UNIWERSYTET IM. ADAMA MICKIEWICZA W POZNANIU
Centrum NanoBioMedyczne

Prof. dr hab. Igor Iatsunskyi
Adam Mickiewicz University
NanoBioMedical Centre
Wszechnicy Piastowskiej str. 3,
61-614, Poznań
igoyat@amu.edu.pl
tel: +48 731 308 173

Poznan, 27th October 2026

POLITECHNIKA GDAŃSKA
BIURO RADY DYSCYPLINY NAUKOWEJ
INŻYNIERIA MATERIAŁOWA
Wpłynęło dnia 27.10.2026
L.dz. 74/2026
Podpis

REVIEW

of the doctoral dissertation of Ms. Aiswarya Manohar

"Engineering Laser-Induced Graphene for Multifunctional Electrochemical Interfaces"

submitted in the discipline of **Materials Engineering**
at **Gdańsk University of Technology**

Supervisor: Prof. dr hab. inż. Jacek Ryl
Auxiliary supervisor: Dr Mohsen Khodadadi Yazdi

The doctoral dissertation submitted for review by Ms. Aiswarya Manohar focuses on the fabrication, optimization and surface engineering of laser-induced graphene (LIG) for the development of multifunctional electrochemical interfaces. The subject of the dissertation fits within one of the rapidly developing areas of modern materials engineering, nanotechnology and electrochemistry, related to the design of advanced carbon-based materials for electrochemical sensing, bioelectronics and flexible analytical devices.
Laser-induced graphene has attracted considerable scientific attention due to its relatively simple fabrication, high electrical conductivity, porous structure and the possibility of directly producing conductive patterns on various polymeric substrates. Unlike conventional graphene fabrication techniques, laser processing enables localized modification of precursor materials without requiring complex chemical synthesis or transfer procedures. However, the resulting physicochemical and electrochemical properties strongly depend on the processing conditions, precursor composition and subsequent surface functionalization. In this context, the research undertaken by the Doctoral Candidate is scientifically relevant and possesses considerable application potential.
The dissertation has been prepared in the form of a comprehensive, traditional doctoral thesis comprising 176 pages. It includes a literature review, research objectives, experimental methodology, results and discussion, conclusions and references. The experimental work addresses several interconnected research directions, beginning with the optimization of laser processing conditions and progressing toward the development of increasingly complex electrochemical interfaces incorporating hydrogel membranes, bimetallic nanoparticles, multifunctional polymers and biological recognition elements.
The literature review demonstrates the Candidate's very good knowledge of the current state of research on laser-induced graphene and electrochemical surface engineering.

Particularly valuable are the sections devoted to LIG fabrication mechanisms, the influence of laser processing parameters on structural and electrochemical properties, and different strategies for modifying carbon-based electrodes. The discussion of hydrogel interfaces, electrocatalytic nanoparticles, antifouling polymers and enzyme immobilization provides an appropriate scientific background for the subsequent experimental investigations.
The theoretical part is generally well organized and supported by relevant scientific literature. Nevertheless, the introductory chapters would benefit from a larger number of schematic illustrations explaining the mechanisms of laser-induced graphitization, the influence of processing parameters on the resulting material structure and the principles of the proposed surface modification strategies. Such illustrations would make the discussion more accessible and facilitate understanding of the relationships between individual research stages.
The objectives of the dissertation are formulated clearly and address the systematic investigation of the relationships between laser fabrication parameters, physicochemical properties and electrochemical performance of LIG, followed by the development of functional surface modifications for targeted electrochemical applications. In my opinion, the principal objectives have been substantially achieved, although some aspects concerning quantitative material characterization, statistical reproducibility and long-term performance require further clarification.
The greatest scientific value of the dissertation lies in its systematic approach to the optimization and functionalization of LIG electrodes and the extensive range of experimental investigations performed. The Candidate employed modern characterization techniques, including scanning and transmission electron microscopy, Raman spectroscopy, X-ray photoelectron spectroscopy, electrical measurements, contact angle analysis, cyclic voltammetry, electrochemical impedance spectroscopy and chronoamperometric measurements.
Particularly noteworthy is the investigation of the influence of laser power, scanning speed, hatch spacing and focal position on LIG formation using polyimide substrates of different thicknesses. The results demonstrate that relatively small changes in processing conditions can significantly influence the morphology, electrical conductivity and electrochemical properties of the resulting material. The identification of processing windows suitable for obtaining conductive graphene structures represents an important contribution to improving the reproducibility of LIG electrode fabrication.
Another valuable aspect of the dissertation is the investigation of hydrogel-modified LIG electrodes. The use of chitosan, alginate and agar-based interfaces provides an opportunity to examine how different polymeric membranes influence electrochemical accessibility, interfacial transport and electron-transfer characteristics. The results indicate that the chemical nature of the hydrogel and its interaction with the underlying electrode strongly influence the resulting electrochemical response.
I also positively assess the development of LIG electrodes modified with iridium and platinum nanostructures. The sequential electrodeposition approach allows the formation of bimetallic catalytic interfaces and provides an interesting strategy for modifying electroactive surface area and electron-transfer kinetics. The investigation of hydrogen peroxide oxidation demonstrates the potential of these materials for electrocatalytic and electroanalytical applications.
Particular recognition should be given to the integration of bimetallic nanostructures with a multifunctional APTAC/SBMA copolymer and glucose oxidase. This approach combines catalytic activity, enzyme immobilization, antifouling functionality and antibacterial properties within a single electrochemical platform. These results demonstrate the feasibility of the proposed surface engineering strategy for electrochemical biosensing.

The final experimental part explores the possibility of extending laser-induced graphene fabrication to alternative substrates, including cellulose-based and fluoropolymer materials, together with preliminary investigations of LIG transfer onto flexible polymeric supports. Although these studies are less developed than the main experimental sections, they provide interesting directions for future research on sustainable, flexible and potentially wearable electrochemical devices.

In my opinion, **the most important scientific achievements** of the dissertation include:

- Establishing relationships between laser processing parameters, structural characteristics and electrochemical properties of LIG electrodes.
- Identifying suitable processing conditions for obtaining conductive and electrochemically active LIG structures on polyimide substrates.
- Investigating the influence of hydrogel membranes on electrochemical accessibility and interfacial charge-transfer processes.
- Developing bimetallic Ir-Pt-modified LIG electrodes with enhanced electrocatalytic properties.
- Integrating catalytic nanostructures, multifunctional copolymers and glucose oxidase within a single electrochemical sensing platform.
- Demonstrating glucose detection and preliminary antifouling and antibacterial functionality.
- Exploring alternative precursor materials and transfer approaches for future flexible LIG-based devices.

From an editorial perspective, the dissertation is generally logically organized, and the experimental results are presented in a coherent sequence. However, several figures, captions and quantitative analyses require correction or clarification. In particular, the absence of statistical information for some measured parameters and the limited presentation of electrochemical impedance modelling reduce the possibility of independently assessing certain conclusions.

Despite my positive assessment of the dissertation, I would like to raise several comments and scientific questions for discussion. I would stress, that those comments and questions do not diminish the scientific value of the dissertation but identify areas where additional quantitative analysis and experimental verification would strengthen the conclusions.

Comments and Questions:

1. Page 20, Figure 1. The graphical representations of graphene and graphene oxide appear to be interchanged.
2. Page 29. The laser wavelength is not specified in the relevant discussion. Since the wavelength strongly influences optical absorption, penetration depth and energy transfer to the precursor material, this information should be included to provide a complete description of the laser processing conditions.
3. The literature review contains relatively few schematic illustrations. Additional figures explaining laser-induced graphitization, the influence of laser processing parameters and the different strategies for LIG functionalization would improve the clarity of the theoretical discussion.
4. Page 72, Figure 13b. The optimization matrix presents regions corresponding to complete LIG formation, incomplete formation and unsuccessful processing. However, the distribution of these regions appears discontinuous, with gaps between different processing conditions. It is not sufficiently clear whether these gaps result from untested parameter

combinations, experimental variability or specific physical phenomena associated with laser-induced graphitization. A more detailed explanation of the criteria used to classify the different regions would be valuable.

5. Page 75. The text contains typographical errors, including those around line 5.

6. Page 78, Table 7. Contact angle measurements are reported without standard deviations or other measures of experimental uncertainty. Similar limitations can be observed for several other physical and electrochemical parameters presented throughout the dissertation. The number of independent measurements and the corresponding statistical variability should be reported to demonstrate the reproducibility and significance of the observed differences.

7. Page 98. The discussion of the Randles–Ševčík analysis contains typographical and figure-related inconsistencies. The corresponding plot should be clearly presented and correctly referenced, with appropriate identification of the experimental data and fitted relationships. This is particularly important because the calculated electroactive surface area is used as a key parameter for comparing the investigated electrodes.

8. The EIS results are discussed mainly through qualitative comparison of the impedance spectra. However, equivalent-circuit modelling and the corresponding fitting parameters are not sufficiently presented. The inclusion of an appropriate equivalent circuit, fitted spectra and quantitative values of charge-transfer resistance, double-layer or constant-phase-element parameters and diffusion-related contributions would considerably strengthen the interpretation.

9. Figure 35. The figure caption contains an inconsistency in the identification of individual panels. In particular, panel (b) is not properly described. The caption should be corrected to ensure that all SEM images and corresponding samples are clearly identified.

10. The dissertation presents extensive electron microscopy investigations of LIG and metal-modified electrodes. However, complementary EDX elemental analysis and elemental mapping are not sufficiently presented. Such measurements would provide additional information about the elemental distribution and spatial homogeneity of Ir and Pt deposits and help verify the proposed bimetallic architecture. I would like to ask why this characterization was not included and whether alternative compositional analyses were performed to confirm the distribution of both metals.

11. Figure 41. The relationship between theoretical metal loading, electroactive surface area and heterogeneous electron-transfer rate constant is particularly interesting. However, the metal loading was calculated using Faraday's law under the assumption of 100% deposition efficiency. Since competing electrochemical reactions may occur during electrodeposition, the actual deposited mass can differ significantly from the theoretical value. How was the validity of this assumption assessed? Was the metal loading independently verified using methods such as ICP-MS, ICP-OES, EDX or another quantitative analytical technique?

12. The dissertation demonstrates that relatively small variations in laser power and scanning speed can substantially affect the electrochemical performance of LIG electrodes. However, the underlying mechanisms are not fully quantified. To what extent can the observed changes be attributed to differences in graphitic ordering, defect density, oxygen-containing functional groups and the resulting porous morphology? Could a more quantitative correlation between Raman parameters, surface chemistry, electrical conductivity and heterogeneous electron-transfer rate constants provide a predictive model for optimizing LIG fabrication?

13. The electroactive surface area is estimated using the Randles–Ševčík relationship, while electron-transfer kinetics are evaluated using electrochemical methods. Considering the highly porous and heterogeneous nature of LIG electrodes, how were the assumptions of semi-infinite planar diffusion and the applicability of the selected kinetic models verified?

Could thin-layer diffusion within pores, surface adsorption or nonuniform current distribution influence the calculated electroactive surface area and heterogeneous electron-transfer rate constants?

14. The dissertation demonstrates improved electrocatalytic behaviour following sequential electrodeposition of Ir and Pt. However, it remains unclear whether the observed enhancement originates primarily from increased electroactive surface area, the intrinsic catalytic activity of individual metals or synergistic interactions between Ir and Pt. What experimental evidence supports the formation of a bimetallic catalytic interface rather than separate Ir- and Pt-rich deposits? How could the individual contributions of surface area, composition and electronic interactions be distinguished?

15. The developed glucose sensing platform demonstrates promising analytical characteristics and partial resistance to protein fouling. However, its long-term operational stability and performance under realistic conditions remain important challenges. How stable are the enzyme-containing copolymer layers during repeated electrochemical measurements and prolonged exposure to biological media? To what extent might enzyme leaching, polymer swelling, changes in oxygen availability or degradation of the catalytic interface influence the sensor response? What additional experiments would be necessary to demonstrate the suitability of this platform for continuous glucose monitoring?

Final Evaluation

The doctoral dissertation submitted by Ms. Aiswarya Manohar, entitled **"Engineering Laser-Induced Graphene for Multifunctional Electrochemical Interfaces,"** constitutes an original and valuable scientific contribution to materials engineering, surface science and electrochemical sensing.

The Candidate has demonstrated very good knowledge of modern methods for the fabrication, characterization and functionalization of carbon-based electrode materials, as well as the ability to plan and conduct complex experimental investigations. The dissertation combines systematic optimization of laser processing parameters with the development of multifunctional electrochemical interfaces incorporating hydrogel membranes, catalytic nanoparticles, polymers and biological recognition elements.

The obtained results possess significant scientific and application-oriented value and may contribute to the further development of flexible electrochemical sensors, biosensing platforms and advanced carbon-based functional materials. Although some aspects of quantitative characterization, statistical analysis and mechanistic interpretation require clarification, the dissertation presents a coherent body of original experimental research and demonstrates the Candidate's scientific competence and ability to conduct independent research.

In my opinion, the doctoral dissertation of Ms. Aiswarya Manohar **fulfils the requirements specified in the Act of 20 July 2018 – Law on Higher Education and Science**. Therefore, I recommend that Ms. Aiswarya Manohar be admitted to the subsequent stages of the doctoral degree procedure in the discipline of Materials Engineering.

Prof. dr hab. Igor Iatsunskyi

Signed by /
Podpisano przez:

Igor Iatsunskyi

Date / Data:
2026-10-27 12:40

UNIWERSYTET IM. ADAMA MICKIEWICZA W POZNANIU
Centrum NanoBioMedyczne

Prof. dr hab. Igor Iatsunskyi

Poznań, 27 października 2026

Uniwersytet im. Adama Mickiewicza
NanoBioMedical Centre
Wszechnicy Piastowskiej str. 3,
61-614, Poznań
igoyat@amu.edu.pl
tel: +48 731 308 173

RECENZJA
rozprawy doktorskiej pani Aiswary Manohar

„Engineering Laser-Induced Graphene for Multifunctional Electrochemical Interfaces"

wykonanej w dyscyplinie **Inżynieria Materiałowa** na **Politechnice Gdańskiej**

Promotor: prof. dr hab. inż. Jacek Ryl;
Promotor pomocniczy: Dr Mohsen Khodadadi Yazdi

Przedstawiona do recenzji rozprawa doktorska Pani Aiswary Manohar koncentruje się na wytwarzaniu, optymalizacji i inżynierii powierzchni grafenu indukowanego laserowo (LIG) na potrzeby rozwoju wielofunkcyjnych interfejsów elektrochemicznych. Tematyka rozprawy wpisuje się w jeden z szybko rozwijających się obszarów nowoczesnej inżynierii materiałowej, nanotechnologii i elektrochemii, związany z projektowaniem zaawansowanych materiałów węglowych do zastosowań w czujnikach elektrochemicznych, bioelektronice oraz elastycznych urządzeniach analitycznych.
Grafen indukowany laserowo przyciągnął znaczne zainteresowanie naukowe ze względu na stosunkowo prosty proces wytwarzania, wysoką przewodność elektryczną, porowatą strukturę oraz możliwość bezpośredniego tworzenia przewodzących wzorów na różnych podłożach polimerowych. W przeciwieństwie do konwencjonalnych technik wytwarzania grafenu, obróbka laserowa umożliwia lokalną modyfikację materiałów prekursorowych bez konieczności przeprowadzania złożonej syntezy chemicznej lub procedur transferu. Jednakże powstałe właściwości fizykochemiczne i elektrochemiczne silnie zależą od warunków obróbki, składu prekursora oraz późniejszej funkcjonalizacji powierzchni. W tym kontekście badania podjęte przez Doktorantkę są istotne naukowo i posiadają znaczny potencjał aplikacyjny.
Rozprawa została przygotowana w formie kompleksowej, tradycyjnej pracy doktorskiej liczącej 176 stron. Zawiera ona przegląd literatury, cele badawcze, metodologię eksperymentalną, wyniki i dyskusję, wnioski oraz bibliografię. Praca eksperymentalna obejmuje kilka powiązanych ze sobą kierunków badawczych, rozpoczynając od

optymalizacji warunków obróbki laserowej, a kończąc na opracowaniu coraz bardziej złożonych interfejsów elektrochemicznych zawierających membrany hydrożelowe, bimetaliczne nanocząstki, polimery wielofunkcyjne oraz elementy rozpoznawania biologicznego.
Przegląd literatury wykazuje bardzo dobrą wiedzę Kandydata na temat obecnego stanu badań nad grafenem indukowanym laserowo oraz elektrochemiczną inżynierią powierzchni. Szczególnie wartościowe są sekcje poświęcone mechanizmom wytwarzania LIG, wpływowi parametrów obróbki laserowej na właściwości strukturalne i elektrochemiczne oraz różnym strategiom modyfikacji elektrod węglowych. Dyskusja na temat interfejsów hydrożelowych, nanocząstek elektrokatalitycznych, polimerów antyfoulingowych oraz immobilizacji enzymów stanowi odpowiednie zaplecze naukowe dla późniejszych badań eksperymentalnych.
Część teoretyczna jest ogólnie dobrze zorganizowana i poparta odpowiednią literaturą naukową. Niemniej jednak, rozdziały wprowadzające zyskałyby na większej liczbie schematycznych ilustracji wyjaśniających mechanizmy grafityzacji indukowanej laserowo, wpływ parametrów obróbki na strukturę otrzymanego materiału oraz zasady proponowanych strategii modyfikacji powierzchni. Takie ilustracje uczyniłyby dyskusję bardziej przystępną i ułatwiły zrozumienie zależności między poszczególnymi etapami badań.
Cele rozprawy są sformułowane jasno i dotyczą systematycznego zbadania zależności między parametrami wytwarzania laserowego, właściwościami fizykochemicznymi a wydajnością elektrochemiczną LIG, a następnie opracowania funkcjonalnych modyfikacji powierzchni dla celowanych zastosowań elektrochemicznych. Moim zdaniem główne cele zostały w znacznym stopniu osiągnięte, choć niektóre aspekty dotyczące ilościowej charakterystyki materiału, statystycznej powtarzalności i długoterminowej wydajności wymagają dalszego wyjaśnienia.
Największa wartość naukowa rozprawy tkwi w jej systematycznym podejściu do optymalizacji i funkcjonalizacji elektrod LIG oraz w szerokim zakresie przeprowadzonych badań eksperymentalnych. Kandydat wykorzystał nowoczesne techniki charakterystyki, w tym skaningową i transmisyjną mikroskopię elektronową, spektroskopię Ramanowską, spektroskopię fotoelektronów promieniowania rentgenowskiego, pomiary elektryczne, analizę kąta kontaktowego, woltamperometrię cykliczną, spektroskopię impedancji elektrochemicznej oraz pomiary chronoamperometryczne.
Szczególnie godne uwagi jest zbadanie wpływu mocy lasera, prędkości skanowania, odstępu między liniami (hatch spacing) i pozycji ogniskowej na tworzenie LIG przy użyciu podłoży poliimidowych o różnej grubości. Wyniki wykazują, że stosunkowo niewielkie zmiany w warunkach obróbki mogą znacząco wpływać na morfologię, przewodnictwo elektryczne i właściwości elektrochemiczne otrzymanego materiału. Identyfikacja okien procesowych odpowiednich do uzyskiwania przewodzących struktur grafenowych stanowi istotny wkład w poprawę powtarzalności wytwarzania elektrod LIG.
Kolejnym wartościowym aspektem rozprawy jest zbadanie elektrod LIG zmodyfikowanych hydrożelem. Zastosowanie interfejsów opartych na chitozanie, alginianie i agarze stwarza możliwość zbadania, w jaki sposób różne membrany polimerowe wpływają na dostępność elektrochemiczną, transport na granicy faz oraz charakterystykę transferu elektronów. Wyniki wskazują, że natura chemiczna hydrożelu oraz jego oddziaływanie z podłożowym elektrodą silnie wpływają na uzyskiwaną odpowiedź elektrochemiczną.
Pozytywnie oceniam również opracowanie elektrod LIG zmodyfikowanych nanostrukturami irydu i platyny. Podejście oparte na sekwencyjnym elektroosadzaniu umożliwia tworzenie bimetalicznych interfejsów katalitycznych i stanowi interesującą strategię modyfikacji elektroaktywnej powierzchni oraz kinetyki transferu elektronów. Badanie utleniania

nadtlenku wodoru wykazuje potencjał tych materiałów w zastosowaniach elektrokatalitycznych i elektroanalitycznych.
Szczególnego uznania zasługuje integracja bimetalicznych nanostruktur z wielofunkcyjnym kopolimerem APTAC/SBMA oraz oksydazą glukozową. Podejście to łączy aktywność katalityczną, immobilizację enzymu, funkcjonalność antyfoulingową oraz właściwości antybakteryjne w ramach jednej platformy elektrochemicznej. Wyniki te potwierdzają wykonalność zaproponowanej strategii inżynierii powierzchni dla elektrochemicznego biosensorstwa.
Końcowa część eksperymentalna bada możliwość rozszerzenia wytwarzania grafenu indukowanego laserowo na alternatywne podłoża, w tym materiały na bazie celulozy i fluoropolimery, wraz z wstępnymi badaniami transferu LIG na elastyczne substraty polimerowe. Chociaż badania te są mniej rozwinięte niż główne sekcje eksperymentalne, wyznaczają interesujące kierunki dla przyszłych badań nad zrównoważonymi, elastycznymi i potencjalnie noszonymi urządzeniami elektrochemicznymi.

Moim zdaniem **najważniejsze osiągnięcia naukowe** rozprawy obejmują:

- Ustalenie zależności między parametrami obróbki laserowej, charakterystyką strukturalną a właściwościami elektrochemicznymi elektrod LIG.
- Identyfikacja odpowiednich warunków obróbki w celu uzyskania przewodzących i elektrochemicznie aktywnych struktur LIG na podłożach poliimidowych.
- Badanie wpływu membran hydrożelowych na dostępność elektrochemiczną oraz procesy transferu ładunku na granicy faz.
- Opracowanie bimetalicznych elektrod LIG modyfikowanych Ir-Pt o zwiększonych właściwościach elektrokatalitycznych.
- Integracja nanostruktur katalitycznych, wielofunkcyjnych kopolimerów oraz oksydazy glukozowej w ramach jednej platformy elektrochemicznego czujnika.
- Demonstracja wykrywania glukozy oraz wstępnej funkcjonalności antyfoulingowej i antybakteryjnej.
- Badanie alternatywnych materiałów prekursorowych i metod transferu dla przyszłych elastycznych urządzeń opartych na LIG.

Z redakcyjnego punktu widzenia rozprawa jest ogólnie zorganizowana logicznie, a wyniki eksperymentalne są przedstawione w spójnej sekwencji. Jednakże kilka rysunków, podpisów oraz analiz ilościowych wymaga poprawy lub wyjaśnienia. W szczególności brak informacji statystycznych dla niektórych mierzonych parametrów oraz ograniczona prezentacja modelowania impedancji elektrochemicznej ograniczają możliwość samodzielnej oceny niektórych wniosków.

Pomimo mojej pozytywnej oceny rozprawy, chciałbym zgłosić kilka uwag i pytań naukowych do dyskusji. Chciałbym podkreślić, że uwagi i pytania te nie umniejszają wartości naukowej rozprawy, lecz wskazują obszary, w których dodatkowa analiza ilościowa i weryfikacja eksperymentalna wzmocniłyby wnioski.

Uwagi i pytania:

1. Strona 20, Rysunek 1. Wygląda na to, że przedstawienia grafenu i tlenku grafenu zostały zamienione miejscami.
2. Strona 29. W odpowiedniej dyskusji nie określono długości fali lasera. Ponieważ długość fali silnie wpływa na absorpcję optyczną, głębokość penetracji oraz transfer energii do

materiału prekursorowego, informacja ta powinna zostać uwzględniona, aby zapewnić pełny opis warunków obróbki laserowej.

3. Przegląd literatury zawiera stosunkowo mało schematycznych ilustracji. Dodatkowe rysunki wyjaśniające grafityzację indukowaną laserowo, wpływ parametrów obróbki laserowej oraz różne strategie funkcjonalizacji LIG poprawiłyby przejrzystość dyskusji teoretycznej.

4. Strona 72, Rysunek 13b. Macierz optymalizacji przedstawia obszary odpowiadające pełnemu tworzeniu się LIG, niepełnemu tworzeniu się oraz nieudanej obróbce. Jednak rozkład tych obszarów wydaje się nieciągły, z przerwami między różnymi warunkami obróbki. Nie jest wystarczająco jasne, czy przerwy te wynikają z nieprzetestowanych kombinacji parametrów, zmienności eksperymentalnej, czy specyficznych zjawisk fizycznych związanych z grafityzacją indukowaną laserowo. Warto byłoby przedstawić bardziej szczegółowe wyjaśnienie kryteriów użytych do klasyfikacji poszczególnych obszarów.

5. Strona 75. Tekst zawiera błędy typograficzne, w tym te w okolicach linii 5.

6. Strona 78, Tabela 7. Pomiary kąta kontaktowego podano bez odchyleń standardowych lub innych miar niepewności eksperymentalnej. Podobne ograniczenia można zaobserwować w przypadku kilku innych parametrów fizycznych i elektrochemicznych przedstawionych w rozprawie. Liczba niezależnych pomiarów oraz odpowiadająca im zmienność statystyczna powinny zostać podane, aby wykazać powtarzalność i istotność zaobserwowanych różnic.

7. Strona 98. Dyskusja dotycząca analizy Randlesa–Ševčíka zawiera nieścisłości typograficzne oraz błędy w odniesieniu do rysunków. Odpowiedni wykres powinien zostać wyraźnie przedstawiony i poprawnie opisany, z właściwą identyfikacją danych eksperymentalnych oraz dopasowanych zależności. Jest to szczególnie istotne, ponieważ obliczona elektroaktywna powierzchnia jest wykorzystywana jako kluczowy parametr do porównania badanych elektrod.

8. Wyniki EIS są omawiane głównie poprzez jakościowe porównanie widm impedancyjnych. Jednak modelowanie obwodem równoważnym oraz odpowiadające mu parametry dopasowania nie zostały przedstawione w wystarczającym stopniu. Uwzględnienie odpowiedniego obwodu równoważnego, dopasowanych widm oraz ilościowych wartości oporu przeniesienia ładunku, parametrów warstwy podwójnej lub elementu stałej fazy oraz wkładów związanych z dyfuzją znacznie wzmocniłoby interpretację.

9. Rysunek 35. Podpis pod rysunkiem zawiera nieścisłość w identyfikacji poszczególnych paneli. W szczególności panel (b) nie został właściwie opisany. Podpis należy skorygować, aby zapewnić jasną identyfikację wszystkich obrazów SEM i odpowiadających im próbek.

10. W rozprawie przedstawiono szeroko zakrojone badania mikroskopowe elektronowe LIG oraz elektrod modyfikowanych metalem. Jednakże uzupełniająca analiza pierwiastkowa EDX oraz mapowanie pierwiastkowe nie zostały przedstawione w wystarczającym stopniu. Takie pomiary dostarczyłyby dodatkowych informacji na temat rozkładu pierwiastków i przestrzennej jednorodności osadów Ir i Pt oraz pomogłyby zweryfikować proponowaną architekturę bimetaliczną. Chciałbym zapytać, dlaczego nie uwzględniono tej charakterystyki i czy przeprowadzono alternatywne analizy składu w celu potwierdzenia rozkładu obu metali.

11. Rysunek 41. Relacja między teoretycznym obciążeniem metalem, elektroaktywną powierzchnią a stałą szybkości heterogenicznego transferu elektronów jest szczególnie interesująca. Jednakże obciążenie metalem obliczono przy użyciu prawa Faradaya przy założeniu 100% wydajności osadzania. Ponieważ podczas elektroosadzania mogą zachodzić konkurencyjne reakcje elektrochemiczne, rzeczywista masa osadzonego metalu może znacząco różnić się od wartości teoretycznej. W jaki sposób oceniono zasadność tego

założenia? Czy obciążenie metalem zostało niezależnie zweryfikowane przy użyciu metod takich jak ICP-MS, ICP-OES, EDX lub innej ilościowej techniki analitycznej?

12. Praca doktorska wykazuje, że stosunkowo niewielkie wahania mocy lasera i prędkości skanowania mogą istotnie wpływać na wydajność elektrochemiczną elektrod LIG. Jednakże leżące u podstaw mechanizmy nie zostały w pełni skwantyfikowane. W jakim stopniu zaobserwowane zmiany można przypisać różnicom w uporządkowaniu grafitowym, gęstości defektów, grupach funkcyjnych zawierających tlen oraz wynikającej z nich porowatej morfologii? Czy bardziej ilościowa korelacja między parametrami Ramanowskimi, chemią powierzchni, przewodnictwem elektrycznym a stałymi szybkości heterogenicznego transferu elektronów mogłaby dostarczyć modelu predykcyjnego do optymalizacji wytwarzania LIG?

13. Elektroaktywna powierzchnia jest szacowana przy użyciu zależności Randlesa–Ševčíka, podczas gdy kinetyka transferu elektronów jest oceniana za pomocą metod elektrochemicznych. Biorąc pod uwagę wysoce porowatą i heterogenną naturę elektrod LIG, w jaki sposób zweryfikowano założenia dotyczące dyfuzji półnieskończonej płaszczyznowej oraz stosowalności wybranych modeli kinetycznych? Czy dyfuzja w cienkiej warstwie wewnątrz porów, adsorpcja powierzchniowa lub niejednorodny rozkład prądu mogą wpływać na obliczoną elektroaktywną powierzchnię i stałe szybkości heterogenicznego transferu elektronów?

14. Praca doktorska wykazuje poprawę właściwości elektrokatalitycznych po sekwencyjnym elektroosadzaniu Ir i Pt. Pozostaje jednak niejasne, czy zaobserwowana poprawa wynika głównie ze zwiększonej elektroaktywnej powierzchni, właściwej aktywności katalitycznej poszczególnych metali, czy z synergicznych oddziaływań między Ir i Pt. Jakie dowody eksperymentalne wspierają tworzenie się bimetalicznego interfejsu katalitycznego, a nie oddzielnych osadów bogatych w Ir i Pt? W jaki sposób można by rozróżnić poszczególne wkłady powierzchni, składu i oddziaływań elektronowych?

15. Opracowana platforma do wykrywania glukozy wykazuje obiecujące charakterystyki analityczne i częściową odporność na fouling białkowy. Jednak jej długoterminowa stabilność operacyjna i wydajność w warunkach rzeczywistych pozostają istotnymi wyzwaniami. Jak stabilne są warstwy kopolimerowe zawierające enzymy podczas powtarzalnych pomiarów elektrochemicznych i przedłużonej ekspozycji na media biologiczne? W jakim stopniu wymywanie enzymu, pęcznienie polimeru, zmiany w dostępności tlenu lub degradacja interfejsu katalitycznego mogą wpływać na odpowiedź sensora? Jakie dodatkowe eksperymenty byłyby konieczne, aby wykazać przydatność tej platformy do ciągłego monitorowania poziomu glukozy?

Ocena końcowa

Doktorat przedłożony przez panią Aiswaryę Manohar, zatytułowany **„Engineering Laser-Induced Graphene for Multifunctional Electrochemical Interfaces"**, stanowi oryginalny i cenny wkład naukowy w inżynierię materiałową, naukę o powierzchniach oraz elektrochemiczne wykrywanie.

Kandydatka wykazała się bardzo dobrą wiedzą na temat nowoczesnych metod wytwarzania, charakterystyki i funkcjonalizacji materiałów elektrodowych opartych na węglu, a także umiejętnością planowania i przeprowadzania złożonych badań eksperymentalnych. Praca doktorska łączy systematyczną optymalizację parametrów obróbki laserowej z opracowaniem wielofunkcyjnych interfejsów elektrochemicznych zawierających membrany hydrożelowe, nanocząstki katalityczne, polimery oraz elementy rozpoznawania biologicznego.

Uzyskane wyniki posiadają znaczną wartość naukową i aplikacyjną i mogą przyczynić się do dalszego rozwoju elastycznych czujników elektrochemicznych, platform biosensingowych oraz zaawansowanych funkcjonalnych materiałów węglowych. Chociaż niektóre aspekty charakterystyki ilościowej, analizy statystycznej i interpretacji mechanistycznej wymagają wyjaśnienia, rozprawa doktorska stanowi spójny zbiór oryginalnych badań eksperymentalnych i wykazuje kompetencje naukowe Kandydatki oraz jej zdolność do prowadzenia niezależnych badań.

W mojej opinii rozprawa doktorska Pani Aiswary Manohar **spełnia wymagania określone w ustawie z dnia 20 lipca 2018 r. – Prawo o szkolnictwie wyższym i nauce**. W związku z tym rekomenduję, aby Pani Aiswarya Manohar została dopuszczona do kolejnych etapów postępowania w sprawie nadania stopnia doktora w dyscyplinie inżynieria materiałowa.

Prof. dr hab. Igor Iatsunskyi



Signed by /
Podpisano przez:

Igor Iatsunskyi

Date / Data:
2026-10-27 12:39