



**WYDZIAŁ FIZYKI  
i INFORMATYKI  
STOSOWANEJ**  
Uniwersytet Łódzki

Łódź, dnia 17.04.2023 r.

dr hab. Paweł Kowalczyk, prof. UŁ  
Kierownik Katedry Fizyki Ciała Stałego  
Uniwersytet Łódzki  
ul. Pomorska 149/153  
90-236 Łódź  
e-mail: [pawel.kowalczyk@uni.lodz.pl](mailto:pawel.kowalczyk@uni.lodz.pl)

**Ocena rozprawy doktorskiej mgr inż. Pawła Wojciechowskiego**

**pt. „Opracowanie nowego modelu strukturalnego ultracienkiej warstwy azotku żelaza na Cu(001) z wykorzystaniem lokalnych pomiarów pracy wyjścia, analizy wzorów dyfrakcyjnych i oddziaływań z tlenem molekularnym”**

W przedstawionej do recenzji pracy doktorskiej wykonanej pod kierunkiem dr. hab. Mikołaja Lewandowskiego, prof. UAM i dr. Patryka Florczyka, mgr inż. Paweł Wojciechowski podejmuje tematykę wzrostu i charakteryzacji azotków oraz tlenków żelaza na miedzi. Badania swoje prowadził z wykorzystaniem STM, STS, XPS, LEED oraz spektroskopii mas QMS. W moim odczuciu materiał eksperymentalny zawarty w dysertacji jest bardzo bogaty i doskonale wpisuje się w światowe trendy badania niskowymiarowych struktur o właściwościach funkcjonalnych. Z informacji zawartych na końcu rozprawy wynika, iż pan Paweł Wojciechowski jest współautorem 5 prac opublikowanych w czasopiśmie naukowych z czego w dwóch jest pierwszym autorem. Nie wymieniona tam została jedna z prac, która przygotowywana była do wysłania do recenzji. Wyniki swoich badań pan Paweł Wojciechowski prezentował na dziesięciu konferencjach naukowych w tym w na siedmiu z nich w formie wystąpienia ustnego. W trakcie trwania swojego doktoratu brał udział w realizacji czterech projektów naukowych. Odbił również dwa staże poza granicami kraju w tym jeden trwający trzy miesiące.

Rozprawa doktorska podzielona została na sześć rozdziałów, spis literatury liczący 289 pozycji oraz opis osiągnięć Autora w tym listę publikacji oraz komunikatów konferencyjnych. W rozdziale pierwszym Autor opisuje azotki żelaza poświęcając znaczną uwagę ultracienkim warstwom. Opisuje również azotki żelaza na podłożu Cu(001) oraz inne struktury, których można się spodziewać przy takim wzroście w szczególności azotki miedzi, oraz tlenki miedzi i żelaza. Rozdział drugi rozprawy poświęcony został opisowi aparatury wykorzystanej przez Autora w badaniach. Z kolei w rozdziale trzecim Doktorant skupił się na opisie struktury krystalicznej i elektronowej wyhodowanych azotków żelaza.

tel.: +48 42 635-57-42, fax: +48 42 635-57-42,  
ul. Pomorska 149/153 3, 90-236 Łódź  
e-mail: [dziekanat@wfis.uni.lodz.pl](mailto:dziekanat@wfis.uni.lodz.pl)

 [www.wfis.uni.lodz.pl](http://www.wfis.uni.lodz.pl)

Wskazał w tym rozdziale na istnienie nowej struktury krystalicznej dla tego materiału. W rozdziale czwartym opisane zostały eksperymenty związane z oddziaływaniem wytworzonych azotków z tlenem i parą wodną dzięki czemu opracowany został model utleniania nanostruktur. W rozdziale piątym przedstawione zostały wyniki związane ze wzrostem tlenków żelaza na podłożu wicynalnym Cu(410). W rozdziale szóstym Autor przedstawił główne wnioski i podsumował swoją pracę.

Stronę formalną przedstawionej do recenzji rozprawy oceniam dobrze. Praca jest bardzo estetyczna a rysunki i tabele dobrej jakości i bardzo czytelne. Moje uwagi dotyczące formalnej strony pracy przedstawiam poniżej:

- Podrozdział 1.2 „Cele badań” wydaje się być błędnie zatytułowany gdyż zawiera on opis struktury pracy doktorskiej,
- Niektóre ze złożonych rysunków w pracy posiadają dodatkowe oznaczenia w postaci liter a, b, itd., a niektóre ich nie posiadają co skutkuje brakiem konsekwencji w opisie rysunków. Autor stosuje zmienny styl oznaczania rysunków czasami z wykorzystaniem nawiasów „(a)” a czasem bez nich „a”. Niekiedy opis wskazuje, że rysunek powinien mieć dodatkowe oznaczenia literowe a one nie istnieją (np. Rys. 3.4),
- Równanie 2.2 na stronie 27 jest błędnie zapisane,
- Niektóre rysunki nie mają poprawnych odwołań z treści pracy (np. 2.4),
- W pracy odnaleźć można pewną ilość drobnych błędów stylistycznych oraz niefortunne sformułowania np. „obecność pofalowania struktury atomowej azotku żelaza”,

Merytoryczną stronę pracy oceniam wysoko. Bardzo podobał mi się rozdział 2, w którym Autor szczegółowo opisał wykorzystane techniki badawcze. Ten opis stanowić może doskonałą bazę dla młodszych badaczy chcących w szybki sposób zapoznać się z wybranymi technikami pomiarowymi. Z kolei w rozdziale trzecim moją uwagę zwróciła kompleksowość podejścia do struktury krystalicznej i elektronowej wyhodowanych warstw. Bardzo podobało mi się wykorzystanie analizy LEED-IV, co daje pewne przesłanki wskazujące na istnienie nowej struktury azotku żelaza. Na pochwałę zasługuje również złożona analiza struktur tlenkowych przeprowadzona w rozdziale czwartym. Wykorzystanie STM, XPS, LEED oraz spektroskopii masowej QMS pozwoliło doktorantowi zaproponować szereg reakcji chemicznych prowadzących do utleniania azotków żelaza i samego żelaza. Z kolei w rozdziale piątym Autor przedstawia wstępne wyniki wzrostu tlenku żelaza na powierzchni wicynalnej miedzi. Mimo, że jest to najkrótszy z rozdziałów składających się na rdzeń rozprawy to jednak uważam, że jest bardzo ważny. Kluczową kwestią jakiej podjął się tu Doktorant jest rozpoznanie przyszłych ścieżek eksperymentalnych, które prowadzić mogą do prób kontroli wzrostu azotków żelaza na podłożach wicynalnych. W moim odczuciu Autor pracy z tym zadaniem poradził sobie bardzo dobrze. W trakcie lektury przedstawionej do recenzji pracy nasunął mi się szereg uwag i pytań, które wymienione są poniżej:

- Na stronie 23 opisując rys. 1.15 Autor wspomina, że linie w LEED są typowe dla układów heksagonalnych/prostokątnych. Brakuje jednak wyjaśnienia takich obrazów dyfrakcyjnych LEED.
- Precyzyjna analiza chemiczna próbki w XPS wymaga dokładnej kalibracji analizatora. Jak została ta kalibracja przeprowadzona?
- Na stronie 60 Autor opisuje FER komentując, że przed analizą zostało odjęte tło. Jak określone zostało to tło i jak dużego błędu należy się spodziewać przy takiej operacji?

- Na stronie 67 rozprawy Autor podaje różnice energetyczne między strukturami wynoszącą 1.97 eV. Czy zdaniem Autora taka wartość energii jest duża czy mała. W pracy zabrakło komentarza na ten temat.
- Autor na stronie 67 raportuje wyniki obliczeń wartości pracy wyjścia i porównuje je z wynikami STM. Jednak w STM odległość sondy od próbki jest stosunkowo mała. Czy w przypadku obliczeń DFT odległość ta wpływa na wartość pracy wyjścia?
- Opisując rysunek 4.3 (strona 77) Autor sugeruje, że różnice w określonych rozmiarach struktury wąskopasmowej z wykorzystaniem STM i LEED mogą wynikać z zakrzywienia ekranu bądź jego ograniczonej rozdzielczości. W moim odczuciu to stwierdzenie wymaga dodatkowego komentarza.
- Czy zdaniem doktoranta obserwowane struktury paskowe są rekonstrukcjami czy wzorami moire?
- Przy opisie rysunku 4.4 (strona 78) zabrakło mi wyjaśnienia czym są zespoły odcinków czy też krótkich linii widoczne w obrazach LEED. Czy taka obserwacja w danych LEED jest poparta wynikami STM?
- Na stronie 78, Autor określa wymiary stałej sieci azotku żelaza i wspomina, że różnice w stałych sieci raportowanych w tym miejscu w porównaniu z tymi z rozdziału 3.2 wynikają z ilości naniesionego żelaza. To stwierdzenie wymaga dodatkowego komentarza.
- Na rys. 4.9 (strona 84) i tekście opisującym ten rysunek wskazano na istnienie grup OH. Jakie jest źródło takich grup?
- Opisując rys. 4.11 na stronie 87 Autor nie wyjaśnił jakie jest źródło zmian ciśnienia parcjalego NO widoczne na wykresie w zakresie do 5 minuty w zależności od środowiska UHV w porównaniu z O<sub>2</sub>. Dlaczego ten obszar różni się jeśli porównać dane z rysunku 4.10 (bez ekspozycji na OH) z 4.11b (po ekspozycji na OH)?
- Na stronie 91 Autor wspomina dawkę tlenu wynoszącą 1200L której poddawał swoje próbki. Patrząc jednak na czas ekspozycji i ciśnienie tlenu wydaje się, że dawka ta była inna.
- Na rys. 5.2c,d (strona 92) pokazano transformatę FFT dla powierzchni wycinalnej Cu(410). Z czym związana jest obecność dwóch maksimów w pobliżu  $k=0$  i dlaczego ich ułożenie względem innych prążków różni się na rysunkach 5.2c i 5.2d?

## Podsumowanie

Przedstawiona do recenzji rozprawa doktorska mgr inż. Pawła Wojciechowskiego związana jest ze wzrostem ultracienkich wysp azotku żelaza na miedzi oraz procesów utleniania otrzymanych nanostruktur. Zawarte w niej wyniki są oryginalne i zostały przedstawione w serii kilku artykułów naukowych i wystąpień konferencyjnych. Rozprawa przygotowana przez mgr inż. Pawła Wojciechowskiego wskazuje jednoznacznie o jego zdolności do samodzielnego prowadzenia pracy naukowej. Niewielkie uchybienia edytorskie występujące w rozprawie nie wpływają znacząco na jej poziom naukowy i mają jej pozytywną ocenę. Stwierdzam, że przedstawiona do recenzji rozprawa doktorska mgr inż. Pawła Wojciechowskiego spełnia warunki stawiane przez Ustawę Prawo o szkolnictwie wyższym i nauce i wnioskuję o dopuszczenie Doktoranta do publicznej obrony rozprawy.

*/podpisał: dr hab. Paweł Kowalczyk, prof. UŁ*