



Politechnika Warszawska

Wydział Fizyki

Warszawa, 3.09.2025

Prof. dr hab. inż. Mariusz Zdrojek

Recenzja rozprawy doktorskiej Katarzyny Ludwiczak

Uwagi wstępne.

Praca doktorska magister Katarzyny Ludwiczak zatytułowana „Epitaxial Hexagonal Boron Nitride: from Color Centers to Wafer Scale Heterostructures” zrealizowana była na Wydziale Fizyki Uniwersytetu Warszawskiego pod kierunkiem prof. dr hab. Andrzeja Wysmołka oraz dr hab. Johanesa Bindera. Manuskrypt pracy napisany jest w języku angielskim.

Manuskrypt pracy doktorskiej przedstawiony jest w klasycznej formie – monografii, składającej się przede wszystkim z ośmiu głównych rozdziałów, dotyczących motywacji, części teoretycznej (materiały, metodologia badawcza i technologiczna), części eksperymentalnej i wynikowej, oraz podsumowania całości pracy. Każdy z rozdziałów podzielony jest na numerowane rozdziały i podrozdziały, których zawartość jest spójna ze omawianym obszarem tematycznym. Manuskrypt zawiera również bardzo bogatą listę bibliografii (295 pozycji), silnie powiązaną merytorycznie z całością pracy. Bardzo doceniam przedstawione na początku pracy informacje autorki dotyczące jej poziomu zaangażowania w poszczególne badania oraz procesy przygotowania próbek i materiałów, które doprowadziły do powstania tej pracy. Autorka pracy doktorskiej prezentowała swoje wyniki aż na kilkunastu konferencjach o zasięgu krajowym i międzynarodowym (11 wystąpień ustnych, 4 postery), co zdecydowanie jest rezultatem imponującym. Na jej dorobek naukowy składa się współautorstwo siedmiu publikacji w recenzowanych periodykach naukowych, z czego dwie są ściśle związane są z tematyką jej rozprawy doktorskiej a kolejna praca z tej tematyki jest w trakcie przygotowania (status na dzień przygotowywania recenzji). Zwracam uwagę, że obie publikacje, na których oparta jest dysertacja opublikowane są w bardzo dobrym czasopiśmie ACS AMI (IF 8.2). Całkowita liczba cytowań wspomnianych prac wynosi 57 (według bazy Scopus), a index Hirsha wynosi 3, co jest wynikiem bardzo dobrym na tym etapie rozwoju naukowego.

Praca napisana jest bardzo poprawnym stylem w języku angielskim co sprawia, że lektura manuskryptu jest przyjemnością. Wyniki prezentowane są w sposób przejrzysty i estetyczny. Bardzo doceniam fakt, że autorka często odnosi swoje wnioski do literatury.

Uwagi krytyczne i pytania

Podczas analizy manuskryptu niewiele jest wątpliwości i braków, które zauważyłem. Odniosłem jedynie wrażenie, że przy opisie właściwości materiałów 2D zabrakło mi odniesienia do struktury pasmowej i fononowej badanych materiałów. Szczegółowe pytania i komentarze dotyczące pracy, które nasunęły się podczas analizy manuskryptu:

- W jaki sposób zapewniona jest jakość (czystość) delaminowanych i przenoszonych warstw hBN? W jaki sposób było to weryfikowane?



Politechnika Warszawska

Wydział Fizyki

- czy jednorodność wytworzonych warstw MoSe_2 pokazana na mapach ramanowskich np. na rys. 6.6 była weryfikowana również innymi metodami – AFM, SEM? Czy faktycznie mamy do czynienia z polikrystaliczną ciągłą warstwą MoSe_2 na powierzchni 2”?

Ocena wraz z uzasadnieniem

Warunki stawiane rozprawom doktorskim, zostały określone w art. 187 ustawy z dnia 20 lipca 2018 r. Prawo o szkolnictwie wyższym i nauce. Zgodnie z tym przepisem rozprawa doktorska powinna prezentować ogólną wiedzę teoretyczną kandydata w danej dyscyplinie oraz umiejętność samodzielnego prowadzenia pracy naukowej, a ponadto przedmiotem rozprawy doktorskiej ma być oryginalne rozwiązanie problemu naukowego. Mając powyższe na uwadze, po kolei odnoszę się poniżej do tych przesłanek:

1. Stwierdzam, że rozprawa doktorska zawiera i poprawnie prezentuje ogólną wiedzę teoretyczną zakresu obejmującego dyscyplinę nauki fizyczne.

Uzasadnienie: Oceniam, że autorka manuskryptu: (i) jasno i precyzyjnie opisuje obszar badawczy (na tle aktualnej wiedzy), którego dotyczy podjęta praca; (ii) prawidłowo opisuje właściwości strukturalne kryształów hBN oraz MoSe_2 – są to materiały badane w pracy; (iii) przedstawia bardziej pogłębioną wiedzę na temat właściwości magnetycznych materiałów oraz mechanizmach interakcji, skupiając się na przypadku materiałów o strukturze dwuwymiarowej; (iv) przytacza podstawowe informacje o dwuwymiarowych materiale magnetycznym (CrPS_4); (v) obszernie opisuje epitaksjalne techniki wzrostu kryształów (MOVPE i MBE); (vi) przedstawia szczegółowy i wystarczająco wyczerpujący opis metod badawczych używanych w swojej pracy (mikroskopia optyczna i elektronowa, spektroskopia Ramana, fotoluminescencja, AFM); (vii) w sposób prawidłowy nawiązuje do wskazanej i obszernej literatury; (viii) przedstawia wstęp teoretyczny, który jest adekwatny do podjętego przez nią problemu badawczego, co stanowi dobrą podstawę do zrozumienia wyników pracy.

2. Stwierdzam, że rozprawa doktorska jest dowodem na to, że kandydatka ubiegająca się o nadanie stopnia doktora wykazuje umiejętność samodzielnego prowadzenia pracy naukowej.

Uzasadnienie: Uważam, że (i) autorka prawidłowo zdefiniowała hipotezę badawczą, którą jest wykazanie, że hBN może służyć jako podłoże do wzrostu innych materiałów 2D oraz, że hBN może być użyty jako sensor pola magnetycznego i naprężeń (poprzez interakcje centrów barwnikowych z dwuwymiarowymi materiałami magnetycznymi); (ii) autorka wiarygodnie wskazała zasadność podjęcia się tej tematyki badawczej, biorąc pod uwagę istniejącą literaturę naukową; (iii) opracowała metodę delaminacji i przenoszenia warstw hBN, co w szczególności doceniam; (iv) wykazała się znajomością metod badawczych niezbędnych do prawidłowego zrealizowania celu pracy (w szczególności spektroskopia Ramana, fotoluminescencja); (v) opanowała metodę produkcji urządzeń elektronicznych na bazie materiałów 2D oraz ich charakteryzację; (vi) autorka wykazuje umiejętność zbierania i analizy danych badawczych oraz ich zrozumiałej prezentacji; (v) autorka udowadnia umiejętność przygotowania publikacji naukowych; oraz (vi) prawidłowo wysuwa wnioski wynikające z uzyskanych wyników prac, często konfrontując je z doniesieniami literaturowymi.



Politechnika Warszawska

Wydział Fizyki

3. Stwierdzam, że rozprawa doktorska stanowi oryginalne rozwiązanie problemu naukowego.

Uzasadnienie: Ogólnym problemem badawczym wskazanym przez autorkę jest zbadanie właściwości epitaksjalnego heksagonalnego azotku boru wskazujących na możliwość użycia tego materiału jako podłoża do wzrostu heterostruktur 2D oraz na możliwość użycia hBN jako lokalnego sensora zintegrowanego w heterostrukturze. W tym obszarze autorka wnosi następujące argumenty, które są nowe w odniesieniu do wcześniej dostępnej literatury:

(i) wykazała, że użycie heksagonalnego azotku boru jako podłoża do wzrostu dwuselenku siarki znacząco poprawia jego jakość strukturalną co manifestuje się poprzez wąskie i dobrze widoczne linie ekscytonowe w widmie fotoluminescencji; (ii) zbadała właściwości elektryczne MoSe_2 wyhodowanego na transferowanym podłożu hBN, pokazując możliwość modyfikacji koncentracji nośników za pomocą samodzielnie wytworzonych urządzeń; (iii) zbadała interakcje pomiędzy punktowymi defektami w strukturze hBN a dwuwymiarowymi materiałami magnetycznymi CrPS_4 i CrBr_3 , w zależności od temperatury i wartości przyłożonego pola magnetycznego, pokazując statystyczną analizę emisji światła z pojedynczych defektów; (iv) zaobserwowała, że odpowiedź optyczna z warstw hBN może być skorelowana z przejściami fazowymi w materiałach magnetycznych 2D; (v) zbadała właściwości optyczne heterostruktur 2D typu hBN/materiał magnetyczny przy użyciu spektroskopii Ramana w świetle spolaryzowanym.

W związku z powyższym, przedłożoną mi do recenzji rozprawę doktorską oceniam jednoznacznie bardzo pozytywnie. Uważam, że ta rozprawa może być podstawą uzyskania stopnia doktora w dyscyplinie nauki fizyczne ponieważ spełnia warunki określone w stosownej ustawie. Niniejszym, wnoszę o dopuszczenie mgr Katarzyny Ludwiczak do kolejnych etapów procedury ubiegania się o stopień doktora.

Ponadto, zważywszy na wyjątkowy dorobek oraz wagę prezentowanych wyników wnioskuję o wyróżnienie rozprawy doktorskiej mgr Katarzyny Ludwiczak. W szczególności doceniam następujące osiągnięcia jej pracy: (i) opracowanie metody wielkoskalowej delaminacji i przenoszenia epitaksjalnych warstw hBN; (ii) pokazanie, że MoSe_2 hodowany na podłożu hBN charakteryzuje się wysoką jakością strukturalną co udowodniono badaniami fotoluminescencji oraz umożliwia kontrolę koncentracji nośników w tym materiale; (iii) zaobserwowanie korelacji odpowiedzi optycznej z warstw hBN z przejściami fazowymi w materiałach magnetycznych 2D.