їхні колектори та методи зменшення міжфазного опору на межі між колектором і активним матеріалом за допомогою формування лазерно-індукованих періодичних поверхневих структур (ЛППС). Міжфазний опір між колектором і активним матеріалом призводить до енергетичних втрат та зменшення питомої потужності пристрою. У ході досліджень було встановлено, що ЛППС можуть значно покращити електрохімічні характеристики суперконденсаторів. Основні ефекти покращення електрохімічних характеристик пояснюються кількома факторами. Утворені лазером періодичні структури сприяють збільшенню площі контакту між електродним матеріалом та колектором, що зменшує питомий опір. Лазерна обробка спричиняє певні хімічні зміни на поверхні струмозбирача, що може сприяти поліпшенню електропровідності та хімічної стабільності контакту. Для успішного впровадження методу необхідно оптимізувати інтеграцію лазерної обробки у виробничий цикл. Важливими залишаються питання економічної доцільності та масштабування технології, проте суттєве зниження внутрішніх опорів відкриває перспективу для підвищення питомої потужності суперконденсаторів різних типів. Метод лазерної обробки не потребує використання додаткових реагентів чи багатокомпонентних підшарів, що спрощує виробництво й робить цей підхід привабливим для комерційного застосування.

Ключові слова: наноструктури, лазерна обробка матеріалів, суперконденсатори, струмозбирачі, поверхнева модифікація

1. Вступ

Сучасні енергетичні системи вимагають високоефективних пристроїв для накопичення енергії, серед яких суперконденсатори займають важливе місце завдяки своїй високій потужності, тривалому терміну служби та швидкому зарядженню [1,2,3]. Проте одним із головних обмежень широкого впровадження суперконденсаторів є їхній міжфазний опір на межі колектор-електрод, який впливає на ефективність енергопередачі та загальні характеристики пристрою. Зменшення міжфазного опору є актуальною задачею для підвищення продуктивності суперконденсаторів та забез-

печення їхньої надійності в промислових і побутових застосуваннях [4, 5].

Багато досліджень присвячено вивченню способів зменшення міжфазного опору шляхом модифікації електродних матеріалів, використання проміжних шарів або зміни складу електроліту [3]. Наприклад, застосування вуглецевих наноматеріалів та металевих покриттів показало певне покращення характеристик суперконденсаторів [6,7], проте ці методи є технологічно складними та затратними. Одним із перспективних підходів є використання лазерної обробки струмозбирачів, що дозволяє створювати наноструктуровану поверхню,

здатну покращувати адгезію електродного матеріалу та зменшувати контактний опір.

Морфологія поверхні є одним з ключових факторів контролю оптичних, змочувальних, механічних, біологічних, хімічних та інших властивостей твердих поверхонь [8–10]. Поверхні модифіковані наноструктурами, в особливості ЛППС, мають ряд важливих переваг та приваблюють можливістю швидко та безконтактно наноструктурувати поверхню на макро-, мікро- й нанорівні одним процесом. На відміну від традиційних літографічних чи хімічних методів, вони не потребують масок, додаткових реагентів чи багатоетапних технологічних процедур [10].

Раніше вже було проведено дослідження модифікації поверхні колекторів суперконденсаторів за допомогою пікосекундних лазерних імпульсів [11]. В цій роботі автори змінили морфологію поверхні колекторів утворюючи пірамідки. Було показано що після лазерної обробки колекторів суперконденсаторів опір комірки зменшився у два рази, порівняно з комірками що були зібрані з колекторів з необробленою поверхнею. Також за рахунок обробки було збільшено ємність та покращено стабільність та довговчність суперконденсаторів. Крім того дослідження показали що лазерна обробка посилила механічне зчеплення між колектором і вуглецевим шаром. І навіть після 100 годин термічного шоку при температурах від $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$ до $80\text{ }^{\circ}\text{C}$ модифіковані колектори продемонстрували лише незначне зниження міцності зчеплення, що свідчить про їхню довговічність у суворих умовах експлуатації.

У цій роботі буде проведена спроба покращити алюмінієвий струмозбірник суперконденсатора за рахунок фемтосекундної лазерної обробки поверхні з утворенням ЛППС. Цей підхід має значний потенціал для масштабного впровадження в промислових умовах, відкриваючи нові можливості для розвитку технологій збереження енергії.

ЛППС на колекторах відкривають широкі перспективи для зменшення міжфазного опору у суперконденсаторах. Формування таких структур дає змогу суттєво впливати на рельєф поверхні металевих матеріалів, збільшуючи ефективну площу контакту із активним шаром та електролітом. У процесі лазерної обробки відбувається локальне плавлення та швидке охолодження, що призводить до появи регулярних нанорельєфних утворень, орієнтованих відповідно до поляризаційної осі випромінювання [12]. Це не лише змінює топографію колектора, а й може впливати на його поверхневий склад і створювати додаткові центри адгезії для електродного матеріалу.

2. Матеріали і методи

Було зроблено декілька партій електродів з високоякісного активованого вугілля Norit Supra, де колектором слугувала оброблена фемтосекундним лазером Al фольга. Для досліджень було утворено ЛППС на поверхні фольги у середовищах повітря та азоту.

2.1. Лазерні параметри

Зразки оброблялись фемтосекундним лазером Yb: KGW (модель Pharos 20 W, LightConversion, Вільнюс, Литва). На рис. 1

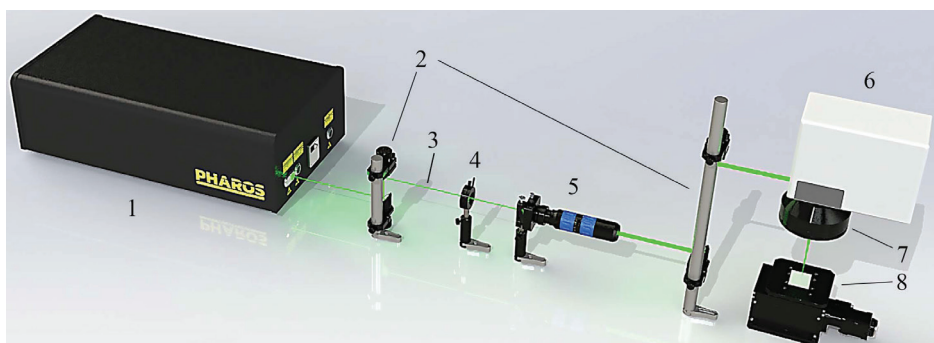


Рис. 1. Схема лазерної установки. 1 – фемтосекундний лазер «Pharos», 2 – перископи з дзеркалами, 3 – лазерний промінь, 3 – напівхвильова пластина, 5 – розширювач лазерного пучка, 6 – гальво-сканер, 7 – F-тета-лінза, 8 – моторизований столик по осі z.

показана схема лазерної установки для обробки матеріалу [13].

При обробці використовувався лазерний пучок з довжиною хвилі $\lambda=1030$ нм, лазер був налаштований на потужність 3,2 Вт, з енергією за імпульс 16 мкДж, частота імпульсів була 200 кГц, крок між лініями сканування був 10 мкм, швидкість – 1 м/с. Діаметр лазерної плями на поверхні матеріалу у фокусі дорівнював 75 мкм. Було пораховано що при скануванні на одну точку потрапляло біля 15 імпульсів (112,5 якщо враховувати накладання між лініями сканування), а флюенс дорівнював 0,362 Дж/см². Параметри лазерної обробки і в повітрі і в азоті, були однаковими. Для обробки у азоті використовувалась газова камера, у яку подавався газ під тиском 9,5 бар.

2.2. Виготовлення електродних компонентів

До активованого вугілля Norit Supra було додано $\approx 5\%$ зв'язуючого, для того щоб матеріал не розсипався, та зпресовано до тонкої плівки. Отримані вугільні електроди були приклеєні до колектора за допомогою провідного клею. На оброблену алюмінієву фольгу було нанесено та розтерто клей та покладено в пічку для засихання. Клей виготовили наступним чином: зв'язуюче розчиняли у ДМА з додаванням сажі, для провідності, та розмішували все це до густої однорідної маси.

На рис. 2 показано процес збирання електродної пари для досліджень. Спочатку алюмінієву фольгу, обробляли лазером у середовищах повітря та азоту, потім на оброблену

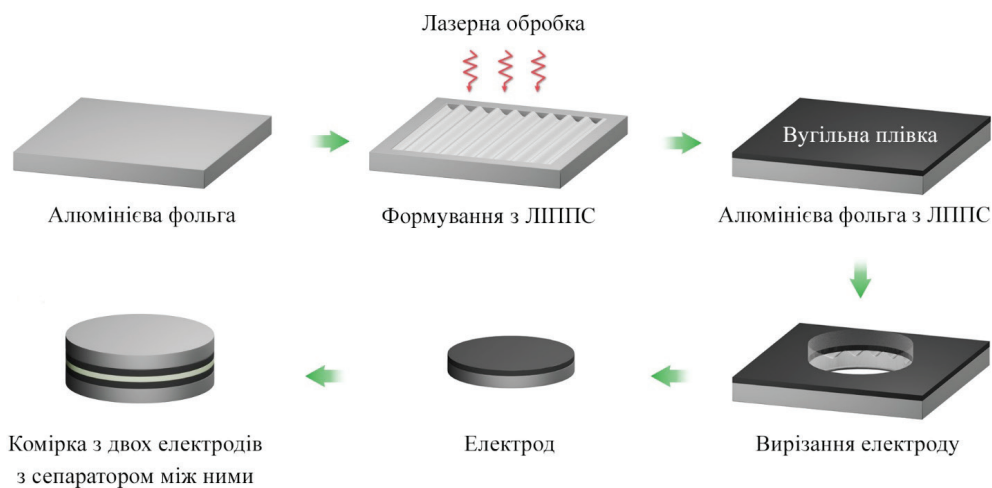


Рис. 2. Процес створення електропари.

поверхню наносили провідний клей та пресували сажову плівку. Після цього обтирали її для створення електрода.

При виготовленні електродних компонентів сажову плівку до фольги пресували з тиском 5 тон при температурі 120 °C протягом 1 хв.

Для досліджень електродних компонентів використовувався електроліт Na_2SO_4 .

2.3. СЕМ і ЕІС

Результати експерименту вивчали за допомогою скануючого електронного мікроскопа (СЕМ) Phenom ProX (Thermo Fisher Scientific, Массачусетс, США).

У Електрохімічна імпедансна спектроскопія (ЕІС) проводилася за допомогою комплексу Autolab PGSTAT12/FRA-2 (ECO CHEMIE, Нідерланди) після 10 попередніх (формульних) циклів заряджання-розряджання.

2.4. Розрахунки основних параметрів

Ємність C розраховувалась за формулою:

$$C = \frac{2 I t_d}{m_{ef} U_{max}}, \quad (1)$$

де I – сила струму при якому відбувалась розрядка, t_d – час розрядки, m_{ef} – вага активної речовини $m_{ef} = m_{el} - m_{zv}$, m_{el} – вага елект-

рода, $m_{зв}$ – вага звязуючого (5% від маси електрода), U_{max} – напруга до якої був заряджена комірка з двох електродів.

Кулонівська ефективність η розраховувалась за формулою:

$$\eta = \frac{Q_{розр}}{Q_{зар}}, \quad (2)$$

де $Q_{розр} = I_{розр} t_{розр}$ – загальна кількість заряду що була винесена при розрядці, де $Q_{зар} = I_{зар} t_{зар}$ – загальна кількість заряду що була внесена при зарядці, $I_{розр}/I_{зар}$ – струм при якому відбувалися розрядка/зарядка, $t_{розр}/t_{зар}$ – час за який відбувалися розрядка/зарядка.

Опір R визначався за формулою

$$R = \frac{\Delta U}{2I}, \quad (3)$$

де $\Delta U = U_{max} - U_{min}$ – спад напруги при розряджанні комірки, що визначався за допомогою різниці U_{max} – напруга до якої заряджалась комірка та U_{min} – що визначалась за допомогою перетину двох проведених ліній, одна по точкам розряду, а інша по вертикально по максимуму напруги.

3. Результати і обговорення

Для проведення експерименту було взято промислову алюмінієву фольгу. У ході дослідження було проведено багато варіацій режимів лазерної обробки. Експерименти охоплювали широкий діапазон параметрів, включаючи потужність лазера, енергію за імпульс, різні кроки між лініями лазерного сканування та швидкість сканування. У результаті було відібрано режим при якому утворювались найякісніші ЛППС.

СЕМ-зображення (Рис. 3) чітко показують формування періодичних нанорельєфів на поверхні струмозбірника, що є характерною ознакою утворення ЛППС. Водночас, крім утворених наноструктур, можна побачити затемнені «смуги» або заглибини, що періодично повторюються, зумовлені вищою локальною енергією, яка надходила в зону опромінення через гаусову форму лазерного пучка. У цих ділянках поверхня зазнає інтенсивнішого на-

грівання, що призводить до більш вираженого плавлення та наступного швидкого охолодження металу. Цей процес стимулює появу додаткових хвильових утворень на макрорівні. Таким чином, спільна дія згаданих чинників формує різнорівневу наномікроструктуру: дрібний регулярний рельєф ЛППС накладається на більші заглибини, сформовані під впливом нерівномірного розподілу енергії. Така комбінація може мати позитивний вплив на адгезію та загальний контакт між струмозбирачем та активним матеріалом у подальшому, адже забезпечує збільшену площу взаємодії та потенційно зменшує міжфазний опір. Також варто відзначити відсутність значних ознак оплавлення чи тріщиноутворення, що свідчить про оптимальність обраних параметрів обробки.

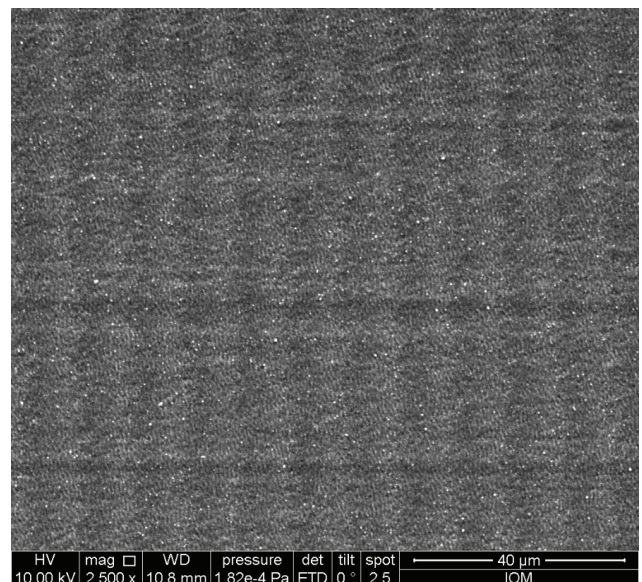


Рис. 3. СЕМ зображення утворених ЛППС на поверхні струмозбірника, при обробці у повітрі.

У ході досліджень було зроблено по 5 комірок з колекторами обробленими ЛППС у повітрі, та у азоті. Одержані та розраховані значення зарядно-переносного опору, омичного опору, ємності та кулонівської ефективності було внесено до таблиці № 1. Усі значення в таблиці є осередненими.

За результатами таблиці можна зробити висновок, що обробка електродів у середовищі азоту забезпечує нижчий омичний опір і менший загальний (або зарядно-переносний)

Табл. 1

Отримані результати досліджень опору

Обробка	R_s (середн.), Ом	R (середн.), Ом	C (середн.), Ф/г	η (середн.)
Повітря	$1,019 \pm 0,183$	$70,37 \pm 15,81$	$39,92 \pm 11,59$	$96,37 \pm 0,94$
Азот	$0,753 \pm 0,177$	$23,17 \pm 4,29$	$42,64 \pm 8,58$	$95,51 \pm 0,47$
Необроблена	3,4	187,9	-	-

опір порівняно з обробкою в повітрі. Зокрема, у зразків, оброблених у азоті, найменше значення омичного опору R_s становить 0,753 Ом, а загальний опір R – 23,17 Ом, що значно нижче, ніж у зразків, оброблених у повітрі (1,019 Ом та 70,37 Ом відповідно). Водночас, ємність у зразків, оброблених у азоті, трохи вища ($42,64 \pm 8,58$ Ф/г), ніж у зразків, оброблених у повітрі ($39,92 \pm 11,59$ Ф/г), що свідчить про їхню кращу здатність накопичувати заряд. Кулонівська ефективність у більшості досліджуваних зразків перебуває на рівні 95–97%, що відображає стабільність зарядно-розрядних процесів. Для порівняння, необроблений зразок має значно вищі опори ($R_s = 3,4$ Ом, $R = 187,9$ Ом), що підтверджує корисний вплив лазерної модифікації поверхні електродів як у повітрі, так і в азоті, причому азот дає пере-

вагу з погляду провідності та ємності. Слід зауважити, що ємність є досить малою для суперконденсатора у всіх зібраних комірках, можливо, через відсутність термовакуумної відкачки, яка допомагає зменшити вміст небажаних летких речовин, таких як адсорбована волога.

Для графіків вольтамперної характеристики було вибрано по три зразки комірок з більш наближеними даними до середніх значень показаних в табл. 1. Зі спостережень за вольтамперними кривими зразків, оброблених у повітрі (рис. 4), видно, що вони характеризуються типовою для подвійношарових систем формою, проте помітний певний нахил і немає ідеально «прямокутного» виду. Це свідчить про наявність не лише чисто ємнісної складової, а й певної поляризації та внутрішнього опору. Графіки загалом симетричні при заряді

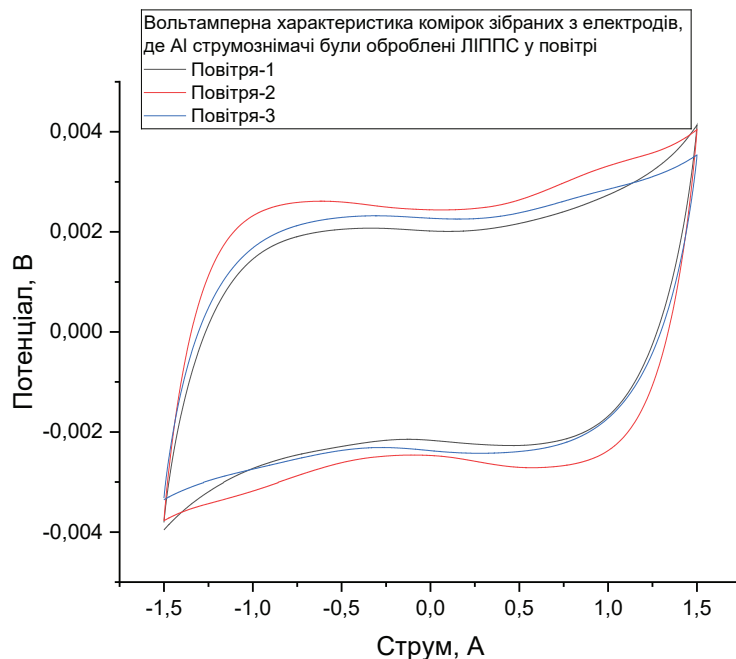


Рис. 4. Вольтамперна характеристика комірок зібраних з електродів, де Al струмознімачі були оброблені ЛППС у повітрі.

й розряді, що свідчить про стабільну роботу комірки.

На вольтамперних характеристиках зразків, у яких струмознімачі були оброблені в середовищі азоту (рис. 5), крива має більш «прямокутну» форму порівняно з обробкою у повітрі. Це вказує на менший внутрішній опір і більш виражену ємнісну поведінку, тобто система наближається до ідеального подвійного шару. Водночас у деяких випадках на цих CV-кривих можуть бути помітні слабкі «плечі», або пікові особливості, що говорить про наявність певних псевдо-Фарадеївських процесів.

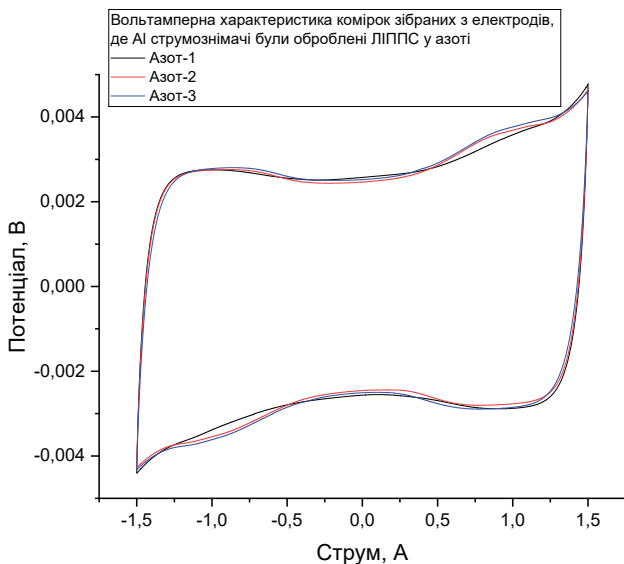


Рис. 5. Вольтамперна характеристика комірок зібраних з електродів, де Al струмознімачі були оброблені ЛППС у азоті.

Зокрема, під час лазерної обробки в азотному середовищі може формуватися тонкий шар нітридів чи змінених оксидів (Al–N, Al–O–N тощо), які в розчині здатні брати участь у зворотних реакціях окиснення-відновлення. Якщо ці пікові особливості стабільні й не спричиняють сильного зсуву потенціалу з часом, вони можуть навіть підвищувати ефективну ємність. Утім загальний вигляд «прямокутнішої» кривої без різких максимумів свідчить, що основний внесок у накопичення заряду робить саме подвійний електричний шар, а внутрішня поляризація колектора зведена до мінімуму. Така форма ВАХ відбивається

і на нижчих омичних опорах, а також більш рівномірному розподілі потенціалу під час циклічного заряджання-розряджання.

Для трьох зразків «Азот» бачимо мінімальні відхилення одне від одного, а от у серії «Повітря» криві трохи більш «розтягнуті», є помітніша різниця між зразками, а також відчутніший нахил ділянок заряду-розряду. Це зумовлено тим, що лазерна обробка в атмосфері повітря відбувається менш контрольовано й більш хаотично, ніж у середовищі азоту. Коли зразок нагрівається лазером, на його поверхні може інтенсивно утворюватися оксидний шар. У повітрі цей процес практично не регулюється, що ускладнює відтворюваність.

Покращення провідності при використанні ЛППС може бути пов'язане з тим, що утворення періодичних структур зменшує k_0

і кількість мікропорожнин і дефектів, де відбувається накопичення опору. У разі інтенсивної взаємодії лазера з поверхнею може спостерігатися часткове видалення оксидних шарів або їхня реконструкція, що також впливає на контактні властивості [11]. Оскільки в багатьох металах наявність оксидів суттєво збільшує міжфазний опір, мінімізація цих шарів приводить до підвищення ефективності струмопровідності. Завдяки вивіренним параметрам лазерної обробки (довжині хвилі, частоті слідування імпульсів, тривалості та енергії імпульсу) можна цілеспрямовано змінювати структуру поверхні та її хімічний склад.

Випробування на реальних комірках демонструють, що застосування ЛППС сприяє рівномірнішому розподілу електроліту, оскільки сформовані рельєфи зменшують поверхневий натяг і покращують змочуваність. Це не лише знижує опір перенесенню зарядів, а й забезпечує міцніше зчеплення активного шару з колектором, що важливо для довготривалої стабільності пристрою [11]. У свою чергу, поліпшення контакту між активним шаром та колектором дає змогу ефективніше передавати енергію і скорочувати втрати під час заряджання та розряджання суперконденсатора. Отже, впровадження ЛППС на металевих колекторах є перспективним методом покращень струмозбірників.

Результати проведеного дослідження можуть бути використані для вдосконалення технологій виготовлення струмознімачів суперконденсаторів та інших електрохімічних пристроїв накопичення енергії, зокрема для підвищення їх довговічності, питомої ємності й енергетичної ефективності. З'ясування впливу різних середовищ (повітря та азоту) під час лазерної обробки дає змогу краще контролювати структуру й хімічний склад поверхні, що відкриває шлях до підвищення стабільності й уніфікації процесу виготовлення. Крім того, результати можуть знайти застосування у виготовленні сенсорів і компонентів мікроелектроніки, де потрібний високий ступінь точності й відтворюваності поверхневих шарів.

Якщо порівняти лазерні методи наноструктурування з хімічними, у контексті екологічної безпеки та сталої технології, лазерна обробка поверхні може мати переваги перед традиційними хімічними методами. Перше, застосування лазера дозволяє скоротити або повністю уникнути використання агресивних реактивів і отримання шкідливих побічних продуктів. Це сприяє зменшенню забруднення довкілля, оскільки відсутні етапи хімічної утилізації та мінімізується ризик потрапляння токсичних відходів у навколишнє середовище. Крім того, лазерна обробка є висококаліброваним процесом, що має нижче споживання матеріалів і зменшує кількість відходів в процесі виготовлення порівняно з традиційними технологіями травлення. Важливим аспектом також є енергетична ефективність, завдяки швидкості обробки та точній фокусувальній здатності лазерних систем загальний час дії на зразок може бути скорочено, що впливає на зменшення сукупного енергоспоживання.

Загалом, лазерний метод можна розглядати як більш екологічно безпечну альтернативу традиційним хімічним технологіям, що робить його перспективним для застосування у виробництві та дослідницьких проєктах, орієнтованих на зниження екологічного навантаження.

Під час виконання дослідження мали місце кілька об'єктивних чинників, що впливали

на отримані результати. По-перше, кількість зразків не була достатньо великою, щоб надати широке статистичне охоплення. По-друге, не було проведено термовакуумної відкачки для видалення зайвої вологи. Крім того, не було показано дослідів на аналіз хімічного складу поверхні.

У майбутньому доцільно глибше вивчити механізми можливих утворень нітридно-оксидних шарів під час роботи в різних газових середовищах, а також їхній вплив на електрохімічні властивості. Перспективним є використання інших інертних або реактивних газів (аргону, водню, аміаку тощо) й дослідження їхньої здатності формувати специфічні поверхневі структури. Окрім того, розширення аналізу методами SEM, TEM, XRD, XPS дасть змогу детальніше окреслити кореляцію між морфологією поверхні, її складом і отриманими електрохімічними характеристиками. Такий підхід допоможе розробити універсальні рекомендації для створення високоефективних електродів та подальшої інтеграції цих технологій у промисловість.

Висновок

У ході дослідження було здійснено фемтосекундну лазерну обробку алюмінієвих колекторів у двох середовищах (повітрі та азоті) з формуванням на поверхні структур типу ЛППС. Проведені вимірювання вольтамперних характеристик, імпедансу та розрахунки основних електрохімічних параметрів засвідчили, що колектори з лазерною обробкою мають істотно нижчі опори порівняно з необробленим алюмінієм. Зокрема, в окремих випадках омичний опір зменшився на 70% при лазерній обробці колектора у повітрі та на 78% при лазерній обробці у азоті відносно контрольного зразка без обробки. Зарядно-переносний опір також суттєво знизився: на 63% при лазерній обробці у повітрі та на 88% при лазерній обробці у азоті. Отримані результати підтверджують позитивний вплив лазерної модифікації на провідність алюмінієвих колекторів, зокрема у середовищі азоту, що демонструє найкращі показники зниження опору.

Отримані результати пояснюються тим, що лазерна обробка в інертному середовищі (азоті) відбувається більш контрольовано: знижуються некеровані процеси окиснення, також можливим є формування нітридних й окисдно-нітридних шарів, які могли б поліпшити електрохімічні властивості колектора. У повітрі так само спостерігається покращення, проте менше передбачуване.

Практична корисність полягає в можливості застосування контрольованої лазерної обробки для створення струмознімачів зі зменшеним внутрішнім опором, що є важливим для суперконденсаторів та інших пристроїв накопичення енергії

Список використаної літератури

[1]. M. Liu, J. C. Liu, Y. Zhang, X. Han, H. Li, Z. H. Huang, T. Ma. Current collectors for supercapacitors: objectives, modification methods and challenges // *ChemElectroChem*, 12(1), e202400513 (2025).

[2]. C. Lamiel, I. Hussain, X. Ma, K. Zhang. Properties, functions, and challenges: current collectors // *Materials Today Chemistry*, 26, 101152 (2022).

[3]. A. Abdisattar, M. Yeleuov, C. Daulbayev, K. Askaruly, A. Tolynbekov, A. Taurbekov, N. Prikhodko. Recent advances and challenges of current collectors for supercapacitors // *Electrochemistry Communications*, 142, 107373 (2022).

[4]. K. D. Verma, et al. Characteristics of current collector materials for supercapacitors // *Handbook of Nanocomposite Supercapacitor Materials I: Characteristics*, pp. 327–340 (2020).

[5]. O. Kuznietsov, I. Gnilitskyi, F. Ivashchyshyn. Femtosecond laser infusion of graphite coating into aluminum foil // *Welding and Related Technologies*, pp. 92–95 (2025). CRC Press.

[6]. J. J. Vilatela, R. Marcilla. Tough electrodes: carbon nanotube fibers as the ultimate current collectors/active material for energy management devices // *Chemistry of Materials*, 27(20), pp. 6901–6917 (2015).

[7]. X. T. Sun, et al. Laser irradiation of graphite foils as robust current collectors for high-mass loaded electrodes of supercapacitors // *Rare Metals*, 41(12), pp. 4094–4103 (2022).

[8]. K. Koch, B. Bhushan, W. Barthlott. Diversity of structure, morphology and wetting of plant surfaces // *Soft Matter*, 4(10), pp. 1943–1963 (2008).

[9]. I. Hussain, S. Sahoo, M. S. Sayed, M. Ahmad, M. S. Javed, C. Lamiel, K. Zhang. Hollow nano- and microstructures: mechanism, composition, applications, and factors affecting morphology and performance // *Coordination Chemistry Reviews*, 458, 214429 (2022).

[10]. J. Bonse, S. V. Kirner, J. Krüger. Laser-induced periodic surface structures (ЛІПСС) // *Handbook of Laser Micro- and Nano-Engineering*, pp. 1–59 (2020).

[11]. Y. Huang, Y. Li, Q. Gong, G. Zhao, P. Zheng, J. Bai, C. Nan. Hierarchically mesostructured aluminum current collector for enhancing the performance of supercapacitors // *ACS Applied Materials & Interfaces*, 10(19), pp. 16572–16580 (2018).

[12]. J. Bonse, S. Gräf. Maxwell meets Marangoni – a review of theories on laser-induced periodic surface structures // *Laser & Photonics Reviews*, 14(10), 2000215 (2020).

[13]. O. V. Kuznietsov, G. D. Tsibidis, A. V. Demchishin, A. A. Demchishin, V. Babizhetskyy, I. Saldan, I. Gnilitskyi. Femtosecond laser-induced periodic surface structures on 2D Ti-Fe multilayer condensates // *Nanomaterials*, 11(2), 316 (2021).

Стаття надійшла до редакції 14.02.2025 р.

PACS: 81.16.-c, 82.47.Uv, 73.40.Ns, 81.40.Tv
DOI: <https://doi.org/10.18524/1815-7459.2025.1.325655>

OPTIMIZATION OF THE INTERFACIAL RESISTANCE OF SUPERCAPACITORS BY FORMING LASER-INDUCED PERIODIC STRUCTURES ON CURRENT COLLECTORS

O. V. Kuznietsov^{1,2}, I. M. Gnilitskyi^{1,2}

¹ Lviv Polytechnic National University, 12 S. Bandera St, Lviv, 79013, Ukraine

oleksandr.v.kuznietsov@lpnu.ua, yaroslav.m.hnilitskyi@lpnu.ua

² "NoviNano Lab" LLC, 5 Pasternaka St, Lviv, 79018, Ukraine

oleksandr.v.kuznietsov@lpnu.ua, yaroslav.m.hnilitskyi@lpnu.ua

Abstract. The object of the study is supercapacitors, particularly their collectors and methods for reducing interfacial resistance at the boundary between the collector and the active material by forming laser-induced periodic surface structures (LIPSS). Interfacial resistance between the collector and the active material leads to energy losses and a decrease in the specific power of the device. The study established that LIPSS can significantly improve the electrochemical characteristics of supercapacitors. The primary effects of improved electrochemical characteristics are explained by several factors. The periodic structures formed by the laser contribute to an increase in the contact area between the electrode material and the collector, thereby reducing specific resistance. Laser processing induces certain chemical changes on the surface of the current collector, which may enhance electrical conductivity and chemical stability of the contact. For the successful implementation of this method, it is necessary to optimize the integration of laser processing into the production cycle. Economic feasibility and technology scaling remain crucial considerations; however, the significant reduction in internal resistances opens up prospects for increasing the specific power of various types of supercapacitors. The laser processing method does not require the use of additional reagents or multi-component sublayers, which simplifies production and makes this approach attractive for commercial application.

Keywords: nanostructures, laser material processing, supercapacitors, current collectors, surface modification