



INSTYTUT FIZYKI POLSKIEJ AKADEMII NAUK
INSTITUTE OF PHYSICS, POLISH ACADEMY OF SCIENCES

02-668 WARSZAWA, AL. LOTNIKÓW 32/46
fax: + (48-22) 843-0926; <http://info.ifpan.edu.pl>

LABORATORY OF GROWTH AND PHYSICS OF LOW DIMENSIONAL CRYSTALS

Prof. dr hab. Tomasz Wojtowicz tel. +(48-22)-843-6601 ext.3123; +(48-22)-843-1331
wojto@ifpan.edu.pl www.ifpan.edu.pl/SL-3/TWojtowicz/wojtowicz.html www.ifpan.edu.pl/SL-3/

Warszawa, 17-05-2012 r

Recenzja rozprawy doktorskiej mgr Marty Anny Galickiej

Zatytułowanej:

**„Badanie struktury krystalicznej, elektronowej i własności magnetycznych nanodrutów ze
związków półprzewodnikowych III-V”**

Przedstawiona do recenzji rozprawa doktorska mgr Marty Galickiej dotyczy teoretycznej analizy własności strukturalnych, elektronowych i magnetycznych nanodrutów półprzewodnikowych. Praca ta wykonana została w Zespole Modelowania Nanostruktur Oddziału ON4 Instytutu Fizyki Polskiej Akademii Nauk pod kierunkiem prof. dr hab. Perty Kacman.

Nanodrutry półprzewodnikowe, będące przedmiotem badań mgr Galickiej, w ostatnich latach stały się jednym z najbardziej gorących tematów z dziedziny fizyki ciała stałego (obok nanorurek węglowych, grafenu oraz zupełnie ostatnio izolatorów topologicznych). Zainteresowanie nanodrutami półprzewodnikowymi, oprócz tego, iż mogą być zastosowane do różnorodnych badań podstawowych, jest wywołane ich potencjałem do wykorzystania jako nanocegiełek do budowy nowego typu przyrządów półprzewodnikowych oraz ich matryc metodą samoorganizacji lub składania, dokonywanych w ramach podejścia od „dołu do góry”. Praca doktorska Pani Galickiej jest więc niezmiernie aktualna i, jak wykażę w dalszej części mojej recenzji, wnosi istotny wkład do dziedziny fizyki nanostruktur półprzewodnikowych. Posiada ona nie tylko dużą wartość dla fizyków zajmujących się teorią nanostruktur, ale także - a może nawet przede wszystkim - dla eksperymentatorów (do których sam należę). Przewidywania teoretyczne rozprawy bowiem nie tylko pomagają uporządkować już istniejące dane eksperymentalne, ale także pozwalają ukierunkować przyszłe prace eksperymentalne w dziedzinie nanodrutów.

Godnym podkreślenia jest też fakt, że praca ta bardzo dobrze wpisuje się w tematykę badawczą realizowaną w szeregu eksperymentalnych grup badawczych Instytutu Fizyki PAN. W Instytucie Fizyki bowiem od kilku lat prowadzone są nie tylko intensywne badania wzrostu nanodrutów metodą VLS (Vapor Liquid Solid) (w oddziale ON4: nanodrutry III-V i II-VI oparte na ZnO oraz GaN, w oddziale ON1: nanodrutry IV-VI i III-V, np. GaMnAs, czy wreszcie w Laboratorium Środowiskowym SL3: nanodrutry II-VI

oparte na ZnTe i ZnO) ale także rozległe badania ich własności fizycznych, ze szczególnym naciskiem na ich przyszłe zastosowania do budowy ultra czułych nanosensorów biologicznych i medycznych.

Recenzowaną rozprawę oraz uzyskane w jej ramach wyniki naukowe oceniam więc bardzo wysoko. Na podstawie lektury przedstawionej pracy mogę także wysnuć wniosek, iż mgr Marta Galicka opanowała niełatwą technikę posługiwania się dość zaawansowanym oprogramowaniem do obliczeń „z pierwszych zasad” (*ab initio*). Co bardzo ważne, Pani Galicka stosuje pakiety obliczeniowe ze zrozumieniem fizyki, która jest podstawą stosowanych w nich metod i przybliżeń. Wreszcie autorka umiała zastosować zdobytą wiedzę do, zakończonego sukcesem, podjęcia prób odpowiedzi na nurtujące pytania współczesnej fizyki nanostruktur półprzewodnikowych. W ramach przyjętej metody mgr Galicka przeprowadziła dobrze zdefiniowany cykl badań, które, rozumiejąc ograniczenia metody wniosły moim zdaniem istotny wkład do dziedziny fizyki nanostruktur półprzewodnikowych. Poniżej przedstawię bardziej szczegółowy opis rozprawy, krótkie omówienie najważniejszych wyników oraz uwagi merytoryczne.

Rozprawa doktorska mgr Anny Galickiej napisana została w języku polskim, liczy 82 strony i zawiera obszerne odniesienie do literatury naukowej, obejmujące 95 pozycji bibliograficznych. Składa się ona ze wstępu oraz czterech zasadniczych rozdziałów. W pierwszym z nich zawarta jest krótka charakterystyka badanych materiałów III-V. W rozdziale drugim opisane są metody obliczeniowe, poczynając od zdefiniowania problemu wieloelektronowego, opisanie podstaw na których opiera się użyta w pracy metoda *ab initio*, tj. twierdzenia Hohenberga - Kohna oraz równań Kohna – Shama, wprowadzenia funkcjonu korelacji – wymiany, omówienia teorii pseudopotencjałów, aż po zaprezentowanie szczegółów zastosowanych w pracy obliczeń. Rozdział drugi zawiera wyniki obliczeń dla najbardziej do tej pory popularnych nanodrutów związków III-V: GaAs oraz InAs. Najpierw autorka przedstawia konstrukcje teoretyczną nanodrutów a następnie uzyskane wyniki badania stabilności nanodrutów, które oparte są na obliczeniach energii swobodnej nanodrutów o strukturze blendy cynkowej (ZB) i wurcytu (WZ) dokonane w funkcji średnicy nanodrutów. Obliczenia te, ze względu na używane przez autorkę komputery o konkretnych mocach obliczeniowych, są ograniczone do nanodrutów o średnicach poniżej 3.5 nm, czyli właściwie do nanodrutów niedostępnych eksperymentalnie. Dlatego też, w kolejnym podrozdziale, mgr Galicka dokonuje oszacowania energii swobodnej nanodrutów o większych średnicach, albo stosując metodę przybliżoną opartą na oszacowaniu energii powierzchniowej nanodrutów, albo używając ekstrapolacji obliczeń *ab initio* wykonanych dla nanodrutów o małych średnicach. Wynikiem tych rozważań, a konkretnie ekstrapolacji, jest zaproponowana przez Galicką ze współpracownikami nowa metoda tworzenia nanodrutów bezdefektowych, opisana w kolejnym podrozdziale (3.4). W ostatniej części rozdziału trzeciego dyskutowane są własności elektronowe nanodrutów tj. ich struktura pasmowa oraz rozkład gęstości ładunku. Wreszcie rozdział czwarty poświęcony jest teoretycznym badaniom domieszkowania nanodrutów zarówno niemagnetyczną domieszką amfoteryczną, którą jest Si, jak i magnetyczną domieszką: Mn. Dla tej ostatniej prowadzone są dodatkowe obliczenia dla nanodrutów z dwoma Mn, w celu zbadania ferromagnetyzmu.

Do najważniejszych osiągnięć pracy zaliczyłbym przewidzenie przez Panią mgr Galicką na podstawie obliczeń *ab initio*, iż odpowiednio cienkie nanodruły z GaAs i InAs, ze względów energetycznych, będą rosły w strukturze krystalicznej wurcytu, pomimo tego, że w postaci litej kryształy obu materiałów posiadają strukturę blendy cynkowej. Co więcej, ekstrapolacja obliczeń przewiduje małe różnice energetyczne dla nanodrutów wurcytowych i o strukturze blendy cynkowej w dość szerokim przedziale średnic nanodrutów III-V. To tłumaczy wcześniejsze obserwacje eksperymentalne powstawania w nanodrutach naprzemiennych segmentów ZB/WZ, i to nie tylko dla nanodrutów ze związków III-V. Dodatkowo, pani Galicka przewiduje, że błędy ułożenia - wynikające z tej małej różnicy energetycznej

pomiędzy nanodrutami o strukturze ZB oraz WZ - powinny pojawiać się wraz z rosnącą średnicą dla nanodrutów InAs wcześniej (dla Φ rzędu 10-12 nm) niż dla nanodrutów GaAs (co następuje dla Φ rzędu 15 nm). Jest to również zgodne z danymi eksperymentalnymi.

Oba wyżej wymienione wyniki teoretyczne pozwoliły Pani Galickej, wraz ze współautorami: teoretykami z Instytutu Fizyki (prof. dr. hab. Perłą Kacman - promotorką rozprawy, oraz mgr. Małgorzatą Bukałą i prof. nzw. dr hab. Ryszardem Buczko), oraz eksperymentatorami z bardzo dobrej grupy dr Hadas Shtrikman, z Instytutu Weizmanna w Izraelu zaproponować nową metodę wytwarzania bezdefektowych nanodrutów. Metoda ta polega na dwuetapowym wzroście. Najpierw hodowane są cienkie i bezdefektowe nanodruły o strukturze wurcytu metodą VLS a następnie, po odpowiedniej zmianie warunków technologicznych, dohodowywane są epitaksjalne „otoczki” z tego samego materiału. W efekcie powstawać mają bezdefektowe nanodruły o „użytecznych” średnicach i o strukturze wurcytu. Skuteczność zaproponowanej metody została także przez autorów pomysłu zademonstrowana w praktyce dla nanodrutów GaAs hodowanych na podłożach o orientacji (211)B. Taka orientacja podłoża pozwoliła na uzyskanie, wskutek termicznej reorganizacji cienkiej warstwy złota osadzonej uprzednio na powierzchni podłoża, nanonakatalizatorów Au/Ga o odpowiednio małych średnicach.

Powyżej wspomiana, dość dzisiaj niestety rzadka wśród teoretyków, ścisła współpraca z eksperymentatorami i próba opisu rzeczywistości a nie tworzenie „idealnych” modeli teoretycznych - których użyteczność dla eksperymentatorów jest bliska zeru - zasługuje na szczególne podkreślenie.

Innym bardzo ważnym wynikiem uzyskanym przez mgr Martę Galicką w ramach pracy doktorskiej są jej pionierskie obliczenia *ab initio* dotyczące domieszkowania nanodrutów III-V amfoteryczna domieszką Si oraz magnetycznymi jonami Mn. Dla mnie, ze względu na własne zainteresowania, szczególnie ciekawe są te dotyczące wbudowywania się do nanodrutów Mn. Jest to o tyle istotne, że praktycznie brak jest danych eksperymentalnych w tym zakresie. Wiadomo bowiem, że warunki wzrostu nanodrutów metodą VLS (stosunkowo wysoka temperatura) są niekompatybilne ze wzrostem niskotemperaturowym, jaki jest niezbędny dla podstawieniowego wbudowywania się Mn w warstwach III-V o strukturze blendy cynkowej. Jedyna do tej pory, zakończona sukcesem próba wyjścia z sytuacji zaproponowana została przeze mnie i zrealizowana we współpracy z grupą z Regensburga. Polegała ona na wzroście struktur core-shell GaAs-GaMnAs, w których otoczka hodowana była w niskiej temperaturze. Obliczenia mgr Marty Galickiej pozwoliły na zaproponowanie innego podejścia.

Mgr Galicka dokonała analizy energetycznej Mn dla różnych jego położeń w poprzek nanodrutu. Pierwszym niezmiernie istotnym wynikiem Galickiej w tym zakresie jest wykazanie, że dla nanodrutów o strukturze blendy cynkowej Mn najchętniej powinien się lokować na powierzchni nanodrutu, a tym samym będzie jakby „wyrzucany” ze środka nanodrutu na zewnątrz. Z kolei w nanodrutach III-V o strukturze wurcytu taka segregacja ku powierzchni nie będzie następować, a nawet dla nanodrutów InAs atomom manganu korzystniej energetycznie będzie się lokować w centrum nanodrutu. Dalej badając pary Mn w nanodrutach autorka rozprawy przewiduje, iż najniższą energię będą miały nanodruły o strukturze wurcytu z manganami o spinach równoległych (sprzężonymi ferromagnetycznie) i znajdującymi się w centrum nanodrutu. Stąd kolejna wskazówka dla technologów i eksperymentatorów, aby spróbowali wyhodować i zbadać nanodruły wurcytowe z Mn i to InAs, bo dla nich – jak wiadomo – dodatkowo temperatura używana do wzrostu VLS jest znacznie niższa niż dla GaAs.

Podczas czytania rozprawy nasunęło mi się kilka uwag merytorycznych. Główne z nich wymieniam w punktach poniżej, dla ułatwienia ewentualnego ustosunkowania się do nich przez mgr Martę Galicką podczas publicznej obrony:

1. W rozprawie brak jest szerszego uzasadnienia dla zastosowania do opisu preferowanej struktury, w której będzie krystalizował nanodrut, metody *ab initio*. Autorka na str. 2. wymienia stosowane wcześniej podejścia teoretyczne, po czym użycie w doktoracie metody kwituje jednym zdaniem: „Z drugiej strony wydaje się, że obliczenia energii swobodnej nanodrutu, czyli kosztu potrzebnego do uformowania powierzchni bocznej drutu, są wystarczające do określenia stabilności końcowej struktury.” Mnie osobiście nic takiego się nie wydaje, bo przecież drut, szczególnie w metodzie VLS nie powstaje natychmiast, lecz rośnie warstwa po warstwie. I trudno się spodziewać, że nanodrut jest tak przewidywany, że będzie zawczasu wiedział, jaki koszt energetyczny związany jest z uformowaniem w przyszłości konkretnych powierzchni bocznych. Moim zdaniem uczciwsze przedstawienie sprawy powinno być takie, że celem pracy jest zbadanie czy takie podejście, choć na pierwszy rzut oka niemające bardzo głębokiego uzasadnienia, będzie w stanie wytłumaczyć istniejące dane eksperymentalne oraz przewidzieć nowe własności wzrostu nanodrutów. No i oczywiście post factum okazało się, że teoria jest bardzo użyteczna.
2. Brak jest szerszej dyskusji ograniczeń metody, z których autorka musi sobie chyba zdawać sprawę, ale niepotrzebnie obawia się je wyartykułować. Przykładowo, choć praca pretenduje do tłumaczenia eksperymentalnych wzrostów metodą MBE, w oczywisty sposób nie uwzględnia kluczowej roli podłoża. A autorka jest przecież świadoma tej roli skoro na str. 45 i 46 umieszcza zdjęcia SEM nanodrutów pięknie zorientowanych względem tego podłoża (co dowodzi wzrostu epitaksjalnego). Innym przykładem jest fakt, iż zastosowanie podłoża o orientacji (100) pozwala wymusić wzrost nanodrutów III-V wzdłuż kierunku $\langle 001 \rangle$, pomimo, że energetycznie preferowaną osią wzrostu nanodrutów jest kierunek $\langle 111 \rangle$.
3. W pracy autorka odnosi się do wzrostu nanodrutów w warunkach ultra wysokiej próżni (MBE) podkreślając, iż z tego powodu nie trzeba w obliczeniach uwzględniać pasywacji powierzchni nanodrutu. Z kolei, jak pokazano w przypadku wielu materiałów półprzewodnikowych (nie tylko III-V ale też II-VI), ważnym kanałem dostarczania pierwiastków składowych, z których budowany jest nanodrut, jest ich migracja od powierzchni podłoża, po bocznej powierzchni nanodrutu, aż do kropelki eutektyka. Przykładowo, w przypadku wzrostu nanodrutów GaAs podczas wzrostu powierzchnie boczne są cały czas pokryte migrującym Ga i to w obecności As. Mgr Galicka ma tego oczywiście świadomość, ponieważ na Rys. 3.14 pokazuje odpowiedni schemat wzrostu. Tak więc powierzchnie boczne nanodrutu podczas wzrostu nie mają kontaktu z próżnią ale z cienką warstewką ruchliwego Ga. Na moje wyczucie może to powodować różnice w energii powierzchniowej, będącej kluczowym elementem analizy. Jestem ciekaw, czy w ramach użytej metody *ab initio* istnieje możliwość uwzględnienia obecności Ga na powierzchniach bocznych i czy należy się spodziewać, iż może to wpłynąć na wyniki obliczeń.
4. Na stronie 27 autorka pisze iż, „z powodu ograniczeń dostępnych mocy komputerowych średnice nanodrutów ... osiągały maksymalnie 5.5 nm. Z kolei wyniki przedstawiane na Rys. 3.11 kończą się dla $\Phi=3.5$ nm. Dlaczego? Przecież przy dokonywaniu ekstrapolacji przedstawionej na Rys. 3.12. te punkty dla nanodrutów z $\Phi=5.5$ nm byłyby bardzo istotne. Co więcej brakuje mi oszacowania jakie czasy wymagane by były dla policzenia drutów o średnicy większej niż 5.5 nm lub jakie potrzebne by były komputery dla obliczeń w realnych czasach. Zresztą nie bardzo jest oczywiste dla czytelnika (może jest to gdzieś napisane ale ja sam przegapiłem) jakie konkretnie komputery były używane do obliczeń.

5. Jak wspominałem powyżej w rozprawie przedstawione są obliczenia nanodrutów o średnicach poniżej 3.5 nm. Aby dokonać w rozdziale 3.3. oszacowania energii nanodrutów z większymi średnicami autorka rozważa dwa podejścia. Pierwsze z nich opiera się na szacowaniu energii swobodnej na podstawie energii „powierzchni” na jednostkę powierzchni. Wyniki tak otrzymanej energii swobodnej przedstawione są na rysunku 3.11 dla nanodrutów o średnicach do 100 nm i porównane z tymi otrzymanymi z metody *ab initio* w ograniczonym przedziale średnic. Z niezbyt dobrej zgodności wyników (dla nanodrutów o strukturze blendy cynkowej) obu metod w zakresie średnic gdzie obie metody stosowano (tj. $\Phi < 3.5$ nm), autorka stwierdza, iż przybliżona metoda nie może posłużyć do oceny energii nanodrutów o dużych średnicach i że lepiej należy zastosować ekstrapolację. Muszę przyznać, że we mnie, jako eksperymentatorze, taka metoda budzi co najmniej zdziwienie. Jak spojrzeć na rysunek 3.12 ekstrapolacja jest robiona w skali log-log i jest dokonana do wartości $\Phi = 100$ nm, czyli średnic NWs przekraczających 28-ośmio krotnie największe średnice, dla których przeprowadzono obliczenia *ab initio*. Z mojego doświadczenia taka ekstrapolacja jest dość ryzykowna. A na jej podstawie przecież wyciągnięte zostały istotne wnioski co do stabilności strukturalnej nanodrutów (ZB vs. WZ). Ja zupełnie nie widzę przyczyn (poza post factum stwierdzoną zgodnością metody „ekstrapolacji” z wynikami eksperymentalnymi) dla których metoda ekstrapolacji miałaby być lepsza. Przecież jest chyba oczywistym i wielokrotnie „testowanym” w fizyce faktem, iż jedne przybliżone metody dobrze pracują w jednym zakresie parametrów a inne przybliżone metody dobrze pracują w innym zakresie parametrów. No i że zależy to od przyjętych dla danego przybliżenia założeniach. Autorka sama przecież podaje przyczynę, dla której zgodność przybliżenia dla nanodrutów ZB o małej średnicy może być obarczona błędem. Mianowicie metoda ta nie uwzględnia energii zerwanych wiązań w narożach nanodrutu. Ale to ograniczenie staje się przecież coraz to mniej istotne wraz ze wzrostem średnicy nanodrutów. A przybliżenie chcemy przecież stosować właśnie dla nanodrutów o dużych średnicach. Innym oczywistym faktem jest też to, że ekstrapolacja danego przybliżenia daleko poza obszar dostępnych punktów (tu 1.5 rzędów wielkości w Φ) może prowadzić do dużych błędów. Ekstrapolacja zakłada bowiem, że zależność funkcyjna ekstrapolowanej wielkości od zmiennej niezależnej będzie stała w całym zakresie. Czy tutaj jakieś wspierające argumenty istnieją? Dlaczego autorka nie wrysowała „otwartych” punktów (szacowania) z Rys. 3.11. do Rys. 3.12 obok ekstrapolacji. Ja, tak jak pewnie i inni potencjalni czytelnicy rozprawy, bardzo chciałbym taki uzupełniony rysunek zobaczyć.
6. W swoich obliczeniach dotyczących nanodrutów zawierających Mn mgr Galicka przedstawiała wyniki obliczeń zakładające iż Mn znajduje się w różnych położeniach podstawieniowych. Z kolei wiadomo że Mn w GaMnAs często wbudowuje się także w pozycje międzywęzłowe. Jestem ciekaw czy autorka podjęła już jakieś próby tego typu obliczeń i czy są one w ogóle możliwe w ramach stosowanej w pracy metody *ab initio*. Można pewnie sobie wyobrazić, że energetycznie bardziej korzystne będzie umiejscowienie się pojedynczego Mn nie na powierzchni nanodrutu ZB (zamiast w centrum) ale w pozycji międzywęzłowej w centrum. Taka pozycja międzywęzłowa może być też preferowana w przypadku par Mn-Mn (jak to mam miejsce w przypadku warstw GaMnAs, InMnAs czy InMnSb).

Z obowiązku recenzenta na koniec muszę wspomnieć, iż tak jak praktycznie w każdej pracy, tak i w tej nie udało się autorce uniknąć kilku drobnych uchybień. Choć muszę przyznać, że jak na moje własne doświadczenie ilość tych uchybień jest bardzo mała. Dam więc tylko kilka przykładów:

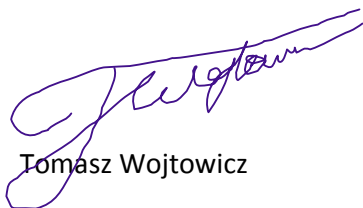
1. Na stronie 8 występuje, mam nadzieję, „błąd drukarski”, gdzie we wzorze (1.2) z lewej strony równania brakuje wykładnika „-1”.
2. Mniej oczywistym dla czytelnika, jest już błąd w opisie osi x na Rys. 3.22. Zgodnie z tym rysunkiem autorka przeprowadziła obliczenia dla średnic nanodrutów aż do 35 nm (pomimo wspomnianych wcześniej ograniczeń związanych z mocą obliczeniową użytych komputerów). Najprawdopodobniejszą przyczyną powstania tego błędu była próba ujednoczenia jednostek długości i używanie systemu miar i wag SI, podczas gdy wyniki obliczeń programu podawane były w Å. Autorka zapewne zmieniła podpis osi na „nm” a zapomniała podzielić opis liczbowy na osi przez 10. Zresztą próba użycia jednostek SI i tak nie do końca się powiodła, gdyż na rysunku 4.7 znowu pojawiają się Å zamiast nm.
3. Na stronie 40, mgr Galicka opisując mechanizm VLS powiela, często występującą, ale też silnie mylącą niespecjalistów, nieścisłość, iż z cienkiej warstwy złota metodą podgrzewania wytwarzane są krople złota. Nie są to krople złota, topiącego się w temperaturze 1064 °C (a więc znacznie wyższej niż używane), ale krople eutektyka Au/Ga. Ma to dodatkowe istotne znaczenie dla zrozumienia faktów eksperymentalnych, ponieważ eutektyk ten powstaje zazwyczaj z Ga pobieranego z podłoża GaAs wskutek jego „rozpuszczania”. Tym samym prowadzi to do powstawania niskoenergetycznych „facetów” o orientacji (111) umożliwiających bardzo dobrze zorientowany w stosunku do podłoża wzrost nanodrutów <111> na podłożach o dowolnej orientacji, np. (001), (110) czy wreszcie (211)B. Ta ostatnia sytuacja jest pięknie zobrazowana na Rys. 3.19.

Oczywiście z racji bycia recenzentem, w znacznej części swojej oceny skupiłem się na pewnych niedociągnięciach pracy i to takich, które wydają się istotne dla eksperymentatora. W podsumowaniu chciałbym jednak jeszcze raz podkreślić, że rozprawę doktorską Pani mgr Marty Anny Galickiej oceniam bardzo wysoko. Większość moich uwag nie ma bowiem wpływu na bardzo istotne wyniki uzyskane w pracy, a jedynie dotyczy samej formy ich prezentacji. Z kolei ogromną zaletą wyników uzyskanych przez Panią Galicką jest ich aktualność oraz fakt, że w ramach przyjętej metody potrafią one dać wskazówki dla dalszych prac eksperymentalnych dotyczących nanodrutów półprzewodnikowych, szczególnie tych zawierających Mn. Oczywiście po lekturze rozprawy Pani Galickiej przychodzą na myśl inne, nierozważne w pracy a bardzo ciekawe i istotne przypadki (jak choćby Mn międzywęzłowy). Ale przecież rozprawa doktorska musi mieć swoje ramy a praca mgr Galickiej jest już i tak bardzo obszerna tematycznie. Dodatkową zaletą recenzowanej rozprawy jest więc właśnie to, iż otwiera ona nowy rozdział w teoretycznych badaniach nanodrutów. Należy mieć nadzieję, iż Pani mgr Marta Galicka te badania, już po uzyskaniu tytułu doktora, będzie dalej kontynuowała i rozwijała. Możliwości finansowego wsparcia takich badań są już zagwarantowane, dzięki uzyskanemu przez mgr Galicką prestiżowemu stypendium START, przyznawanemu przez Fundację na Rzecz Nauki Polskiej dla młodych naukowców.

Na zakończenie należy też podkreślić, iż wartość wyników naukowych uzyskanych przez mgr Galicką w ramach doktoratu została już zweryfikowana przez środowisko naukowe. Po pierwsze prezentowane w doktoracie wyniki zostały opublikowane w siedmiu pracach naukowych, w tym w dwóch pracach, które ukazały się w tak prestiżowym czasopiśmie jak Nano Letters (Impact Factor, IF=12.2). W jednej z prac z Nano Letters Pani Marta Galicka jest pierwszym autorem i praca ta dotyczy ferromagnetyzmu

nanodrutow III-V z Mn, czyli wyników omówionych w rozdziale 4.1 rozprawy doktorskiej. Pani Galicka wygłosiła też sama trzy referaty zaproszone, z których najważniejszy to ten przedstawiony na 4-th Nanowire Growth Workshop w Paryżu w 2009 r. Oprócz tego mgr Galicka wygłosiła pięć prezentacji ustnych i zaprezentowała 10 plakatów na międzynarodowych konferencjach i szkołach. Otrzymała też ona nagrodę zespołową Dyrektora Instytutu Fizyki PAN w 2009 r za udział w publikacji Nano Lett. 9, 1506 (2009) zawierającej jej obliczenia, omówione w rozdziale 3 rozprawy.

W podsumowaniu stwierdzam, że przedstawiona do recenzji rozprawa doktorska zawiera nowe i bardzo wartościowe wyniki naukowe dające istotny wkład do postępu w dziedzinie fizyki nanostruktur półprzewodnikowych. Rozprawę doktorską, pomimo kilku uwag krytycznych dotyczących głównie formy prezentacji wyników, oceniam bardzo wysoko i stwierdzam, że spełnia ona wszystkie wymagania stawiane przez Ustawę o stopniach i tytule naukowym. Dlatego też wnioskuję o dopuszczenie jej do publicznej obrony.



Tomasz Wojtowicz