

## Ocena wniosku habilitacyjnego doktora Łukasza Kłopotowskiego

### 1. Ocena osiągnięcia naukowego

Jako osiągnięcie naukowe w rozumieniu Art.16 punkt 1 Ustawy o stopniach naukowych itd. Habilitant podał cykl dziewięciu publikacji pod wspólnym tytułem **Sterowanie stanem ekscytonowym w pojedynczej kropce kwantowej z tellurkiem kadmu**. Cykl tworzą cztery prace opublikowane w *Physical Review B*, w tym jeden *Rapid Communication*, dwie w *Applied Physics Letters*, dwie w *Journal of Applied Physics* oraz jedna – monoautorska praca w *Acta Physica Polonica A*.

Kropki kwantowe z tellurkiem kadmu są interesujące między innymi ze względu na właściwości obiecujące dla manipulacji uwięzionego spinu. Kropki CdTe były mniej intensywnie badane od kropek InAs, mimo że charakteryzuje je 1) potencjalnie słabsze niż w III-V sprzężenie nadsubtelne spinu nośników ze spinami jądrowymi, pozwalające liczyć na dłuższy czas koherencji, 2) dobra rozpuszczalność jonów metali przejściowych w CdTe, umożliwiające produkcję półprzewodnika magnetycznego. Obydwie cechy motywowały podjęte przez habilitanta badania nad optyczną kontrolą, zapisem i sterowaniem spinem uwięzionego ekscytonu, w szczególności mechanizm tworzenia polaronu magnetycznego przez momenty magnetyczne jonów metali przejściowych w oddziaływaniu ze spinem ekscytonu. Badania spinowo-magnetyczne musiały być poprzedzone bardziej podstawowymi studiami nad uwięzieniem kompleksów ekscytonowych oraz ich identyfikacją w widmie fotoluminescencyjnym (PL). Przeprowadzenie podjętych w osiągnięciu badań wymagało opracowania pionierskich technik wzrostu (w tym sztucznych molekuł), technik pomiarowych, itd. Uwięzione układy ekscytonowe w kropkach II-VI oraz własności strukturalne tych kropek były w momencie podjęcia badań obszarem słabo poznanym, w porównaniu z kropkami InAs/GaAs.

W recenzji omawiam prace w kolejności, w jakiej habilitant przedstawił je w autoreferacie. Autor zaczyna prezentację od sterowania stanem ładunkowym – opisanym w pracach H3, H5, oraz H7. H3 *Stark spectroscopy and radiative lifetimes in single self-assembled CdTe quantum dots* to praca opublikowana w *Physical Review B* wykonana we współpracy z Univ. Pierre et Marie Curie, CNRS Marcoussis, oraz Univ. Sheffield. Kropki kwantowe osadzone są w diodzie Schottky'ego. Pole elektryczne przyłożone między wysokodomieszkowanym (typ p) tellurkiem cynku a kontaktem Schottky'ego Ti/Au pozwala sterować obsadzeniem ładunkowym kropek CdTe, a co za tym idzie względną intensywnością linii kompleksów neutralnych (ekscyton, bieksyton) i naładowanych (triony). Struktura diody, w której osadzone są kropki, pozwala na obserwację efektu Starka w przesunięciach linii w widmie PL dla kompleksów ekscytonowych oraz odczytać lokalizację elektronów i dziur z tzw. wbudowanego momentu dipolowego. Podobnie jak w kropkach InAs w pracy H3 stwierdzono, że dziura pod nieobecność zewnętrznego pola elektrycznego znajduje się powyżej elektronu.

Kwantowy efekt rozmiarowy i nierówne rozmiary kropek pozwalają autorom na selekcję pojedynczej kropki przez zakresu energii widma PL. W pracach cyklu do selekcji pojedynczej kropki używano również apertury o submikronowym prześwicie. Wyniki wskazują, iż lokalizacja nośników, głównie dziur, znacząco różni się dla różnych stanów ładunkowych kropki. W szczególności wbudowany moment dipolowy - znaczny dla ekscytonu, dla dodatniego trionu niemal znika. Autorzy badają intensywność linii PL, w tym w funkcji czasu po impulsowym wzbudzeniu i znajdują, że tempo rekombinacji dodatniego trionu  $X^+$  jest szybsze niż neutralnego ekscytonu  $X$ , co w konsystencji ze znikaniem wbudowanego dipola dla  $X^+$  wskazuje na większe przekrywanie funkcji elektronowej i dziurowej dla dodatniego trionu. Wyniki pracy wskazują, iż w kropkach CdTe dla nośników z pasma walencyjnego nie udaje się osiągnąć granicy silnego uwięzienia, czy zamrożenia przestrzennych stopni swobody, oraz że oddziaływanie między nośnikami silnie modyfikuje rozkład ładunku w kropce. Ekscytonowy promień Bohra w CdTe jest znacznie mniejszy niż w materiałach III-V i kilkukrotnie mniejszy niż rozmiar kropek. Praca H3 dokumentuje opanowanie techniki osadzania kropek w strukturze pozwalającej na przyłożenie pola elektrycznego i jednoczesną obserwację widma PL. W pracy osiągnięto kontrolę stanów ładunkowych w kropkach CdTe oraz zrozumienie widm fotoluminescencyjnych z identyfikacją kompleksów ekscytonowych, wyznaczeniem struktury przestrzennej rozkładu uwięzionego ładunku oraz oszacowaniem wpływu oddziaływania na widma.

Praca H5 *Charging effects in self-assembled CdTe quantum dots*, *Acta Physica Polonica A* 120, 819 (2011) to monoautorskie review prac nad efektami ładowania kropek CdTe w widmie, korzystające w dużej części z materiału przedstawionego w H3. Artykuł jest materiałem pokonferencyjnym z 40th School and Conference „Jaszowiec” w Krynicy Zdroju z 2011 roku. Wstęp, dyskusja technik wzrostu, budowy struktur w których osadzane są kropki oraz efektów oddziaływania podane są w szerszym zakresie niż w H3. Poza diodą Schottkyego p-i, przebadany jest efekt Starka dla kropek w obszarze i diody n-i-p. Układy z diodą n-i-p są badane dokładniej w pracy H7 *Stark spectroscopy of CdTe and CdMnTe quantum dots embedded in n-i-p diodes*, *Journal of Applied Physics* 115, 2013512 (2014), gdzie podane są również wyniki dla kropek CdMnTe - z poszerzeniem o rząd wielkości szerokości linii fotoluminescencji, w wyniku oddziaływania z momentami magnetycznymi jonów Mn.

Praca H1 *Dynamics of charge leakage from self-assembled CdTe quantum dots* z *Applied Physics Letters* 96, 201905 (2010) pokazuje możliwość optycznego ładowania kropek kwantowych elektronami, przechowywania ładunku na czas rzędu ms, a następnie detekcję ładunku przez konwersję do impulsu świetlnego indukowanego zmianą pola elektrycznego. Kropki umieszczone są w diodzie z kontaktem Schottkyego. Światło laserowe o energii fotonów poniżej przerwy materiału bariery ZnTe tworzy nierezonansowo ekscytony w kropkach, przy czym polaryzacja elektryczna złącza ustawiona jest w taki sposób, iż dziury opuszczają kropkę przechodząc do tylnego kontaktu. Polaryzacja pola elektrycznego utrzymywana jest przez czas rzędu ms, a następnie odwracana, co umożliwia ładowanie kropki dziurami i śledzenie rekombinacji z pozostającym w kropce elektronem. Obserwacja elektroluminescencji pozwala na przeprowadzenie dyskusji stabilności uwięzienia elektronów, a wysokość pików w funkcji odstępu czasowego pozwala na dyskusję mechanizmu ucieczki ładunku z kropek. Znalezione, iż tempo zaniku odbiega od eksponencjalnego. Zaproponowano wyjaśnienie

efektu oddziaływaniem międzykropkowym w naładowanej elektronami warstwie, która uzależnia tempo ucieczki ładunku od liczby elektronów w warstwie.

Praca H4 *Tuning the inter-shell splitting in self-assembled CdTe quantum dots*, K. Kukliński, Ł. Kłopotowski i inni, *Applied Physics Letters* 99, 141906 (2011) bada sygnał fotoluminescencyjny dla silnych nierezonansowych wzbudzeń optycznych. Przy silniejszych wzbudzeniach poza neutralnym ekscytonem i trionami obserwowane są bieksycytony i kompleksy ujemnie naładowane. W silniejszych wzbudzeniach pojawiają się również przejścia o wyższej energii, które autorzy przypisują rekombinacji elektron-dziura ze wzbudzonej powłoki o symetrii orbitalnej p. Przy większej mocy lasera obserwowana jest rekombinacja z kolejnego stanu wzbudzonego. Pomiar sygnału zależnego od czasu dla układów z jednym X, dwoma 2X i jednej linii z pasma p (oznaczana 3X\*) w kropce wskazuje na szybsze tempo rekombinacji 3X\* i monoeksponencjalny zanik tej linii. Zanik sygnału od 2X oraz X jest bardziej złożony. Autorzy wskazują, że powodem tego zachowania jest istnienie kaskady przejść z redukcją liczby nośników między przejściami. Tytułowe strojenie rozszczepienia międzypowłokowego – z jego zwiększeniem z liczbą monowarstw CdTe we wzroście Stranskiego-Krastanowa – zostało stwierdzone przez obserwację widma PL. Efekt ma wynikać ze spadku promienia kropek z ilością tworzącego je tellurku kadmu osadzanego na niedopasowanym sieciowo tellurku cynku, co jest korzystne dla zakumulowanej energii elastycznej.

Rapid H2 *Magnetic polaron formation and exciton spin relaxation in single Cd<sub>1-x</sub>MnxTe quantum dots*, *Rapid Communication, Physical Review B* 83, 081306(R) 2011 bada kropki magnetyczne oraz oddziaływanie spinu ekscytonu ze spinami jonów manganu. Tytułowy polaron magnetyczny – skorelowany układ spinów jonów magnetycznych oraz nośników – badany był w kropkach kwantowych CdMnTe od początku stulecia [Maksimov i inni PRB 62, 7767 (2000)]. Niemniej jednak praca H2 dostarczyła nowych i cennych informacji na temat dynamiki spinu i jonów magnetycznych dzięki obserwacji pojedynczej kropki oraz pomiarom zależnym od czasu. Powstawanie polaronu magnetycznego – zaobserwowano dla koncentracji manganu 3.5% i wyższej. Praca dała rozstrzygający – negatywny – rezultat dla pomysłu sterowania magnetyzacją polaronu przez polaryzację światła tworzącego ekscytony w kropce. Autorzy stwierdzili, że ekscyton szybko gubi zapisaną w spinie informację o polaryzacji tworzącego go fotonu oddziałując z zastaną konfiguracją momentów jonów magnetycznych, która pod nieobecność ekscytonu podlega fluktuacjom termicznym. Oznaką oddziaływania spinu ekscytonu z jonami magnetycznymi o rozkładzie termicznym jest poszerzenie linii widmowych (obserwowane już w pracy Maksimova). Powstawanie polaronu następuje w wolniejszym procesie orientacji momentów magnetycznych jonów manganu - na kierunek spinu ekscytonu. Oznaką tworzenia polaronu jest przesunięcie linii widmowej ekscytonu ku czerwieni stowarzyszone ze zwężeniem linii widmowej. Spin ekscytonu w ten sposób pośredniczy w ferromagnetycznym porządkowaniu jonów manganu, które – pod nieobecność ekscytonu przy koncentracji powyżej 1% wykazują sprzężenie antyferromagnetyczne. Tempo tworzenia polaronu zależy od koncentracji manganu. Jak pokazało zależne od czasu widmo PL, dla koncentracji Mn na poziomie 20% przesunięcie linii widmowej osiąga wartość ustaloną w czasie krótszym niż czas życia ekscytonu.

Ilościowa analiza procesów oddziaływania spinu ekscytonu z momentami magnetycznymi jonów manganu podana jest w pracy H6 *Influence of exciton spin relaxation on the PL spectra of semimagnetic quantum dots*, *Physical Review B* 87, 245316 (2013). H6 wykorzystuje model Heisenberga oddziaływania spinu ekscytonu z jonami Mn (oddziaływanie wymiany s,p-d) oraz zewnętrznym polem magnetycznym. Po zaniedbaniu stanów ciemnych ekscytonu, przyczynku od lekkiej dziury, założeniu stałej wartości funkcji falowych nośników oraz statystycznego rozkładu magnetyzacji jonów manganu, uzyskiwane jest wyrażenie na intensywność rekombinacji w funkcji energii dla różnych polaryzacji. Model zakłada pozarezonansowe i niespolaryzowane źródło światła tworzącego pary elektron-dziura i analizuje stadia relaksacji momentów magnetycznych w układzie. Dla wcześniej rekombinujących par elektron-dziura wimo PL dziedziczy gaussowski rozkład od rozkładu momentów jonów magnetycznych. Szybka relaksacja spinu ekscytonu przez jego oddziaływanie z fluktuacją momentu magnetycznego prowadzi do pojawienia się nierównego, boltzmannowskiego obsadzenia stanów spinowych, które wprowadza asymetrię do widma PL. Asymetria ta znika w czasie po uporządkowaniu jonów magnetycznych z przesunięciem maksimum intensywności ku czerwieni.

Podane w H6 wyniki doświadczenia dla ewolucji czasowej widm PL jakościowo odtwarzają przewidywania modelowe, co do przejściowej asymetrii po relaksacji ekscytonu oraz przesunięcia ku czerwieni po utworzeniu polaronu magnetycznego. Model przewiduje również destabilizację termiczną polaronu magnetycznego. Przeprowadzone zostaje modelowanie widma w funkcji zewnętrznego pola magnetycznego z dopasowaną amplitudą przejścia oraz temperaturą spinową jonów manganu, przy pozostałych parametrach fitowania (liczba jonów w objętości zajętej przez nośniki, ekscytonowa temperatura spinowa) przyjętych jako niezależne od pola magnetycznego. Dopasowanie daje idealną zgodność z doświadczeniem co do położenia i kształtu linii widmowych i pozwala na uzyskanie informacji co do własności układu, które nie są bezpośrednio dostępne w eksperymencie, w tym efektywne pole wymiany, które okazuje się rzędu kilku tesli.

Ostatnie dwie prace H8 i H9 dotyczą sztucznych molekuł. Podwójne kropki kwantowe mają znaczenie dla manipulacji stanami spinowymi uwięzionych nośników. W pracy H8 *Engineering the hole confinement for CdTe-based quantum dot molecules*, *Journal of Applied Physics* 117, 224306 (2015) autorzy pokazali, że kropki CdTe w dwóch warstwach w matrycy ZnTe z prawdopodobieństwem 50% formują sprzężone pionowo pary. Kropki na górnej warstwie – podobnie jak w dla InAs – są znacznie większe, w wyniku redystrybucji naprężeń. Dla uzyskania możliwości sterowania rozkładem ładunku oraz obserwacji sprzężenia tunelowego między kropkami potrzeba aby stany nośników w obydwu kropkach pojawiały się w podobnym zakresie energii. Dla kropek CdTe stwierdzono, że główna część widma PL pary kropek pokrywa się z widmem kropki pojedynczej. Górna kropka, o głębszym potencjale uwięzienia w wyniku zwiększonej koncentracji kadmu wprowadza w tym zakresie energii do widma PL tylko niskoenergetyczny ogon. Aby wysterować polem naprężeń autorzy na substrat ZnTe pod pierwszą warstwę kropek położyli barierę ZnMgTe (zmiejszone niepodasowanie sieciowe na dolnej warstwie). Po warstwie kropek nałożono barierę nominalnie z czystego ZnTe, na której wprowadzono drugą warstwę kropek. Zwiększono w ten sposób naprężenie w górnej warstwie i uzyskano kropki o podobnie położonych poziomach uwięzionych. Zmierzone widma PL w funkcji pola elektrycznego [Rys. 5(a)] wykazały

znany [Phys. Rev. Lett. 94, 057402 (2005); Science 311, 636 (2006); Phys. Rev. B 71, 205316 (2005)] antykrossing stanów ekcytonowych z nośnikami w tej samej lub w różnych kropkach (*direct/indirect exciton*), co dowodzi sukcesu w osiągnięciu sztucznego sprzężenia walencyjnego między kropkami. Interpretacja odpychania linii widmowych przez redystrybucję ładunku między stanami *direct* oraz *indirect* ekscytonu jest wparta przez znane z molekuł InAs/GaAs zachowanie intensywności odpychających się w antykrossingu linii widmowych od pola elektrycznego. Linie widmowe molekuły są większej szerokości niż dla pojedynczych kropek. Autorzy wskazują jako możliwe źródło efektu przesunięcie osi kropek, i związaną z obniżeniem symetrii domieszką stanów ciemnego ekscytonu.

Sukces w produkcji sprzężonych kropek CdTe otwiera drogę do tworzenia magnetycznych sztucznych molekuł. Pierwszy krok w tym kierunku wykonano pracy H9 *Optical signatures of spin-dependent coupling in semimagnetic quantum dot molecules Physical Review B* 92, 075303 (2015). Dolna warstwa kropek tworzona jest z CdTe, górna z CdMnTe. Dla dużej szerokości warstwy *spacera* między kropkami [8nm] zależność linii PL od pola magnetycznego pozwala wyseparować linie kropki niemagnetycznej: wąskie, prawie niezależne od pola magnetycznego linie oraz linie kropki magnetycznej: szerokie, przesuwane ku czerwieni przez pole magnetyczne. Przy mniejszej szerokości *spacera*, separacja linii na magnetyczne i niemagnetyczne nie jest możliwa, co albo świadczy o powstawaniu orbitali rozciągniętych, zajmujących obydwie kropki albo dyfuzję Mn z górnej do dolnej warstwy. Z analizy efektywnych czynników zeemanowskich autorzy stwierdzają, że za nachylenie linii odpowiada rozciągnięty orbital dziurowy, a za cechy oddziaływania między liniami widmowymi – międzykropkowe tunelowanie elektronu, silnie zależne od spinu.

Opis osiągnięcia w autoreferacie jest przemyślany, dobrze zorganizowany i starannie zredagowany. Wstęp w części 4.1 zawiera perspektywę historyczną badań nanostruktur począwszy od lat 70 XX wieku, wyjaśnia znaczenie prowadzonych prac, istniejące i możliwe zastosowania. Część 4.2 dotyczy kropek kwantowych, ze szczególnym uwzględnieniem kropek wiążących zarówno elektrony i dziury, które są przedmiotem badań osiągnięcia. Autor omawia klasyfikację kompleksów ekcytonowych, możliwość kontroli stanów ładunkowych układu oraz sprzężenie z jonami magnetycznymi. Autor opisuje formowanie polaronu magnetycznego i jego konsekwencje spektralne. Na stronie 7 wkradł się błąd w wyrażeniu na potencjał oscylatora harmonicznego, który dla utrzymania odstępów energetycznych między poziomami co  $\hbar\omega$  powinien zostać podzielony przez 2. Autor podaje, że w przybliżeniu silnego uwięzienia możliwe jest wyrażenie przesunięć linii w widmie fotoluminescencji kompleksów ekcytonowych względem ekscytonu przez całki oddziaływania z podaniem jako źródła pracy G. Bester et al. Phys. Rev. B 68(7), 073309 (2003). Recenzent korzysta z okazji aby wskazać, że fakt ten wskazał wcześniej: J. Phys.: Cond. Matter 12, 2453 (2000) oraz Phys. Rev. B 66, 165331 (2002), wraz ze związkiem przesunięć z różnym stopniem lokalizacji elektronów i dziur, w tym możliwym zarówno przesunięciem ku fioletowi jak i ku czerwieni linii X+ względem X zależnie od rozmiarów kropki.

W dalszej części autoreferatu habilitant streszcza wyniki z publikacji, ukazując ich znaczenie dla tematyki.

W polskim autoreferacie na dole strony 19 w kontekście powstawania polaronu magnetycznego pojawia się zdanie, „W trzecim stadium, jony Mn 2+ oddziałują z

zewnętrznym polem  $B = B_0 + B_{ex}$  co prowadzi do pojawienia się niezerowego namagnesowania.,, (koniec cytatu) Źródłem tworzenia polaronu jest efektywne pole magnetyczne wymiany z ekscytonem (B), a namagnesowanie następuje w odpowiedzi na całkowite pole magnetyczne dane przez sumę pola zewnętrznego i pola wymiany. Odpowiednie sformułowanie w autoreferacie angielskim podane jest jednak precyzyjnie (drugi akapit stronu 18).

Cykl prac stanowiący prezentuje spójne, rozpisane na wiele lat przedsięwzięcie, od początku motywowane możliwością utworzenia półmagnetycznych kropek II-VI dla optycznej kontroli i odczytu stanu spinowego ekscytonu. Cel badań został osiągnięty, a jego realizacja dostarczyła wiedzy na temat skutecznych procedur przygotowania próbek, technik pomiarowych oraz zrozumienia widm PL, sprzężenia ekscytonów z jonami magnetycznymi, powstawania ekscytonowego polaronu magnetycznego oraz zależnego od spinu sprzężenia tunelowego nośników w półmagnetycznych sztucznych molekułach.

Prace z cyklu zostały zauważone przez środowisko naukowe. Wg Web of Science, z wyłączeniem cytowań z prac habilitanta, artykuł H1 został zacytowany 3 razy, H2 - 19 razy, H3 - 2 cytowań, H4 - 4, H6-5 cytowań. Liczba cytowań nie jest wielka, zapewne ze względu na fakt iż wyniki dla efektu Starka w kropkach InAs, sztucznych molekuł InAs/GaAs, ekscytonów w kropkach CdMnTe, pojawiły się wiele lat temu, dyscyplina jest dojrzała i nie przyciąga już tak wielkiego zainteresowania jak kilka lat temu.

Jak wynika z oświadczeń, kandydat był osobą planującą badania oraz próbki, współprowadzącą pomiary, uczestniczącą w przygotowaniu modeli teoretycznych i piszącą publikacje. Od strony modelowania, wzrostu, pomiarów autor uzyskał wsparcie wielu wybitnych badaczy (dr hab. Łukasz Cywiński IF PAN, dr Krzysztof Fronc IF PAN, prof. Andrzej Golnik UW, dr Mateusz Goryca UW, dr Tomasz Kazimierzczuk UW, prof. Piotr Kossacki UW, prof. Olivier Krebs CNRS, prof. Grzegorz Karczewski IF PAN, prof. Maurice Skolnick, prof. Aleksander Tartakowski Sheffield, prof. Valia Voliotis Univ. P. et M. Curie, dr Piotr Wojnar IF PAN, prof. Tomasz Wojtowicz IF PAN). Bez wątplenia jednak wkład habilitanta w prace cyklu był wiodący. Mojej opinii nie zmienia brak deklaracji udziału procentowego wymaganego od habilitanta w Rozporządzeniu MNiSW w sprawie kryteriów oceny osiągnięć osoby ubiegającej się o nadanie stopnia doktora habilitowanego z dnia 1 września 2011.

Spójnie z oświadczeniami Kandydat jest pierwszym autorem ośmiu prac z cyklu. W pracy, której nie jest pierwszym autorem habilitant pełni rolę autora korespondującego. Habilitant kierował grantem własnym MNiSW oraz grantem OPUS NCN o tematyce ściśle związanej z prezentowanym osiągnięciem. Wyniki tych grantów wchodziły w skład osiągnięcia.

Zauważyć należy, że osiągnięcie habilitacyjne jest wynikiem rozwoju naukowego kandydata. Jego praca magisterska (1997) wykonana na Wydziale Fizyki Uniwersytetu Warszawskiego pod opieką prof. Andrzeja Twardowskiego dotyczyła rozszczepienia ekscytonowego w CdMnTe i jego modyfikacji pod wpływem potencjału lokalnego. Kandydat przygotował pod opieką prof. Michała Nawrockiego rozprawę doktorską pt *Magneto-optical Study of Exciton Tunneling in Asymmetric Double Quantum Well Structures* i obronił ją z wyróżnieniem również na Uniwersytecie Warszawskim w 2003 roku.

W związku z Art. 16.1 Ustawy o stopniach etc. należy stwierdzić, że Habilitant „posiada osiągnięcie naukowe stanowiące znaczny wkład autora w rozwój” fizyki nanostruktur półprzewodnikowych”.

Poza tematyką rozprawy autor uczestniczył z powodzeniem w badaniach nad polarytonami ekscytonowymi, nad właściwościami nanostruktur z tlenku cynku, ekscytonami w dwuwymiarowych dichalkogenkach metali przejściowych oraz czarnym fosforem. Na wyróżnienie zasługuje artykuł w prestiżowym czasopiśmie Nano Letters, M. Szymura i inni 15, 1972 (2015), *Spin-Splitting Anisotropy in Single Diluted Magnetic Nanowire Heterostructures*, w której badano kropki naturalne z CdMnTe w strukturach rdzeń-otoczka z ZnTe/ZnMgTe. W pracy znaleziono silną anizotropię czynnika Zeemana zależnie od orientacji zewnętrznego pola magnetycznego, które tłumaczono efektami mieszania pasm walencyjnych. Według autoreferatu Habilitant uczestniczył w pomiarach oraz zaproponował model opisu anizotropii. Aktywność naukowa kandydata jest adekwatna do wymagań stawianych przez Ustawę.

### **Udział w projektach badawczych i współpraca naukowa**

W związku z podanymi w Rozporządzeniu MNiSW z dnia 1 września 2011 kryteriami należy zauważyć bardzo aktywny udział kandydata w konferencjach międzynarodowych [Art. 5.2] – 27 referatów na konferencjach, w tym 6 zaproszonych. Ponadto habilitant pracował w Komitecie programowym szkoły - konferencji „Jaszowiec”.

Dr Łukasz Kłopotowski odbył staż podoktorski (2003-2004) na Universidad Autonoma de Madrid, u prof. Luisa Vini. Kandydat w roku 2003 uzyskał stypendium START Fundacji na rzecz Nauki Polskiej. Od 2004 roku habilitant pracował jako najpierw adiunkt, a od 2014 jako asystent w Środowiskowym Laboratorium Fizyki i Wzrostu Kryształów Instytutu Fizyki Polskiej Akademii Nauk. Kandydat kierował pięcioma projektami naukowymi i pracował w pięciu innych (KBN, FP6, NCN). Spełnione są więc kryteria udziału w projektach badawczych [Art.5.1], oraz kierowania projektami badawczymi z udziałem partnerów krajowych i międzynarodowych [Art.5.5].

Poza stażem podoktorskim Habilitant odbył wiele staży niesprecyzowanej w autoreferacie długości minn. w Univ. Montpellier, Ecole Polytechnique Lausanne, Laboratoire de Photonique et Nanostructures CNRS, Lab. National de Champs Magnetique Intenses Toulouse, i na Univ. Sheffield. Kandydat współpracował lub współpracuje poza IF PAN minn. z grupą prof. M.Nawrockiego i P.Kossackiego na UW, M. Skolnicka i A. Tartakowskiego z Sheffield, prof. Krebssem z CNRS. Spełnione są więc kryteria Art. 4.6-8 Rozporządzenia.

### **Autorstwo prac i monografii.**

Habilitant jest współautorem 65 artykułów (11 w Physical Review B, 4 w Applied Physics Letters, 2 Nanotechnology, 1 w Nano Letters), w tym 55 po doktoracie, z indeksem cytowań Hirscha 12, ponad 360 cytowaniami po wyłączeniu autocytowań. Dorobek naukowy kandydata mierzony autorstwem artykułów w czasopiśmie z bazy JCR [Art. 3.2. Rozporządzenia] oraz wskaźniki bibliograficzne [Art. 4.3-5 Rozporządzenia] są odpowiednie dla pomyślnego zakończenia postępowania habilitacyjnego. Ponadto, [Art. 4.1 Rozporządzenia] Kandydat jest współautorem rozdziału *Molecular beam epitaxy of semi-magnetic quantum dots* w książce *MBE: From Research to Mass Production* wydanej w roku 2012 przez Elseviera.

## Osiągnięcia dydaktyczne

Kandydat współprowadził w latach 2012-2016 laboratorium *Technologie i projektowanie nowych materiałów* dla makrokierunku inżynieria nanostruktur Wydziałów Chemii i Fizyki UW. W latach 1997-2002 Kandydat, jeszcze jako doktorant, prowadził ćwiczenia rachunkowe z fizyki. Habilitant sprawował opiekę naukową nad studentami UW (2 praktykantami), prowadził 2 prace magisterskie na Uniwersytecie Kardynała Stefana Wyszyńskiego. Ponadto Wnioskodawca wygłosił szereg wykładów popularyzatorskich dla studentów Politechniki Warszawskiej, oraz dla stypendystów Krajowego Funduszu na rzecz Dzieci. Kandydat był przewodniczącym sesji szkoleniowej stanowiącej część International School and Conference on the Physics of Semiconductors Jaszowiec. Do osiągnięć dydaktycznych można zaliczyć opiekę naukową nad doktorantami, w tym promotorstwo pomocnicze doktoratu M. Szymury [Art.5.10].

## Podsumowanie

Moim zdaniem wniosek spełnia kryteria określone w Ustawie o Stopniach i Tytule Naukowym i w Rozporządzeniu Ministra Nauki i Szkolnictwa Wyższego z dnia 1.09.2011. Rekomenduję więc komisji habilitacyjnej wydanie pozytywnej opinii w sprawie nadania dr Łukaszowi Kłopotowskiemu stopnia doktora habilitowanego.

Bartłomiej Stefan