



**WYDZIAŁ FIZYKI
i INFORMATYKI
STOSOWANEJ**

Uniwersytet Łódzki

Łódź, dnia 25.09.2020 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

Ocena rozprawy doktorskiej mgr Arkadiusza Janasa

pt. „Synteza i badanie właściwości strukturalnych i elektronowych metalicznych nanostruktur na powierzchniach dwuskładnikowych kryształów półprzewodnikowych”

W przedstawionej do recenzji pracy doktorskiej wykonanej pod kierunkiem prof. dr hab. Franciszka Kroka z Wydziału Fizyki, Astronomii i Informatyki Stosowanej Uniwersytetu Jagiellońskiego, mgr Arkadiusz Janas podejmuje tematykę wytwarzania i charakteryzacji nanostruktur złota wytworzonych w procesie epitaksjalnego wzrostu na podłożach półprzewodnikowych AIII-BV i MoS_2 . W szczególności przebadany został charakter wzrostu na podłożach InSb , InAs , InP , GaSb , GaAs , GaP oraz typu van der Waals'a - naturalnym i syntetycznym MoS_2 . W ramach badań stwierdzono, że najciekawszym z badanych podłoży AIII-BV jest InSb , na którym następuje wzrost długich krystalicznych nanodrutów InAu_2 . Nanostruktury te częściowo wbudowane są w podłoże. Na innych podłożach AIII-BV również tworzyły się nanostruktury krystaliczne jednak o znacznie mniejszych długościach. Jedynie dla podłoży GaAs , GaP nie zaobserwowano tworzenia się stopów Au z atomami z III grupy. Na podłożu MoS_2 również obserwowano wzrost czystego Au w postaci trójkątnych wysp o rozmiarach kilkudziesięciu nanometrów. Badania tego układu wskazały na bardzo niskie tarcie między wyspami Au a podłożem, które w świetle przedstawionych wyników i ich analizy jest kierunkowe. Badania prowadzone było z użyciem szerokiego wachlarza technik pomiarowych w szczególności RHEED, SEM, AFM, LC-AFM i HAADF STEM. Dzięki współpracy z Uniwersytetem w Mediolanie w pracy znalazły się również wyniki symulacji wykorzystujących dynamikę molekularną. Z informacji zawartych na początku rozprawy wynika, iż pan Arkadiusz Janas jest współautorem 5 prac opublikowanych w bardzo dobrych czasopiśmie naukowych a także, że wyniki swoich badań prezentował na dziewięciu konferencjach bądź spotkaniach naukowych w tym na jednej międzynarodowej.

Rozprawa doktorska podzielona została na osiem rozdziałów z czego pierwszy to Wstęp a siódmy i ósmy to odpowiednio Podsumowanie i Bibliografia. We Wstępie Autor wprowadza czytelnika w zagadnienia nanotechnologii oraz omawia podstawy fizyczne badanych procesów w szczególności dyfuzji, samoorganizacji i tarcia. W drugim rozdziale opisany jest układ eksperymentalny wykorzystywany w prowadzonych badaniach. W trzecim rozdziale przedstawione są wyniki eksperymentalne obrazujące morfologię i budowę chemiczną nanostruktur Au epitaksjalnie wytworzonych na półprzewodnikach z grupy AIII-BV. W badaniach tych Autor zdecydował o utrzymaniu stałej temperatury podłoża na poziomie 330°C i takiego samego pokrycia 2 ML Au dla wszystkich próbek. W rozdziale czwartym przedstawione zostały wyniki formowania się nanostruktur Au na GaAs w zależności od temperatury podłoża zmienianej w zakresie 350°C-650°C. Eksperymenty te pozwoliły na opisanie metastabilnej rekonstrukcji powierzchni GaAs(001) indukowanej atomami Au. W piątym i szóstym rozdziale Autor koncentruje się na wzroście Au na MoS₂ – warstwowym podłożu półprzewodnikowym z wiązaniami van der Waals’a między warstwami. W szczególności w pierwszym z rozdziałów wykorzystywane są naturalne kryształy MoS₂ a w drugim są to syntetycznie wyhodowane monowarstwy MoS₂ na SiO₂. Dla obu tych podłoży Autor zaobserwował możliwość manipulacji nanowyspami za pomocą sondy AFM. Wyniki eksperymentalne wzbogacone zostały przez obliczenia teoretyczne dynamiki molekularnej. W rozdziale siódmym Autor w rzeczowy sposób podsumowuje uzyskane w ramach realizacji pracy wyniki a w rozdziale ósmym przedstawia bibliografię liczącą 177 pozycji.

Stronę formalną przedstawionej do recenzji rozprawy oceniam bardzo wysoko. Praca jest bardzo estetyczna a rysunki i tabele dobrej jakości i bardzo czytelne. Autor nie ustrzegł się jednak kilku pomyłek – moje uwagi krytyczne dotyczące formalnej strony pracy przedstawiam poniżej:

- wielokrotnie końcówki wyrazów są niepoprawne,
- brakuje wycięć przy akapitach co nieco utrudnia lekturę pracy,
- polska nazwa techniki SPM jest tłumaczona niekiedy zgodnie z zaleceniami Polskiego Towarzystwa Fizycznego jako „mikroskopia próbnikowa” a niekiedy w inny sposób (np. jako „mikroskopia bliskich oddziaływań”),
- na stronie 72 rozprawy Autor odnosi się do rysunku 26 a raczej powinien do 28,
- oznaczenia i odpowiednie odwołania z tekstu do fragmentów rysunku 46 (strona 113) są pomieszane,
- na stronie 24 Autor definiuje strumień cząstek wykorzystując F a na stronie 27 ta sama wielkość fizyczna określana jest literą R , problem pogłębia wykorzystanie F w innym kontekście we wzorze (14) na stronie 32,
- niektóre oznaczenia wielkości fizycznych umieszczone w pracy nie są tłumaczone pod odpowiednimi wzorami np. D_0 we wzorze (3) czy też ΔE_j^{+1} u góry strony 28,
- przy niektórych pozycjach literaturowych zamiast numeru DOI jest jedynie słowo „adres”,
- kolorystyka dziesiątej pozycji literaturowej jest inna niż wszystkich pozostałych.

Z zyskiem dla pracy było by również rozdzielenie opisów procesów wzrostów dla różnych podłoży na kilka akapitów co poprawiłoby czytelność rozprawy. Wszystkie wymienione tu uwagi krytyczne nie wpływają jednak na moją ogólnie dobrą ocenę formalnej strony pracy.

Pod względem merytorycznym Autor w rozprawie koncentruje się głównie na wzroście nanostruktur Au na podłożach półprzewodnikowych. Badania ta przeprowadzone są bardzo solidnie a wnioski z nich wynikające mają wysoki aspekt naukowy. Zastosowanie HAADF STEM pozwoliło na

wykonanie obrazów z wyraźnie widocznymi kolumnami atomowymi, dla których kontrast kolorystyczny odpowiada zmianom koncentracji chemicznej jonów. Wykorzystanie tej techniki w połączeniu z algorytmami sztucznej inteligencji zastosowanymi do rozpoznawania obrazu pozwoliły na określenie składu chemicznego w poszczególnych regionach badanych próbek. Z badań tych jasno wynika, że dla większości użytych podłoży tworzą się stopy Au z indem bądź gadolinem. Szczególnie interesujące wydaje się być formowanie się długich nanodrutów na InSb. Autor zdecydował się również przeprowadzić szczegółowe badania morfologii i struktury chemicznej nanostruktur w funkcji temperatury podłoża GaAs. Podłoże to wybrane zostało ze względu na jego duży potencjalny aspekt technologiczny. Badania te pokazały tworzenie się nowych metastabilnych rekonstrukcji co również jest bardzo interesującym aspektem wynikającym z recenzowanej rozprawy. W ostatnich rozdziałach pracy Autor koncentruje się na wzroście Au na MoS₂ i bardzo ciekawym aspekcie kierunkowego zmniejszenia siły tarcia między nanostrukturami a podłożem. W trakcie lektury pracy nasunął mi się szereg uwag i pytań, który wymienione są poniżej:

- w podrozdziale 3.2 Autor opisuje rekonstrukcje powierzchniowe w grupie AIII-BV – niestety opisy te nie są zbyt pomocne dla czytelnika nie zaznajomionego z tą grupą materiałów; być może dodanie rysunku pomogłoby w lepszym zrozumieniu zmian zachodzących na powierzchni, które mają bezpośredni wpływ na później obserwowany charakter wzrostu.
- Na stronie 68 Autor zamieszcza Tabelę 2. Nie wyjaśnia jednak czym jest „średni rozmiar” – jest to średni rozmiar dyfuzji czy może średni rozmiar nanostruktury? Jeśli jest to średni rozmiar dyfuzji to w jaki sposób ta wartość została wyznaczona?
- Autor raportuje, że dla Au na InSb stosunek długości do szerokości nanostruktur wynosi 7.9. Wartość ta wydaje się być mocno zaniżona w świetle danych pokazanych na rysunku 25. Umieszczenie w pracy histogramu rozkładu długości nanodrutów bardzo by tu pomogło, bądź chociaż wartości środkowej rozkładu długości. Co więcej, bazując na danych z tabeli 2 stosunek ten wynosi 7.7.
- Na stronie 70 Autor wspomina mechanizm wzrostu VSS – szkoda, że w podrozdziale 1.6 nie zamieścił opisu tego modelu,
- Na rysunkach 26 i 27 warto było by dodać linię trendu i zaznaczyć błędy pomiarowe.
- Z czego wynikają tak duże różnice w pokryciu powierzchni raportowane w Tabeli 3 (strona 72) w stosunku do danych z Tabeli 2 (str. 68)
- W przypadku wzrostu Au na InP nie zaobserwowano dyfuzji złota w głąb podłoża a jednocześnie nanostruktury rosną w postaci stopów. Musi to oznaczać dyfuzję In. Niestety odniosłem wrażenie, że zagadnienie to nie jest dyskutowane w pracy.
- Jakie znaczenie mają liczby w nawiasach w ostatniej kolumnie tabeli 10 (str. 94)?
- Na rysunku 37a (str. 96) Autor przedstawia wynik działania algorytmu klasteryzacji k-means, nie wyjaśnia jednak co jest na osiach X i Y na tym rysunku.
- Wyniki przedstawione na rysunku 39 (str. 99) wskazują na znacznie większe pokrycie powierzchni w stosunku do tych prezentowanych na rys. 25 (str. 69) i w Tab. 2 (str. 68) gdzie pokrycie wynosi ok 18% - czy oznacza to, że wytwarzane próbki są niehomogeniczne? Wskazują na to również dane z Tab. 11 (str. 103), w której dla GaAs i temperatury 350°C obserwowano pokrycie ok 10% a w Tab. 3 (str. 72) dla temperatury jedynie o 20°C niższej Autor raportuje pokrycie na poziomie 20%. Wydaje mi się mało prawdopodobne aby stosunkowo niewielka różnica temperatur wpłynęła na taką zmianę pokrycia.

Podsumowanie

Przedstawiona do recenzji rozprawa doktorska mgr Arkadiusza Janasa związana jest z badaniem charakteru wzrostu nanostruktur na podłożach półprzewodnikowych z grupy AIII-BV i MoS_2 . Zawarte w niej wyniki są oryginalne i zostały opublikowane w serii pięciu artykułów naukowych. Rozprawa przygotowana przez mgr Arkadiusza Janasa wskazuje jednoznacznie o jego zdolności do samodzielnego prowadzenia pracy naukowej a również do prowadzenia współprac krajowych i międzynarodowych. Niewielkie uchybienia edytorskie występujące w rozprawie nie wpływają znacząco na jej poziom naukowy i moją jej pozytywną ocenę. Stwierdzam, że przedstawiona do recenzji rozprawa doktorska mgr Arkadiusza Janasa spełnia warunki stawiane przez Ustawę o stopniach naukowych i tytule naukowym oraz o stopniach i tytule w zakresie sztuki i wnioskuję o dopuszczenie doktoranta do publicznej obrony rozprawy.


dr hab. Paweł Kowalczyk, prof. UŁ