

**Голові разової спеціалізованої вченої ради
Національного університету «Львівська політехніка»
доктору технічних наук, професору
Галині КЛИМ**

РЕЦЕНЗІЯ

**професора кафедри електронної інженерії
Національного університету «Львівська політехніка»,
доктора фізико-математичних наук,
МИКИТЮКА Зіновія Матвійовича
на дисертацію
КУЗНЄЦОВА Олександра Валентиновича
«Фемтосекундна лазерна обробка як інструмент покращення
поверхневих властивостей металів для сенсорів та
суперконденсаторів»,
подану на здобуття наукового ступеня доктора філософії в галузі знань
15 «Автоматизація та приладобудування»
за спеціальністю 153 «Мікро- та наносистемна техніка»**

Актуальність теми дисертації

Сучасна цивілізація неможлива без численних електронних пристроїв і гаджетів, що пронизують усі сфери життя — від побуту до промисловості, аграрного сектору, медицини, оборонних та космічних технологій. Для взаємодії людини з цим «світом електроніки» слугують сенсори — елементи, які перетворюють зовнішній подразник на електричний сигнал. Не менш важливою складовою є ефективне джерело живлення, здатне забезпечити безперебійну роботу всієї електронної інфраструктури. Саме цих злободенних питань торкається у своїй дисертації О. В. Кузнєцов.

При контакті пристроїв із оточенням вирішальну роль відіграє стан поверхні: вона визначає фізичні, оптичні та каталітичні властивості матеріалу, а отже — чутливість сенсорів, провідність електродів та функціональність спеціальних покриттів. Прикладами важливості поверхневої інженерії є камуфляжні покриття, захист від підробок, текстурування сонячних елементів для підвищення поглинання світла,

оптимізація теплообміну та «лотос-ефект», який перешкоджає обмерзанню авіаційних крил.

Дисертант зосередився на перспективному напрямі — контрольованій лазерній модифікації поверхонь сенсорних та суперконденсаторних систем з метою підвищення їх ефективності. Метод полягає в опроміненні матеріалів піко- та фемтосекундними імпульсами, унаслідок чого формується нанорельєф: лазерно-індуковані поверхневі структури (у тому числі періодичні). Попри складну фізику процесу, що охоплює інтерференційні та плазмонні явища та самоорганізацію речовини, такий підхід має вагомі переваги перед розпиленням, хімічним чи плазмовим травленням, літографією: він одностадійний, швидкий, економічний і придатний до промислового масштабування.

Таким чином, результати, отримані у дисертаційній роботі О. В. Кузнєцова, мають як фундаментальне, так і прикладне значення, відповідають актуальним запитам сучасного матеріалознавства й електроніки та повністю підтверджують актуальність обраної теми.

Ступінь обґрунтованості та достовірності наукових положень і висновків

У роботі застосовано цілий «набір» перевірених методів, які доповнюють одне одного і дають повну картину того, що відбувається з матеріалами після фемтосекундної обробки. Окрім самого лазерного комплексу, дисертант використав:

- сканувальну електронну мікроскопію (СЕМ) і фокусований іонний пучок (ФІП) для знімків поверхні та зрізів;
- атомно-силову мікроскопію (АСМ) та безконтактну профілометрію для вимірювання шорсткості;
- енерго-дисперсійну спектроскопію (ЕДС) для визначення складу;
- конфокальну раманівську мікроскопію для фазового аналізу;

- електрохімічні вимірювання (імпедансна спектроскопія, циклічна вольтамперометрія, гальваностатичне циклювання) для оцінки провідності й ємності електродів.

Щоб пояснити, як саме формується рельєф, автор також розрахував температурні процеси у двошаровій системі Ti/Fe за допомогою двотемпературної моделі й оцінив параметри поверхневої плазмон-поляритонної хвилі. Модельні результати добре узгоджуються з експериментом, а самі експерименти не суперечать даним інших дослідників.

Поставлені задачі виконані повністю, методи вимірювань — сучасні й перевірені, тому одержані висновки можна вважати достовірними. До того ж ключові результати уже опубліковані у фахових журналах високого рейтингу (квартилі Q1 та Q3), що є додатковим підтвердженням їхньої надійності.

Наукова новизна

Під час виконання дисертаційної роботи здобувачем отримано низку нових результатів, серед яких можна виділити наступні:

1. Вперше досліджено формування лазерно-індукованих періодичних поверхневих структур на поверхні масивних зразків Ti/Fe після фемтосекундної лазерної обробки у повітрі. Запропоновано двотемпературну модель, яка пояснює локальний тепловий відгук, формування фази TiFe та механізм селективної абляції. Встановлено, що сформовані ЛППС демонструють стабільну періодичність навіть на поверхнях із початковими нерівностями, що підтверджує ефективність методу для створення контрольованих наноструктур у двокомпонентних системах.

2. Здійснено систематичне дослідження впливу середовища (повітря та дистильована вода) на формування наночастинок Ni, Co та NiCo

у процесі фемтосекундної лазерної абляції без використання стабілізаторів або хімічних реагентів. Запропонований підхід є екологічно безпечним, одноетапним і не потребує додаткової очистки або складної обробки. Встановлено, що синтез у водному середовищі сприяє утворенню металевої фази (Ni — 81%, NiCo — 80%), тоді як у повітрі переважають оксидні фази (NiO — 92%, NiCoO і CoO — 100%). Для кобальту у воді зафіксовано переважання Co(OH)_2 (65%) та Co_3O_4 (33%). Отримані результати демонструють переваги лазерної обробки матеріалів для підвищення їх ефективності у ємнісних системах накопичення енергії, каталізі та технологіях водневої енергетики.

3. Вперше встановлено, що формування ЛППС на алюмінієвих колекторах забезпечує значне зменшення повного електрохімічного опору суперконденсаторної комірки порівняно з необробленою поверхнею. Підтверджено структурні модифікації поверхні без фазових перетворень; доведено ефективність ЛППС-модифікації як методу покращення електрохімічних характеристик струмознімачів.

4. Вперше досліджено можливість ефективного вплавлення графіту в алюмінієву фольгу за допомогою фемтосекундної лазерної обробки як альтернативи традиційним методам створення металографітових композитів. Встановлено, що зміна параметрів лазерного впливу дозволяє точно контролювати процес вплавлення графіту, мінімізувати оксидацію та забезпечити високу адгезію покриття. Запропонований підхід є простим, одноетапним, екологічним і може бути використаний для створення вдосконалених струмознімачів у суперконденсаторах без застосування хімічних домішок або додаткових етапів обробки.

Практичне значення одержаних результатів

Сьогодні лазерна обробка матеріалів перетворилася на універсальний інструмент, здатний закривати найрізноманітніші прикладні завдання. У своїй роботі О. В. Кузнецов наочно довів, що фемтосекундні лазери можна ефективно використати для створення водневих сенсорів, каталітичних електродів, струмознімачів суперконденсаторів та інших ключових компонентів систем накопичення й перетворення енергії. Запропоновані підходи вирізняються екологічністю (відсутність хімічних реагентів), високою керованістю через гнучке налаштування параметрів опромінення та хорошими перспективами промислового масштабування. Отже, практичне значення таких лазерних технологій у матеріалознавстві й надалі зростатиме разом із поширенням отриманих у дисертації напрацювань.

Відповідність теми дисертації профілю спеціальності, відсутність порушень академічної доброчесності

Представлена дисертація повністю відповідає спеціальності 153 «Мікро- та наносистемна техніка», оскільки зосереджена на розробці й оптимізації мікро- та наноструктурованих металевих поверхонь, отриманих фемтосекундною лазерною обробкою, для водневих сенсорів і елементів систем накопичення енергії. Тематика охоплює ключові напрями спеціальності — від лазерних технологій мікро- і наноструктурування до сенсорної електроніки та електрохімічних накопичувачів.

Використаний автором методичний арсенал (фемтосекундна лазерна установка, скануючий електронний мікроскоп, атомно силова мікроскопія, енергодисперсна спектроскопія, конфокальна Раман-мікроскопія, імпедансна спектроскопія, двотемпературне моделювання тощо) є типовим для сучасних досліджень у сфері мікро- та наносистемної техніки, що підтверджує відповідність обраних підходів профілю спеціальності.

Порушень академічної доброчесності у роботі не виявлено. Дисертація є самостійною науковою працею автора; усі запозичення оформлено коректно, а результати інших дослідників належно процитовано. Основні положення оприлюднено у рецензованих фахових виданнях, що додатково засвідчує достовірність і прозорість представлених матеріалів.

Дискусійні положення й зауваження щодо змісту та оформлення дисертації

Наведені нижче зауваження мають переважно редакційний характер і не стосуються основних наукових результатів:

1. Друкарські й стилістичні помилки. У тексті трапляються поодинокі орфографічні неточності та некоректні закінчення слів; бажано провести фінальну вичитку.
2. Нумерація і посилання. У кількох місцях змісту зсунута нумерація рисунків і таблиць (після рис. 1.5, 2.9, табл. 3.4; посилання на рис. 4.9). Варто синхронізувати підписи та посилання.
3. Пояснення параметра β . Для повноти викладу рекомендується додати коротке пояснення чи приклад розрахунку коефіцієнта β у формулах (2.3–2.5).
4. Стабільність нанорельєфу та електродів. Було б доцільно продемонструвати довготривалу стабільність електродів із ЛППС (після 500–1000 циклів) та порівняти їхні характеристики з необробленими електродами.

Зазначені зауваження не знижують наукової цінності виконаної роботи і можуть бути враховані у майбутніх публікаціях.

Висновок про відповідність дисертації вимогам, які пред'являються до наукового ступеня доктора філософії

Дисертаційна робота Кузнецова Олександра Валентиновича властивостей металів для сенсорів та суперконденсаторів», представлена на здобуття наукового ступеня доктора філософії за спеціальністю 153 «Мікрота наносистемна техніка», є актуальним та завершеним науковим дослідженням, в якому матеріал викладено послідовно, логічно і в доступній формі. Робота повністю відповідає вимогам наказу МОН України №40 від 12.01.17р. «Про затвердження вимог до оформлення дисертації» та постанови КМ від 12 січня 2022 р. №44 «Порядку присудження ступеня доктора філософії та скасування рішення разової спеціалізованої вченої ради закладу вищої освіти, наукової установи про присудження доктора філософії» з останніми змінами, внесеними постановою КМ №341 від 21.03.2022 р., а її автор, Кузнецов Олександр Валентинович, може бути рекомендований для присудження йому, за умови розгляду разової спеціалізованої вченої ради Національного університету «Львівська політехніка», наукового ступеня доктора філософії за спеціальністю 153 –

Рецензент

д.ф-м.н., кафедри електронної інженерії

Національного університету

«Львівська Політехніка»,

Професор



Зіновій МИКИТЮК

Підпис д.ф-м.н., проф. Микитюка З.М. засвідчую

Проректор



Микола ЛОГОЙДА