

2017 -06- 09 *MB. wtk.*

Prof. dr hab. Perła Kacman
Instytut Fizyki PAN,
Warszawa

Warszawa, 8.06.2017 r.

Recenzja rozprawy habilitacyjnej dra Wojciecha Pacuskiego Ocena dorobku naukowego, organizacyjnego i dydaktycznego

Sylwetka Habilitanta

Dr Wojciech Pacuski tytuł magistra uzyskał w 2003 roku na Wydziale Fizyki Uniwersytetu Warszawskiego, obroniwszy wykonaną pod kierunkiem prof. Piotra Kossackiego pracę „Magnetospektroskopia domieszkowanych studni kwantowych”. Z Zakładem Fizyki Ciała Stałego UW, w szczególności z grupą prof. Kossackiego, dr Pacuski jest nieprzerwanie związany do dziś. Pracę doktorską nt. „Spektroskopia optyczna szerokoprzerwowych półprzewodników półmagnetycznych na bazie ZnO i GaN” wykonał także pod kierunkiem profesora Kossackiego na Uniwersytecie Warszawskim – był to jednak doktorat podwójny, częściowo wykonany pod kierunkiem prof. Joela Ciberta podczas 15-tomiesięcznego pobytu w Grenoble. Po uzyskaniu stopnia doktora w 2007 roku nadal współpracował z kolegami z Uniwersytetu Warszawskiego, także w czasie 20-miesięcznego stażu odbytego w grupie prof. Detlefa Hommela w Bremie. Po powrocie z Niemiec w 2009 r. został zatrudniony na Wydziale Fizyki UW, gdzie pracuje do chwili obecnej na stanowisku adiunkta.

Osiągnięcia naukowe dr Pacuskiego uzyskane w ciągu 13 lat od ukończenia studiów są imponujące: jest on współautorem 69 oryginalnych prac naukowych opublikowanych w czasopismach naukowych z najwyższej półki listy filadelfijskiej, między innymi takich jak Nature Communication, ACS-Nano, Physical Review Letters, Applied Physics Letters, Crystal Growth & Design, itd. (sumaryczny impact factor 155, liczba cytowań 593, indeks Hirscha - 13). Jest także autorem jednego europejskiego zgłoszenia patentowego. Wygłosił 10 referatów zaproszonych i kilkanaście ustnych prezentacji na konferencjach międzynarodowych. Został zaproszony do Komitetu Programowego poważnej konferencji międzynarodowej „International Conference on Molecular Beam Epitaxy”. Nawiązał liczne kontakty naukowe współpracując z kilkoma ośrodkami we Francji, Niemczech i w Austrii, a także w kraju, przede wszystkim z Instytutem Fizyki PAN. Dla swoich badań uzyskał finansowanie: grant promotorski na przygotowanie rozprawy doktorskiej, otrzymał Humbolt Research Fellowship na początku stażu podoktorskiego w Niemczech, a następnie uzyskał finansowanie i kierował następującymi projektami: prestiżowy projekt NCBiR Lider, projekt MNiSW dla wybitnych młodych naukowców Iuventus Plus (dwukrotnie) oraz projekt NCN z

konkursu Sonata BIS. Uczestniczył także w charakterze głównego wykonawcy w realizacji kilku innych projektów. Dr Pacuski jest laureatem szeregu nagród i programów stypendialnych, w tym np. otrzymanej w 2014 r. Nagrody Indywidualnej I stopnia Rektora Uniwersytetu Warszawskiego oraz stypendium Fundacji na rzecz Nauki Polskiej w programie START, stypendium MNiSW dla wybitnych młodych naukowców i Programu stypendialnego Nowoczesny Uniwersytet. W zeszłym roku dr Pacuskiemu przyznana została Nagroda im. Stefana Pieńkowskiego za „Osiągnięcia w wytwarzaniu i badaniach optycznych nanostruktur półprzewodnikowych – mikrownęk optycznych i kropek kwantowych z jonami magnetycznymi”, tj. za osiągnięcia będące tematem rozpatrywanego właśnie wniosku o nadanie stopnia doktora habilitowanego.

Ocena rozprawy habilitacyjnej

W przedłożonej dokumentacji jako podstawę ubiegania się o stopień doktora habilitowanego dr Pacuski wskazał cykl powiązanych tematycznie 9 prac naukowych opublikowanych w latach 2009-2016, którym nadał tytuł „Zaprojektowanie, wytworzenie i zbadanie metodami optycznymi nowych układów mikrownęk i struktur kwantowych zawierających jony magnetyczne” :

1. W. Pacuski, C. Kruse, S. Figge, and D. Hommel, "High-reflectivity broadband distributed Bragg reflector lattice matched to ZnTe", *Applied Physics Letters* 94, 191108 (2009).
2. C. Kruse, W. Pacuski, T. Jakubczyk, J. Kobak, J. A. Gaj, K. Frank, M. Schowalter, A. Rosenauer, M. Florian, F. Jahnke, and D. Hommel, "Monolithic ZnTe-based pillar microcavities containing CdTe quantum dots", *Nanotechnology* 22, 285204 (2011).
3. W. Pacuski, T. Jakubczyk, C. Kruse, J. Kobak, T. Kazimierczuk, M. Goryca, A. Golnik, P. Kossacki, M. Wiater, P. Wojnar, G. Karczewski, T. Wojtowicz, D. Hommel, "Micropillar cavity containing a CdTe quantum dot with a single manganese ion", *Crystal Growth & Design* 14, 988 (2014).
4. J. Kobak, T. Smoleński, M. Goryca, M. Papaj, K. Gietka, A. Bogucki, M. Koperski, J.-G. Rousset, J. Suffczyński, E. Janik, M. Nawrocki, A. Golnik, P. Kossacki, W. Pacuski, "Designing quantum dots for solotronics", *Nature Communications* 5, 3191 (2014).
5. W. Pacuski, "Individual cobalt and manganese ions in semiconductor quantum dots and photonic structures", *Proc. SPIE 9167, Spintronics VII*, 91670K (2014).
6. T. Smoleński, W. Pacuski, M. Goryca, M. Nawrocki, A. Golnik, and P. Kossacki, "Optical spin orientation of an individual Mn²⁺ ion in a CdSe/ZnSe quantum dot", *Physical Review B* 91, 045306 (2015).
7. J.-G. Rousset, B. Piętka, M. Król, R. Mirek, K. Lekenta, J. Szczytko, J. Borysiuk, J. Suffczyński, T. Kazimierczuk, M. Goryca, T. Smoleński, P. Kossacki, M. Nawrocki, W. Pacuski, "Strong coupling and polariton lasing in Te based microcavities embedding (Cd,Zn)Te quantum wells", *Applied Physics Letters* 107, 201109 (2015),
8. T. Smoleński, T. Kazimierczuk, J. Kobak, M. Goryca, A. Golnik, P. Kossacki, W. Pacuski, "Magnetic Ground State of an Individual Fe²⁺ Ion in Strained Semiconductor

Nanostructure" Nature Communications 7, 10484 (2016).

9. J.-G. Rousset, J. Kobak, E. Janik, M. Parlinska-Wojtan, T. Slupinski, A. Golnik, P. Kossacki, M. Nawrocki, W. Pacuski, "Distributed Bragg reflectors obtained by combining Se and Te compounds: Influence on the luminescence from CdTe quantum dots", Journal of Applied Physics 119, 183105 (2016).

Dr Pacuski jest samodzielnym autorem jednej z tych prac, zaproszonego przeglądowego artykułu prezentującego wyniki dotyczące pojedynczych jonów manganu i kobaltu w półprzewodnikowych kropkach kwantowych i strukturach fonicznych. Pozostałe prace są wieloautorskie. Dr Pacuski jest pierwszym autorem w 2 wieloautorskich pracach, a w 4 pracach będąc ostatnim na liście, autorem wskazanym do korespondencji. Nie wszyscy współautorzy prac złożyli stosowne oświadczenia o swoim udziale w badaniach, których wyniki zawarte są w opublikowanych pracach – Habilitant skorzystał z Rozporządzenia Ministra Nauki i Szkolnictwa Wyższego z dnia 30 października 2015 r., w sprawie szczegółowego trybu i warunków przeprowadzania czynności w przewodzie doktorskim, w postępowaniu habilitacyjnym oraz w postępowaniu o nadanie tytułu profesora, w którym §12 p.3 mówi, że „W przypadku gdy praca zbiorowa ma więcej niż pięciu współautorów, habilitant załącza oświadczenie określające jego indywidualny wkład w powstanie tej pracy oraz oświadczenia co najmniej czterech pozostałych współautorów”. Mimo braku wszystkich oświadczeń, nie zachodzi podejrzenie, że czyjś zasadniczy wkład został pominięty, gdyż załączone oświadczenia obejmują, w moim rozumieniu, wszystkich najważniejszych autorów.

W autoreferacie dr Pacuski w zwięzłej formie przedstawia najważniejsze wyniki, które są zawarte w wybranych pracach oraz w bardzo logiczny i przekonujący sposób opisuje jak kolejne prace wynikają z poprzednich, uzasadniając w ten sposób nie tylko powiązanie tematyczne wybranych 9 prac, ale także ukazując swoją rolę w inicjowaniu i prowadzeniu badań, które doprowadziły do powstawania kolejnych wyników. Nie ukrywam, że gdy otrzymałam prośbę o zrecenzowanie dorobku dr Pacuskiego, w pierwszej chwili nie byłam pewna czy zdołam oddzielić jego wkład w te osiągnięcia od wkładu całej grupy młodych bardzo zdolnych badaczy, którzy są współautorami tych prac i przypuszczalnie będą chcieli wkrótce także ubiegać się o tytuł doktora czy doktora habilitowanego. Sposób w jaki Habilitant przedstawił swoje osiągnięcia w autoreferacie bardzo ułatwił to zadanie. W moim rozumieniu, przedstawiony przez Habilitanta opis prowadzenia przez Niego badań naukowych, pokazanie jak wyznaczał sobie kolejne zadania, jak rozszerzał swoje kompetencje i możliwości aparaturowe, a także jak w kolejnych etapach współpracował z osobami czy ośrodkami posiadającymi uzupełniające do tego czym dysponował umiejętności czy aparaturę (bardzo ciekawy w tym kontekście jest opis powstawania pracy H3), świadczy o ogromnym zaangażowaniu dr Pacuskiego w rozwój dziedziny, którą się zajmuje i o niezwyklej u tak młodego naukowca dojrzałości naukowej.

Tematyka cyklu prac p.t. „Zaprojektowanie, wytworzenie i zbadanie metodami optycznymi nowych układów mikrownęk i struktur kwantowych zawierających jony magnetyczne”.

W pracy H1 opracowane zostały zwierciadła Bragga z supersieci ZnTe/MgSe/MgTe/ZnTe, w których dobierając odpowiednio stosunek grubości warstw MgSe i MgTe autorzy mogli sterować stałą sieci, a w szczególności dopasować ją do stałej sieci ZnTe. Przerwę energetyczną można było zmieniać w zakresie od przerwy ZnTe do bliskiego nadfioletu poprzez zmianę grubości warstwy ZnTe. Wytworzone zwierciadła zawierające takie supersieci wykazały odbicie wynoszące ca 99%.

Opracowane w pracy H1 zwierciadła Bragga, dopasowane do bariery ZnTe, posłużyły następnie Habilitantowi do produkcji mikrownęk z wstawionymi w nie kropkami kwantowymi (praca H2, H3 i H9). W pracy H2 udało się autorom wytworzyć wnękę z kropkami kwantowymi CdTe/ZnTe zamkniętą od góry i od dołu szeregiem kilkunastu par Bragga i dopasować energie rezonansowe wnęki i emisji kropek kwantowych. Przy pomocy skupionej wiązki jonów (FIB) zdołali oni następnie wytrawić strukturę foniczną – wnękę mikrofilarów. W swoim autoreferacie Habilitant wskazuje na fakt, że wyniki tej pracy zostały wykorzystane następnie w kilku publikacjach nie włączonych do rozpatrywanego cyklu prac stanowiącego podstawę ubiegania się o tytuł doktora habilitowanego. W szczególności bazując na próbkach wytworzonych w pracy H2 pokazano, że takie mikrofilary otoczone radialnymi zwierciadłami Bragga (blokującymi świecenie z mikrofilara na boki) wydłużają czas życia ekscytonów w kropkach kwantowych.

Kolejnym krokiem było umieszczenie w mikrownęce kropki kwantowej CdTe/ZnTe z pojedynczym jonem magnetycznym Mn (praca H3). Jak pisze Habilitant „Zastosowaniem struktur mikrownękowych z kropkami kwantowymi z pojedynczymi jonami Mn jest rezonansowa spektroskopia taka jak rezonansowa fluorescencja czy mieszanie czterech fal”, co On i współpracownicy pokazali w pracy opublikowanej właśnie, w kwietniu 2017, w *Crystal Growth & Design*. Te wyniki dają nadzieję na kontrolowanie oddziaływań pomiędzy oddalonymi od siebie jonami magnetycznymi w różnych kropkach kwantowych, ale w tej samej wnęcie. Dzięki takim właściwościom systemy te mogłyby posłużyć jako pamięci magnetyczne zbudowane na jednym jonie czy też stać się kandydatami na qubity w komputerach kwantowych. Mogłoby to się stać otwarciem dla nowego rozwoju elektroniki opartej na jednym jonie, solotroniki, jak nazwali to autorzy w pracy H4. W tej opublikowanej na łamach *Nature Communications* pracy pt. *Designing quantum dots for solotronics* przedstawione zostały metody tworzenia nowych rodzajów kropek kwantowych zawierających w środku jeden, centralnie osadzony atom magnetyczny, nie tylko manganu ale także np. kobaltu. Autorzy zbudowali też kropkę kwantową z rozważanym już uprzednio jonem manganu, ale osadzonym w kryształ selenku kadmu. Zastąpienie cięższego pierwiastka (telluru) lżejszym selenem doprowadziło do wydłużenia o rząd wielkości czasu pamiętania zapisanej informacji.

W innej pracy, która także ukazała się w Nature Communications (praca H8), jako jon magnetyczny użyte zostało żelazo. W pracy H8 autorzy pokazali, że naprężenie wynikające z niedopasowania sieciowego w kropce kwantowej z pojedynczym jonem Fe^{2+} prowadzi do jakościowej zmiany widma energetycznego domieszki, a mianowicie do dwukrotnie zdegenerowanego stanu podstawowego z dwoma rzutami spinu $S_z = \pm 2$. Wynik ten jest bardzo ciekawy ze względu na ewentualne zastosowania spintroniczne struktur z jonami żelaza, czego przedtem nie przewidywano ze względu na fakt, że w kryształach objętościowych 2-wartościowa domieszka żelaza ma niezdegenerowany stan podstawowy, co praktycznie uniemożliwia jakiegokolwiek aplikacje tego typu. Magnetyczny charakter stanu podstawowego jonu żelaza w kropce kwantowej CdSe/ZnSe potwierdzony został przy pomocy fotoluminescencji, dzięki wykorzystaniu sprzężenia pomiędzy uwięzionym ekscytonem i pojedynczą domieszką Fe.

W kolejnych pracach autorzy udoskonalali swoje struktury, co pozwoliło im na kilka ciekawych odkryć: np. opracowali metodę optycznego sterowania orientacją spinu jonu magnetycznego w kropkach kwantowych CdTe/ZnSe (praca H6). Optyczne pompowanie spinu jonu Mn^{2+} osiągnięto w tej pracy poprzez wstrzykiwanie do kropki kwantowej spinowo-spolaryzowanego ekscytronu przy spolaryzowanym kołowo wzbudzeniu o energii bliskiej energii emisji kropki. Z kolei w pracy H7 zastosowanie zwierciadeł Bragga o stałej sieci dopasowanej nie do ZnTe, ale do MgTe pozwoliło autorom uzyskać laserowanie polarytonowe w mikrownękach ze studniami kwantowymi domieszkowanymi jonami magnetycznymi.

Podsumowując ten wrywkowy przegląd najważniejszych wyników rozprawy, chce podkreślić, że przedstawione publikacje stanowią bez wątpienia bardzo istotny wkład w dziedzinę badań optycznych i magnetycznych własności niskowymiarowych struktur półprzewodnikowych. Uzyskanie unikalnych struktur z kropkami kwantowymi zawierającymi pojedyncze jony magnetyczne może mieć przełomowe znaczenie dla rozwoju spintroniki. W mojej ocenie jednak najważniejszym osiągnięciem dr Pacuskiego zarówno naukowym jak i organizacyjnym, osiągnięciem będącym podstawą poważnej części wyników przedstawionych w przedłożonych pracach, jest stworzenie na Wydziale Fizyki UW laboratorium MBE. W laboratorium tym zaprojektowano, opracowano technologię i wytworzono szereg niezwykle ciekawych nowych struktur półprzewodnikowych, przede wszystkim wspomniane wyżej kropki kwantowe zawierające różne pojedyncze jony magnetyczne.

Ocena aktywności dydaktycznej i popularyzującej naukę

Dr Pacuski jako pracownik uczelni prowadzi szeroko zakrojoną działalność dydaktyczną. Jest promotorem pomocniczym dwóch doktorantów (J.-G. Rousset, J. Kobak), którzy kończą przygotowywanie rozpraw doktorskich. Pod jego kierunkiem 5-ciu studentów przygotowało

pracę magisterską i także 5-ciu prace licencjackie. Praca licencjacka przygotowana pod opieką dr Pacuskiego przez Michała Papaja została nagrodzona Złotym Medalem Chemii za najlepszą w Polsce pracę licencjacką z chemii w r. 2014. Dr Pacuski od 5-ciu lat prowadzi autorski wykład na Wydziale Fizyki Uniwersytetu Warszawskiego: „Technologia i strukturyzacja materiałów półprzewodnikowych”, ponadto jako adiunkt na Wydziale Fizyki UW od 2009 prowadził i prowadzi liczne ćwiczenia i pokazy do wykładów innych wykładowców oraz w Pracowni Technologii Informacyjnej i Pracowni Technik Pomiarowych w Nanotechnologii. Prowadził także zajęcia z gimnazjalistami w ramach europejskiego edukacyjnego programu „The IRRESISTIBLE” (Including Responsible Research and innovation in cutting Edge Science and Inquiry-based Science education to improve Teacher's Ability of Bridging Learning Environments). Wykładał i prezentował laboratoria Wydziału Fizyki na licznych imprezach popularyzujących naukę, w tym np. dla uczestników i laureatów Olimpiady Fizycznej. Brał też udział w Pikniku Naukowym.

Konkluzja

Podsumowując stwierdzam, że zarówno osiągnięcie naukowe przedłożone w postaci zbioru 9 prac wraz autoreferatem, zasługująca na wyróżnienie aktywność naukowa i organizacyjna, a także dydaktyczna oraz popularyzatorska Habilitanta spełniają z nadmiarem kryteria ustawy o stopniach naukowych i tytule naukowym z dnia 14 marca 2003r., Rozporządzenia Ministra Nauki i Szkolnictwa Wyższego z dnia 3 października 2014r. i dalszymi poprawkami, i dlatego stawiam wniosek o nadanie dr Wojciechowi Pacuskiemu stopnia doktora habilitowanego.

P. Kosman