

Prof. dr hab. Grzegorz Karczewski
Instytut Fizyki Polskiej Akademii Nauk
al. Lotników 32/46, 02-668 Warszawa

**Ocena dorobku naukowego oraz recenzja rozprawy habilitacyjnej
doktora Macieja Molasa z Uniwersytetu Warszawskiego**

A. Ocena dorobku naukowego i aktywności zawodowej dr. Macieja Molasa

Dr Maciej Molas jest absolwentem Wydziału Fizyki Uniwersytetu Warszawskiego, który ukończył w 2010 roku pracę magisterską pt.: „Wpływ warunków wzrostu na własności optyczne kropek kwantowych” wykonaną pod kierunkiem prof. dr. hab. Adama Babińskiego. Profesor Babiński oraz profesor Marek Potemski z Grenoble byli promotorami pracy doktorskiej Habilitanta. To podwójne promotorstwo wynikało z umowy pomiędzy Uniwersytetem Warszawskim a Uniwersytetem w Grenoble o wspólnej opiece doktorskiej. W rezultacie, w 2014 r. Habilitant otrzymał stopień doktora obu tych uczelni. Rozprawa doktorska zatytułowana była „Multiekscytony w półprzewodnikowych kropkach kwantowych”. Po utrzymaniu tytułu doktora nauk fizycznych, w latach 2014-2017 dr Molas odbył staż podoktorski w Narodowym Laboratorium Wysokich Pól Magnetycznych w Grenoble. Obecnie, od listopada 2017 r., Dr Maciej Molas pracuje na Wydziale Fizyki Uniwersytetu Warszawskiego, początkowo na stanowisku adiunkta naukowego, a od lutego 2020 r. na stanowisku adiunkta badawczo-dydaktycznego.

Według bazy Web of Sciences dorobek naukowy dr. Molasa składa się z ok. 65 publikacji naukowych cytowanych 1600 razy (1400 bez autocytowań). Dr Molas prezentował swoje wyniki na wielu konferencjach krajowych i międzynarodowych, 4 z tych prezentacji było referatami zaproszonymi, natomiast 7 prezentacjami ustnymi (1 prezentacja ustna przed uzyskaniem stopnia doktora). Gros artykułów dr. Macieja Molasa (55) opublikowanych zostało po uzyskaniu stopnia doktora, co dobrze ilustruje rozwój naukowy Habilitanta. Biorąc pod uwagę stosunkowo krótki staż pracy naukowej Habilitanta podkreślić trzeba, że jego dotychczasowy dorobek naukowy jest imponujący, daleko wykraczający ponad średni dorobek habilitantów. Najlepszym tego dowodem jest indeks Hirsha, który właśnie przekroczył 20 punktów. Imponująca jest również średnia liczba cytowań jego prac, równa 25.32 cytowań na publikację. Dane nauko-metryczne dorobku publikacyjnego dr. Macieja Molasa wskazują, że jego dotychczasowy dorobek publikacyjny znacznie przekracza warunki stawiane zazwyczaj kandydatom ubiegającym się o stopień doktora habilitowanego.

Przechodząc do strony merytorycznej dorobku naukowego Habilitanta trzeba wyróżnić w nim kilka publikacji, które są znane, doceniane i często cytowane przez specjalistów. Poniżej omówię

najczęściej cytowane publikacje, których Habilitant jest autorem, a które nie weszły w skład cyklu 7 publikacji będących osiągnięciem habilitacyjnym. Najczęściej cytowaną pracą współautorstwa dr. Molasa (323 cytowania) jest wielo-autorska praca z Nature opublikowana w 2019 roku pt.: "Resonantly hybridized excitons in moire superlattices in van der Waals heterostructures" (wśród współautorów jest noblista profesor Kostya Novoselov). W pracy tej, używając supersieci złożonych z monowarstw dwusiarczku molibdenu (MoSe_2) i dwusiarczku wolframu (WS_2) autorzy pokazali, że pasma ekscytonowe mogą hybrydyzować, powodując rezonansowe wzmocnienie efektów moire w takich strukturach. Obserwowana hybrydyzacja objawia się wyraźnym przesunięciem energii ekscytonu w zależności od kąta rotacji międzywarstwowej. Dla supersieci, w których pary monowarstw są prawie wyrównane, rezonansowe mieszanie stanów elektronowych prowadzi do wyraźnego wpływu geometrycznego wzoru moire na dyspersję i widmo optyczne zhybrydyzowanych ekscytonów. Autorzy twierdzą, że ich obserwacje mogą stanowić podstawę strategii inżynierii struktury pasmowej w urządzeniach półprzewodnikowych opartych na heterostrukturach van der Waalsa. Praca ta jest bardzo ważna i szeroko znana w środowisku fizyków zajmujących się półprzewodnikami, w szczególności materiałami warstwowymi. Mimo, że rola Habilitanta w jej powstaniu nie była wiodąca, docenić należy jego udział w jej powstaniu. Ponadto publikacja ta jest bardzo charakterystyczna dla dorobku naukowego Habilitanta, ponieważ dotyczy wyrafinowanych badań optycznych struktur kwantowych budowanych z materiałów warstwowych będących przedmiotem jego wieloletnich badań.

Kolejna, wysoko cytowana praca Habilitanta (122 cytowania) dotyczy badań ewolucji ekscytonowej struktury pasmowej w zależności od ilości warstw MoSe_2 . Praca ta zatytułowana "Exciton band structure in layered MoSe_2 : from a monolayer to the bulk limit" ukazała się *Nanoscale* w 2015 r. Przedstawiono w niej wyniki pomiarów mikrofotoluminescencji i mikroodbicia na cienkich warstwach MoSe_2 o grubości od jednej do pięciu monowarstw. Określono zależną od grubości ewolucję przejść ekscytonowych w stanie podstawowym i wzbudzonym zachodzących w różnych punktach strefy Brillouina. Aktywowane temperaturą przesunięcia energetyczne i poszerzenia szerokości pasma rezonansowego autorzy wyjaśnili za pomocą standardowych formalizmów opracowanych dla półprzewodników.

Następną ważną publikacją w dorobku Habilitanta, jest praca z 2017 roku, cytowana 112 razy, opublikowana w *Nanophotonics* pt.: "Optical properties of atomically thin transition metal dichalcogenides: observations and puzzles". W publikacji tej dokonano przeglądu najnowszych wyników badań właściwości optycznych jednowarstwowych i kilkuwarstwowych półprzewodnikowych dichalcogenków metali przejściowych. Przedstawiono obserwacje eksperymentalne i przedyskutowano je w kontekście istniejących modeli, uwypuklając ograniczenia naszego zrozumienia w tej dziedzinie. Na wstępie przedstawiono reprezentatywną strukturę pasmową tych układów i ich międzypasmowe przejścia optyczne. Następnie rozważony został wpływ zewnętrznego pola magnetycznego, omówiono spektroskopię Zeemana i eksperymenty z pompowaniem optycznym, które ujawniają zjawiska związane z dolinowymi stopniami swobody.

Na koniec tego krótkiego, aczkolwiek reprezentatywnego przeglądu dorobku naukowego dr. Macieja Molasa trzeba wspomnieć jego najnowszą, niecytowaną jeszcze publikację zatytułowaną „Exposing the trion's fine structure by controlling the carrier concentration in hBN-encapsulated MoS₂” opublikowaną w listopadzie ubiegłego roku (2021) w Nanoscale. Przytaczam tę publikację, ponieważ w przeciwieństwie do prac wcześniejszych w pracy tej nazwisko dr. Molasa pojawia się na ostatnim miejscu listy autorów, co świadczy o jego kierowniczej roli w powstaniu tej publikacji. W pracy tej autorzy pokazują, że atomowo cienkie materiały, takie jak półprzewodzące dichalkogenki metali przejściowych, są bardzo wrażliwe na otoczenie. Stwarza to możliwość zewnętrznej kontroli ich właściwości poprzez zmianę tego otoczenia. W pracy tej badano wysokiej jakości heterostruktury van der Waalsa zbudowane z monowarstwowego MoS₂ otoczonego hBN. Autorzy pokazali, że koncentracja nośników w monowarstwach MoS₂ może być strojona w zakresie jednego rzędu wielkości poprzez modyfikację grubości dolnego płątka hBN.

Tych kilka przykładów z dorobku Habilitanta pokazuje, że on jest sprawnym bardzo eksperymentatorem, który potrafi posługiwać się różnymi, zaawansowanymi metodami pomiarowymi. Efektywnie wykorzystuje te metody do charakteryzacji struktur półprzewodnikowych o obniżonej wymiarowości oraz do badania zjawisk kwantowych zachodzących w takich strukturach.

Dr Molas kieruje obecnie dwoma grantami OPUS finansowanymi przez NCN. Kierował również grantem Sonatina zakończonym w maju 2021r. W sumie, na lata 2017-2026 zdobył środki finansowe na badania w kwocie bliskiej 5 mln złotych. Habilitant był również wykonawcą w projekcie finansowanym przez European Research Council w ramach programu Advanced Grant. Ponadto przed uzyskaniem stopnia doktora był kierownikiem dwóch i wykonawcą w dwóch innych mniejszych zadaniach badawczych. Aktywność dr Molasa w zdobywaniu środków finansowych na badania jest zatem bardzo znacząca.

Habilitant odbył zagraniczne staże naukowe w Narodowym Instytucie Grafenowym w Manchesterze (UK) w latach 2018-2019 oraz w latach 2014-2017 w Narodowym Laboratorium Wysokich Pól Magnetycznych w Grenoble (Francja). Z ośrodkiem w Grenoble współpracował również bardzo aktywnie przed uzyskaniem doktoratu odbywając tam pięć krótszych staży w latach 2011-2014 (łącznie 21 miesięcy). Posiada zatem bogate doświadczenie we współpracy z zagranicznymi instytucjami badawczymi.

Dr Molas ma także znaczne doświadczenie pedagogiczne. Był opiekunem 3 prac magisterskich i jako promotor pomocniczy opiekuje się 4 doktorantami. Jest doświadczonym nauczycielem akademickim o czym świadczą liczne prowadzone przez niego wykłady, ćwiczenia i pracownie studenckie. Jest doświadczonym organizatorem i aktywnym popularyzatorem nauki. Za swoje osiągnięcia naukowe i dydaktyczne został dwukrotnie nagrodzony przez Rektora Uniwersytetu Warszawskiego (w 2019 i 2021 r.). Od Ministra Nauki i Szkolnictwa Wyższego otrzymał stypendium dla wybitnych, młodych

naukowców. Otrzymał również tytuł „Outstanding Reviewer” od wydawnictwa IOP za swój wkład w recenzowanie publikacji.

Reasumując uważam, że poziom naukowy prac dr. Maciej Molas, jego bogate doświadczenie we współpracy międzynarodowej, w realizacji zadań badawczych, dydaktyce etc. predestynują go do dalszej, samodzielnej pracy naukowej.

B. Recenzja rozprawy habilitacyjnej dr. Macieja Molas

Rozprawę habilitacyjną dr. Macieja Molas stanowi cykl 7 artykułów naukowych opublikowanych w latach 2017-2019 w renomowanych pismach specjalistycznych o zasięgu światowym. Wszystkie artykuły habilitacyjne są wieloautorskie. Habilitant jest pierwszym autorem 6 z nich, natomiast ostatnim autorem jednego. Artykuły cyklu opublikowane były w następujących czasopismach: po dwa w Physical Review Letters (IF=9,16) oraz w Scientific Reports (IF=4,38), po jednym w Nanoscale (IF=7,79), Nanotechnology (IF=3,85) i 2D Materials (IF=7,10). Wszystkie wymienione czasopisma należą niewątpliwie do wiodących w dziedzinie fizyki materii skondensowanej, w szczególności w fizyki materiałów warstwowych i struktur dwuwymiarowych. Według oświadczeń współautorów ich wkład w poszczególne publikacje cyklu habilitacyjnego polegał na pomocy w opracowaniu danych i uczestnictwie w pisaniu publikacji. Profesor Potemski wspomina o swojej roli jako inicjatora badań. Wynika z tego, że wkład Habilitanta w powstanie publikacji cyklu habilitacyjnego polegał przede wszystkim przeprowadzeniu większości raportowanych pomiarów, opracowaniu wyników i pisaniu publikacji. Habilitant miał również istotny wkład w opracowanie koncepcji i zaplanowanie badań.

Dr Molas opatrzył cykl artykułów składających się na rozprawę habilitacyjną obszernym wstępem, który zasługuje na uwagę. Niewątpliwą zaletą tego wprowadzenia jest jego charakter, szeroko i przystępnie przedstawiający istotę zjawisk, które były przedmiotem badań habilitanta. Osiągnięcie habilitacyjne dotyczy właściwości optycznych kompleksów ekscytonowych w cienkich warstwach dichalkogenków metali przejściowych takich, jak MoS_2 , MoSe_2 , WS_2 i WSe_2 . Habilitant badał oddziaływania ekscytonów z fononami, modyfikacje ich właściwości pod wpływem otoczenia dielektrycznego, obróbki chemicznej, temperatury oraz pól elektrycznych i magnetycznych. W rezultacie szerokich badań raportowanych w cyklu artykułów habilitacyjnych dr Maciej Molas uzyskał szereg cennych wyników, które można zebrać w pięć tematów wiodących: (1) Kompleksy ekscytonowe w cienkich warstwach WS_2 , (2) oddziaływanie elektron-fonon w warstwach WS_2 , (3) ciemne ekscytony w warstwach dichalkogenków metali przejściowych, (4) serie ekscytonowe w monowarstwach dichalkogenków metali przejściowych zamkniętych w heksagonalnym azotku boru, (5) zmiana koncentracji nośników w monowarstwach MoS_2 .

W pierwszej pracy cyklu habilitacyjnego (Nanoscale, vol. 9) badane były kompleksy ekscytonowe w cienkich warstwach dwusiarczku wolframu (WS_2) o grubości od jednej do ośmiu warstw atomowych oraz w próbce objętościowej o grubości 32 nm. Pokazano, że optyczna absorpcja pasmowa

monowarstwy WS_2 zdominowana jest przez konkurujące ze sobą linie rezonansowe, które przyporządkować można do ekscytonów - jednego neutralnego i dwóch ujemnie naładowanych, tzw. trionów. Udział tych linii ekscytonowych w całkowitej absorpcji światła zmienia się w zależności od temperatury i koncentracji nośników. Bardzo ważnym wynikiem było zbadanie ewolucji widm PL cienkich warstw WS_2 w funkcji liczby warstw. W grubszych warstwach widma PL zdominowane są przez skośne z udziałem fononów. Autorzy pokazali, że ewolucja energii tych przejść wraz ze wzrostem liczby warstw daje się opisać prostym wzorem opisującym ewolucję energii w dwuwymiarowych stanach elektronowych związanych w prostokątnej studni kwantowej.

W następnej pracy cyklu habilitacyjnego (Nanotechnology, vol. 29) badane były również ekscytony naładowane, ale tym razem badana monowarstwa WS_2 zamknięta została pomiędzy płatkami hBN, co pozwoliło na znacznie zmniejszenie niejednorodnego poszerzenia linii PL. W rezultacie, można było rozdzielić i zbadać fotoluminescencją stanu singletowego i trypletowego ujemnie naładowanych ekscytonów (trionów). Stwierdzono, że stan singletowy jest znacznie silniej związany niż stan trypletowy, gdyż można go obserwować nawet w temperaturze pokojowej, podczas gdy stan trypletowy widoczny jest tylko w temperaturach kriogenicznych.

Oddziaływania ekscytonów z fononami w monowarstwach WS_2 były przedmiotem badań Habilitanta w trzeciej pracy cyklu opublikowanej w Scientific Reports, vol 7. Za pomocą niekonwencjonalnej techniki pomiarowej, spektroskopii wzbudzonego rozpraszania Ramana (RSE) badane były monowarstwy WS_2 . Pomiar techniką RSE polega na przemiataniu energii wzbudzenia, podczas gdy energia detekcji jest stała i równa energii przejść związanymi z obojętnymi lub naładowanymi ekscytonami. Otrzymane wyniki pokazują, że spektroskopia RSE może być użyteczną techniką do badania oddziaływań elektronowo-fononowych w cienkich warstwach dichalcogenków metali przejściowych.

Następnym tematem badań Habilitanta były tzw. ciemne ekscytony, których emisję zaobserwowano w wyniku zastosowania pola magnetycznego przyłożonego w płaszczyźnie warstw, co powodowało mieszanie stanów jasnych i ciemnych umożliwiając obserwację tych drugich. Wyniki dotyczące badań ciemnych ekscytonów zostały przedstawione w 2D Materials, vol. 4 oraz Physical Review Letters, vol. 123. W pierwszej z tych publikacji autorzy przedstawili niskotemperaturowe pomiary magneto-fotoluminescencji, w których wykazano rozjaśnianie ciemnych ekscytonów przez pole magnetyczne B przyłożone w płaszczyźnie monowarstw różnych półprzewodzących dichalcogenków metali przejściowych. Dla monowarstw WSe_2 i WS_2 emisja ciemnych ekscytonów była obserwowana ok. 50 meV poniżej piku jasnych ekscytonów i miała charakterystyczną strukturę dubletu, podczas gdy dla monowarstwy $MoSe_2$ nie pojawiają się żadne piki emisji indukowane polem magnetycznym.

Badania właściwości ciemnych stanów ekscytonowych kontynuowane były w wysokiej jakości monowarstwie WSe_2 zamkniętej pomiędzy warstwami hBN. W eksperymentach fotoluminescencji z rozdzielaniem polaryzacji, przeprowadzonych na takich próbkach pokazane zostało, że wewnętrzne oddziaływania wymienne w połączeniu z przyłożonym polem magnetycznym w płaszczyźnie i/lub poza

płaszczyzną umożliwiającą sondowanie i manipulowanie dolinowym stopniem swobody ciemnych ekscytonów. W publikacji z *Physical Review Letters*, vol. 123 badane były podobne próbki, tzn. monowarstwa WSe_2 zamknięta w heksagonalnym azotku boru i uzyskano bardzo podobne wyniki, a mianowicie autorzy pokazali, że jak wewnętrzne oddziaływanie wymienne w połączeniu z przyłożonym polem magnetycznym w płaszczyźnie i/lub poza płaszczyzną umożliwia sondowanie i manipulowanie dolinowym stopniem swobody ciemnych ekscytonów.

W ostatniej z publikacji cyklu habilitacyjnego omówiony został wpływ obróbki sulfonimidem bis(trifluorometanu) (TFSI, superkwas) na właściwości optyczne monowarstwy MoS_2 . Wpływ ten badany był za pomocą fotoluminescencji, kontrastu odbiciowego i rozpraszania Ramana w szerokim zakresie temperatur. Wykazano, że wielokrotne zastosowanie obróbki chemicznej powoduje stopniowe wygaszanie emisji i absorpcji trionów oraz przesunięcie czasowe pomiędzy absorpcją a emisją neutralnych ekscytonów związanych z rezonansami ekscytonowymi A i B. Ta ewolucja pozwoliła jednoznacznie zidentyfikować kompleks trionowy związany z ekscytonem B w monowarstwie MoS_2 . Zastosowana obróbka chemiczna powoduje również znikanie emisji związanej z defektami powierzchniowymi, co związane jest to ze skuteczną pasywacją defektów na powierzchni monowarstwy MoS_2 . Pasywacja zmniejsza gęstość nośników, co z kolei wpływa na poza płaszczyznowe pole elektryczne w próbce. Obserwowane zmniejszenie koncentracji nośników wpływa również na rozpraszanie Ramana w monowarstwie MoS_2 .

Jak pokazuje powyższy przegląd, rozprawa habilitacyjna dr. Macieja Molasa jest z jednej strony dość monotematyczna – dotyczy właściwie jednego typu materiałów półprzewodnikowych – cienkich warstw dichalkogenków metali przejściowych i jednego typu własności materiałowych – właściwości optycznych związanych z ekscytonami. Z drugiej strony, zarówno materiały, jak i zagadnienia, którymi zajmował się Habilitant okazały się być bardzo różnorodne i ciekawe. Każdy rodzaj materiału oraz każde badane zagadnienie wymagały indywidualnego podejścia eksperymentalnego, często innowacyjnego jak np. zastosowanie metody RSE, oraz nowatorskiej interpretacji, jak np. w przypadku dolinowych stopni swobody ciemnych ekscytonów. Uważam, że dr Maciej Molas bardzo dobrze poradził sobie ze swoimi badaniami, ich interpretacją i opisem uzyskanych wyników.

Podsumowując, w swojej rozprawie habilitacyjnej dr Maciej Molas przedstawił szereg interesujących wyników dotyczących własności ekscytonów w dichalkogenkach metali przejściowych. Jego prace te są ważne z punktu widzenia badań podstawowych półprzewodników warstwowych. Uważam, że przedstawiona rozprawa habilitacyjna stanowi istotny wkład autora w uprawianą dziedzinę nauki. Stwierdzam, że rozprawa spełnia warunki określone w ustawie i rozporządzeniu o stopniach naukowych. Ponieważ zarówno dorobek naukowy jak i rozprawę habilitacyjną dr. Macieja Molasa oceniam pozytywnie, wnoszę o dopuszczenie habilitanta do dalszych etapów przewodu habilitacyjnego


Grzegorz Karczewski