Politechnika Warszawska
Wydział Fizyki

Warszawa, 22.09.2026

Prof. dr hab. inż. Mariusz Zdrojek

Recenzja rozprawy doktorskiej Natalii Zawadzkiej

Uwagi wstępne.
Praca doktorska magister Natalii Zawadzkiej, zatytułowana „Hybrydowe struktury materiałów warstwowych dla nowoczesnej optoelektroniki", została zrealizowana na Wydziale Fizyki Uniwersytetu Warszawskiego pod kierunkiem dr hab. Macieja Molasa, prof. UW. Manuskrypt pracy jest napisany w języku polskim.

Manuskrypt pracy doktorskiej przedstawiony jest w klasycznej formie – monografii, składającej się z siedmiu głównych rozdziałów: wstępu teoretycznego (wprowadzenia do badanych materiałów i zjawisk), opisu technik eksperymentalnych oraz właściwej części wynikowej, obejmującej również opis badanych próbek. W ostatnim rozdziale autorka zamieszcza również podsumowanie, perspektywy dalszych badań, opis wkładu autorki i współpracowników oraz podsumowanie swoich osiągnięć. Każdy z rozdziałów podzielony jest na numerowane podrozdziały, których zawartość jest wzajemnie powiązana i spójna z omawianym obszarem tematycznym. Na końcu manuskryptu znajduje się lista referencji (131 pozycji), z których autorka korzysta w swojej pracy.
Kandydatka do stopnia doktora jest współautorką aż 27 prac naukowych (wg Scopus), natomiast w manuskrypcie podano 20 pozycji. To imponująca liczba publikacji na tym etapie rozwoju naukowego. Niemniej jednak, jedynie dwie z tych prac (*2D Materials, ACS Nano*) są ściśle związane z tematyką jej rozprawy doktorskiej, a jedna praca jest w przygotowaniu (wg danych podanych w manuskrypcie). W tych trzech pracach jest pierwszą autorką.
Całkowita liczba cytowań wspomnianych prac wynosi 227 (według bazy Scopus), a indeks Hirsha wynosi 10, co jest wynikiem wysoce ponadprzeciętnym.
Autorka prezentowała wyniki swojej pracy doktorskiej na kilku konferencjach o zasięgu krajowym i międzynarodowym (4 wystąpienia ustne, 1 plakat).
Autorka jest kierowniczką projektu Preludium (NCN) oraz brała udział w realizacji projektu SONATA BIS (NCN).
Manuskrypt jest napisany poprawnie stylistycznie, choć styl jest dość oszczędny, co czasem sprawia, że podczas czytania pojawiają się pewne skróty myślowe. Wyniki są prezentowane w sposób przejrzysty, estetyczny i staranny. Znalazłem tylko kilka literówek w pracy.

Uwagi krytyczne i pytania
Szczegółowe pytania i komentarze dotyczące pracy, które nasunęły mi się podczas analizy manuskryptu:
- W początkowym rozdziale brakuje mi opisu motywacji użycia CGT jako kontakt elektryczny do badanych urządzeń (oprócz tego, że materiał nie był dotychczas stosowany w tej roli).

- W rozdziale 4 autorka twierdzi na początku, że badano dwie struktury tunelowe. Dwie w sensie liczby próbek czy dwa typy próbek? Jaka była statystyka badanych urządzeń?
- Na str. 46 autorka podaje grubość kontaktu CGT. Skąd wynika użycie akurat takiej grubości materiału?
- Skąd wynika dość istotna różnica w wydajności kwantowej elektroluminescencji dla próbek z CGT i grafenem jako elektrodami? Czy rzeczywiście można tę różnicę przypisać materiałowi elektrody? (mamy przecież różne próbki, różne grubości hBN, geometria, rezystancja kontaktów)
- Na str. 60 w tekście mowa jest o ułożeniu pasm typu I a na rysunku 4.15 opisane jest ułożenie typu II. Czy to zwykła nieścisłość (literówka)?
- W podsumowaniu na str. 62 brakuje mi bardziej wyraźnego uwypuklenia nowości wynikających z wcześniejszego opisu w rozdziale.
- Rozdział 5.1, autorka twierdzi, że bada wielowarstwowe GeS. Co oznacza wielowarstwa w tym przypadku – jaka jest jej grubość?
- W rozdziale 5 autorka bada próbki z barierami tunelowymi i bez nich. Czy różna grubość hBN pozwala jednoznacznie ustalić wpływ bariery tunelowej na obserwowane wyniki? Czy GeS również miał różną grubość w różnych próbkach?
- Na str. 69 FWHM ekscytonu GeS wynosi 35,5±0,5 meV, ale w podsumowaniu (str. 78) pojawia się 361±1 meV – jest to bardzo prawdopodobna literówka.
- Na str. 73 autorka argumentuje, że czas przebywania wstrzykniętych nośników w GeS jest porównywany z czasem życia już utworzonego ekscytonu? Czy w argumentacji dotyczącej powstawania ekscytonu nie należałoby raczej znać czasu jego formowania?
- W 5.5 warto byłoby wprost napisać, które z przedstawionych w rozdziale 5 obserwacji stanowią pierwsze doniesienia, a które jedynie rozszerzają istniejącą wiedzę.
- Na początku rozdziału 6.1 brakuje bardziej szczegółowych danych dotyczących geometrii badanej próbki. Autorka stwierdza jedynie, że bada makroskopowy kryształ.
- Pytanie bardziej ogólne: na ile wyniki uzyskane dla wielowarstwowych a czasem dla nawet dość grubych materiałów, można ekstrapolować na atomowo cienkie układy? Jak redukcja liczby warstw mogłaby zmienić zaobserwowane wyniki?

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 w zakresie dyscypliny *nauki fizyczne*.

Uzasadnienie: Oceniam, że autorka manuskryptu: *(i)* poprawnie i jasno przytacza aktualną wiedzę z obszaru badawczego, dotyczącego materiałów warstwowych i ich właściwości optoelektronicznych; *(ii)* przedstawia pogłębioną wiedzę na temat podstaw fizycznych spektroskopii – głównego narzędzia badawczego używanego w pracy doktorskiej; *(iii)*

przytacza wystarczające informacje dotyczące metodyki wytwarzania próbek, których użyła w badaniach; *(iv)* przedstawia wyczerpujący opis metod badawczych oraz układów eksperymentalnych używanych w swojej pracy; *(v)* poprawnie nawiązuje do wykazanej i obszernej literatury; oraz *(vi)* przedstawia wstęp teoretyczny adekwatny do podjętego problemu badawczego.

2. Stwierdzam, że rozprawa doktorska stanowi dowód na to, że kandydat ubiegający się o nadanie stopnia doktora wykazuje umiejętność samodzielnego prowadzenia pracy naukowej.

Uzasadnienie: Uważam, że autorka *(i)* zaproponowała intersującą hipotezę badawczą, która dotyczyła mechanizmów emisji światła oraz transportu nośników w materiałach warstwowych; *(ii)* wskazała istotne braki w istniejącej literaturze w tym zakresie i przekonywująco uzasadniła fakt podjęcia się tej tematyki badawczej; *(iii)* udowodniła umiejętność przygotowania materiałów do badań oraz ich podstawową charakteryzację; *(iv)* wykazała się znajomością metod badawczych niezbędnych do prawidłowego zrealizowania celu pracy (w szczególności metody spektroskopowe, luminescencja, badań właściwości elektrycznych); *(v)* wykazała umiejętność zbierania i analizy danych badawczych oraz ich klarownej prezentacji; *(vi)* udowadnia umiejętność przygotowania publikacji naukowych; oraz *(vii)* prawidłowo wysuwa wnioski wynikające z uzyskanych wyników prac.

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

Uzasadnienie: Problem badawczy wskazany przez autorkę dotyczył zbadania mechanizmów emisji światła oraz transportu nośników ładunku w materiałach warstwowych (heterostrukturach) opartych na dwuwymiarowych materiałach van der Waalsa (vdW).
W tym obszarze autorka wnosi następujące argumenty, które są nowe w odniesieniu do wcześniej dostępnej literatury:
(i) autorka zademonstrowała, urządzenie typu wertykalny emiter na bazie materiałów vdW, w którym półprzewodnik ferromagnetyczny $Cr_2Ge_2Te_6$ pełni funkcję elektrod wstrzykujących nośniki do monowarstwy WSe_2, oraz wykazała możliwość elektrycznej modulacji elektroluminescencji poprzez rezonansowe i antyrezonansowe warunki tunelowania; *(ii)* autorka zbadała proces elektroluminescencji w GeS, w tym liniowo spolaryzowaną elektroluminescencję wynikającą z wewnątrzpłaszczyznowej anizotropii tego materiału, oraz wykazała, że bariery tunelowe hBN zmieniają reżim emisji; (iii) autorka zaobserwowała emisję pojedynczych fotonów w $ZnPS_3$ oraz powiązała ją z konkretnym mikroskopowym defektem – wakancją fosforową.

W związku z powyższym, przedłożoną mi do recenzji rozprawę doktorską oceniam jednoznacznie bardzo pozytywnie. Uważam, że ta rozprawa może stanowić podstawę uzyskania stopnia doktora w dyscyplinie nauk fizycznych, ponieważ spełnia warunki określone w odpowiedniej ustawie. Niniejszym wnoszę o dopuszczenie mgr Natalii Zawadzkiej do kolejnych etapów procedury ubiegania się o stopień doktora.