IChF
Instytut Chemii Fizycznej PAN

ul. Kasprzaka 44/52
01-224 Warszawa
tel: (4822) 343 20 77
e-mail: lewin@ch.pw.edu.pl

Prof. dr hab. inż. Janusz Lewiński

Warszawa, 07.02. 2021 r.

Recenzja całokształtu dorobku naukowego oraz rozprawy habilitacyjnej dr. inż. Michała Baranowskiego

pt.: „*Efekty ekscytonowe w nowych materiałach półprzewodnikowych*”.

Informacje ogólne oraz ocena dorobku naukowego.

Dr inż. Michał Baranowski jest absolwentem Wydziału Fizyki Technicznej, Informatyki i Matematyki Stosowanej Politechniki Łódzkiej, gdzie w 2009 roku obronił pracę magisterską pt.: „Transport elektronów w supersieciach półprzewodnikowych”. Następnie w 2013 roku uzyskał stopień doktora nauk chemicznych na podstawie rozprawy pt.: „Dynamika nośników w półprzewodnikowych studniach kwantowych na podłożu z GaAs, emitujących w zakresie bliskiej podczerwieni” wykonanej pod kierunkiem prof. dr hab. inż. Jana Misiewicza na Wydziale Podstawowych Problemów Techniki Politechniki Wrocławskiej. W tym samym roku został zatrudniony w tej ostatniej jednostce na stanowisku asystenta, a od roku 2015 do chwili obecnej na stanowisku adiunkta. W latach 2016 - 2019 odbył długoterminowy staż naukowy w Laboratorium Silnych Pól Magnetycznych w Tuluzie. Ponadto w 2016 i 2017 roku odbył krótkookresowe wizyty naukowo-badawcze na Wydziale Fizyki, Astronomii i Informatyki Stosowanej UMK Toruń oraz w High Field Magnet Laboratory na Uniwersytecie im. Radbouda w Nijmegen.

Zainteresowania naukowe Habilitanta koncentrują się na badaniu fizyki ekscytonu w dwóch grupach materiałów półprzewodnikowych: monowarstwowych dichalkogenkach metali przejściowych oraz perowskitach halogenkowych metali. Na dotychczasowy podstawowy dorobek naukowy składa się 46 współautorskich publikacji w czasopismach z listy Filadelfijskiego Instytutu Informacji Naukowej, których sumaryczny współczynnik wpływu IF wynosi ok. 260. Po doktoracie Habilitant opublikował 31 prac, z czego 7 publikacji o sumarycznym IF ok. 66.5 zostało przedstawione jako dorobek habilitacyjny. Całkowity dorobek naukowy uzupełniają liczne wystąpienia na konferencjach krajowych i międzynarodowych (1 wykład na zaproszenie, 10 komunikatów ustnych i 15 posterów).

Ogólna liczba cytowań według bazy Web of Science wynosi ok. 400, w tym bez autocytowań 340, a indeks Hirscha 12. Osiągnięcia naukowe dr. Baranowskiego zostały uhonorowane wyróżnieniami i stypendiami, w tym Stypendium imienia Maxa Borna przyznane przez Prezydenta Miasta Wrocławia (2011), Stypendium Start Fundacji na rzecz Nauki Polskiej (2014) oraz Stypendium dla Młodych Wybitnych Naukowców przyznane przez Ministra Nauki i Szkolnictwa Wyższego (2019).

Dotychczas Habilitant był kierownikiem trzech projektów badawczych: Iuventus Plus (IP2011001471), Preludium 4 (2012/07/N/ST3/03173) oraz MNiSW Mobilnosc Plus V (1648/MOB/V/2017/0), oraz uczestniczył jako wykonawca w realizacji dwóch projektów badawczych Narodowego Centrum Nauki. W trakcie swojej działalności naukowej recenzował też prace w renomowanych międzynarodowych czasopismach specjalistycznych, takich jak: ACS Energy Letters czy Journal of Materials Science.

Opinia o przedstawionych do habilitacji publikacjach naukowych

Przedstawiona do recenzji rozprawa habilitacyjna jest spójnym tematycznie cyklem **7** publikacji składających się na osiągnięcie naukowe zatytułowane „Efekty ekscytonowe w nowych materiałach półprzewodnikowych". Ten tematyczny cykl prac został omówiony w polskojęzycznym autoreferacie będącym częścią dokumentacji postępowania habilitacyjnego. Prace te ukazały się w renomowanych czasopismach specjalistycznych, w tym *2D Materials*, (2 prace), *Nano Letters,* (2), *Journal of Physical Chemistry C,* (1), *ACS Energy Letters,* (1), *Journal of Materials Chemistry C,* (1) (IF od 4.3 do 16.3, o sumarycznym współczynniku wpływu IF 66.5). Prezentowane wyniki zostały wykonane w grupie badawczej dr. hab. Pauliny Płochockiej w Laboratoire National des Champs Magnetiques Intenses, CNRS-UGA-UPS-INSA (Toulouse, France). Wszystkie publikacje stanowiące podstawę rozprawy habilitacyjnej mają charakter wieloautorski. Należy jednak podkreślić, że dr. Baranowski jest pierwszym autorem w 6 pracach oraz autorem korespondencyjnym w siódmej pracy. Dołączone do rozprawy kompletne oświadczenia współautorów tych prac nie pozostawiają też wątpliwości odnośnie wiodącej lub współwiodącej roli Habilitanta w formułowaniu celów badawczych, znaczącym udziale w badaniach eksperymentalnych i interpretacji otrzymanych wyników oraz przygotowaniu publikacji. W zależności od publikacji oświadczenia współautorów zawierają stwierdzenia o współudziale w formułowaniu koncepcji badawczej, przygotowaniu materiałów i ich charakteryzacji z zastosowaniem różnorodnych technik, obliczeń, interpretacji wyników pomiarowych oraz redagowaniu publikacji.

Tematyka publikacji przedstawionych w cyklu habilitacyjnym obejmuje badanie właściwości fizykochemicznych dwóch grup materiałów półprzewodnikowych: dichalkogenków metali przejściowych o strukturze warstwowej oraz dwu- i trójwymiarowych perowskitów halogenkowych metali. Obie grupy materiałów wzbudzają ogromne zainteresowanie na przestrzeni ostatniej dekady, co wynika z ich unikalnych właściwości fizykochemicznych i ogromnego potencjału aplikacyjnego. W przypadku kryształów van der Waalsa dichalkogenków metali przejściowych o strukturze warstwowej pojedyncze atomowo-cienkie warstwy charakteryzują się nietrywialnymi właściwościami optycznymi i elektronowymi. To samo dotyczy perowskitów halogenkowych metali o unikalnej właściwościach fizykochemicznych wynikających z ich budowy na poziomie atomowym oraz struktury jonowej sieci krystalicznej podatnej na subtelne zmiany pod wpływem czynników zewnętrznych. Na przykład, już na początkowym etapie badania właściwości fizykochemicznych tych grup materiałów zaobserwowano, że fizyka ekscytonu jest dalece odmienna od obserwowanej w półprzewodnikach III-V czy II-VI, chociaż przyczyny tego są różne i wynikają ze skomplikowanego charakteru rekombinacji par dziura-elektron. Badanie podstawowych właściwości ekscytonów w tych nowych materiałach było podstawowym celem recenzowanego cyklu prac. Głównym narzędziem badawczym były metody spektroskopii optycznej, połączone w niektórych przypadkach z pomiarami w ekstremalnie silnych polach magnetycznych (do 68T).

Poniżej wymienione zostały największe dokonania Habilitanta składające się na osiągnięcie naukowe zatytułowane „Efekty ekscytonowe w nowych materiałach półprzewodnikowych".

• W grupie półprzewodnikowych monowarstw dichalkogenków metali przejściowych:

- Wyjaśnienie przyczyn różnego stopnia polaryzacji fotoluminescencji w dichalkogenkach metali przejściowych typu MX_2, gdzie wykazany został wpływ ułożenia stanów jasnych i ciemnych ekscytonu na obserwowany stopień polaryzacji kołowej fotoluminescencji [H1].

- Nowatorskie badania fotoluminescecji związanej z międzywarstwowym ekscytonem w heterostrukturalnym układzie $MoS_2/MoSe_2/MoS_2$ i wykazanie, że międzywarstwowy ekscyton formujący się w tego typu strukturach charakteryzuje się znacznie wydłużonym czasem życia i stabilną polaryzacją fotoluminescencji [H2].

- Zbadanie charakteru przerwy w półprzewodnikowym materiale warstwowym ReS_2 i wykazanie obecności tzw. „gorącego" charakteru emisji ekscytonowej, wskazującej że większość obserwowanej emisji zachodzi zanim układ osiągnie równowagę termodynamiczną [H3].

• W grupie materiałów na bazie perowskitów halogenkowych, prace [H4-H7]:

- Zbadanie wpływu zmian temperatury i związanego z tym przejściem od statycznego do dynamicznego nieporządku na widmo fotoluminescencji najpopularniejszego dla cienkiej warstwy multikomponentowego perowskitu $Cs_{0.05}(MA_{0.17}FA_{0.83})_{0.95}Pb(I_{0.83}Br_{0.17})_3$, gdzie wykazano występowanie efektu zmiany gęstości stanów pułapkowych pod wpływem temperatury, który nie jest spotykany w klasycznych półprzewodnikach. Efekt zmiany gęstości stanów pułapkowych pod wpływem temperatury [H4].

- Zbadanie struktury subtelnej ekscytonu dla monokryształu $MAPbBr_3$, gdzie wykazano, że obniżająca się symetria kryształów perowskitowych przy obniżaniu temperatury ma bezpośrednie przełożenie na strukturę energetyczną ekscytonu. Zgodnie z przewidywaniami teoretycznymi w rombowej fazie kryształu $MAPbBr_3$ zaobserwowano po raz pierwszy rozszczepienie struktury subtelnej stanów jasnych ekscytonu w krysztale objętościowym półprzewodnika. Uzyskana wartość rozszczepienia stanów jasnych ekscytonu może służyć jako punkt wyjściowy do badań wpływu ograniczenia przestrzennego na stany ekscytonowe w nanokryształach półprzewodnikowych. Ponadto wyniki badań struktury subtelnej ekscytonu w polu magnetycznym dostarczyły przesłanek na obecność sprzężenia nośników ładunku z drganiami sieci, które prowadzi do zwiększenia ich masy efektywnej [H5].

- Przeprowadzenie oryginalnych badań przejść ekscytonowych dla serii dwuwymiarowych perowskitów o różnej długości łańcucha organicznego, $(C_nH_{2n+1}NH_3)_2PbI4$, (gdzie n = 4, 6, 8, 10, 12) w ekstremalnych polach magnetycznych i wykazanie znaczącej zmiany masy efektywnej nośników na skutek przejścia fazowego. Jednocześnie efektem tych badań było znaczne poszerzenie wiedzy w obszarze pochodzenia złożonego widma absorpcji dwuwymiarowych perowskitów [H6].

- Pełniejsze zrozumienie natury emisji w dotychczas najintensywniej badanym przedstawicielem rodziny podwójnych perowskitów, tj perowskitem halogenkowym $Cs_2AgBiBr_6$ i wykazanie, że właściwości emisyjne tego materiału zdominowane są przez silne sprzężenie drgań sieci z nośnikami ładunku. Badania te pozwoliły wyjaśnić, czemu półprzewodnik ten wykazuje fotoluminescencje pomimo skośnej przerwy [VII].

Wymienione najważniejsze dokonania Habilitanta charakteryzują się bardzo wysokim poziomem naukowym i nowatorskością w skali światowej, co niewątpliwie potwierdza fakt ich publikacji w najbardziej renomowanych czasopismach specjalistycznych. Zapoznając się ze źródłowymi artykułami zwykle nie dokonuję ich wnikliwej recenzji, bo takową przeszły na etapie przyjmowania do publikacji. Niemniej, czasami recenzenci koncentrując się na wysoce oryginalnych wynikach eksperymentalnych pozostawiają bez komentarza pewne niefortunne

formy opisu, jak to na przykład ma miejsce w pracy H6 (Nano Lett. 2019, 19, p. 7055): cf. ‘cationic Pb orbitals’ czy też ‘the valence band is built from s-like orbitals, whereas the conduction band is built from p-like orbitals’, w tym ostatnim przypadku ma zastosowanie zwykle pełniejszy klasyczny opis: ‘the valence band is derived from Pb 6s and Br 4p orbitals and the conduction band minimum is dominated mostly by Pb 6p states’. Integralną częścią przedstawionej dokumentacji postępowania habilitacyjnego jest też polskojęzyczny autoreferat, który stanowi wprowadzenie do przedmiotowej tematyki oraz swoiste omówienie cyklu artykułów stanowiących czteroletni dorobek naukowy dr. inż. Michała Baranowskiego. Jednocześnie autoreferat pełni dość istotną nieformalną rolę - jest często jedynym elementem przybliżającym nam osobowość autora przy obecnym trybie postępowań habilitacyjnych. W tym kontekście pragnę zauważyć, że w przypadku autoreferatu zaskakuje pewna nonszalancja Habilitanta w przygotowaniu tej części. Ta uwaga szczególnie odnosi się do używania często skrótów myślowych, niefortunnych określeń czy też nieścisłości przy opisie materiałów, jak na przykład na str. 5: ‘Monowarstwa tych materiałów składa się z warstwy atomów metalu przejściowego otoczonej z dwóch stron atomami chalkogenów’.

Zauważyłem też, że Autor analizując (i) wpływ przejścia od statycznego do dynamicznego nieporządku na widmo fotoluminescencji cienkich warstw multikomponentowego perowskitu $Cs_{0.05}(MA_{0.17}FA_{0.83})_{0.95}Pb(I_{0.83}Br_{0.17})_3$ nie odnosi się do dynamiki układu indukowanej naświetlaniem (cf. Tsai et al., Science 2018, 360, 67), czy (ii) dynamiki materiałów perowskitowych na poziomie molekularnym i sieci krystalicznej. Pomija w swoich rozważaniach dynamikę atomu centralnego w podstawowej jednostce oktaedrycznej (Chem. Sci., 2017, 8, 5628), co niewątpliwie może być dodatkowym czynnikiem determinującym fizykę ekscytonu w tego typu materiałach. W tym fragmencie pozwolę sobie jeszcze na jedną uwagę semantyczną. W autoreferacie Habilitant wprowadza pojęcie ‘dolinotronika’ jako bezpośrednie tłumaczenie z języka ang. terminu ‘valleytronica’. Nazwa powinna być tak skonstruowana, aby w miarę jednoznacznie kojarzyła się z określonym zjawiskiem, a w języku polskim dolina raczej nie ma konotacji z elektroniką poza Doliną Krzemową. Natomiast w mowie potocznej doliniarz to złodziej lub barwniej - specjalista od opróżniania cudzych kieszeni/dolin. Dlatego uważam, że określenie ‘dolinotronika’ raczej nie przyjmie się w języku polskim, a na chwilę obecną dla mnie bliższy byłby termin ‘elektronika dolinowa’. Powyższe uwagi w najmniejszym stopniu nie wpływają na moją bardzo wysoką ocenę przedstawionego do oceny wniosku habilitacyjnego.

Ocena dorobku organizacyjnego i dydaktycznego.

Dr inż. Michał Baranowski w ramach działalności dydaktycznej w latach 2013-2016 przeprowadził różnorodne zajęcia dydaktyczne, w tym ćwiczenia rachunkowe z podstaw fizyki, programowanie proceduralne w języku C oraz laboratoria z podstaw fizyki doświadczalnej. Ponadto uczestniczył w przygotowaniu treści i materiałów do wykładu z optyki półprzewodników oraz opracował materiały do ćwiczenia „Wyznaczanie momentu bezwładności ciał metodą wahadła fizycznego grawitacyjnego i sprawdzenie twierdzenia Steinera". Habilitant jest promotorem jednej pracy magisterskiej i jednej pracy inżynierskiej. W latach 2016-2019 w trakcie stażu sprawował bezpośrednią opiekę naukową nad doktorantką w grupie dr hab. Pauliny Płochockiej. Habilitant jest członkiem Polskiego Towarzystwa Fizycznego.

Wnioski końcowe

Tematyka publikacji przedstawionych w cyklu habilitacyjnym wpisuje się idealnie w aktualne trendy i wyzwania współczesnej fizyki materiałów i nanotechnologii. Przedstawione osiągnięcia naukowo-badawcze dr. inż. Michała Baranowskiego w postaci jednotematycznego cyklu publikacji „Efekty ekscytonowe w nowych materiałach półprzewodnikowych" dowodzą, że Habilitant wypracował w swojej działalności naukowej wyodrębnioną i spójną tematykę badawczą stanowiącą istotny, oryginalny i twórczy wkład w rozwój dyscypliny. Oceniając bardzo wysoko samą rozprawę habilitacyjną oraz całokształt dokonań naukowych jestem głęboko przekonany, że Habilitant jest w pełni przygotowany do samodzielnego prowadzenia pracy naukowej.

W moim głębokim przekonaniu uważam, że przedstawiona do recenzji rozprawa habilitacyjna spełnia wszystkie warunki określone w art. 17 Ustawy o stopniach naukowych i tytule naukowym oraz o stopniach i tytule w zakresie sztuki z dnia 14.03.2003 r. (Dz. U. nr 65, poz. 595 z 2003 r., z zm. w Dz. U. z 2005 r. nr 164, poz. 1365) i wnioskuję o dopuszczenie dr. inż. Michała Baranowskiego do dalszych etapów przewodu habilitacyjnego.