

dr hab. inż. Agata Jasik
Sieć Badawcza Łukasiewicz - Instytut Mikroelektroniki i Fotoniki
al. Lotników 32/46
02-495 Warszawa

RECENZJA

pracy doktorskiej mgr inż. Malwiny Sikory
pt.: „Opracowanie metodyki preparowania wielowarstwowych nanostruktur do badania za pomocą nowoczesnych mikroskopów elektronowo-jonowych”

Promotor: dr hab. inż. Damian Wojcieszak, prof. uczelni

Tematyka pracy doktorskiej zrealizowanej w ramach programu Doktorat Wdrożeniowy dotyczyła preparatyki wielowarstwowych nanostruktur metalicznych z przeznaczeniem do badań za pomocą skaningowych mikroskopów elektronowych (typu Dual Beam tj. SEM/Ga-FIB i SEM/Xe-PFIB). Autorka pokazała, że istnieje szereg metod przygotowania próbek na potrzeby SEM, które można wykonywać zarówno poza komorą roboczą mikroskopu jak i z użyciem techniki zogniskowanej wiązki jonów, ale zagadnienia te są niewystarczająco dokładnie opisane w literaturze. W szczególności brakuje opracowań naukowych, które porównywałyby rezultaty otrzymane z SEM dla tych samych próbek, w tym powłok cienkowarstwowych, przygotowanych do badań z wykorzystaniem różnych technik. Wiedza na ten temat pozwoliłaby dokonać celowanego wyboru metody przygotowania materiałów cienkowarstwowych do badań i analiz mikroskopowych.

Celem pracy doktorskiej było opracowanie metodyki preparatki niskowymiarowych struktur do badań z wykorzystaniem SEM w celu uzyskania jak najpełniejszego obrazu preparatów, zarówno pod kątem jakości strukturalnej jak i parametrów geometrycznych. Zaprojektowała i przeanalizowała trzy serie wielowarstwowych nanostruktur: Ti/V/Ti, Mo/Nb/Mo oraz W/Hf/W wytworzonych za pomocą rozpylania magnetronowego. Wybór pierwiastków o podobnych liczbach atomowych skutkujący obniżonym kontrastem obrazów

SEM był zamierzonym utrudnieniem wprowadzonym w celach badawczych. Uzyskane wyniki pokazały, że pełny obraz próbki można uzyskać stosując dwie różne metody przygotowania preparatu. Mikrostruktura jest najlepiej widoczna na przełomie uzyskanym przez łamanie próbki, z kolei zastosowanie techniki Xe-PFIB pozwala określić grubości poszczególnych warstw. W pracy wykazano również, że warstwa Pt zapewnia lepszą dokładność analizy SEM/EDS w porównaniu do warstwy ochronnej z węgla. Doktorantka określiła minimalne wymiary warstw w strukturach cienkowarstwowych możliwe do zmierzenia przy użyciu SEM/EDS i wykazała, że wynik zależy od liczby atomowej warstw składowych.

Przyjęta przez Doktorantkę **hipoteza badawcza** zakłada, że można opracować metodykę badania mikrostruktury wielowarstw uwzględniającą ich specyfikę przy wykorzystaniu różnych metod preparatyki. Przy czym Autorka mówi o kompleksowej metodyce bazującej na badaniach SEM/EDS, użytecznej w praktycznych zastosowaniach, mogącej rozszerzyć ofertę usługową firmy Nanores.

Struktura i zawartość merytoryczna rozprawy

Rozprawa liczy 132 strony i zawiera sześć zasadniczych rozdziałów (1-6) uzupełnionych streszczeniem, wykazem skrótów i cytowanej literatury (243 pozycje literaturowe; rozdział 7) oraz zebraniem dorobkiem własnym (rozdział 8) w postaci prezentacji konferencyjnych (udział w 9 konferencjach), artykułów naukowych (współautorstwo w 11 publikacjach, w tym jako pierwszy autor w dwóch artykułach opublikowanych w czasopiśmie o zasięgu międzynarodowym) oraz współwykonstwa w trzech projektach finansowanych przez MNiSW i NCBR.

Wstęp (rozdział 1) poświęcony jest uzasadnieniu wyboru tematyki doktoratu oraz krótkiej prezentacji poszczególnych rozdziałów rozprawy doktorskiej. W uzasadnieniu podjęcia tematu Autorka podaje braki w literaturze przedmiotu w zakresie porównawczej analizy mikrostruktury złożonych nanostruktur oraz zapotrzebowanie naukowe i rynkowe na taką analizę. Opis poszczególnych rozdziałów jest zapowiedzią logicznej prezentacji zarówno eksperymentu jak i analizy uzyskanych wyników.

W rozdziale 2 Doktorantka zrobiła wstęp do mikroskopii elektronowo-jonowej zawierający budowę mikroskopu elektronowego i uogólnioną zasadę jego działania. Schematycznie zobrazowała i opisała odpowiedź próbki na pobudzenie wiązką elektronów. Powiązała to z wyposażeniem mikroskopu w detektory sygnału pochodzącego od elektronów wtórnych emitowanych z płytszych obszarów analizowanego materiału do 50 nm, wysokoenergetycznych elektronów wstecznie rozproszonych pochodzących z głębokości większej niż 50 nm i charakterystycznego promieniowania rentgenowskiego zależnego wprost od liczby atomowej i pozwalającego zidentyfikować dany pierwiastek w badanym materiale. Istotna dla przeprowadzenia analizy uzyskanych wyników jest też znajomość charakteru zależności współczynników emisji elektronów obu typów od liczby atomowej przedstawiona na rys. 2.6. W dwóch podrozdziałach omawianego rozdziału Autorka przedstawiła zewnętrzne i wewnętrzne sposoby preparowania nanostruktur z przeznaczeniem do badań za pomocą skaningowych mikroskopów elektronowych. Metody

zewnętrzne stosowane do przygotowania do badań elementów elektronicznych to: mokre trawienie chemiczne, trawienie plazmowe, mechaniczna obróbka ścierna, czy obróbka laserowa. Nanometrowe powłoki wielowarstwowe, powszechnie stosowane m.in. w optyce, optoelektronice czy technice sensorowej preparowane są za pomocą ultramikrotomii, przygotowywania złądów lub łamania próbek. Każda z wymienionych metod kładzie nacisk na zachowanie oryginalnej struktury i topologii badanej próbki, ale wszystkie one charakteryzują się dość dużą przypadkowością miejsca, w którym uda się uzyskać właściwy przełom. W związku z tym często konieczne jest posługiwanie się technikami bardziej precyzyjnymi, np. wykorzystującymi zogniskowaną wiązkę jonów (ang. Focused Ion Beam). Należą one do grupy metod wewnątrzkomorowych omówionych w drugim podrozdziale pracy doktorskiej. Autorka obszernie opisuje zalety i wady metod wykorzystujących dwa rodzaje źródeł jonów: ciekłego metalu, w którym najczęściej stosowany jest Ga i indukcyjnie wzbudzonej plazmy, gdzie dominuje Xe. Metoda wykorzystująca wiązkę jonów Xe jest odpowiedzią na zidentyfikowane wady metody wykorzystującej wiązkę Ga polegające m.in. na nieintencjonalnej implantacji jonów Ga do preparowanego materiału, tworzenie mikrokropel Ga na modyfikowanej powierzchni oraz małej szybkości usuwania materiału z preparowanego obiektu (kilka razy mniejsza niż dla wiązki Xe). Zaletą stosowania wiązki Xe jest tworzenie rekonstrukcji 3D. Z prostopadłościennego preparatu usuwane są kolejne warstwy, obrazy zapisywane i następnie scalane za pomocą dedykowanego oprogramowania. Ważnym aspektem jest obojętność fizyko-chemiczna wiązki jonów Xe, co jest kluczowe w pracy z materiałami półprzewodnikowymi pod kątem ich optycznej i elektrycznej charakteryzacji. Jednak niewątpliwą zaletą wiązki jonów Ga jest preparatyka na użytek mikroskopii TEM. Tworzenie próbek transparentnych dla elektronów jest w tym przypadku łatwiejsze.

W rozdziale 3 Doktorantka przeanalizowała wnioski wyływające z przeglądu literatury opisanego w rozdziale 2, zdefiniowała cel pracy i postawiła hipotezę badawczą. Wnioski prowadzą do stwierdzenia, że warunkiem przeprowadzenia pełnej analizy mikroskopowej nanostruktur jest przygotowanie preparatów za pomocą wzajemnie uzupełniających się metod. Zastosowanie właściwej powłoki ochronnej nakładanej na próbkę pozwoli odkryć wszystkie cechy próbek. Wybór tych metod uwarunkowany jest rodzajem badanego materiału.

W rozdziale 4 przedstawiono sposób wytwarzania wielowarstwowych nanostruktur: w podrozdziale 4.1 dla struktur z warstwą wanadu pomiędzy warstwami tytanu (Ti/V/Ti), w podrozdziale 4.2 dla struktur z warstwą molibdenu pomiędzy warstwami niobu (Nb/Mo/Nb), w podrozdziale 4.3 dla struktur z warstwą hafnu pomiędzy warstwami z wanadu (W/Hf/W). Wybór warstw metalu w strukturze o zbliżonej masie atomowej był zabiegiem intencjonalnym zwiększającym stopień trudności analizy. Grubość warstw zewnętrznych wynosiła 200 nm a warstwy wewnętrznej od 5 nm do 100 nm, co pozwoliło m.in. określić rozdzielczość metody zastosowanej do analizy. Struktury zostały osadzone na podłożach Si i SiO₂ za pomocą rozpylania magnetronowego w Zespole Technologii Cienkowarstwowych na Wydziale Elektroniki, Fotoniki i Mikrosystemów Politechniki Wrocławskiej. Procesy

przeprowadzono w atmosferze Ar pod ciśnieniem 1.2×10^{-2} mbar. Nanostruktury z wanadem i molibdenem wykonano przy mocy magnetronów równej 400 W, natomiast z hafnem – przy 300 W. Jakość strukturalną oraz szybkości osadzania poszczególnych materiałów oceniono na próbkach zawierających pojedynczą warstwę. W pierwszym przypadku posłużono się niskokątową dyfrakcją rentgenowską GIXRD (ang. Grazing Incydent X-Ray Diffraction), w drugim - analizą obrazów SEM. Na podstawie uzyskanych wyników potwierdzono wysoką jakość strukturalną – obecność krystalitów faz odpowiednich pierwiastków oraz zgodność grubości warstw w nanostrukturze z projektowanymi danymi.

W kolejnych podrozdziałach rozdziału 5 Autorka przedstawiła wpływ metody preparatki zarówno zewnątrz jak i wewnątrzkomorowej (podrozdział 5.1), zastosowanej powłoki ochronnej (podrozdział 5.2) oraz liczby atomowej (podrozdział 5.3) na jakość uzyskiwanych powłok o wielowarstwowej konstrukcji, nanometrycznych grubościach warstw składających się z pierwiastków o bardzo zbliżonych liczbach atomowych Z ($\Delta Z=1 \div 2$). Przewagę metody bazującej na jonach Xe nad wiązką Ga została wykazana na przykładzie próbek Ti/V/Ti. Wpływ zastosowanej powłoki ochronnej z platyny i węgla na wyniki analizy został zademonstrowany dla materiałów W/Hf/W, natomiast określenie wpływu liczby atomowej na kontrast obrazów SEM pokazano dla trzech grup nanostruktur: Ti/V/Ti, Nb/Mo/Nb i W/Hf/W. W podrozdziale 5.4 przedstawiono opis zaproponowanej przez Doktorantkę metodyki preparowania i analizy wielowarstwowych struktur za pomocą mikroskopów elektronowo-jonowych. Metodyka dotyczy nanometrycznych powłok wielowarstwowych złożonych z materiałów o zbliżonej liczbie atomowej, charakteryzowanych za pomocą SEM/EDS na przełomach wykonanych za pomocą mechanicznego łamania oraz pocieniania wiązką jonów Xe.

W rozdziale 6 (ostatnim z kluczowych rozdziałów rozprawy) Doktorantka robi podsumowanie przeprowadzonych badań i uzyskanych wyników wykazując, że cel został osiągnięty, a postawiona hipoteza jest prawdziwa.

Oryginalne osiągnięcia Doktorantki

Na uwagę zasługuje zaplanowanie całego eksperymentu. Wkład do planowania wniosła szczegółowa analiza obszernej literatury przedmiotu. Na jej bazie Autorka stwierdziła, że niejasne jest jak poprowadzić metodologię przygotowania i analizy powłok metalicznych by uzyskać pełny obraz jakości strukturalnej i informacji o geometrii nanostruktur wielowarstwowych. Ukierunkowaniem do poszukiwań w literaturze było praktyczne zapotrzebowanie na takie usługi w komercyjnie działającej firmie Nanores, w której Doktorantka jest/była zatrudniona. Problem okazał się być nie tylko praktyczny, ale i naukowy. **Zdefiniowanie problemu, określenie go jako zagadnienia naukowego (luki w literaturze światowej) i przedstawienie planu realizacji można uznać za oryginalne osiągnięcie, w którym Doktorantka miała co najmniej znaczący udział.**

Oryginalnych osiągnięć Autorki należy upatrywać przede wszystkim w pracy eksperymentalnej, a taka jest zaprezentowana w rozdziałach 4 i 5.

Rozdział 4 dotyczy osadzania pojedynczych warstw metalicznych i nanostruktur złożonych z naprzemiennie występujących trzech warstw o różnej grubości warstwy środkowej: Ti/V/Ti, Nb/Mo/Nb i W/Hf/W. Pojedyncze warstwy zostały wykonane w celu oceny zarówno poprawności wyboru parametrów technologicznych zastosowanych podczas osadzania poszczególnych materiałów oraz w celu określenia szybkości wzrostu. Jak pisze Autorka, nanostruktury zostały zaprojektowane tak, by możliwe było zbadanie w jaki sposób liczba atomowa warstw składowych wpływa na możliwość oceny mikroskopowej, a zarazem by zwiększyć stopień trudności analizy, a przez to wprowadzić do zagadnienia pierwiastek naukowości. Przy pracach technologiczno-metrologicznych charakterystyczne jest rozbudowanie prac eksperymentalnych. W recenzowanej pracy doktorskiej eksperyment jest ograniczony (nawet po uwzględnieniu procesów optymalizacyjnych), a mimo to na żadnym etapie realizacji pracy cel nie był zagrożony i został osiągnięty z sukcesem. Wykonano i scharakteryzowano trzy grupy po 6 próbek. Poszczególne założenia pracy zostały zweryfikowane korzystając z badań przeprowadzonych na poszczególnych grupach próbek, a jeden z nich – na wszystkich razem. Trudno dostrzec luki logiczne w zaplanowanych działaniach badawczych. To oznacza, że zarówno **eksperyment jak i cel zostały przemyślane i poprawnie postawione, co można zaliczyć do osiągnięć Doktorantki**. Bazując na zapisach w pracy doktorskiej trudno jednoznacznie stwierdzić, jaki był udział Autorki w wykonaniu procesów technologicznych osadzania warstw i nanostruktur. Idąc dalej, taka sama niejednoznaczność występuje przy analizie wyników rentgenowskich uzyskanych metodą GIXRD.

Rozdział 5 podzielony na podrozdziały dotyczy charakteryzacji i analizy uzyskanych wyników. W podrozdziale 5.1 zweryfikowano wpływ metody preparatki na jakość analizy mikroskopowej. Sprawdzone łamanie mechaniczne i pocienianie jonowe za pomocą wiązek jonów zarówno Ga jak i Xe próbek wykonanych z sekwencji warstw Ti/V/Ti. Stwierdzono, że informację o mikrostrukturze materiałów wchodzących w skład powłoki można jednoznacznie ocenić analizując przełom wykonany za pomocą łamania. Wówczas możliwa jest ocena kształtu i wielkości nanokrystalitów (słupki o szerokości 30-50 nm), zatracą się jednak informacje o geometrii wielostrukury. Do uzyskania tych informacji niezbędna jest preparatyka wewnątrzkomorowa z wykorzystaniem wiązki ww. jonów i obserwacja przełomu za pomocą SEM/EDS. Jednoznacznie rozróżnialna na przełomie wykonanym tą metodą (niezależnie Ga czy Xe) i możliwa do określenia minimalna grubość warstwy wanadu wynosi 10 nm. Autorka wykazała, że przewagą preparatyki z wykorzystaniem wiązki jonów Xe wielowarstw jest większa aczkolwiek szczątkowa widoczność charakterystycznych szczegółów mikrostruktury materiału (kolumn). Może to być skutkiem tworzenia cieńszej warstwy amorficznej i braku implantacji jonów, które mają zdolność modyfikować przełom. Zatem **oryginalnym osiągnięciem Doktorantki jest zaproponowanie wraz z uzasadnieniem wyboru komplementarnych metod preparatki wielowarstwowych nanostruktur o zbliżonej liczbie atomowej sąsiadujących ze sobą materiałów, które pozwolą uzyskać całościową informację o mikrostrukturze i geometrii wielowarstwowych powłok metalicznych przy analizie SEM/EDS**. Warto zaznaczyć, że omówione wyniki zostały opublikowane w pracy M.

Sikora i inni „Improved Methodology of Cross-Sectional SEM Analysis of Thin-Film Multilayers Prepared by Magnetron Sputtering”, Coatings.

W podrozdziale 5.2 Autorka przeprowadziła własną rozstrzygającą analizę wpływu rodzaju warstwy przykrywającej na analizę SEM/EDS nanostruktur powłok metalicznych. Wykazała, że warstwa platyny uwypukla mikrostrukturę analizowanych warstw, nie wprowadza efektu „kurtyny”. Ponadto osadzona w określony sposób w obrazie SEM zawsze wygląda tak samo, niezależnie na jakim podłożu została osadzona. Może zatem służyć jako marker granicy rozdziału, co w przypadku analizy nieznanymi struktur wydaje się być pomocne. Nie poprawia jednak możliwości analizy EDS. Niezależnie od warstwy przykrywającej, analiza EDS nie jest rozstrzygająca jeśli chodzi o przestrzenną analizę pierwiastkową w tego typu strukturach, a jedynie wskazuje na obecność danych pierwiastków w analizowanym obszarze próbki. Również na bazie widm EDS trudno decydować o poprawności ilościowej analizy pierwiastkowej, ponieważ piki od pierwiastków analizowanych i pochodzących od warstw przykrywających mogą nachodzić na siebie zaburzając wynik. Doktorantka zaproponowała wykorzystanie błędu względnego uzyskanego w analizie EDS przekrojów powłok W/Hf/W o różnych grubościach warstwy Hf z różnymi warstwami ochronnymi jako kryterium rozstrzygające w analizie porównawczej. Po wykluczeniu z analizy linii M, stwierdziła, że mniejszy błąd w analizie odnotowano dla warstw ochronnych z Pt. Na bazie wykonanej analizy zaproponowała zbiór kryteriów do kompleksowej oceny właściwości warstw ochronnych. Każde z nich omówiła pod kątem możliwości zastosowania do badanych powłok. Podsumowując należy stwierdzić, że mimo iż badanie literatury przeprowadzone przez Doktorantkę jednoznacznie wskazywało korzyści wynikające z użycia Pt jako warstwy ochronnej, Jej własna analiza doprowadziła do stworzenia **kryteriów oceny przydatności warstw ochronnych w analizie mikroskopowej SEM/EDS i ocenie parametrów geometrycznych wielowarstwowych powłok, co stanowi oryginalny dorobek Autorki.**

W rozdziale 6 Autorka zebrała i przedstawiła w formie schematu **blokowego stworzoną przez siebie udoskonaloną metodykę preparatyki przekrojów powłok wielowarstwowych i obrazowania SEM/EDS wraz z wykorzystywanymi nastawami parametrów procesowych. Należy podkreślić, że wspomniana metodyka została z sukcesem wdrożona w firmie Nanores, zatem oprócz oryginalności ma również znamiona produktu innowacyjnego.**

Stopień rozwiązania zagadnienia.

Biorąc pod uwagę temat i cel, praca w pełni odpowiada wymaganiom stawianym pracom doktorskim z dziedziny „nauki inżyniersko-techniczne”. Na podkreślenie zasługuje przyjęta metodologia badań, wychodząca od dobrego rozeznania literaturowego w zakresie realizowanej pracy i prowadząca do pełnej weryfikacji doświadczalnej. W działaniach tych Autorka wykazała się szeroką wiedzą z dziedziny rozprawy, znajomością i prawidłowym wykorzystaniem nowoczesnych technik badawczych. Zaprezentowany w pracy sposób postępowania świadczy o dojrzałości naukowej Doktorantki. Biegłość w stawianiu hipotez, przejrzystość i logika zaprezentowanych analiz, konsekwencja w rozwiązywaniu trudnych problemów interpretacyjnych, krytyczna ocena uzyskiwanych wyników, konsekwencja w

realizacji eksperymentu, to obraz umiejętności Doktorantki prezentowany w przedkładanej do oceny rozprawie.

Układ treści i opracowanie redakcyjne.

Odzwierciedlają przyjętą metodologię badań, co przyczynia się do przejrzystości pracy. Praca napisana jest poprawnym językiem. Poziom edytorski jest odpowiedni dla prac doktorskich. Nieliczne błędy w rozprawie:

- 1) literówki, np. str. 50, str. 70;
- 2) nietechniczne sformułowanie/a: „... przebieg niemal liniowy ...”, str. 46;
- 3) rysunki: (a) rys. 4.1 i 5.13 są powtórzeniem rys. 2.6; (b) rys.4.2 nic nie wnosi do rozprawy przez swoją oczywistość; (c) rys. 4.7 jest powtórzeniem rys. 4.6, nic nie wnosi do rozprawy; (d) rys. 4.10b i 4.11b – czym jest widoczny biały pasek pomiędzy niobem a podłożem?; (e) rys. 4.11 jest powtórzeniem 4.10, nic nie wnosi do rozprawy; (f) rys. 4.15 jest powtórzeniem 4.14, nic nie wnosi do rozprawy; (g) rys. 4.14b i 4.15b – czym jest widoczny pasek pomiędzy hafnem a podłożem?;
- 4) nieścisłości: (a) w tekście str. 54 czas osadzania tytanu 20 min, w tab. 4.3 – 25 min; (b) w tekście str. 54 czas osadzania wanadu wynosił od 0.5 do 7 min, w tab. 4.3 od 0.5 do 10 min; (c) „Możliwe jest precyzyjne określenie ich szerokości tj. 39 nm ÷ 50 nm ...” – precyzja nie jest określana zakresem wartości; str. 69; (d) pomyłka w tekście odnośnie energii linii $M\alpha$ wolframu, str.78.

Uwagi krytyczne.

Z wielkim zainteresowaniem zapoznałam się z rozprawą przedłożoną do oceny. Przy zaprezentowanym poziomie naukowym pracy pozwalam sobie wskazać kilka uwag, które w żaden sposób nie umniejszają jej wartości.

- 1) dlaczego do badań GIXRD warstwy osadzono na podłożu SiO_2 ? Jaka była temperatura podłoży Si i SiO_2 w procesach osadzania pojedynczych warstw i w przypadku nanostruktur wielowarstwowych? Jak uwzględniono różną przewodność termiczną materiałów podłożowych w przeprowadzonych procesach osadzania warstw i nanostruktur?
- 2) w przypadku łamania próbek (nie warstw!, str. 66) – „... zaznaczona została linia łamania .. „ – jak?, jakim narzędziem?, linia o jakiej długości? jak duże były próbki? Opis jest zbyt lakoniczny jak na metodę, która jako jedna z dwóch (wliczając GIXRD) pozwala zobrazować mikrostrukturę powłok;
- 3) analiza wyników uzyskanych za pomocą GIXRD została przeprowadzona dość powierzchownie, zawarto jedynie dane liczbowe uzyskane z komercyjnie dostępnego software’u, ograniczono się do stwierdzenia, że profile dyfrakcyjne potwierdzają wysoką jakość materiałów;
- 4) jaka jest grubość warstw amorficznych na przekrojach utworzonych za pomocą wiązek jonów Ga i Xe? Skoro podniesione jest to do roli argumentu za stosowaniem preparatyki na bazie wiązki jonów Xe, należałoby podać wartość liczbową.

5) w rozprawie mowa o „udoskonalonej metodyce”. Pożądane byłoby przedstawienie metodyki, którą Doktorantka udoskonała. Wówczas wprost widoczny byłby (może na jednym schemacie blokowym?) Jej wkład własny w dziedzinę.

Dokonując **ogólnej oceny pracy** stwierdzam, że przedstawiona rozprawa doktorska mgr inż. Malwiny Sikory jest pracą wartościową, stojącą na odpowiednio wysokim poziomie naukowym. Autorka wykazała się dobrą znajomością metodologii i techniki prowadzenia badań eksperymentalnych. Praca zawiera wymienione wcześniej elementy oryginalne. Cel pracy został osiągnięty, a postawiona na wstępie hipoteza została zweryfikowana.

Reasumując uważam, że rozprawa doktorska pt. „Opracowanie metodyki preparowania wielowarstwowych nanostruktur do badania za pomocą nowoczesnych mikroskopów elektronowo-jonowych” spełnia wymogi jakie stawia rozprawom doktorskim Ustawa o Tytule Naukowym i Stopniach Naukowych oraz stawiam wniosek o dopuszczenie mgr inż. Malwiny Sikory do publicznej obrony przedłożonej pracy.

