

Prof. dr. hab. Tadeusz Suski
Instytut Wysokich Ciśnień PAN
Sokołowska 29/37
01-142 Warszawa,

19 maja 2017

Recenzja rozprawy habilitacyjnej doktora Łukasza Kłopotowskiego.

" Sterowanie stanem ekscytonowym w pojedynczej kropce kwantowej z tellurku kadmu"

Uwagi ogólne

Rozprawa habilitacyjna doktora Łukasza Kłopotowskiego zatytułowana " Sterowanie stanem ekscytonowym w pojedynczej kropce kwantowej z tellurku kadmu" wykonana została w Instytucie Fizyki Polskiej Akademii Nauk. Rozprawa oparta jest na 9 artykułach opublikowanych w międzynarodowych czasopismach naukowych w okresie 2010-2015. Warto wspomnieć, że dr Łukasz Kłopotowski ukończył studia na Wydziale Fizyki Uniwersytetu Warszawskiego w 1997 roku a stopień doktora nauk fizycznych uzyskał na tym samym Wydziale w 2003 roku.

Ocena osiągnięcia naukowego

Przedstawiony przez dr Ł. Kłopotowskiego zestaw prac składa się z dziewięciu pozycji, w tym:

- Praca H1. Applied Physics Letters (2010), (IF=3.142), cytowania 4; wkład Ł.K.- 49%
- Praca H2. Physical Review B (2011) (IF=3.718), cytowania 26; wkład Ł.K.- 49%
- Praca H3. Physical Review B (2011) (IF=3.718), cytowania 12; wkład Ł.K.- 49%
- Praca H4. Applied Physics Letters (2011), (IF=3.142), cytowania 7; wkład Ł.K.- 40%
- Praca H5. Acta Physica Polonica (2011), (IF= 0.525), cytowania 1; wkład Ł.K.- 100%
- Praca H6. Physical Review B (2013) (IF=3.718), cytowania 8; wkład Ł.K.- 56%
- Praca H7. Journal of Applied Physics (2014), (IF=2.04), cytowania 2; wkład Ł.K.- 40%
- Praca H8. Journal of Applied Physics (2015), (IF=2.04), cytowania 1; wkład Ł.K.- 80%
- Praca H9. Physical Review B (2015) (IF=3.718), cytowania 0; wkład Ł.K.- 80%

Ostatnia informacja dla każdej z prac dotyczy zadeklarowanego przez dr Ł. Kłopotowskiego wkładu w ich realizację.

Dr Ł. Kłopotowski jest pierwszym autorem ośmiu z dziewięciu prac. Osiem prac jest wieloautorskich. Sześć prac opublikowano w czasopismach o Impact Factor'ze powyżej 3 (Phys. Rev. B i Appl. Phys. Lett.). W najlepiej cytowanej pracy w Physical Review B (H2) (26 cytowań), dr Ł. Kłopotowski jest pierwszym autorem. Publikacje stanowiące rozprawę H1-H9 stanowią listę chronologiczną. Zasadniczym tematem wiążącym te prace są ekscytonowe własności pojedynczych i sprzężonych kropek kwantowych CdTe i CdMnTe.

Według oświadczeń habilitanta, wspartych oświadczeniami znacznej części współautorów prac wchodzących w skład rozprawy, wkład dr Ł. Kłopotowskiego w ich realizację był zasadniczy.

Część eksperymentalna przeprowadzonych pomiarów dotyczy badań fotoluminescencji, przy pobudzeniach „continuous wave” lub impulsowych. Stosował pole elektryczne i magnetyczne do kontrolowanej zmiany własności struktur epitaksjalnych z kropkami kwantowymi CdTe i/lub CdMnTe. Pomiary prowadzone były w niskich temperaturach.

Poniżej omawiam przedstawione w rozprawie habilitacyjnej prace:

Praca **H1** dotyczy koncepcji obróbki informacji kwantowej poprzez kontrolowane wykorzystanie ładunku magazynowanego w samoorganizujących się kropkach kwantowych CdTe. Podjęto badania dynamiki ucieczki elektronów i zidentyfikowano mechanizm tej ucieczki jako tunelowanie przez barierę ZnTe. W szczególności rozważano rolę pola elektrycznego indukowanego w kropce CdTe przez zmagazynowane tam ładunki i wpływ przykładanego zewnętrznego pola elektrycznego na tę ucieczkę nośników. Pokazano, że odpowiednia kombinacja impulsów elektrycznych i światła laserowego umożliwia przeprowadzenie cyklu: zapisanie informacji-jej przechowanie-odczyt.

Praca **H2** to najczęściej cytowana publikacja Ł. Kłopotowskiego (26 razy, 19 razy bez samocytowań) spośród zawartych w rozprawie. Stanowi to dobrą rekomendację tej pracy. Omówiono w niej tworzenie polaronu magnetycznego w pojedynczej kropce kwantowej Cd_{1-x}Mn_xTe. Tworzy go ekscyton wygenerowany przez promieniowanie laserowe, oddziałujący z jonami magnetycznymi Mn²⁺. W wyniku tego procesu dochodzi do spontanicznego, lokalnego uporządkowania magnetycznego. Zostały określone czasy tworzenia polaronów. Stwierdzono, że tworzenie polaronów ulega przyspieszeniu wraz ze wzrostem koncentracji Mn. Zgodnie ze wzrostem oddziaływań spin-spin. Autorzy pracy wykazali, że polaron tworzy się po relaksacji spinu ekscytonu a orientacja polaronu jest określona głównie przez przypadkowe fluktuacje magnetyzacji odpowiadające objętości ekscytonu w czasie jego formowania.

W pracy **H3** autorzy koncentrują się na badaniu wpływu zewnętrznego pola elektrycznego na stan ładunkowy kropki kwantowej CdTe. W celu pełnego wykorzystania kropek kwantowych w zastosowaniach optoelektronicznych i w obliczeniach kwantowych potrzebna jest informacja na temat oddziaływania kulombowskiego pomiędzy nośnikami na odpowiednich stanach kropki kwantowej. Wykorzystuje się tutaj przybliżenie Hartree-Fock'a. Umieszczenie takiej próbki w strukturze diodowej stworzyło możliwości kontrolowania stanu ładunkowego kropek CdTe i określenie jego wpływu na funkcje falowe nośników. Stwierdzono większy wpływ kwantowego efektu Starka na funkcję falową dziury w porównaniu z funkcją elektronu. Wynika to ze znacznie płytszego potencjału wiążącego dziury w pasmie walencyjnym. Korelacje kulombowskie mają tu dominujące znaczenie w stosunku do „uwięzienia” nośników w obszarze kropki kwantowej. W rezultacie widmo emisji pojedynczych kropek kwantowych CdTe wykazuje tę samą sekwencję przejść radiacyjnych należących do różnych stanów neutralnego ekscytonu jak w systemach dwuwymiarowych.

W pracy **H4** prowadzone były badania fotoluminescencji w silnie wzbudzonych, pojedynczych, samoorganizujących się kropkach kwantowych CdTe. Obserwowano widma emisyjne pochodzące od sekwencyjnie wypełnianych powłok s-, p- i d-. Przeprowadzono analizę rozszczepienia między-powłokowego w próbkach o różnej szerokości warstw CdTe.

Wraz ze wzrostem tej szerokości zwiększa się wielkość tego rozszczepienia. Pokazuje to nową możliwość kontrolowanej zmiany rozszczepienia między-powłokowego w kropkach CdTe, wielkości ważnej zarówno z punktu widzenia budowania opisu mechanizmów decydujących o własnościach takich kropek jak i możliwych ich zastosowań.

Praca **H5** jest przeglądowym podsumowaniem dotychczasowych osiągnięć dr Ł. Kłopotowskiego (po uzyskaniu stopnia doktora) w dziedzinie badań kropek kwantowych CdTe i CdMnTe. Praca ta odpowiada wykładowi zaproszonemu habilitanta na 40. Międzynarodowej Szkole i Konferencji Fizyki Półprzewodników „Jaszowiec”-2011. Jego tytuł „Charging Effects in Self-Assembled CdTe Quantum Dots” bardzo dobrze oddaje zawartość omawianej pracy i jej ścisłe relacje z pracami H1-H4. Należy tutaj wspomnieć o zamieszczeniu w publikacji ciekawej dyskusji dotyczącej porównania sekwencji linii emisyjnych kropek kwantowych CdTe i InGaAs i skomentowania różnic pomiędzy systemami kropek kwantowych rodzin półprzewodników II-VI i III-V.

W pracy **H6** przedstawiono kompleksowe badania fotoluminescencji w pojedynczych kropkach kwantowych $Cd_{1-x}Mn_xTe$ z różną zawartością Mn. Interesujące pytanie dotyczy tutaj określenia wpływu relaksacji spinowej ekscytonu na widma fotoluminescencji. Większość rozważań teoretycznych dotyczących powyższego zagadnienia zakłada stan równowagi termodynamicznej pomiędzy systemem spinów Mn i ekscytonem. W takiej sytuacji energia wymiany jest minimalizowana poprzez spontaniczne budowanie uporządkowania ferromagnetycznego w systemie paramagnetycznych spinów Mn. Tworzy się ekscytonowy polaron magnetyczny (EMP). Odpowiada to osiągnięciu stanu równowagi w kompleksie ekscyton- system spinów Mn. Przeprowadzona analiza przesunięć Zeemana linii ekscytonowych i szerokości linii fotoluminescencyjnych w funkcji zewnętrznego pola magnetycznego, pozwoliła wykorzystać zastosowany model do wyznaczenia efektywnej objętości kropek (obszar lokalizacji ekscytonu), linii fotoluminescencyjnych w funkcji zewnętrznego pola magnetycznego oraz pozwoliła uzyskać informacje na temat ilości paramagnetycznych jonów Mn^{2+} , ich temperatury i ilości w każdej z kropek.

Praca **H7** mieści się w wątku badań stanu ładunkowego kompleksów ekscytonowych związanych z kropkami kwantowymi CdTe oraz $Cd_{1-x}Mn_xTe$ umieszczonymi w obszarze zubożonym diody *n-i-p*. Zastosowana metoda przeprowadzonego eksperymentu to „spektroskopia Starkowska” i fotoluminescencja. Pokazano, że po pierwsze: przy dużych napięciach polaryzacyjnych zastosowanych do grupy kropek kwantowych sygnał fotoluminescencji ulega silnemu osłabieniu w wyniku tunelowania nośników poza obszar kropek. W przypadku dziur odbywa się to przy znacznie niższych napięciach polaryzacji. Jest to wynik znacznie płytszego „uwięzienia” dziur. Po drugie, pokazano, że ucieczka dziur pod wpływem ujemnej polaryzacji i ich wstrzykiwanie przy dodatniej polaryzacji umożliwia zmianę stanu ładunkowego z ujemnego na dodatni pojedynczych kropek kwantowych CdTe i $Cd_{1-x}Mn_xTe$.

Prace **H8 i H9** zawierają moim zdaniem, najciekawsze wyniki w całym zbiorze badań przedstawionych w rozprawie habilitacyjnej i oceniam je najwyżej. Prace te reprezentują z jednej strony rodzaj podsumowania badań opisanych w pracach H1-H7, dotyczących sterowania stanem nośników w pojedynczej kropce kwantowej CdTe lub $Cd_{1-x}Mn_xTe$. Z drugiej strony, wprowadzają pozostający w głównej tematyce rozprawy habilitacyjnej bardzo interesujący wątek sprzężenia tunelowego pomiędzy dwoma warstwami kropek kwantowych. W przypadku pracy H8 są to kropki CdTe w obu warstwach. W pracy H9 omówione zostały oddziaływania kropek CdTe z CdMnTe. Wytworzenia takich struktur stanowiło olbrzymie osiągnięcie. Wykazało pełne opanowanie metody inżynierii naprężeń w

celu uzyskania kropek w modzie Stransky'ego- Krastanova. Należy podkreślić, że dostrojenie stanów nośników w sąsiadujących warstwach do rezonansu, realizowane było poprzez przyłożenie pola elektrycznego (H8) lub magnetycznego o zmiennej amplitudzie (H9). Strojenie energii stanów ekscytonowych w okolicach rezonansu odpowiada hybrydyzacji stanów elektronowych i tworzeniu się stanu molekularnego w parach kropek.

W pracy **H9** przeanalizowano zależność „międzykropkowego” sprzężenia tunelowego dla kropek oddzielonych barierami o różnej grubości. Stwierdzono, że dla bariery 8 nm takie sprzężenie nie występuje. Dla bariery o grubości 4 nm pojawiają się dwa rodzaje sprzężenia. Jedno, słabsze nie prowadzi do rezonansu i wynika z faktu wnikania do kropki magnetycznej części funkcji falowej nośnika zlokalizowanego w kropce niemagnetycznej. Sprzężenie rezonansowe realizuje się przy zewnętrznym polu magnetycznym 3T, następuje hybrydyzacja funkcji falowej elektronu i „uwspólnienie” jej na obie kropki. Następuje to jednak tylko dla jednej polaryzacji spinowej.

Podsumowując: dr Ł. Kłopotowski stosował w prowadzonych badaniach głównie metodę pomiarów fotoluminescencji w modzie pobudzenia stałego oraz impulsowego. To ostatnie pozwoliło określić czasy życia/zaniku różnych wzbudzeń optycznych w samoorganizujących się kropkach kwantowych niemagnetycznych CdTe i magnetycznych $Cd_{1-x}Mn_xTe$. Pomiar prowadzone były w niskich temperaturach w funkcji przykładanego pola elektrycznego lub magnetycznego. Ważne i ciekawe wyniki zostały uzyskane po przeprowadzonej nanostrukturyzacji przygotowanych próbek, co pozwoliło kontrolować ilość kropek kwantowych. Dodatkowo pragnę podkreślić fakt biegłego posługiwania się istniejącymi modelami w celu interpretacji przeprowadzonych (w istotnej części przez niego) pomiarów.

W mojej opinii do najważniejszych osiągnięć dr Ł. Kłopotowskiego należą:

1. Określenie mechanizmów fizycznych odpowiedzialnych za tworzenie molekularnego stanu oddziałujących kropek kwantowych CdTe i CdMnTe umieszczonych w podwójnych warstwach CdTe-CdTe lub CdTe-CdMnTe. Wykazanie efektu „anticrossingu” takich stanów. W pełni podzielam opinię habilitanta wyrażoną w jednej z publikacji zaliczonych do rozprawy, że przeprowadzone badania „dowodzą wytworzenia nanostruktury nowego rodzaju, która otwiera możliwości sterowania właściwościami spinowymi poprzez sterowanie przekryciem funkcji falowej pomiędzy kropkami”.
2. Przyjęty w rozprawie dobór zagadnień. Każda kolejna praca, wykorzystuje wyniki uzyskane w poprzednich i wprowadza nowe elementy wykazujące rosnącą z czasem wiedzę ekspercką habilitanta oraz stopień zrozumienia fizyki kropek kwantowych CdTe i CdMnTe.
3. Włączenie do dyskusji wyników porównania z innymi systemami kropek kwantowych (w tym magnetycznych) tworzonych przez półprzewodniki III-V, np. InAs z pojedynczym jonem Mn^{2+} . Przeprowadzone porównania pozwalają umieścić uzyskane wyniki w szerszym kontekście własności rozrzedzonych półprzewodników magnetycznych oraz fizyki kropek kwantowych. Ze szczególnym uwzględnieniem ich potencjalnych zastosowań.
4. Umiejętność wykorzystania najwyższej jakości struktur epitaksjalnych, tworzonych głównie przez G. Karczewskiego i T. Wojtowicza, oraz przez P. Wojnara, do „atakowania” kolejnych zagadnień z fizyki kropek kwantowych i ich magnetyzmu. Jestem przekonany, że dr Ł. Kłopotowski uczestniczył również w projektowaniu tych

struktur. Ten fakt jak i inne świadczą o umiejętności aranżowania i prowadzenia bardzo efektywnej współpracy zarówno krajowej jak i wewnątrz-europejskiej.

W recenzowanej Rozprawie brakowało mi pewnego obszaru zagadnień, moim zdaniem ważnego. Ten niedosyt wynika z braku informacji dotyczących temperaturowych zależności omawianych zjawisk. Włączenie tego obszaru do dyskusji pozwoliłoby określić bariery energetyczne odpowiedzialne za wiele badanych w habilitacji zjawisk/efektów, obszary stabilności oraz dysocjacji ekscytonów (przejście Mott'a), obszary w pobliżu przemiany fazowej ferromagnetyk-paramagnetyk (fluktuacje, wykładniki krytyczne) itp.

Omówienie pozostałych osiągnięć naukowo-badawczych

Badania prowadzone przed uzyskaniem tytułu doktora. Praca magisterska

Pracę magisterską Ł. Kłopotowski wykonał w Zakładzie Fizyki Ciała Stałego na Wydziale Fizyki UW pod kierunkiem prof. Andrzeja Twardowskiego. Celem przeprowadzonych badań było zrozumienie anomalnych wartości rozszczepień Zeemana przejść ekscytonowych obserwowanych w silnie rozcieńczonych półprzewodnikach półmagnetycznych.

Pracę doktorską habilitant wykonywał w tym samym Zakładzie. Promotorem tej pracy był prof. dr hab. Michał Nawrocki. Jej celem było wyznaczenie czasów tunelowania ekscytonów między studniami kwantowymi z tellurku kadmu. Realizacja pracy doktorskiej zaowocowała publikacją 5 prac.

Badania prowadzone po uzyskaniu tytułu doktora niezwiązane z tematyką rozprawy

Uważam, że również w tym obszarze działalności dr Ł. Kłopotowski działał w aktualnej i bardzo atrakcyjnej tematyce. W trakcie stażu podoktorskiego odbytego w Laboratorium prof. L. Viña w Madrycie, habilitant zajmował się z sukcesem badaniami polarytonów ekscytonowych, kwazicząstek powstających na skutek silnego oddziaływania ekscytonu wytworzonego w studni kwantowej z fotonem - modem pola elektromagnetycznego mikrowęzki planarnej. Uważa się, że polarytony mają szansę na odegranie istotnej roli w budowie źródeł światła nowej generacji (polarytonowe lasery półprzewodnikowe) czy własności fundamentalne (kondensacja Bosego-Einsteina, nadciekłość).

Po powrocie do Warszawy jednym z głównych zainteresowań habilitanta były właściwości optyczne warstw i nanostruktur z tlenku cynku oraz nanodrut z tellurku cynku. Działania te doprowadziły do opublikowania szeregu prac obejmujących oba zagadnienia.

Po zakończeniu badań kropek kwantowych (koło 2015 r.) Dr Ł. Kłopotowski badał półprzewodniki dwuwymiarowe z rodziny dwuchalkogenków metali przejściowych. Ekscytony w tych półprzewodnikach dwuwymiarowych stanowiły łącznik z poprzednim obszarem zainteresowań habilitanta. Ten ostatni okres podsumowuje między innymi ciekawa praca

Ł. Kłopotowski et al., "Revealing the nature of excitons in liquid exfoliated monolayer tungsten disulphide, Nanotechnology 27, 425701 (2016). Swoją udział w przeprowadzeniu badań i przygotowaniu publikacji jej pierwszy autor ocenia na ponad 50%.

Ocena aktywności naukowej

Dorobek naukowy dr Łukasza Kłopotowskiego

Bardzo dobre osiągnięcia dr Łukasza Kłopotowskiego w ramach jego działalności naukowej charakteryzuje indeks Hirscha 12, ilość wszystkich prac opublikowanych to 65, w tym po uzyskaniu stopnia doktora nauk fizycznych 55. O wysokim poziomie jego publikacji świadczy lista czasopism, w których się ukazały: Physical Review B 11 prac;

Nanotechnology 2 prace; Applied Physics Letters 4 prace; Journal of Applied Physics 2 prace; RSC Advances 2 prace; Nano Letters 1 praca.

Ilość cytowań wszystkich prac 342 (bez autocytowań). Ważną pozycję na liście osiągnięć stanowi rozdział zatytułowany „Molecular Beam Epitaxy of Semimagnetic Quantum Dots” w monografii „Molecular Beam Epitaxy: From Research to Mass Production (Elsevier, 2012). Habilitant jest współautorem tego rozdziału.

Należy również podkreślić jego bardzo aktywny udział w życiu naukowym środowiska międzynarodowego, gdzie jego dorobek został doceniony poprzez powierzenie mu wygłoszenia 6 wykładów zaproszonych na ważnych konferencjach międzynarodowych. Oprócz tego prezentował osobiście 27 referatów (z ogólnej sumy 40) i był autorem lub współautorem 60 plakatów konferencyjnych. Wygłosił 12 seminariów na różnych polskich uczelniach.

Dr Ł. Kłopotowski realizował 10 projektów KBN, Ministerstwa Nauki i Szkolnictwa Wyższego oraz Narodowego Centrum Nauki. W pięciu był kierownikiem grantów, pozostałych pięciu ich wykonawcą.

Zwraca uwagę znaczna ilość staży krótkoterminowych w różnych ośrodkach europejskich i długi pobyt po-doktorski w Madrycie. Świadczy to o dużej łatwości nawiązywania współpracy. Pomocna w tym była atrakcyjna tematyka uprawiana przez habilitanta oraz posiadanie zestawów najwyższej jakości struktur wytwarzanych w IF PAN.

Dorobek dydaktyczny, organizacyjny i popularyzatorski

Wiele działań habilitanta mieści się w wątku działalności dydaktycznej. Należy do nich między innymi: sprawowanie funkcji promotora pomocniczego w pracy doktorskiej Małgorzaty Szymury, współprowadzenie Laboratorium dla II/III roku mikrokierunku Inżynieria Nanostruktur UW, trzykrotne prowadzenie wykładów dla studentów Wydziału Mechatroniki Politechniki Warszawskiej, promotorstwo dwóch prac magisterskich na Uniwersytecie Kardynała Stefana Wyszyńskiego, prowadzenie indywidualnej pracowni magisterskiej na Universidad Autónoma de Madrid, prowadzenie ćwiczeń rachunkowych na Wydziale Fizyki UW (5 semestrów) i kilka innych działań.

W ramach działalności organizacyjnej stworzył w IF PAN Laboratorium Mikrospektroskopii Nanostruktur i układ do pomiarów korelacji fotonowych i dynamiki fotoluminescencji.

Ważnym elementem działalności popularyzatorskiej Ł. Kłopotowskiego było jego zaangażowanie w pracę z młodzieżą. 9-cio krotnie, w latach 1996-2016 brał udział jako wykładowca w Warsztatach dla stypendystów Krajowego Funduszu na rzecz Dzieci.

Podsumowanie

Reasumując stwierdzam, że zawartość merytoryczna pracy habilitacyjnej Ł. Kłopotowskiego i jego całkowity dorobek naukowy oraz osiągnięcia dydaktyczne i organizacyjne, są podstawą do uznania, że dr Ł. Kłopotowski ma bez wątplenia kwalifikacje do samodzielnej pracy naukowej. Świadczy o tym jego szeroka wiedza i dotychczasowe doświadczenie badawcze oraz umiejętność stawiania problemów naukowych i ich rozwiązywania. Powyższy wniosek formułuję podkreślając bardzo dobre wyniki bibliometryczne.

Stwierdzam więc, że przedstawiona mi do recenzji rozprawa habilitacyjna wnosi istotny wkład do fizyki ciała stałego. Uznaję, że spełnione zostały wymagania określone w Ustawie z dnia 14 marca 2003 r. o stopniach naukowych i tytule naukowym oraz o stopniach i tytule w zakresie sztuki.

Wnioskuje o nadanie dr Łukaszowi Kłopotowskiemu stopnia naukowego doktora habilitowanego w dziedzinie nauk fizycznych, w dyscyplinie fizyka.

Tadeusz Sułki