UNIWERSYTET WARSZAWSKI
BIURO RAD NAUKOWYCH
2026 -07- 23
WPŁYNĘŁO
L.dz. 1008 .....Podpis. .....

Łódź, dnia 22.07.2026 r.

WYDZIAŁ FIZYKI
i INFORMATYKI
STOSOWANEJ
Uniwersytet Łódzki

Prof. dr hab. Paweł Kowalczyk
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 Natalii Zawadzkiej

pt. „Hybrydowe struktury materiałów warstwowych dla nowoczesnej optoelektroniki"

W przedstawionej do recenzji pracy doktorskiej wykonanej pod kierunkiem dra hab. Macieja Molasa, prof. UW z Uniwersytetu Warszawskiego, mgr Natalia Zawadzka podejmuje tematykę związaną z charakteryzacją własności optoelektronicznych materiałów warstwowych. W moim odczuciu materiał eksperymentalny zawarty w dysertacji jest bardzo bogaty i doskonale wpisuje się w światowe trendy naukowe. Z informacji zawartych na końcu rozprawy wynika, iż Pani Milena Ojrzyńska jest współautorką 19 prac z czego w 4 jest pierwszym autorem. Trzonem rozprawy doktorskiej są dwie opublikowane prace oraz jedna będąca na etapie przygotowania. Wyniki swoich badań Autorka dysertacji prezentowała na dziewięciu konferencjach naukowych w tym na ośmiu z nich w formie wystąpienia ustnego. W trakcie trwania swojego doktoratu realizowała dwa projekty naukowe z Narodowego Centrum Nauki, w których pełniła rolę stypendysty (Sanata Bis 12) oraz kierownika (Preludium 23).

Rozprawa doktorska przygotowana została w jednolitej i zwartej formie i liczy 108 stron. Podzielona została na siedem rozdziałów i uzupełniona krótkim podsumowaniem osiągnięć naukowych Autorki i Bibliografią liczącą 131 pozycji. W rozdziale pierwszym Autorka opisuje materiały, z którymi pracowała – dichalkogenki metali przejściowych, trichalkogenki metali i krzemowca, monochalkogenki i trichalkogenofosforany metali przejściowych oraz skrótowo opisuje elektroluminescencję i emitery pojedynczych fotonów. W rozdziale drugim i trzecim omówiła odpowiednio podstawy fizyczne spektroskopii i wykorzystane metody doświadczalne. Rozdziały od czwartego do szóstego zawierają trzon rozprawy i skupia się w nich Autorka na badaniach WSe2, GeS oraz ZnPS3. W rozdziale siódmym Doktoranta krótko podsumowuje uzyskane wyniki, syntetycznie omawia perspektywy dalszych badań oraz wskazuje na wkład współpracowników w powstanie rozprawy doktorskiej. Taki układ pracy jest poprawny i nie budzi moich zastrzeżeń.

Stronę formalną przedstawionej do recenzji rozprawy oceniam dobrze. Praca jest estetyczna a rysunki dobrej jakości i czytelne. Mimo, dużej staranności przy przygotowaniu rozprawy, rzuciły mi się w oczy drobiazgi, które wymieniam poniżej:

- Praca byłaby bardziej czytelna gdyby Autorka zdecydowała się wprowadzić większej liczby akapitów.
- Odnalazłem w pracy powtórzenia podobnych treści w sąsiadujących akapitach.
- W pracy zdarzają się drobne błędy edytorskie (np. str. 16: „w dołu", str. 18: „linia linii", str. 33: „prze co", str. 43: „odbija się od jej", str. 74: „wgłąb" i inne). Pojawiają się również trudne w odbiorze zdania (np. str. 73 „Wstrzykiwanie nośników jest znacznie bardziej kontrolowane" czy też str. 74: „Tempo relaksacji z wyższych stanów do krawędzi pasma może być wolniejsze od tempa rekombinacji z wyższych stanów, co powoduje emisję w wyższych energiach").
- Odwołania do rysunku 11 na stronie 23 nie następują w kolejności.
- Równanie 2.6 na stronie 36 wydaje się być zapisane z błędem – czy współczynniki Ai nie powinny być po znaku sumy?
- Rozmiary etykiet opisujących sekcje na rysunkach są różnych rozmiarów np rys. 6.2 (str. 82).
- Termin „rozdzielczość polaryzacyjna" brzmi dla mnie dość nienaturalnie i być może warto było zastosować inne określenie.
- Na rys. 4.1b i d niektóre elementy heterostruktur pozostają nieoznaczone – domyślam się, że jest to hBN – rysunki byłyby bardziej czytelne gdyby to oznaczono.
- Na str. 50 tekst wychodzi poza prawy margines co pewnie jest błędem LaTex.
- Czy jednostki i wartości na belce koloru na rys. 4.6a są poprawne?
- Autorka nie jest konsekwentna w stosowaniu spacji przy zapisie zakresów wartości np. na stronie 52 pojawiają się trzy wersje.
- Autorka wymiennie używa jednostek eV i meV np. na stronie 67, a błędy są podawane z różnymi dokładnościami - 1 mV, a niekiedy 0.5 mV.
- W pracy pojawiają się również problemy ze spójnością argumentacji np. na stronie 72 Autorka napisała o progach tunelowania nośników rozpoczynającym się od pewnej wartości progowej, a w końcowej części opisu stawia tezę o braku barier tunelowych.

Proszę o pozostawienie tych uwag edytorskich w trakcie obrony bez komentarza.

Merytoryczną stronę pracy oceniam wysoko. Autorka podjęła się wyzwania związanego z analizą własności optelektronicznych materiałów warstwowych, w szczególności WSe2, GeS oraz ZnPS3. Autorka badała zarówno własności foto- jak i elektroluminescencję co w moim odczuciu jest bardzo wartościowe i umożliwia komplementarne spojrzenie na badane materiały. Za bardzo wartościowe uznaję porównanie dwóch różnych materiałów stanowiących kontakty do WSe2 tzn. grafen i Cr2Fe2Te6. W pracy jasno zostało pokazane, że rodzaj kontaktu wpływa na wstrzykiwanie nośników, a co za tym idzie na proces elektroluminescencji. Szczególnie istotne wydaje mi się pokazanie, że dla elektrod grafenowych intensywność emisji wzrasta wykładniczo a dla półprzewodnikowego Cr2Ge2Te6 była ona silnie niemotoniczna. Podobało mi się również porównanie procesów elektroluminescencji z GeS w układzie wertykalnym (tunelowym) z barierami z hBN i planarnym z kontaktami grafenowymi. Badania te pokazały, że w pierwszym przypadku dominowała emisja ekscytonowa, która nie pojawiła się dla układów planarnych, w których GeS nie było kapsułkowane w

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

hBN. Za szczególnie wartościową i oryginalną część rozprawy uważam rozdział szósty opisujący badania, w których po raz pierwszy zaobserwowano emisję pojedynczych fotonów w warstwowym ZnPS3. Kwantowy charakter centrów emisyjnych potwierdzono pomiarami korelacji drugiego rzędu, a ich szczegółowa charakterystyka obejmowała określenie lokalizacji przestrzennej, dynamiki zaniku, stabilności temperaturowej oraz silnej anizotropii liniowej absorpcji i emisji. Zestawienie wyników spektroskopowych z obliczeniami DFT pozwoliło wskazać pojedynczą lukę fosforową jako najbardziej prawdopodobne mikroskopowe źródło obserwowanej emisji kwantowej. Badania te opublikowane zostały w ACS Nano w połowie czerwca 2026 roku i w ciągu niecałego miesiąca praca ta była wyświetlona ponad 1600× co wskazuje na duże zainteresowanie społeczności naukowej zaprezentowaną w tej części rozprawy tematyką. Muszę tu jednak również podkreślić, że nieco doskwierał mi styl przygotowania rozprawy, w którym Autorka raportowała wyniki nie poświęcając dużo miejsca ich dogłębnej interpretacji. W konsekwencji w rozprawie zaprezentowanych zostało dużo ciekawych wyników z szeregiem hipotez stanowiących możliwe scenariusze stojące za obserwowanymi procesami fizycznymi.

Merytoryczną stronę pracy oceniam wysoko. Autorka podjęła się ambitnego zadania zbadania właściwości optoelektronicznych materiałów warstwowych, ze szczególnym uwzględnieniem WSe2, GeS oraz ZnPS3. Prowadziła zarówno badania fotoluminescencji, jak i elektroluminescencji, co uważam za szczególnie wartościowe, ponieważ umożliwiło komplementarną charakterystykę procesów emisji światła oraz mechanizmów wzbudzania i rekombinacji nośników w badanych układach. Za istotny element rozprawy uznaję porównanie dwóch materiałów elektrodowych zastosowanych w wertykalnych strukturach tunelowych z monowarstwą WSe2, tj. grafenu oraz Cr2Ge2Te6. Przedstawione wyniki wskazują, że rodzaj elektrody wpływa na procesy wstrzykiwania nośników, a tym samym na przebieg elektroluminescencji. Szczególnie interesujące jest wykazanie, że w strukturze z elektrodami grafenowymi intensywność emisji wzrastała wykładniczo wraz z przyłożonym napięciem, podczas gdy dla półprzewodnikowych elektrod Cr2Ge2Te6 obserwowano silnie niemonotoniczną zależność, skorelowaną jakościowo z gęstością stanów elektronowych materiału elektrodowego. Wartościowe jest również porównanie elektroluminescencji GeS w wertykalnych strukturach zawierających bariery tunelowe z hBN oraz w strukturach pozbawionych takich barier. Badania te wykazały, że obecność hBN w istotny sposób modyfikuje charakter emisji: w strukturze z barierami tunelowymi dominowała emisja ekscytonowa, natomiast w układach bez barier nie zaobserwowan emisji ekscytonowej, a obserwowano szerokie pasma wysokoenergetyczne.

Za szczególnie wartościową i oryginalną część rozprawy uważam rozdział szósty, przedstawiający pierwszą obserwację emisji pojedynczych fotonów w warstwowym ZnPS3. Kwantowy charakter centrów emisyjnych potwierdzono za pomocą pomiarów funkcji korelacji drugiego rzędu, natomiast ich kompleksowa charakterystyka obejmowała określenie lokalizacji przestrzennej, dynamiki zaniku, stabilności temperaturowej oraz silnej anizotropii liniowej absorpcji i emisji. Zestawienie wyników spektroskopowych z obliczeniami struktury elektronowej pozwoliło wskazać pojedynczą lukę fosforową jako najbardziej prawdopodobne mikroskopowe źródło obserwowanej emisji kwantowej. Wyniki te zostały opublikowane w czasopiśmie *ACS Nano* w czerwcu 2026 roku, co potwierdza ich aktualność i wysoką wartość naukową.

Jednocześnie pewien niedosyt pozostawia sposób prezentacji i dyskusji wyników. Autorka koncentruje się przede wszystkim na ich raportowaniu, poświęcając relatywnie niewiele miejsca pogłębionej analizie mechanizmów odpowiedzialnych za obserwowane zjawiska. W konsekwencji rozprawa zawiera wiele interesujących wyników oraz szereg prawdopodobnych hipotez

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

interpretacyjnych, jednak nie zawsze przedstawia dostatecznie rozbudowane argumenty pozwalające rozstrzygnąć, który z proponowanych scenariuszy fizycznych najlepiej opisuje badane procesy.

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

- Strona 25: Widma fotoluminescencji i elektroluminescencji są nieznacznie przesunięte energetycznie – wyjaśnienie podane przez Autorkę jest bardzo zdawkowe i poproszę o jego przedyskutowanie.
- Strona 31: Opis w podrozdziale 2.3 nie wyjaśnia wzrostu intensywności dla małych czasów pokazanego na rys. 2.2.
- Strona 48: Na rys. 4.2 Autorka pokazała wyniki AFM pomiaru grubości płatków hBN. Wyniki nie odzwierciedlają średniej grubości płatków i zarejestrowane są lokalnie. W tym przypadku wynoszą ok 2.0 i 2.5 nm. Są to bariery przez które muszą tunelować nośniki i wydają się one na tyle grube, że powinny obniżać prąd o wiele rzędów wielkości. Jeśli do tego moja interpretacja rysunku jest słuszna i w heterostrukturze jest więcej płatków hBN to czy mechanizm tunelowania jest odpowiedni aby tłumaczyć przepływ prądu?
- Strona 49: Wysokości odczytane z rysunku 4.3 najprawdopodobniej są błędne ponieważ dane wydają się nie być poprawnie wypoziomowane i dla danych z 4.3b wysokość powinna być raczej mniejsza a dla tych pokazanych na 4.3d większa. Nie wydaje się to jednak krytyczne i proszę w trakcie obrony pozostawić tą uwagę bez komentarza.
- Strona 54: Szacowanie konwersji fotonów i elektronów na fotony zawiera sprzeczność – otrzymane szacunki dla elektron-foton są większe niż dla foton-foton gdy tymczasem Autorka napisała, że to proces foton-foton przeważa. Swoją drogą, czy słuszne jest założenie, że cały obszar heterostruktury bierze udział w procesie konwersji?
- Strona 69: Autorka wspomina o czasie tunelowania nośników – czy jest to zasadne stwierdzenie?

Podsumowanie

Przedstawiona do recenzji rozprawa doktorska mgr Natalii Zawadzkiej związana jest z charakteryzacją optoelektroniczną materiałów dwuwymiarowych, które perspektywicznie mogą pozwolić wytwarzanie urządzeń optoelektronicznych nowej generacji w tym emiterów pojedynczych fotonów. Zawarte w niej wyniki są oryginalne i zostały przedstawione w serii kilku artykułów naukowych. Rozprawa przygotowana przez mgr Natalię Zawadzką stanowi oryginalne rozwiązanie problemu naukowego i wskazuje jednoznacznie o dogłębnej wiedzy w dyscyplinie nauki fizyczne oraz o zdolności do samodzielnego prowadzenia pracy naukowej przez Doktorantkę. Stwierdzam, że przedstawiona do recenzji rozprawa doktorska mgr Natalii Zawadzkiej spełnia warunki stawiane przez *Ustawę Prawo o szkolnictwie wyższym i nauce* (tj. Dz. U. z 2020 r. poz. 85 z późn. zm.) i wnioskuję o dopuszczenie Doktorantki do publicznej obrony rozprawy.

Jednocześnie biorąc pod uwagę wysoką jakość wyników naukowych, a w szczególności wyniki opisane w pracy opublikowanej w ACS Nano w czerwcu 2026 roku związane z emisją pojedynczych fotonów z ZnPS3, a także liczbę opublikowanych artykułów naukowych, w których Pani Natalia Zawadzka jest współautorem, a także kilka artykułów, w których jest głównym autorem i w końcu rangę

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
www.wfis.uni.lodz.pl

czasopism naukowych, w których prace Doktorantki zostały opublikowane wnioskuję do Rady Dyscypliny Nauk Fizycznych Uniwersytetu Warszawskiego o przyznanie Pani mgr Natalii Zawadzkiej wyróżnienia za przygotowaną rozprawę doktorską.

Prof. dr hab. Paweł Kowalczyk

Kowalczyk

Dokument podpisany
przez Paweł
Kowalczyk
Data: 2026.07.22
18:28:14 CEST

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

www.wfis.uni.lodz.pl