

Recenzja rozprawy doktorskiej mgr Katarzyny Olkowskiej-Pucko zatytułowanej:
„Kompleksy ekscytonowe w dwuwymiarowych strukturach van der Waalsa”

Przedstawiona do recenzji rozprawa doktorska mgr Katarzyny Olkowskiej-Pucko została wykonana w Instytucie Fizyki Doświadczalnej Wydziału Fizyki Uniwersytetu Warszawskiego. Promotorem pracy był dr hab. Maciej Molas, prof. uczelni.

Tematyka rozprawy doktorskiej mgr Katarzyny Olkowskiej-Pucko dotyczy bardzo aktualnych zainteresowań środowisk naukowych związanych z badaniami materiałów warstwowych. Materiały warstwowe stały się obiektem bardzo intensywnych badań po otrzymaniu grafenu, pojedynczej, dwuwymiarowej warstwy węgla i odkryciu jego niezwykłych właściwości fizycznych (Nagroda Nobla w 2010 r.). Jednakże grafen jest półmetalem co znacznie ogranicza jego praktyczne wykorzystanie w elektronice. Spowodowało to skierowanie zainteresowania na inne materiały warstwowe. Jednymi z pierwszych materiałów warstwowych, które przyciągnęły zainteresowanie naukowców na całym świecie stały się półprzewodnikowe dichalkogenki metali przejściowych (ang. transition metal dichalcogenides – TMD), takie jak MoS_2 , MoSe_2 , WS_2 , i WSe_2 , a w szczególności ich monowarstwy, które podobnie do grafenu wykazują zasadnicze różnice w stosunku do ich trójwymiarowych kryształów macierzystych. Niezwykłą własnością dichalkogenków metali przejściowych jest zmiana ich przerwy energetycznej ze skośnej na prostą, położoną w widzialnym i podczerwonym zakresie spektralnym, przy przechodzeniu od materiałów objętościowych (monokryształów) do dwuwymiarowej (ang. two dimensional – 2D) pojedynczej warstwy materiału (monowarstwy). Minimum pasma przewodnictwa i maksimum pasma walencyjnego w monowarstwach TMD położone są w nierównoważnych punktach K^+ i K^- strefy Brillouina. Właściwość ta, w połączeniu z ograniczeniem ruchu nośników prądu do pojedynczej warstwy i znaczną redukcją ekranowania oddziaływania kulombowskiego powodują, że w monowarstwach TMD formują się ekscytony, pary elektron-dziura o bardzo silnych energiach wiązania, rzędu kilkuset elektronowoltów jak i silnie związane ekscytony wyższych rzędów, takie jak triony (dwa elektrony + dziura lub dwie dziury + elektron)

i biekscytony (dwa ekscytony związane kulombowsko). Silne oddziaływanie spin orbita w monowarstwach TMD prowadzi do silnego rozszczepienia spinowego pasm przewodnictwa i walencyjnego w punktach K^+ i K^- co prowadzi do formowania w tych monowarstwach tzw. ekscytonów jasnych i ciemnych. Jasne ekscytony są dozwolone w przejściach optycznych, natomiast ciemne są zabronione ze względu na zachowanie spinu lub pędu. Dodatkowe możliwości badawcze daje możliwość tworzenie różnorodnych struktur, tzw. struktur van der Waalsa, złożonych z ułożonych na sobie, w dowolnie wybranej sekwencji różnych materiałów warstwowych, np. umieszczanie (enkapsulowanie) monowarstw TMD w wysokiej jakości warstwowych kryształach heksagonalnego azotku boru (hBN), z przerwą energetyczną położoną w nadfioletowym obszarze spektralnym powoduje, że linie emisyjne różnorodnych kompleksów ekscytonów, w tym neutralnych (X), naładowanych (T) i biekscytonów (XX) są dobrze rozdzielone/rozróżnialne spektralnie.

Grupy badawcze z Wydziału Fizyki Uniwersytetu Warszawskiego uczestniczą od samego początku w światowych badaniach struktur van der Waalsa opartych na materiałach warstwowych. Badania właściwości fizycznych monowarstw stopów dichalkogenków metali przejściowych przeprowadzone przez mgr Katarzynę Olkowską-Pucko wpisują się znakomicie w kontynuację i rozszerzenie tych badań.

Wyniki przedstawione przez mgr Katarzynę Olkowską-Pucko w rozprawie doktorskiej zostały częściowo opublikowane w 2 artykułach: 2D Materials 10, 015018 (2022) i Physical Review Letters 136, 076901 (2026), w których doktorantka jest pierwszym autorem jak również autorem korespondencyjnym. Jedna praca, związana ściśle z doktoratem, jest w przygotowaniu. Łącznie doktorantka jest współautorem 15 artykułów. Jej indeks Hirsha wynosi $h=10$ a liczba cytowań 247 (235 bez autocytowań) co jest bardzo dobrym rezultatem na tym etapie rozwoju naukowego.

Rozprawa doktorska mgr Katarzyny Olkowskiej-Pucko poświęcona jest badaniu właściwości optycznych kompleksów ekscytonowych w monowarstwach stopów dichalkogenków metali przejściowych $Mo_xW_{1-x}Se_2$ i WS_xSe_{1-x} . Głównym celem jaki postawiła sobie doktorantka było zbadanie i analiza właściwości różnych kompleksów ekscytonowych obserwowanych w widmach fotoluminescencji (ang. photoluminescence – PL) monowarstw wytworzonych bezpośrednio na podłożach SiO_2/Si jak i enkapsulowanych w płatkach kryształów hBN. Doktorantka przeprowadziła szczegółowe badania tych widm w funkcji temperatury otoczenia, mocy pobudzania i przyłożonego pola magnetycznego.

Rozprawa doktorska mgr Katarzyny Olkowskiej-Pucko składa się z 8 rozdziałów, dodatkowych materiałów i liczy dwieście sześćdziesiąt osiem stron, łącznie z bibliografią.

Rozdział 1 zatytułowany: „Wstęp teoretyczny” nie jest opisem stricte teoretycznym a raczej przeglądem podstawowej wiedzy i literatury dotyczącej zagadnień badanych przez doktorantkę. Doktorantka przedstawia w nim w sposób skrótowy obecny stan wiedzy dotyczący różnych materiałów dwuwymiarowych, ze szczególnym uwzględnieniem badanych w pracy doktorskiej półprzewodnikowych dichalkogenków metali przejściowych. Omówiono różne kompleksy ekscytonowe formujące się w monowarstwach dichalkogenków metali przejściowych oraz metody ich badania, głównie metody badania widm fotoluminescencji w różnych warunkach otoczenia.

W rozdziale 2 doktorantka opisała kolejne etapy przygotowania próbek badanych rozprawie doktorskiej, od opisu wzrostu kryształów objętościowych do otrzymywania monowarstw oraz heterostruktur materiałów warstwowych metodą eksfoliacji mechanicznej, w tym techniką transferu deterministycznego stosowaną do enkapsulowania monowarstw TMD w płatkach hBN. Przedstawiła też metodę wyznaczania koncentracji stopów w pomiarach spektroskopii rentgenowskiej.

W rozdziale 3 doktorantka przedstawiła bardzo skrótowo techniki eksperymentalne stosowane w pracy doktorskiej tj. pomiary widm fotoluminescencji oraz rozpraszania Ramana oraz bardzo skrótowo podstawy fizyczne tych zjawisk. Rozdział jest bardzo krótki i mógłby być bardziej rozbudowany o bardziej szczegółowy opis podstaw fizycznych badanych zjawisk, w tym np. opisu reguł wyboru dla przejść optycznych, siły oscylatora i innych podstawowych pojęć spektroskopowych. Należy jednak zaznaczyć, że część z tych zagadnień doktorantka poruszyła w innych rozdziałach.

W rozdziale 4 doktorantka opisała układy eksperymentalne wykorzystane do przeprowadzenia badań w pracy doktorskiej. Przedstawiła układ do badań metodami spektroskopii optycznej z wykorzystaniem helowego kriostatu przepływowego umożliwiającego badania od temperatur pokojowych do niskich temperatur, tzw. ciekłego helu oraz układy do pomiarów magnetoptycznych w silnych polach magnetycznych, w tym układ z cewką nadprzewodzącą umożliwiającą badania do 17 T i magnesem rezystywnym z polami magnetycznymi do 30 T. Opisała również komercyjny spektrofotometr ramanowski stosowany do pomiarów widm rozpraszania Ramana i fotoluminescencji w temperaturze pokojowej.

Rozdziały wstępne 1-4 są dobrym wprowadzeniem do tematyki pracy doktorskiej mgr Katarzyna Olkowskiej-Pucko.

W rozdziałach od 5 do 7 mgr Katarzyna Olkowska-Pucko przedstawiła rezultaty swoich badań zawartych w pracy doktorskiej. W rozdziale 8 podsumowała swoje badania.

W rozdziale 5 zostały przedstawione badania widm fotoluminescencji w funkcji temperatury, mocy pobudzania i zewnętrznego pola magnetycznego dwóch monowarstw WS_xSe_{1-x} . Jedna monowarstwa była eksfoliowana bezpośrednio na podłożu SiO_2/Si , druga była dodatkowo enkapsulowana w kryształach hBN. Koncentracja molowa siarki określona na podstawie badań widm rentgenowskich wynosiła około 57 %. Doktorantka rozpoczęła badania od przeprowadzenia pomiaru widm fotoluminescencji obu monowarstw w niskiej temperaturze, 5K. W widmach PL obu monowarstw $WS_{0.57}Se_{0.43}$ zaobserwowano, podobnie jak widmach PL WS_2 i WSe_2 , bogate widmo spektralne. Z porównania widm PL monowarstw stopu z widmami monowarstw materiałów binarnych WS_2 i WSe_2 doktorantka zinterpretowała w obu monowarstwach $WS_{0.57}Se_{0.43}$ linie o najwyższej energii jako linie emisji neutralnego ekscytonu (X). Interpretacja ta jest całkowicie poprawna w monowarstwie enkapsulowanej w hBN, natomiast w monowarstwie nieenkapsulowanej budzi pewne zastrzeżenia. Mianowicie, doktorantka oszacowała/wyznaczyła energię X w obu monowarstwach wykorzystując tzw. prawo Vergarda (równanie 5.1). Tak wyznaczona energia X zgadza się bardzo dobrze z energią wyznaczoną z widm PL dla próbki enkapsulowanej w hBN, natomiast dla próbki nieenkapsulowanej energia X wyznaczona z widm PL jest o około 30 meV mniejsza. Wskazuje to zatem na to, że linia ta w próbce nieenkapsulowanej może być linią emisyjną ujemnie naładowanego ekscytonu, trionu (T), którego energia wiązania zarówno w WS_2 i WSe_2 jest równa około 30 meV. Brak emisji linii ekscytonu neutralnego jest częsty w strukturach gorszej jakości i o wyższych koncentracjach gazu elektronów (brak warstw hBN zabezpieczających przed nieintencjonalnym domieszkowaniem), w których zwiększa się prawdopodobieństwo formowania się ekscytonów naładowanych. Dodatkowym pomiarem, który zazwyczaj stosuje się celu w rozstrzygnięciu wątpliwości jaki ekscyton, X czy T jest obserwowany jest pomiar widma odbicia, w którym intensywności przejść optycznych zależą głównie od gęstości stanów, podczas gdy w widmach PL zależą dodatkowo od koncentracji gazu elektronów i czasów relaksacji różnych kompleksów ekscytonowych. Czy były wykonane pomiary widm odbicia w tych monowarstwach? Dodatkowym badaniem pomocnym w rozstrzygnięciu powyższych wątpliwości jest też pomiar widma pobudzania fotoluminescencji. Należy dodać, że w dobrej jakości monowarstwach binarnych związków WS_2 i WSe_2 obserwuje się emisje z rozdzielonych spektralnie dwóch stanów trionów: singletu i tripletu spinowego elektronów (T_s i T_t), którego to rozdzielenia spektralnego nie obserwuje się w stopach ze względu na gorsze własności monowarstw. Doktorantka w dalszych badaniach skupiła się na monowarstwie $WS_{0.57}Se_{0.43}$ enkapsulowanej w hBN. Z widm PL w funkcji gęstości mocy lasera pobudzającego doktorantka wyróżniła cztery najwyższej energetyczne linie, które oznaczyła, zaczynając od najwyższej energii przejścia optycznego jako:

X, T, T^I i T^D . Dwie pierwsze linie zostały już poprzednio zinterpretowane przez doktorantkę jako emisja ekscytynu neutralnego (X) i ujemnie naładowanego trionu (T). W celu interpretacji natury dwu pozostałych linii emisyjnych zostały przeprowadzone szczegółowe badania ewolucji widm PL w funkcji pola magnetycznego od 0 do 30 T przyłożonego w płaszczyźnie monowarstwy. Pomiaru zostały wykonane w konfiguracji Voita. Badania te zostały przeprowadzone przez współautorów prac doktorantki ale doktorantka dokonała ich pełnej analizy, na podstawie której zinterpretowała te linie jak związane z emisją ujemnie naładowanych trionów zabronionych w przejściach optycznych ze względu na: zachowanie spinu (T^D) oraz pędu (T^I). Interpretacja ta jest całkowicie poprawna. Dużym osiągnięciem jest obserwacja emisji z tych stanów w stopach, ze względu, jak już zostało wspomniane powyżej, na ich obniżoną jakość w stosunku do związków binarnych. Z dodatkowych pomiarów widm magneto-fotoluminescencji przeprowadzonych w konfiguracji Faradaya w funkcji pola magnetycznego od 0 do 30 T przyłożonego prostopadle po powierzchni monowarstwy doktorantka wyznaczyła g czynniki kompleksów X, T, T^I , T^D . Badania te potwierdziły interpretację natury tych kompleksów.

W rozdziale 6 zostały przedstawione badania widm fotoluminescencji monowarstw $\text{Mo}_x\text{W}_{1-x}\text{Se}_2$ enkapsulowanych w płatkach hBN. Zbadano monowarstwy o 4 różnych zawartościach molowych molibdenu i wolframu: $\text{Mo}_{0.85}\text{W}_{0.15}\text{Se}_2$, $\text{Mo}_{0.68}\text{W}_{0.32}\text{Se}_2$, $\text{Mo}_{0.49}\text{W}_{0.51}\text{Se}_2$, $\text{Mo}_{0.46}\text{W}_{0.54}\text{Se}_2$, $\text{Mo}_{0.23}\text{W}_{0.71}\text{Se}_2$ oraz monowarstwy materiałów binarnych MoSe_2 i WSe_2 . We wszystkich monowarstwach, oprócz trzech monowarstw o podobnej zawartości molowej molibdenu i wolframu $\text{Mo}_{0.23}\text{W}_{0.71}\text{Se}_2$, w niskotemperaturowym widmie PL zaobserwowano dwie linie widmowe zinterpretowane jako emisje ekscytynu neutralnego (X) i ujemnie naładowanego trionu (T). Pojedynczą linię w widmie PL monowarstwy $\text{Mo}_{0.23}\text{W}_{0.71}\text{Se}_2$ zinterpretowano jako emisję neutralnego ekscytynu (X). Podobnie jak w przypadku pojedynczej linii w widmie PL monowarstwy $\text{WSe}_{0.57}\text{Se}_{0.43}$ wskazane byłoby potwierdzenie natury tej linii w pomiarach widm odbicia i pobudzania fotoluminescencji. Jak już zostało wspomniane badane były trzy różne monowarstwy $\text{Mo}_{0.23}\text{W}_{0.71}\text{Se}_2$. Dwie zostały wytworzone przez doktorantkę a jedna przez współpracowników. Energie emisji linii X w widmach PL trzech monowarstw różnią się znacznie. W monowarstwach otrzymanych przez doktorantkę wprowadzie tylko o 2 meV, ale w trzeciej próbce aż o około 30 meV. Doktorantka oparła interpretację tej linii jako emisję ekscytynu neutralnego (X) na podstawie oszacowań teoretycznych energii ekscytynu neutralnego w stopach stosując tzw. równanie bowingu (6.1). Energia X wyznaczona dla trzeciej próbki $\text{Mo}_{0.23}\text{W}_{0.71}\text{Se}_2$ (otrzymaną przez współautorów) nieznacznie odbiega od wartości teoretycznej, wyznaczonej przez doktorantkę z równania 6.1, podczas gdy energie X wyznaczone z widm PL

próbek wykonanych przez doktorantkę odbiegają od energii X otrzymanej w oszacowaniu teoretycznym o około 30 meV. Warto byłoby wykonać dopasowanie zmian energii X w funkcji składu molowego molibdenu i wolframu w równaniu 6.1 dla obu przypadków osobno: próbek wykonanych przez doktorantkę i współautorkę. Doktorantka wykonała następnie szczegółowe badania widm PL wszystkich badanych monowarstw w funkcji temperatury (5-300 K) i mocy pobudzania, które potwierdziły interpretację natury obu przejść optycznych X i T. Z analizy ewolucji widm PL w funkcji temperatury doktorantka wyciągnęła dodatkowe wnioski dotyczące natury podstawowego stanu ekscytonu. Mianowicie, stwierdziła, że w monowarstwach $\text{Mo}_{0.85}\text{W}_{0.15}\text{Se}_2$, $\text{Mo}_{0.68}\text{W}_{0.32}\text{Se}_2$, $\text{Mo}_{0.49}\text{W}_{0.51}\text{Se}_2$ i $\text{Mo}_{0.46}\text{W}_{0.54}\text{Se}_2$ ekscyton X, podobnie jak w monowarstwie MoSe_2 , jest ekscytonem jasnym, podczas gdy w monowarstwie $\text{Mo}_{0.23}\text{W}_{0.71}\text{Se}_2$ jest ekscytonem ciemnym podobnie jak monowarstwie MoSe_2 . Zatem w strukturach monowarstw $\text{Mo}_x\text{W}_{1-x}\text{Se}_2$ obserwuje się przejście z tzw. systemów jasnych do ciemnych przy koncentracji molibdenu około 20 %. Z analizy ewolucji niskotemperaturowych widm magnetofotoluminescencji przeprowadzonych w konfiguracji Faradaya w funkcji pola magnetycznego od 0 do 30 T przyłożonego prostopadle do płaszczyzny monowarstwy (część przeprowadziła doktorantka a część współautorzy) doktorantka wyznaczyła g-czynniki ekscytonu neutralnego i trionu. Z analizy tej wynika, że g-czynniki trionu przyjmują wartości pośrednie pomiędzy odpowiednimi g-czynnikami monowarstw MoSe_2 i WSe_2 , natomiast gdy g-czynnik ekscytonu neutralnego wykazuje wyraźnie niemonotoniczność w funkcji składu stopu. Przy wzroście zawartości wolframu w stopie z wartości 0 do około 50 % g-czynnik maleje monotonicznie od $g=-4$ do około $g=-7$, po czym dla zawartości wolframu około 71 % ($\text{Mo}_{0.23}\text{W}_{0.71}\text{Se}_2$) maleje gwałtownie do $g=-10$ a następnie powraca do wartości $g=-4$ w WSe_2 . Doktorantka zinterpretowała tę silnie zmianę g-czynnika w monowarstwie $\text{Mo}_{0.23}\text{W}_{0.71}\text{Se}_2$, na podstawie obliczeń ab-initio struktury pasmowej badanej monowarstwy, przeprowadzonych przez współpracowników, jako wpływ silnego mieszania się w paśmie przewodnictwa funkcji falowych z punktów K i Q dwuwymiarowej strefy Brillouina. Dodatkowo, na podstawie analizy, przeprowadzonych przez siebie pomiarów widm rozpraszania Ramana w monowarstwie $\text{Mo}_{0.23}\text{W}_{0.71}\text{Se}_2$, stwierdziła, że modyfikacja funkcji dolinowych w stopach zależy również od naprężeń w sieci krystalicznej. Zbadała również dla wszystkich badanych próbek zmianę stopnia polaryzacji kołowej X i T w funkcji pola magnetycznego przyłożonego prostopadle do płaszczyzny monowarstwy. Uzyskała bardzo ciekawe rezultaty, a w szczególności zaobserwowała bardzo wysoki stopień polaryzacji kołowej ekscytonu neutralnego w stopach $\text{Mo}_x\text{W}_{1-x}\text{Se}_2$, osiągający w silnych polach magnetycznych wartości bliskie 1, które są wyższe od dotychczas obserwowanego stopnia polaryzacji kołowej w monowarstwach dichalkogenków metali przejściowych.

W rozdziale 7 zostały przedstawione badania widm fotoluminescencji monowarstw $\text{Mo}_x\text{W}_{1-x}\text{Se}_2$ enkapsulowanych w płatkach hBN, które są kontynuacją badań tych struktur przedstawionych w poprzednim rozdziale, z tym że badania ewolucji widm PL zostały przeprowadzone w funkcji pola magnetycznego od 0 do 30 T przyłożonego w płaszczyźnie próbki. Pomiary zostały wykonane w konfiguracji Voita. Doktorantka przeprowadziła samodzielnie część pomiarów a część pomiarów została przeprowadzona przez współpracowników. Doktorantka przeprowadziła samodzielnie analizę wszystkich wyników eksperymentalnych wykorzystując, między innymi wyniki obliczeń struktury pasmowej badanych monowarstw metodą teorii funkcjonału gęstości otrzymane przez współautorów. W widmach magneto-fotoluminescencji zaobserwowała dodatkową linię emisyjną pochodzącą od ciemnego ekscytonu neutralnego (X^D) o energii niższej od energii neutralnego ekscytonu jasnego (X^B). Zaobserwowała kwadratowy wzrost intensywności linii X^D ze wzrostem pola magnetycznego. Wyzaczyła parametry funkcji dopasowania opisujące ten wzrost. Zaobserwowała i zinterpretowała, w niektórych monowarstwach, spadek intensywności linii X^B ze wzrostem pola magnetycznego. Wyzaczyła odległości energetyczne linii X^B i X^D . Dla jednej z próbek wyznaczyła parametr g_1 , który określa tzw. siłę mieszania stanów jasnego i ciemnego ekscytonu neutralnego indukowany przez pole magnetyczne przyłożone w płaszczyźnie monowarstwy.

W rozdziale 8 doktorantka podsumowała wyniki swoich prac oraz przedstawiła perspektywy dalszych badań, co jest bardzo istotne bo wskazuje, że ma pomysł na dalsze swoje badania oraz rozwój naukowy. Opisała też bardzo szczegółowo wkład własny oraz współautorów w badania przeprowadzone w pracy doktorskiej.

Oceniam bardzo wysoko wyniki otrzymane przez mgr Katarzynę Olkowską-Pucko. Część z otrzymanych przez doktorantkę wyników jest nowa, a część jest powtórzeniem i rozszerzeniem wyników otrzymanych przez innych autorów, co nie umniejsza wartości pracy, gdyż struktury monowarstw stopów dichalkogenków metali przejściowych, które są przedmiotem badań doktorantki, są bardzo intensywnie badane na całym świecie. Wyniki otrzymane przez doktorantkę wskazują, że stopy dichalkogenków metali przejściowych tworzą unikalną platformę zarówno do badań podstawowych właściwości fizycznych jak i przyszłych zastosowań w urządzeniach nowej generacji o kontrolowanych własnościach elektronowych i magnetooptycznych. Ponadto otrzymane przez nią wyniki mogą okazać się bardzo przydatne w przyszłych badaniach innych autorów.

Stwierdzam, że zgodnie z § 21 pkt 2–4 Załącznika nr 1 do uchwały nr 157 Senatu Uniwersytetu Warszawskiego z dnia 29 czerwca 2022 r. w sprawie określenia sposobu postępowania

w sprawie nadania stopnia doktora oraz stopnia doktora habilitowanego na Uniwersytecie Warszawskim rozprawa doktorska mgr Katarzyny Olkowskiej-Pucko zatytułowana: „Kompleksy ekscytonowe w dwuwymiarowych strukturach van der Waalsa” spełnia wymagane warunki a w szczególności:

1. Rozprawa doktorska prezentuje ogólną wiedzę teoretyczną kandydata w dyscyplinie albo dyscyplinach oraz umiejętność samodzielnego prowadzenia pracy naukowej.
2. Przedmiotem rozprawy doktorskiej jest oryginalne rozwiązanie problemu naukowego albo oryginalne rozwiązanie w zakresie zastosowania wyników własnych badań naukowych w sferze gospodarczej lub społecznej.

Moja ocena pracy jest pozytywna (a nawet bardzo pozytywna).

Ponadto, oceniając bardzo wysoko zawarte w rozprawie osiągnięcia naukowe mgr Katarzyny Olkowskiej-Pucko, a także jej wysokie umiejętności w planowaniu, przeprowadzaniu eksperymentów jak również dogłębnej analizie danych eksperymentalnych i umiejętności wykonywania obliczeń teoretycznych wnoszę o wyróżnienie przedstawionej mi do oceny rozprawy zatytułowanej: „Kompleksy ekscytonowe w dwuwymiarowych strukturach van der Waalsa”. Uzasadnienie wyróżnienia jest częściowo opisane w tekście powyżej. Za najważniejsze wyniki pracy zasługujące na wyróżnienie uważam:

1. Zaobserwowanie nieliniowej zależności wartości g-czynnika ekscytynu neutralnego od składu molowego stopów $\text{Mo}_x\text{W}_{1-x}\text{Se}_2$ oraz bardzo duże wartości g-czynników ekscytynu neutralnego, przekraczające wartości raportowane wcześniej dla monowarstwowych dichalkogenków metali przejściowych.
2. Obserwacje bardzo wysokiego stopnia polaryzacji kołowej ekscytynu neutralnego stopów $\text{Mo}_x\text{W}_{1-x}\text{Se}_2$ osiągające wartości bliskie jedności.
3. Wyznaczenie w monowarstwie $\text{Mo}_{0,68}\text{W}_{0,32}\text{Se}_2$ czynnika opisującego siłę mieszania stanów jasnego i ciemnego ekscytynu neutralnego w polu magnetycznym przyłożonym równolegle do płaszczyzny próbki. Wynik ten nie był dotychczas raportowany w literaturze.
4. Zaobserwowanie efekt pociemniania jasnego ekscytynu neutralnego w monowarstwach $\text{Mo}_{0,68}\text{W}_{0,32}\text{Se}_2$ oraz $\text{Mo}_{0,49}\text{W}_{0,51}\text{Se}_2$. Wynik ten nie był również raportowany w literaturze.
5. Wyznaczeni składu molowego przejścia z monowarstw o jasnym stanie podstawowym do ciemnego stanu podstawowego w stopach $\text{Mo}_x\text{W}_{1-x}\text{Se}_2$.

O wybitnych osiągnięciach doktorantki świadczy też fakt, że wyniki swoich badań opublikowała w dwóch artykułach w prestiżowych czasopismach naukowych: 2D Materials w 2022 oraz Physical Review Letters w 2026, w których doktorantka jest pierwszym autorem jak również autorem korespondencyjnym.