



ЗАТВЕРДЖУЮ

Проректор з наукової роботи
Національного університету
«Київська політехніка»

д.т.н., проф.

Іван ДЕМИДОВ

"17" 04 2025 р.

Висновок

про наукову новизну, теоретичне та практичне значення
результатів дисертації «Фемтосекундна лазерна обробка як
інструмент покращення поверхневих властивостей металів для
сенсорів та суперконденсаторів»
здобувача наукового ступеня доктора філософії за спеціальністю
153 Мікро- та наносистемна техніка
(галузь знань *15 Автоматизація та приладобудування*)
Олександра КУЗНЄЦОВА
міжкафедрального наукового семінару Навчально-наукового
Інституту інформаційно-комунікаційних технологій та
електронної інженерії

1. Актуальність теми дисертації

Сталий розвиток енергетики та промисловості дедалі більше спирається на високо-потужні сховища енергії та чутливі сенсорні системи, здатні забезпечити швидкий обмін енергією й даними у «розумних» мережах, електротранспорті та IoT-пристроях. Суперконденсатори при цьому вирізняються високою питомою потужністю, швидкими циклами заряд-розряд і довговічністю, тоді як сенсори водню є критичними для безпечної роботи водневої енергетики. Подальше розширення сфер їхнього застосування стримується насамперед високим внутрішнім опором струмознімачів, корозійною нестійкістю металевих елементів та недостатньою селективністю активних матеріалів.

Поширені методи удосконалення поверхні, такі як хімічне травлення, електролітичне осадження та плазмохімічне текстуровання часто передбачають використання агресивних реагентів, а їхній результат суттєво залежить від коливань технологічних параметрів, що ускладнює стабільне відтворення заданого мікро- й нанорельєфу. Натомість обробка поверхні матеріалів піко-фемтосекундними лазерними імпульсами (ПФЛО) з формуванням лазерно-індукованих періодичних поверхневих структур

(ЛППС) пропонує безреагентний, енергоощадний та технологічно гнучкий підхід. Локальний вплив короткоімпульсної лазерної енергії дозволяє модифікувати поверхню матеріалу без суттєвого нагрівання об'єму матеріалу.

У дисертації запропоновано комплексний підхід, що передбачає чотири взаємопов'язані експериментальні напрями: (I) модифікацію багатошарових Ti/Fe-конденсатів з метою посилення гідридоутворення та підвищення чутливості сенсорів; (II) синтез нанопорошків Ni, Co та NiCo шляхом лазерної абляції у воді й повітрі для застосування в електрокаталізі; (III) нанотекстурування алюмінієвих колекторів у повітрі та азоті задля зменшення поверхневого опору; (IV) лазерне вплавлення графіту в Al-фольгу для формування хімічно стійкого композиту Al_4C_3/C . Кожен напрям досліджено з використанням багаторівневих матеріалознавчих методів: сканувальної електронної мікроскопії з енергодисперсійним рентгенівським аналізом, Раман-спектроскопії, рентгенівського фазового аналізу, профілометрії, імпедансної спектроскопії та ін., що дозволило простежити зв'язок між параметрами обробки, отриманою структурою та функціональними властивостями і тим самим обґрунтувати потенціал запропонованого лазерного підходу для розв'язання окреслених технологічних завдань.

Отримані результати переконливо підтверджують ефективність ПФЛО-технології. Так, повний опір суперконденсаторної комірки з колекторами, модифікованими ЛППС у азоті, зменшено з 187,9 Ом до 12,8 Ом. Лазерне текстурування також істотно знизило контактний кут змочування електролітом з $114,8^\circ$ до $19,9^\circ$, що сприяло швидшому іонному транспорту. Для сенсорних Ti/Fe-структур продемонстровано зародження TiFe-фази та кероване формування ЛППС, які забезпечують підвищену гідридоактивність і механічну стабільність датчиків водню.

2. Зв'язок теми дисертації з державними програмами, науковими напрямами університету та кафедри

Дисертацію виконано відповідно до наукових напрямів кафедри електронної інженерії Національного університету «Львівська політехніка»: «Розробка нових підходів до побудови засобів електронної техніки, методів моделювання та дослідження інноваційних технологій в електроніці, оптоелектроніці та сенсоріці» (06.06.2023, протокол НТР № 6/1), а також частково в межах держбюджетної науково-дослідної роботи Міністерства освіти і науки України «Наноструктуровані інтерфейси на основі нетоксичних матеріалів для прикладних застосувань» (2020–2022 рр., номер державної реєстрації 0120U100675).

3. Особистий внесок здобувача в отриманні наукових результатів

Основні наукові та практичні результати дисертації отримано за безпосередньої участі здобувача, або здобувачем самостійно. Формулювання теми, мети, завдань досліджень, а також обговорення, аналіз та інтерпретацію основних результатів експериментів здобувач здійснював спільно з науковим керівником – д.філ., доц. Гніліцьким Я.М. Основні експериментальні операції – фемтосекундна лазерна обробка зразків, складання та електрохімічні випробування комірок суперконденсаторів, вимірювання імпедансних характеристик, шорсткості та змочуваності – проводилися здобувачем. Дані сканувальної електронної мікроскопії, енергодисперсійної спектроскопії, Раман-спектроскопії та рентгенівського аналізу були отримані у співпраці з фахівцями відповідних лабораторій; їхню обробку та інтерпретацію виконав здобувач. Чисельне моделювання фізичних процесів здійснювалося за методичної підтримки колег, тоді як статистичне опрацювання результатів, підготовка графічного матеріалу й оформлення наукових публікацій виконані здобувачем, що забезпечило цілісність і достовірність досліджень.

4. Достовірність та обґрунтованість отриманих результатів та запропонованих автором рішень, висновків, рекомендацій

Експериментальні результати отримано, використовуючи спеціалізоване обладнання та програмне забезпечення. Чисельні результати отримано за допомогою перевірених та апробованих математичних методів, які базуються на фундаментальних законах математики і фізики. Проведені експерименти були багаторазово повторені за різних умов, що підтверджує відтворюваність результатів. Обґрунтованість висновків підтверджується їх відповідністю сучасним теоретичним уявленням. Результати роботи демонструють узгодженість між собою, а також корелюють з матеріалами публікацій інших авторів за даною тематикою.

5. Ступінь новизни основних результатів дисертації порівняно з відомими дослідженнями аналогічного характеру

Наукова новизна отриманих результатів полягає в комплексному вивченні ультракороткої лазерної обробки для створення функціональних наноструктур у багатокомпонентних металевих системах, призначених для сенсорних і енергетичних застосувань. Вперше експериментально показано можливість формування лазерно-індукованих періодичних структур з періодом 650–750 нм на 2D багатошарових зразках Ti/Fe (товщиною шарів 60–80 мкм) після фемтосекундної обробки в повітрі; розроблена одновимірна двотемпературна модель пояснює локальний тепловий відгук, зародження фази TiFe та механізм селективної абляції, водночас отримані ЛППС збільшують площу поверхні на 9 % і зберігають регулярність навіть на нерівних ділянках. Набула подальшого розвитку методика

одностадійного синтезу нанопорошків Ni, Co та NiCo шляхом фемтосекундної лазерної абляції без стабілізаторів: показано, що водне середовище забезпечує збереження до 81 % металевої фази (Ni, NiCo) та формування каталізаторно перспективних фаз $\text{Co}(\text{OH})_2/\text{Co}_3\text{O}_4$, при цьому всі порошки мають нанокристалічну структуру розміром 22–55 нм, придатну для накопичувачів енергії й водневої енергетики. Вперше встановлено, що текстурування алюмінієвих колекторів ЛППС у повітряному та азотному середовищах зменшує повний електрохімічний опір суперконденсаторної комірки до 12,8–24,0 Ом (проти 187,9 Ом у вихідному стані). Вперше також продемонстровано одноетапне лазерне вплавлення графітового шару в Al-фольгу з мінімальною оксидацією при $\lambda = 515$ нм і формуванням інтерметаліду Al_4C_3 поряд із переходом графіту в аморфний стан, що забезпечує високу адгезію покриття й усуває потребу в багатостадійних термічних технологіях. Отримані результати не мають прямих аналогів у відкритій літературі та суттєво доповнюють уявлення про потенціал фемтосекундної лазерної технології в сенсорних і енергетичних системах.

6. Перелік наукових праць, які відображають основні результати дисертації

Основні положення, результати та висновки дисертації викладено у 5 наукових публікаціях, з яких 3 – статті, що опубліковані в наукових виданнях, що включені до наукометричних баз даних, 1 – опублікована у науковому фаховому виданні України та 1 – у матеріалах міжнародних наукових конференцій.

1. **Kuznetsov O.V.**, Tsibidis G.D., Demchishin A.V., Demchishin A.A., Babizhetskyy V., Saldan I., et al. Femtosecond laser-induced periodic surface structures on 2D Ti-Fe multilayer condensates. *Nanomaterials*. 2021. Vol. 11, No. 2. Article 316. (індексовано у Scopus, квартиль Q1). *Особистий внесок здобувача: приготування зразків для досліджень, проведення лазерної обробки для отримання нанотекстурованих поверхонь 2D багатопшарової системи металів Ti/Fe, обговорення результатів, підготовка статті до друку.*
2. Pohrelyuk I.M., Tkachuk O.V., Proskurnyak R.V., **Kuznetsov O.V.**, Gnilitzkyi Y.M. Morphology and corrosion properties of hydroxyapatite coating on VT6 titanium alloy. *Materials Science*. 2023. Vol. 58, No. 6. P. 781–787. (індексовано у Scopus, квартиль Q4). *Особистий внесок здобувача: вимірювання змочуваності зразків, обговорення результатів, підготовка статті до друку.*
3. Proskurnyak R.V., Tkachuk O.V., Pohrelyuk I.M., Padgurskas J., **Kuznetsov O.V.**, Gnilitzkyi I.M. Characterization of hydroxyapatite coatings deposited on gas nitrated Ti-6Al-4V alloy. *Materials Today*

Communications. 2025. Article ID: 112771. (індексовано у Scopus, квартиль Q1). *Особистий внесок здобувача: вимірювання змочуваності зразків, обговорення методів досліджень та отриманих результатів.*

4. **Kuznietsov O.**, Gnilitzkyi I., Ivashchyshyn F. Femtosecond laser infusion of graphite coating into aluminum foil. In: *Welding and Related Technologies*. CRC Press, 2025. P. 92–95. (публікація в матеріалах міжнародної конференції). *Особистий внесок здобувача: приготування зразків для досліджень, проведення лазерної обробки для вплавлення графіту, аналіз та обговорення результатів, написання та підготовка статті до друку.*
5. **Кузнєцов О.В.**, Гніліцький Я.М. Оптимізація міжфазного опору суперконденсаторів шляхом формування лазерно-індукованих періодичних структур на струмозбирачах. *Сенсорна електроніка і мікросистемні технології*. 2025. Т. 22, № 1. С. 44–52. (фахове видання України, серія «Б»). *Особистий внесок здобувача: приготування зразків, проведення лазерної обробки для утворення ЛППС на поверхні алюмінієвих колекторів, виготовлення електродів, збір комірки, проведення імпедансних досліджень, аналіз та обговорення результатів, написання та підготовка статті до друку.*

Опубліковані праці повною мірою відображають основні положення та результати роботи.

7. Апробація основних результатів дослідження на конференціях, симпозіумах, семінарах тощо

Основні результати дисертації було апробовано на такій міжнародній науковій конференції:

– 25th Conference on Materials Science, YUCOMAT 2023, м. Херцег-Нові, Чорногорія, 28 серпня – 1 вересня 2023 р.

8. Наукове значення виконаного дослідження із зазначенням можливих наукових галузей та розділів програм навчальних курсів, де можуть бути застосовані отримані результати

Наукові та практичні результати роботи можуть бути впроваджені у навчальному процесі на кафедрі напівпровідникової електроніки Національного університету «Львівська політехніка», зокрема у лабораторних практикумах з навчальних дисциплін «Основи мікро- та нанотехнологій» та «Технологічні основи мікро- та наносистемної техніки» для здобувачів вищої освіти спеціальності 176 «Мікро- та наносистемна техніка».

9. Практична цінність результатів дослідження із зазначенням конкретного підприємства або галузі народного господарства, де вони можуть бути застосовані

Практична цінність одержаних результатів полягає в розробці простих, екологічно чистих та ефективних лазерних методів модифікації поверхонь металів і створення наноструктурованих матеріалів, які можуть бути безпосередньо використані для виготовлення струмознімачів суперконденсаторів, каталітичних електродів та інших елементів систем накопичення й перетворення енергії. Запропоновані підходи, зокрема фемтосекундна лазерна абляція для синтезу наноструктурованих порошків Ni, Co та NiCo у воді й повітрі, лазерне формування ЛППС на алюмінієвих фольгах у різних середовищах, а також лазерне вплавлення графітового шару в алюміній, є одноетапними та не потребують використання хімічних реагентів або складної подальшої очистки.

Результати досліджень показали, що такі методи забезпечують покращену адгезію, зменшення електрохімічного опору, контрольований склад і морфологію поверхні, а швидкість та простота процесу робить їх придатними для промислового впровадження у виробництво електродів нової генерації. Зокрема, технологічні рішення можуть бути корисними для компанії YUNASKO (м. Київ та м. Хмельницький), яка займається розробкою та випуском високопотужних суперконденсаторів і гібридних накопичувачів енергії в Україні.

10. Оцінка структури дисертації, її мови та стилю викладення

Дисертація має чітку й логічно побудовану структуру, що відповідає вимогам Міністерства освіти і науки України до оформлення кваліфікаційних наукових праць. Загальний обсяг рукопису дисертації – 161 сторінка. Робота складається з вступу, чотирьох розділів, загальних висновків та списку використаних джерел. Кожен розділ логічно пов'язаний з попереднім та відображає етапи виконання дослідження – від постановки задачі й аналізу літератури до опису експериментальних методик, отриманих результатів і їх інтерпретації. Мова дисертації є науковою, граматично та стилістично коректною. Виклад матеріалу здійснено чітко і зрозуміло, з використанням відповідної термінології. Стиль написання відповідає вимогам академічної доброчесності, без порушення логіки викладу.

Дисертація за структурою, мовою та стилем викладення відповідає вимогам МОН України.

У ході обговорення дисертації до неї не було висунуто жодних зауважень щодо самої суті роботи.

11. З урахуванням зазначеного, на міжкафедральному науковому семінарі Навчально-наукового Інституту інформаційно-комунікаційних технологій та електронної інженерії ухвалили:

11.1. Дисертація Кузнєцова Олександра Валентиновича «Фемтосекундна лазерна обробка як інструмент покращення поверхневих властивостей металів для сенсорів та суперконденсаторів» є завершеною науковою працею, у якій запропоновано вирішення конкретного наукового завдання відтворюваного формування лазерно-індукованих наноструктур на алюмінієвих колекторах та багат шарових Ti/Fe-системах, що знижує електрохімічний опір суперконденсаторів і створює передумови для підвищення чутливості водневих сенсорів, що має важливе значення для галузі знань 15 *Автоматизація та приладобудування*.

11.2. Основні наукові положення, методичні розробки, висновки та практичні рекомендації, викладені у дисертаційній роботі, логічні, послідовні, аргументовані, достовірні, достатньо обґрунтовані. Дисертація характеризується єдністю змісту.

11.3. У 5 наукових публікаціях повністю відображені основні результати дисертації, з них 1 стаття опублікована у науковому фаховому виданні України, 3 статті у виданнях інших держав, які входять до міжнародних наукометричних баз, 1 публікація в матеріалах міжнародних наукових конференцій.

11.4. Дисертація відповідає вимогам наказу МОН України № 40 від 12.01.2017 р. «Про затвердження вимог до оформлення дисертації», Порядку присудження ступеня доктора філософії та скасування рішення разової спеціалізованої вченої ради закладу вищої освіти, наукової установи про присудження ступеня доктора філософії (Постанова Кабінету Міністрів України від 12 січня 2022 р. № 44, зі змінами).

11.5. Дисертація є результатом самостійних досліджень, не містить елементів фальсифікації, копіювання, плагіату та запозичень, що констатує відсутність порушення академічної доброчесності. Використання текстів інших авторів мають належні посилання на відповідні джерела.

11.6. З урахуванням наукової зрілості та професійних якостей Кузнєцова Олександра Валентиновича дисертація «Фемтосекундна лазерна обробка як інструмент покращення поверхневих властивостей металів для сенсорів та суперконденсаторів» рекомендується для подання до розгляду та захисту у спеціалізованій вченій раді.

За затвердження висновку проголосували:

за	-	16 (шістнадцять)
проти	-	(немає)
утримались	-	(немає)

Головуючий на міжкафедральному науковому семінарі ІКТЕ
д.т.н., проф.



Ірина ЯРЕМЧУК

Завідувач кафедри ЕЛІ,
д.т.н., проф.



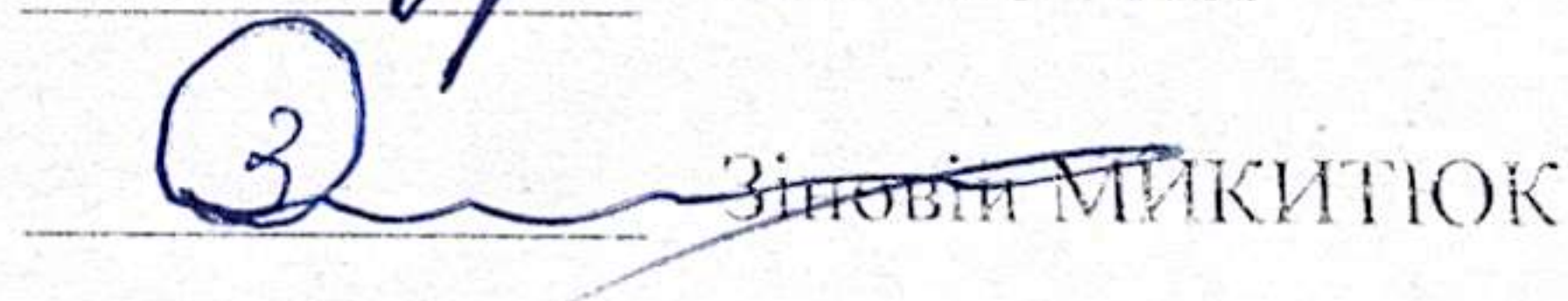
Ірина ЯРЕМЧУК

Рецензенти:
д.т.н., проф.



Олег БУРИЙ

д.ф-м.н., проф.



Зіновій МИКИТЮК

Відповідальний у ІКТЕ
за атестацію PhD
д.т.н. проф.



Ігор ОСТРОВСЬКИЙ

"03." 04 2025 р.