



Łódź, dnia 29.08.2022 r.

**WYDZIAŁ FIZYKI
i INFORMATYKI
STOSOWANEJ**

Uniwersytet Łódzki

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

Ocena rozprawy doktorskiej mgra Marka Dachniewicza

pt. „Niskowymiarowe nanostruktury antymonu na anizotropowych powierzchniach krzemu”

W przedstawionej do recenzji pracy doktorskiej wykonanej pod kierunkiem prof. dr hab. Mieczysława Jałochowskiego z Wydziału Matematyki, Fizyki i Informatyki Uniwersytetu Marii Curie-Skłodowskiej w Lublinie, mgr Marek Dachniewicz podejmuje się zadania zjawisk zachodzących na powierzchniach Si(110) oraz Si(553) pod wpływem osadzania antymonu. Rozprawa podzielona została na sześć rozdziałów, dwa dodatki, spis literatury oraz listę publikacji i komunikatów konferencyjnych. W rozdziale pierwszym Autor w krótki sposób opisuje zagadnienia związane z pracą koncentrując się na motywacji i opisie zawartości poszczególnych rozdziałów. W rozdziale drugim Doktorant wprowadza czytelnika w tematykę związaną z nanostrukturami jednowymiarowymi. Omówione w nim zostały również własności antymonu oraz nanostruktur, które na jego bazie powstają oraz zagadnienia związane z tunelowaniem elektronów. W kolejnym rozdziale Autor opisał metody eksperymentalne wykorzystane w trakcie swoich badań. W rozdziałach czwartym i piątym opisane zostały wyniki eksperymentów tworzące jądro rozprawy. W pierwszym z nich opisano badania nanostruktur Sb po wzroście na Si(110) charakteryzującym się rekonstrukcją (3×2) wymuszoną obecnością atomów Sb oraz (4×2) stabilizowaną Pb. W drugim z rozdziałów eksperymentalnych opisany został wzrost na Si(553) z łańcuchami Au oraz nanowstążkami Pb. Ostatni, szósty rozdział rozprawy stanowi podsumowanie pracy. Na końcu pracy znajdują się dwa dodatki: w pierwszym z nich opisane zostały rekonstrukcje Si(110) indukowane ołowiem, z kolei w drugim doktorant opisuje próbę otrzymania ciągłych warstw Sb(110) i Sb(111) na powierzchni Si(111) o rekonstrukcji (6×6) wymuszonej obecnością Au. Pracę kończy Bibliografia licząca 159 pozycji oraz spis dokonań Autora w postaci listy opublikowanych artykułów naukowych i prezentacji konferencyjnych. Z informacji zawartych w tej części wynika, iż pan Marek Dachniewicz jest współautorem 5 prac opublikowanych w czasopismach naukowych z czego w

jednej jest pierwszym autorem. Wyniki swoich badań Doktorant prezentował na siedmiu konferencjach naukowych w tym w na trzech z nich w formie wystąpienia ustnego.

Stronę formalną przedstawionej do recenzji rozprawy oceniam dobrze. Praca jest bardzo estetyczna a rysunki i tabele dobrej jakości i bardzo czytelne. Bardzo interesującym rozwiązaniem na jakie zdecydował się Autor są rozpoczynające każdy z rozdziałów pracy spisy treści. Przyznaję, że takie rozwiązanie bardzo pomaga w nawigacji po pracy. Autor nie ustrzegł się jednak kilku pomyłek – moje uwagi dotyczące formalnej strony pracy przedstawiam poniżej:

- W pracy pojawiają się podwójne spacje, drobne błędy stylistyczne i kilka literówek.
- Rysunek 2.1 powinien być rozszerzony o widok struktur antymonu z kierunku w płaszczyźnie warstwy dzięki czemu dyskusja pojęcia dwuwarstwy typowa dla materiałów z 15 grupy układu okresowego była by dużo bardziej zrozumiała.
- Wzory w podrozdziale 2.4 mogłyby zostać ponumerowane. Można by rozważyć przeniesienie całego tego podrozdziału i uczynienie z niego fragmentu podrozdziału 3.1 dzięki czemu opis matematyczny z 2.4 i 3.1.3 utworzyłby spójną całość.
- W słowniczku Autor definiuje nazwy technik podając również nazwę polską jednak w treści pracy zdarza się, że te zdefiniowane nazwy są nieznacznie zmienione np. spektroskopia fotoelektronów z rozdzielczością kątową jest nazywana kątowo-rozdzielczą a czasami kątoworozdzielczą fotoemisją czy też kątowo-rozdzielczą spektroskopią fotoelektronów.
- Wzór na promień sfery Ewalda na stronie 49 nie jest podany w układzie SI z czynnikiem ładunku elektronu e pod pierwiastkiem.
- Drobna niekonsekwencją w pracy jest wykorzystywanie stopni Kelwina i Celsjusza – układ jednostek powinien zostać ujednolicony. Podobna konsekwencja pojawia się przy oznaczaniu rekonstrukcji Si(110) gdzie symbole α i β są niekiedy podawane przed nawiasem a niekiedy za nim.
- W dodatku B na stronie 143 Autor opisuje STM odwołując się jednak do rysunku B1 a nie B2, a na stronie 144 opisując obrazy dyfrakcyjne podane jest odwołanie do rysunku B5 gdy tymczasem powinno to być B4.

Merytoryczną stronę pracy oceniam wysoko. Autor podjął się opisu nanostruktur Sb i rekonstrukcji Si indukowanych epitaksjalnym nanoszeniem antymonu na dwóch podłożach Si(110) oraz Si(553). W rozdziale 4 Doktorant opisał wzrost Sb na Si(110) o rekonstrukcji (3×2) stabilizowanej Sb. Jasno pokazał wzrost warstwy zwilżającej oraz krystalicznych wysp Sb(111). Pokazał również, że takie wyspy pojawiają się po wygrzaniu powierzchni po wzroście. W podrozdziale 4.3.2 Autor opisuje złożony eksperyment związany z nanoszeniem Sb na Si(110)-Pb. W eksperymencie tym wydają się być kluczowe dwa parametry tj. ilość naniesionego Sb oraz temperatura wygrzewania próbki. W moim odczuciu Doktorant podszedł do tego zadania bardzo solidnie i przetestował wiele pokryw i temperatur. Próbkę w pierwszej kolejności zbadane zostały z użyciem RHEED a później w osobnych eksperymentach (na co wskazują inne parametry przygotowania próbek) za pomocą STM. Bardzo ważną konkluzją z tych badań jest stwierdzenie dysocjacji Sb₄ już w temperaturze 100°C co jest niższą wartością niż w przypadku innych podłoży.

Rozdział 5 poświęcony został opisowi wzrostu Sb na Si(553) stabilizowanym Au oraz Pb. W podrozdziale 5.2 Autor podjął się zadania wzrostu Sb na tarasach powstających na powierzchni Si(553)-Au. Badania te pokazały samoorganizację tetramerów Sb₄ w krótkie łańcuchy. Proces ten był najefektywniejszy przy nanoszeniu Sb na podłoże utrzymywane w temperaturze pokojowej. Doktorant

wykazał brak dysocjacji molekuł Sb_4 przy wygrzewaniu próbki w temperaturze 200°C co jest istotną różnicą w stosunku do wyników eksperymentalnych opisanych w rozdziale 4. Z kolei w podrozdziale 5.3 Doktorant opisuje eksperymenty związane z wygrzewaniem próbek w znacznie wyższych temperaturach co prowadzi do dysocjacji Sb_4 oraz w konsekwencji do mian podłoża i stabilizacji ściany (221). Autor wykazał, że optymalizacja rozmiarów ściany Si(221) wymaga naniesienia większej ilości złota niż ma to miejsce dla ściany (553). W kończącym rozdział 5 podrozdziale 5.4 Autor skupia się na badaniach liniowych łańcuchów powstających po naniesieniu 0.2 ML Sb na Si(553)-Pb. Wykazuje, że dysocjacja molekuł Sb_4 zachodzi w tym przypadku już w temperaturze pokojowej i powstają nanodrutu Sb-Pb po wyparciu przez antymon niektórych atomów ołowiu. Nadmiarowe atomy Pb tworzą wyspy a część z nich dyfunduje po tarasach podłoża. Autor pokazuje również, że struktura elektronowa nanodrutów ma charakter jednowymiarowy z paraboliczną dyspersją. Badania w tym podrozdziale zostały rozszerzone o DFT i ARPES co tworzy w pełni kompletny opis obserwowanego wzrostu nanodrutów. Merytoryczną część pracy kończą dwa dodatki zawierające opis rekonstrukcji Si(110) indukowanej ołowiem oraz wzrostu Sb na Si(111). Stanowią one doskonale uzupełnienie dysertacji i jednocześnie w przypadku dodatku B pokazują że wzrost ciągłych i jednorodnych warstw Sb(110) na krzemie może być trudny do osiągnięcia.

Bardzo dobrze oceniam opis procesu kalibracji skanera XYZ mikroskopu tunelowego. Widać, że Doktorant włożył dużo wysiłku aby dokonać pomiarów STM z największą możliwą precyzją. Podoba mi się również bardzo solidny opis działania STM oraz pozostałych technik eksperymentalnych. Dzięki temu praca może stanowić doskonałą bazę dla młodych badaczy chcących poznać wykorzystane przez doktoranta techniki badawcze – niesie więc za sobą doskonały czynnik edukacyjny.

W trakcie lektury przedstawionej do recenzji pracy nasunął mi się szereg uwag i pytań, które wymienione są poniżej:

- Autor w rozprawie decyduje się na wykorzystanie notacji pseudokubicznej. Czy jednak nie wykorzystywana jest notacja romboedryczna? Dotyczy to w szczególności powierzchni (110) dla Sb.
- Na stronie 22 i stronie 63 Autor raportuje nieznacznie różne temperatury niezbędne do wytworzenie rekonstrukcji Si(110) (2×3) i (3×2) tj. 650°C i 600°C dla typu α oraz 650°C i 450°C dla typu β . Czy są to różne rekonstrukcje powstające w różnych temperaturach? Czy pisząc o rekonstrukcji (2×3) i (3×2) Autor miał na myśli jedną i tą samą czy dwie różne rekonstrukcje?
- Na stronie 73 Autor opisuje skutki osadzenia 1ML Sb na Si(110)-Pb, w szczególności po wygrzaniu próbki do 300°C zaobserwowano rekonstrukcję (3×2) . Czy na tej próbce obserwowano wytrącenia Pb podobnie jak w przypadku mniejszych pokryć? Na stronie 81 Autor sugeruje, że nanodrutu powstające po wygrzaniu w temperaturze 350°C są związane z właśnie z Pb. Czy możliwe jest, że powstające struktury nie są związane z ołowiem?
- Krystality na rysunku 4.20 mają podobne kształty - czy jest to skutkiem ich budowy czy może kształtu igły STM?
- Z czego zdaniem Autora wynikają różnice w położeniu maksimów dla krzywych (1×1) Si(110)-Pb pokazane na rysunkach 4.23 (strona 83) i 4.25 (strona 86) w szczególności po stronie nieobsadzonej? Na tych samych rysunkach w obszarze podwójnych łańcuchów zauważyć można, że minimum globalne jest przesunięte w stosunku do tego pokazanego na rys. 4.23. Z czego może wynikać to przesunięcie?

- W podrozdziale 5.4.4 (strona 125) Autor pokazuje obliczenia teoretycznie, z których wynika, że atomy Pb przeskakują ponad 1000x na sekundę, jak w takim układzie można wytłumaczyć fakt obserwacji większej bądź mniejszej ilości skaczących atomów w zależności od napięcia polaryzacji w STM (rysunek 5.25 na stronie 122). Co więcej obliczenia te wskazują na większe prawdopodobieństwo przeskoku wzdłuż tarasu niż w kierunku prostopadłym, jak w takim układzie wytłumaczyć formowanie się linii związanych z dyfundującymi atomami Pb w kierunku prostopadłym do tarasów?

Podsumowanie

Przedstawiona do recenzji rozprawa doktorska mgra Marka Dachniewicza związana jest z badaniem niskowymiarowych struktur antymonu na anizotropowych powierzchniach krzemu. Zawarte w niej wyniki są oryginalne i zostały przedstawione w serii kilku artykułów naukowych. Rozprawa przygotowana przez mgra Marka Dachniewicza 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 mgra Marka Dachniewicza spełnia warunki stawiane przez Ustawę Prawo o szkolnictwie wyższym i nauce i wnioskuję o dopuszczenie Doktoranta do publicznej obrony rozprawy.

dr hab. Paweł Kowalczyk, prof. UŁ

