

Dr hab. inż. Artur Podhorodecki, Prof. PWr.
Katedra Fizyki Doświadczalnej, WPPT,
Politechnika Wrocławska

Wrocław 01.01.2017

**Recenzja dorobku naukowego dr Piotra Wojnara
w postępowaniu habilitacyjnym**

Doktor Piotr Wojnar uzyskał stopień naukowy magistra fizyki w 2002 na Uniwersytecie Warszawskim broniąc pracę pt: *Wpływ efektu polaronu magnetycznego na rozpraszanie Ramana z odwróceniem spinu w objętościowym CdMnTe*. Rozprawę doktorską obronił w IF, PAN w Warszawie w roku 2008 i dotyczyła ona „*Wytwarzania i spektroskopii optycznej półmagnetycznych kropek kwantowych CdMnTe*”. Po uzyskaniu stopnia doktora, odbył kilka zagranicznych staży naukowych, podczas których w większości zajmował się kontynuacją badań nanostruktur związków grupy II-VI.

W okresie po doktoracie, dr Wojnar rozwijał swoje badania dt. wzrostu struktur związków grupy II-VI w stronę kontroli ich wymiarowości (nanodruty, kropki kwantowe), architektury (geometria rdzeń-płaszcz, kropka w kresce, sprzęganie kropek) oraz pod kątem możliwości ich domieszkowania jonami magnetycznymi. W okresie tym, powstało 68 publikacji (WoS), a łączna liczba wszystkich artykułów habilitanta tj. 83 osiągnęła obecnie łączną liczbę cytowań ok. 800, dając autorowi współczynnik Hirsha, $H = 15$. Co ważne, statystki bibliograficzne WoS wskazują na istotny rozwój dr Wojnara po otrzymaniu tytułu doktora (ciągły wzrost liczby cytowań), a zakres jego zainteresowań badawczych wykracza poza te przedłożone do oceny. Ponadto, w okresie po doktoracie, Dr Wojnar był kierownikiem 2 projektów badawczych (*Juventus Plus*, *MNiSW* oraz *grant NCN 2011/01/D/ST5/05039*).

Spośród wszystkich swoich publikacji, habilitant przedstawił do oceny cykl 6 wybranych prac, autoreferat oraz załączniki obejmujące wskazane do oceny artykuły. Głównym celem badań przedłożonych do oceny było wytworzenie heterostruktur zarówno osiowych jak i radialnych w nanodrutach tellurkowych, które charakteryzowałyby się obecnością intensywnej luminescencji krawędziowej, a następnie wykorzystanie tej emisji do badania takich efektów jak zmiany przerwy energetycznej wywołane naprężeniem występującym w nanodrutach, badanie obecności rozszczepienia pasm dziur ciężkich i lekkich, a także zwiększenia rozszczepienia Zeemana w nanodrutach zawierających magnetyczne jony manganu wywołane poprzez oddziaływanie wymienne *sp-d*.

W autoreferacie, dr Wojnar w bardzo przejrzysty sposób przedstawia podsumowanie obecnego stanu wiedzy podejmowanej przez niego tematyki badawczej wskazując miejsca, w których wiedza w okresie rozpoczęcia jego badań była nie pełna lub te miejsca, gdzie dostępne wyniki eksperymentalne nie dawały pozytywnych rezultatów (np. brak emisji krawędziowej). Strategia autora polegała na rozwiązaniu kluczowego w tej tematyce problemu, mianowicie braku emisji krawędziowej z nanodrutów ZnTe, która ograniczona była do świecenia defektowego związanego najprawdopodobniej z lukami cynkowymi, a także do świecenia wewnątrz-manganowego w przypadku nanodrutów (Zn, Mn)Te. Ta część pracy badawczej autora miała charakter technologiczny i polegała na optymalizacji procesu wzrostu oraz zastosowaniu znanego wcześniej konceptu pokrywania rdzeni nanomateriałów warstwą ochronną (architektura rdzeń-płaszcz). Uzyskanie pozytywnego wyniku w tym zakresie prowadzonych prac uważam za przełomowe dla przedstawionych w rozprawie wyników, gdyż obserwacja emisji krawędziowej umożliwiła autorowi w kolejnych krokach, subtelniejsze badania właściwości nanodrutów oraz przejście do wzrostu bardziej skomplikowanych struktur.

O dużej wartości przedłożonych do oceny wyników, dojrzałości naukowej i potencjale badawczym kandydata, świadczy wszechstronność prowadzonych przez niego badań. Autor z trudnego zadania technologicznego przechodzi do równie trudnych zadań eksperymentalnych aby na końcu, we współpracy z teoretykami, z którymi współpracuje, wytłumaczyć otrzymane wyniki eksperymentalne. Aby osiągnąć etap końcowy, uczestniczy i/lub prowadzi wyrafinowane eksperymenty, zarówno na układach drutów jak i na pojedynczych strukturach. W przyjętej przez autora strategii badawczej jest duża konsekwencja w wytwarzaniu coraz lepszych struktur oraz w coraz lepszym zrozumieniu ich właściwości fizycznych. Ponadto, podejmowane przez kandydata

zagadnienia są poważnymi wyzwaniem badawczymi, których autor nie obawia się podjąć, nie będąc prosta kontynuacją prac prowadzonych z Zespole, w którym pracuje.

Część wprowadzająca do rozprawy jest przedstawiona w sposób świadczący o dużej dojrzałości badawczej kandydata i zrozumieniu podejmowanej przez niego problematyki, choć w kilku miejscach mogła by być nieco obszerniejsza.

Jedynego czego zabrakło recenzentowi w tej części pracy, to:

-Choćby krótkiej dyskusji dt. położenia jonów Mn (Mg) względem rdzenia drutów kwantowych, ich ewentualnej inter-dyfuzji pomiędzy rdzeniem i płaszczem (może agregacji). Tego rodzaju zjawiska dość często mają miejsce w przypadku domieszkowanych nanostruktur koloidalnych o bardzo małych rozmiarach. W prawdzie, tego rodzaju matryca bazująca na anionie telluru zazwyczaj daje dobrą rozpuszczalnością jonów magnetycznych manganu niemniej jednak ciekawym byłoby rozwinąć ten wątek nieco bardziej, dając pełniejszy ogólny stan wiedzy w tym zakresie i istniejących problemów do rozwiązania. Wątek ten jest też mało dyskutowany w załączonych do rozprawy pracach.

-Ponadto, jak sam autor pisze, w geometrii nanodrutu można łączyć półprzewodniki ze znacznie większym niedopasowaniem sieciowym niż jest to możliwe w przypadku struktur planarnych. Można by więc pokusić się we wstępie o pewien komentarz dt. doboru powłoki pasywującej powierzchnię nanodrutu i nieco dokładniej omówić (pokazać) układ pasmowy powstający dla tego rodzaju struktur. Czy wybór zastosowanej powłoki podyktowany jest jedynie aspektami technologicznymi czy ma związek z projektowaniem potencjału dla nośników wiązanych w rdzeniu druta lub w wytraceniach tam wzrastających? Czy przy wymiarach otrzymywanych nanostruktur oczekiwane są efekty wynikające z kwantowego wiązania nośników ?

-W tej części pracy można by też choćby krótko skomentować fakt istnienia amorficznej warstwy tlenkowej na powierzchni drutów, która przy pobudzeniu UV i CL chyba też powinna być optycznie aktywna? Emisja z tego rodzaju warstw tlenkowych pokrywa cały zakres widzialny mając zarówno ostre jak i szerokie pasma emisji. Więc jeżeli z jakichś względów jak np niska temperatura pomiarów, atmosfera helowa itp. nie należy takiej warstwy brać pod uwagę podczas analizy wyników eksperymentalnych, taka informacja byłaby przydatna recenzentowi do pełniejszego obrazu dyskutowanych w pracy wyników.

-Zabrakło także recenzentowi może nieco obszerniejszego komentarza (może wyników podobnych jak dla rozkładu dla Cd) dotyczącego rozkładu atomów Au użytych w procesie wzrostu

nanodrutów. Jeżeli otrzymane nanodrutu są wolne od metalizacji ich płaszczka, o czym autor pisze, pokazanie takiego wyniku jeszcze bardziej mogłoby potwierdzić wysoką jakość otrzymanych przez autora struktur. Z drugiej strony, taka niekontrolowana metalizacja to bardzo ważny problem w przypadku wykorzystania tego rodzaju nanostruktur w optoelektronice.

Są to jednak tematy, które szczególnie zaintrygowały recenzenta, głównie z powodu jego ograniczonej wiedzy w tych aspektach. Komentarz w tej kwestii mógłby ułatwić dokładniejszą analizę osiągniętych rezultatów. Oczywiście „braki” te nie mają krytycznego wkładu do przedłożonej recenzji.

W drugiej części autoreferatu, autor opisuje otrzymane przez niego wyniki opublikowane w renomowanych czasopismach naukowych (tj. *Nano Letters*; *Nanoscale*; *Appl. Phys. Lett.*, *Nanotechnology*). Wielo-autorski charakter prac nie budzi wątpliwości recenzenta przy tak interdyscyplinarnej pracy, a nawet świadczy na korzyść kandydata świadcząc o jego umiejętności współpracy z kolegami. Wyniki przedstawione w załączonych pracach można umownie podzielić na ukierunkowane na wynik technologiczny (otrzymanie struktur) oraz eksperymentalny (zaawansowane badania spektroskopowe).

Główne wnioski wynikające z rezultatów dotyczących osiągnięć technologicznych kandydata **uważam za bardzo interesujące i przełomowe dla tej tematyki** i podsumowując są następujące:

Autor uzyskał świecenie krawędziowe z nanodrutów ZnTe wykonanych w modzie wzrostu para-ciecz-ciało stałe przy użyciu epitaksji z wiązek molekularnych poprzez dodanie cienkiej radialnej otoczki pasywującej stany powierzchniowe.

Poprzez porównanie otrzymanych wyników z obliczeniami teoretycznymi, autor przedstawia nie oczywisty wniosek, że wraz ze wzrostem grubości powłoki kryjącej, energia przejścia podstawowego rdzenia przesuwa się ku niższym energią, a nie ku wyższym. Podobne obliczenia sugerują, że również koncentracja jonów Mg ma wpływ na powstające w strukturze naprężenia, znacznie bardziej niż sama zmiana składu warstwy podyktowana wprowadzaniem jonów Mg.

Prace ta sugerują również, że dla tego rodzaju struktur, w celu kontroli ich jakości i właściwości optycznych należy stosować raczej strategię kontroli naprężeń niż kontrolę samej geometrii i efektów kwantowego wiązania nośników. Pomocnym w tej części pracy, byłoby również

umieszczenie schematu potencjału wiążącego nośniki w drucie lub wytrąceniach do niego wprowadzanych, z uwzględnieniem powłoki oraz warstwy tlenkowej np. dla różnych grubości powłoki czy zawartości Mg.

Ponadto, w tej części dorobku przedstawiono także rezultat wytworzenia optycznie aktywnych kropek kwantowych CdTe w nanodrutach ZnTe oraz wykazano, że ich emisja optyczna ma charakter jednofotonowy. Pokazano również, że możliwa jest kontrola nad kierunkiem wzrostu wstawek CdTe w nanodrucie ZnTe poprzez zmianę temperatury wzrostu, dzięki czemu wytworzyć można optycznie aktywne nanodruły z wieloma radialnymi otoczkami oraz heterostruktury, w których współistnieją osiowe i radialne wstawki CdTe.

Bardzo ważną wydaje się również kolejna praca technologiczna (*Nanotechnology* **24**, 365201 (2013)), gdzie autor pokazuje skuteczność opracowanej przez niego technologii również przy wzroście nanodrutów na podłożach krzemowych. Jest to ważny rezultat, mając na względzie praktyczne wykorzystanie tego rodzaju struktur w optoelektronice. W tej części pracy autor dostarcza także dowodów na wprowadzenie jonów magnetycznych manganu zarówno do nanodrutów (Zn,Mn)Te/(Zn,Mg)Te typu rdzeń/otoczka, jak i do osiowych wstawek (Cd,Mn)Te w niemagnetycznych nanodrutach ZnTe.

Autor wykazuje w tej części pracy, istnienie emisji z dwóch rodzajów drutów: ze wstawką CdTe wewnątrz rdzenia ZnTe oraz drutów, które oprócz takiej wstawki zawierają otoczkę CdTe. Dla prostszej struktury, obserwuje się jedynie emisję przy ok. 2.1 eV, podczas gdy dla struktury złożonej, dwie emisje: przy ok. 2.05 oraz przy 2.23 eV. Podana interpretacja zakłada, że niższe położona emisja pochodzi z wtrącenia CdTe, a wyższa energetycznie emisja pochodzi z otoczki CdTe. Dla tak podanej interpretacji (płaszczyzna pozioma wyżej, wtrącenie pozioma niżej) ciekawym aspektem byłoby zmierzenie kinetyk emisji i sprawdzenie możliwości transferowania energii wzbudzenia pomiędzy płaszczyzną, a wtrąceniem. Taki proces powinien być chyba dość wydajny ze względu na znaczną różnicę w objętości pomiędzy oboma fragmentami struktury (silniejsza „objętościowa absorpcja” w płaszczyźnie) oraz dość niewielkim odstępem pomiędzy wtrąceniem, a powłoką. Porównując wyniki CL oraz μ -PL widać również, że stosunek intensywności emisji z obu obszarów CdTe ma znacząco inną wartość podczas pomiaru różnymi technikami (zakładam tu wykonanie spektralnej korekcji dla obu układów). Wynika to zapewne z innego mechanizmu wzbudzenia emisji w przypadku obu technik, ale ciekawym byłoby przedyskutowanie otrzymanych wyników w kontekście względnych intensywności emisji z danego drutu i

spróbowanie skorelowania otrzymanych wyników np. z grubością powłoki, temperaturą depozycji itp.

Ta część pracy poza bardzo interesującymi wynikami, pokazuje również ogrom wykonanej pracy eksperymentalnej. Przedstawione są dane statystyczne wykonana dla wielu drutów oraz dokładne mapy emisji i składu świadczące o bardzo rzetelnej pracy doświadczalnej. Ponadto, w mojej ocenie przedstawione wyniki otwierają również wiele nowych możliwości badawczych pokazując, że jest to temat bardzo rozwojowy i nadal wymagający optymalizacji.

Jeżeli struktury tego rodzaju miałyby zostać komercyjnie stosowane, nie banalną sprawą staje się tutaj kontrola i powtarzalność otrzymywania parametrów morfologicznych dla tak skomplikowanych struktur. Wyniki pokazują, że tego rodzaju struktury charakteryzują się pewną dyspersją parametrów technologicznych, a nawet ich asymetrią w obrębie jednego druta. Z przytoczonych wyników widać także, że z pewnym uogólnieniem możemy stwierdzić, że kontrola właściwości optycznych tego rodzaju struktur polega na kontroli naprężeń, i że w strukturach tego rodzaju nie mamy do czynienia z reżimem *silnego kwantowania nośników*. To ostatnie, w odniesieniu do pierwszego jest akurat zaletą ponieważ tego rodzaju układ nie jest tak czuły na zmiany morfologiczne nanodrutów.

Podsumowując tą część, jedyne co można by dodać do przedstawionych w niej wyników to zarysowanie dalszych planów badawczych autora np. nt. możliwości zejścia z rozmiarami tego rodzaju nanostruktur do zakresu silnego kwantowania, poprawienia kontroli morfologicznej otrzymywanych nanostruktur, możliwość uzyskania elektroluminescencji itp.

Dwie pozostałe prace opublikowane w *Nano Letters*, mają charakter głównie eksperymentalny, gdzie autor na podstawie wyrafinowanych i pracochłonnych pomiarów pokazuje bardzo ciekawe rezultaty dla otrzymanych przez siebie struktur. Główne wnioski wynikające z tych prac, to:

1. Identyfikacja emisji optycznej od osiowych i radialnych heterostruktur w pojedynczych nanodrutach przy użyciu katodoluminescencji i mikro-fotoluminescencji.
2. Wykazanie znacznego zwiększenia rozszczepienia Zemana odzwierciedlającego bezpośrednio oddziaływanie wymienne *sp-d* między nośnikami pasmowymi, a jonami magnetycznymi w obydwu rodzajach struktur zawierających jony magnetyczne.

3. Wykazanie silnej anizotropii rozszczepienia Zemana zależnej od kierunku pola magnetycznego względem osi nanodrutu dającej nam możliwość wglądu w strukturę pasmową pojedynczego nanodrutu, a w szczególności w rozszczepienie pasm lekko i ciężko dziurowych.

Wszystkie publikacje poddane przez autora do oceny, ukazały się w najbardziej renomowanych czasopismach o wysokich wartościach wskaźnika IF, będąc recenzowane przez najlepszych ekspertów w dziedzinie na świecie. Jedna z prac cytowana była 19 razy (NL, 2012) pozostałe prace poniżej 10 cytowań, co jest wynikiem dobrym i zrozumiałym ze względu na niedawną datę ich publikacji. W dorobku autora jest również praca cytowana obecnie ponad 100 razy (*Phys.Rev.Lett.* 103, 2009) i recenzent nie ma wątpliwości, że i prace przedłożone do oceny osiągną wkrótce wysoką cytowalność. Te wartości bibliograficzne świadczą o dużym znaczeniu prezentowanych przez kandydata wyników oraz rzetelności ich wykonania.

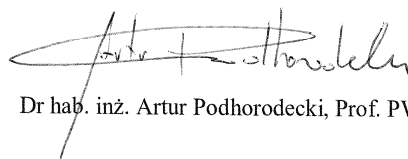
Według mojej oceny, same przytoczone w rozprawie liczby bibliograficzne są wystarczająco wysokie do podjęcia przez habilitanta starań o przyznanie mu stopnia doktora habilitowanego. Niemniej jednak, dorobek autora i otrzymane przez niego rezultaty nie są jedynie dobrze cytowane ale w moim odczuciu ważne dla dziedziny i w mojej ocenie spełnia wymogi stawiane nadawaniu stopnia doktora habilitowanego. Ponadto, wieloaspektowość podejmowanej tematyki gwarantująca nowe wątki badawcze, wypracowana metodyka (zarówno technologiczna jak i eksperymentalna) oraz poziom obecnego zrozumienia badanych zjawisk gwarantuje dalszy, dynamiczny rozwój naukowy dr Piotra Wojnara.

Biorąc pod uwagę wyżej przedstawione do oceny:

- monotematyczny cykl publikacji o wspólnym tytule: **Optycznie aktywne heterostruktury w nanodrutach tellurkowych**
- dorobek naukowy
- działalność dydaktyczną i organizacyjną

Dr Piotra Wojnara stwierdzam, że w świetle obowiązującej „Ustawą o Stopniach Naukowych i Tytule Naukowym oraz Stopniach i Tytule w Zakresie Sztuki”, z dnia 14 marca 2003 roku wraz z „Rozporządzeniem Ministra Nauki i Szkolnictwa Wyższego” z dnia 22 września 2011 roku, **oceny te stanowią podstawę do ubiegania się dr Piotra Wojnara o stopień doktora habilitowanego w zakresie nauk fizycznych.**

Ponadto, jeżeli istnieje odpowiednia procedura umożliwiająca wyróżnienie tej rozprawy przez Radę Instytutu, PAN zgłaszam swój wniosek o wyróżnienie rozprawy dr Piotra Wojnara ze względu na bardzo wysoki poziom przedstawionych rezultatów, jej interdyscyplinarny charakter oraz duże perspektywy rozwojowe przedłożonej tematyki badawczej.

A handwritten signature in black ink, appearing to read 'Artur Podhorodecki', written in a cursive style.

Dr hab. inż. Artur Podhorodecki, Prof. PWR.