

dr hab. Andrzej Wysmołek, prof. UW
Wydział Fizyki
Uniwersytet Warszawski
ul. Pasteura 5
02-093 Warszawa
e-mail: Andrzej.Wysmolek@fuw.edu.pl

Recenzja rozprawy habilitacyjnej dr Marty Gładysiewicz-Kudrawiec
Ocena osiągnięć naukowo-badawczych, dorobku dydaktycznego i
popularyzatorskiego,
oraz współpracy międzynarodowej

Dr Marta Gładysiewicz-Kudrawiec przedstawiła jako osiągnięcie naukowe będące podstawą do uzyskania stopnia doktora habilitowanego „monotematyczny cykl publikacji w czasopismach o międzynarodowym zasięgu” pod tytułem: „Modelowanie wybranych właściwości optycznych struktur półprzewodnikowych związków III-V”. Na cykl ten składa się 15 prac opublikowanych w renomowanych czasopismach naukowych.

Z oświadczeń współautorów wynika, że w przeważającej większości ich współudział miał charakter pomocniczy. Ze strony współautorów zajmujących się technologią współudział w powyższych pracach dotyczył szczegółów struktur epitaksjalnych wytwarzanych metodami MBE oraz PAMBE, takich jak skład, szerokości studni kwantowych, tempo wzrostu itp. parametry technologiczne. Podobnie współautorzy prac prowadzący różnorodne badania doświadczalne (spektroskopia rozdzielona w czasie, spektroskopia modulacyjna, pomiary wzmocnienia materiałowego, badania TEM i inne) dyskutowali uzyskane przez siebie wyniki dla struktur półprzewodnikowych, których modelowaniem zajęła się dr Marta Gładysiewicz-Kudrawiec. Współautorzy zajmujący się modelowaniem zadeklarowali pomocniczy wkład dotyczący użytej parametryzacji i stosowalności modeli oraz pomocy w redakcji artykułów. W mojej opinii wszystkie oświadczenia potwierdzają wiodącą rolę dr Marty Gładysiewicz-Kudrawiec w powstawaniu publikacji stanowiących podstawę do uzyskania stopnia naukowego doktora habilitowanego.

Bardzo ważną cechą pracy naukowej dr Marty Gładysiewicz-Kudrawiec jest jej bliska współpraca z grupami doświadczalnymi zajmującymi się technologią oraz badaniami doświadczalnym nanostruktur półprzewodnikowych. Warto podkreślić jest to, że zmieniła ona swoje zainteresowania naukowe odchodząc od badań teoretycznych nadprzewodnictwa, których zwieńczeniem był doktorat z wyróżnieniem. Przejście do zagadnień związanych z modelowaniem struktur półprzewodnikowych wymagało z pewnością dużej determinacji i ogromnego wkładu pracy. Z perspektywy czasu można jednak stwierdzić, że skoncentrowanie się na problematyce

teoretycznej związanej z przyrządami półprzewodnikowymi (lasery, tranzystory, ogniwa słoneczne) przyniósł jej sukces.

Cykl 15 prac oznaczonych jako [H1-H15] można podzielić na trzy obszary: a) wzmocnienia materiałowego w studniach kwantowych (prace [H1-H6]), b) problematyce rozkładu pól elektrycznych w heterostrukturach AlGaIn/GaN (prace [H7-H11]), c) zagadnieniem wpływu jednorodności struktur kwantowych na ich właściwości optyczne (prace [H12-H15]).

Ad a) Zagadnienie wzmocnienia materiałowego w studniach kwantowych jest kluczowe z punktu widzenia konstrukcji współczesnych laserów półprzewodnikowych, pracujących w szerokim zakresie spektralnym. Zmianę zakresu spektralnego można uzyskać, między innymi, poprzez wykorzystanie półprzewodników grupy III-V rozrzedzanych azotem, jak również antymonem i bizmutem. Rozrzedzanie półprzewodników zwykle pogarsza właściwości optycznych struktur kwantowych. Konieczne jest więc znalezienie kompromisu pomiędzy wielkością wzmocnienia i szerokością obszaru spektralnego. Przez długi czas wpływ domieszkowania azotem na strukturę pasmową GaN był przedmiotem bardzo gorącej dyskusji, która sprowadza się do tego, że bardzo prosty model odpychających się pasm energetycznych, zaproponowany W. Shanona, W. Walukiewicza i innych (Phys. Rev. Lett. 1999) świetnie opisywał wyniki doświadczalne, jednak był silnie krytykowany przez szerokie grono fizyków teoretyków. Z perspektywy czasu wydaje się jednak, że bardziej zaawansowane modele dają podobne rezultaty i prostota modelu jest trudna do przecenienia, gdy trzeba zastosować go do opisu złożonych struktur. Zgodnie z opinią zawartą w autoreferacie podstawowym problemem wyznaczenia „wzmocnienia materiałowego w dla studni kwantowych na bazie związków III-V rozrzedzanych azotem jest prawidłowe wyznaczenie dyspersji energetycznej dla poziomów ... w studni kwantowej”. W przypadku typowych półprzewodników do opisu dyspersji stanów pasmowych w półprzewodnikach III-V, do wielu zastosowań, wystarcza 8-pasmowy model *kp*. W przypadku półprzewodników rozcieńczonych azotem, taki model jest jednak niewystarczający. Wydaje się więc naturalne, że do opisu studni kwantowych GaInNAs/GaAs dr Marta Gładysiewicz-Kudrawiec spróbowała zastosować 10-pasmowy model *kp*. Szczególnie cenne wydaje się pokazanie w jakich warunkach prostszy model 8-pasmowy jest wystarczający do obliczenia wzmocnienia optycznego (materiałowego) w strukturach GaInAs/GaAs, a w jakim zakresie zastosowanie modelu 10-pasmowego jest uzasadnione. Okazało się zastosowanie modelu 10-pasmowego konieczne jest do wyjaśnienia, obserwowanego doświadczalnie, spadku wzmocnienia pod wpływem ciśnień hydrostatycznych. Model 10-pasmowy wymaga jednak znajomości parametrów opisujących modyfikację struktury pasmowej wywołanej obecnością azotu. Dlatego w przypadku związków mieszanych z bizmutem (GaInAsSb oraz GaInPbSb) bardziej efektywnym rozwiązaniem okazało się zastosowanie modelu 8-pasmowego, wykorzystującego parametry pasmowe wyznaczone eksperymentalnie. Jest to w mojej opinii godny podkreślenia przykład efektywnej współpracy dr Marty Gładysiewicz-Kudrawiec z grupami eksperymentalnymi. W mojej opinii ważnym osiągnięciem związanym z modelowaniem struktur GaInNAs, GaInAsSb, GaInPbSb z różnymi barierami dopasowanymi sieciowo do podłoża InP, jest wskazanie rozwiązań materiałowych umożliwiających pokrycie zakresu spektralnego 2-3,5 μm , co jest ważne z punktu widzenia ewentualnych zastosowań.

Opis struktur półprzewodnikowych rozcieńczanych bizmutem wprowadza dodatkowe trudności związane z faktem, że w tym przypadku mamy do czynienia z modyfikacją struktury pasma walencyjnego. Z tego względu do opisu wzmocnienia materiałowego dla studni kwantowych GaInAsBi/GaAs wykorzystano model 14-pasmowy. Ważnym wynikiem tych prac było wykazanie, że zmieniając zawartość bizmutu, nie zwiększając naprężeń w studniach, można przesunąć obszar spektralny dobrego wzmocnienia materiałowego z ok. 2 do 4 μm . Wykorzystanie bizmutu może mieć bardzo ważne znaczenie technologiczne - zapobiega niepożądanym z punktu widzenia zastosowań laserowych transformacji struktur GaInAs/GaAs do układu pasm typu drugiego, przy wzroście koncentracji arsenu. Badania teoretyczne przeprowadzone przez dr Martę Gładysiewicz-Kudrawiec wskazują, że odpowiednie domieszkowanie bizmutem umożliwia przesunięcie emisji laserowej w obszar dłuższych fal, przy jednoczesnym zachowaniu układu pasm typu pierwszego. Jest to bardzo interesujący rezultat.

Prace H1-H6 (opublikowane w latach 2013-2016) były cytowane już ponad 30 razy, przy czym praca H1 uzyskała 13 cytowań. W mojej opinii oznacza to, że badania dotyczące wzmocnienia materiałowego zostały zauważone przez środowisko naukowe i stanowią znaczące osiągnięcie naukowe dr Marty Gładysiewicz-Kudrawiec.

Ad. b)

Problematyka związana z rozkładem pól elektrycznych w heterostrukturach AlGaIn/GaN (prace H7-H11) jest bardzo ważna z nie tylko z punktu widzenia struktur laserowych, ale również dla rozwoju technologii tranzystorów dużej mocy opartych na azotkach. Tematyka ta jest obszarem bardzo efektywnej współpracy pomiędzy Instytutem Fizyki Politechniki Wrocławskiej i Instytutem Wysokich Ciśnień PAN w Warszawie. Struktury hodowane w IWC PAN są charakteryzowane różnymi technikami na PWr. Szczególne miejsce zajmują tu metody spektroskopii fotoodbiwowej oraz elektroodbiwowej, które są rozwijane w Instytucie Fizyki PWr od wielu lat. Trudno przecenić użyteczność tych metod do określenia rozkładu i wielkości wbudowanych pól elektrycznych w półprzewodnikowych strukturach warstwowych. W ramach swoich badań dr Marta Gładysiewicz-Kudrawiec podjęła się teoretycznej analizy wpływu różnych parametrów, takich jak położenie poziomu Fermiego na powierzchni struktur półprzewodnikowych, nieintencjonalnego domieszkowania, grubości warstw na rozkład pól elektrycznych oraz koncentrację gazu 2D w strukturach AlGaIn. W mojej ocenie największe osiągnięcie w tym obszarze badań dr Marty Gładysiewicz-Kudrawiec dotyczy określenia położenia poziomu Fermiego na powierzchni GaN, w strukturach GaN(cap)/AlGaIn/GaN, które okazało się niezależne od grubości warstwy AlGaIn i lokowało się ok. 0,5 eV poniżej dna pasma przewodnictwa. Jest to zgodne z danymi doświadczalnymi oraz wynikami obliczeń z pierwszych zasad. Wynik ten został zauważony przez naukowców zajmujących się strukturami azotkowymi – praca [H1] została zacytowana 24 razy. Problem położenia poziomu Fermiego jest też bardzo ważny dla struktur tranzystorowych osadzanych po stronie azotowej. Przeprowadzone obliczenia pozwoliły na wyznaczenie zakresu grubości warstw GaN oraz AlGaIn, przy których na złączu GaN/AlGaIn formuje się dwuwymiarowy gaz elektronowy. Bardzo interesującym efektem, którego opisu teoretycznego podjęła się dr Marta Gładysiewicz-Kudrawiec jest kwantowanie stanów energetycznych w cienkiej warstwie GaN, raportowane w pracach [H7] oraz [H8] i szczegółowo rozpatrzone w pracy [H11].

Badania teoretyczne rozkładu pól elektrycznych w strukturach azotkowych są bardzo ściśle związane z konkretnymi problemami, przed którymi stają technolodzy oraz doświadczalnicy badający te struktury. Dogłębna analiza teoretyczna dotycząca realnych przyrządów (np. tranzystorów) jest bardzo potrzebna. Wyniki teoretyczne uzyskane w tym zakresie przez dr Martę Gładysiewicz-Kudrawiec zakwalifikowałbym jako znaczący wkład w rozwój tej dziedziny badań.

Ad. c)

Zagadnienie niejednorodności składu oraz szerokości studni kwantowych ma kluczowe znaczenie dla opisu własności optycznych i elektrycznych nanostruktur półprzewodnikowych. Problematyka ta jest szczególnie ważna w sytuacji występowania efektów spontanicznej polaryzacji na granicach warstw tworzących studnie kwantowe, które (poprzez powstanie silnych pól elektrycznych) prowadzą do separacji przestrzennej elektronów i dziur. Dla zredukowania tego niepożądanego efektu studnie kwantowe w laserowych strukturach azotkowych są bardzo wąskie. W efekcie niewielkie fluktuacje składu lub szerokości studni prowadzą do znaczących poszerzeń przejść optycznych. W celu wyjaśnienia obserwowanych doświadczalnie poszerzeń optycznych (międzypasmowych i wewnątrzpasmowych) dr Marta Gładysiewicz-Kudrawiec zaproponowała różne podejścia: analityczne, które sprawdziło się dla wąskich studni, gdzie decydujący wpływ na poszerzenia mają fluktuacje szerokości studni oraz podejście probabilistyczne, w którym efekty fluktuacji szerokości i składu (studni i barier) losuje się spośród pewnego zakresu jednorodnych studni o dobrze określonym składzie i szerokości. W drugim przypadku, wyniki symulacji (histogramy) szerokości i energii przejść porównuje się z wynikami pomiarów elektroodbiccia, czy też modulowanej transmisji. Zaproponowany przez dr Martę Gładysiewicz-Kudrawiec model probabilistyczny („studnie losowej”) okazał się przydatny do wyjaśnienia poszerzeń widm fotoluminescencji oraz dyspersji zaników fotoluminescencji badanych w studniach kwantowych InGaN hodowanych na podłożach z objętościowego GaN. Pewien niedosyt budzi w tych badaniach pominięcie efektów rekombinacji bezpromienistej, jednak w autoreferacie podkreślono, że jest to jeden z kierunków rozwijania metody studni losowej, która może być metodą uniwersalną, również w innych układach materiałowych.

Ciekawym przykładem zastosowania metody studni losowej było wyjaśnienie różnicy energii pomiędzy emisją spontaniczną i wymuszoną w laserze emitującym światło zielone, wynikające z fluktuacji pola elektrycznego wywołanego polaryzacją piezoelektryczną (spowodowane dużymi fluktuacjami naprężeń) w strukturach InGaN o dużej zawartości indu.

Wśród cyklu prac [H12, H15] Najbardziej zauważone przez środowisko naukowe są prace [H13] oraz [H14], które uzyskały w sumie 16 cytowań. W mojej opinii potwierdza to znaczenie tych prac dla zrozumienia procesów fizycznych występujących w realnych strukturach laserowych opartych na azotkach.

Podsumowując, cykl prac [H1-H15] stanowiący rozprawę habilitacyjną dr Marty Gładysiewicz-Kudrawiec dokumentuje ważne osiągnięcie naukowe. Należy zauważyć, że wyniki badań związanych z pracami [H1-H15] były prezentowane przez dr Martę Gładysiewicz-Kudrawiec na 17 międzynarodowych konferencjach oraz w ramach seminariów w zagranicznych ośrodkach naukowych. Wśród tych prezentacji było 9 wystąpień ustnych oraz 15 plakatów. Za najważniejsze uznałbym 2 referaty zaproszone: pierwszy pt. „Material gain in dilute nitrides using 8-band and 10-

band models”, wygłoszony na konferencji Energy Materials Nanotechnology, Cancun-Mexico w roku 2015 oraz referat pt. „Influence of AlN layer on electric field distribution in GaN(cap)/AlGaIn/GaN transistor heterostructures”, wygłoszony na International Workshop on Nitrides 2014, który jest jedną z ważniejszych konferencji azotkowych na świecie.

Prace wchodzące w skład cyklu [H1-H15] zostały opublikowane w latach 2010-2016 w renomowanych czasopismach takich jak Appl. Phys. Letters (3), Journal of Applied Physics (5), J. Phys.D (2) i innych. I były cytowane już w sumie ponad 80 razy. To dobry wynik.

Oceniając cały dorobek naukowo badawczy można stwierdzić, że zgodnie z danymi z bazy Web of Science dr Marta Gładysiewicz-Kudrawiec jest współautorem łącznie 57 prac o łącznej liczbie cytowań 380 (254 bez autocytowań). Jej prace zostały zacytowane w 202 artykułach (153 bez autocytowań). Jej indeks Hirscha wynosi 12. Jest to dobry wynik świadczący o ugruntowanej pozycji naukowej.

Pani dr Marta Gładysiewicz-Kudrawiec prowadziła w swojej karierze akademickiej wykłady, ćwiczenia i laboratoria z zakresu fizyki ogólnej, mechaniki kwantowej, fizyki komputerowej oraz kursy specjalistyczne z programowania. Mimo, że nie precyzuje jaki był zakres godzinowy tych zajęć, to jest to szerokie spektrum, świadczące o jej dużym zaangażowaniu w proces dydaktyczny. W swej karierze dr Marta Gładysiewicz-Kudrawiec była opiekunem dwóch prac licencjackich i dwóch prac magisterskich. Szkoda, że w autoreferacie nie podaje jaka była ich tematyka, jednak fakt opieki nad czterema dyplomantami pokazuje, że jej działalność naukowa jest zauważana przez studentów. Dr Marta Gładysiewicz-Kudrawiec aktywnie włączała się w działalność popularyzatorską, w tym w ramach Dolnośląskiego Festiwalu Nauki, wygłaszając między innymi wykłady „Ogniwa słoneczne: budowa, wykorzystanie i ochrona środowiska” (2016), „Eksperyment łańcuchowy” (2013, 2014), które udało mi się znaleźć na stronach internetowych Festiwalu. Uczestniczyła też w organizacji i przeprowadzeniu Międzyszkolnego Konkursu Fizycznego we Wrocławiu. Te osiągnięcia dydaktyczne i popularyzatorskie oceniam jako znaczące.

W swojej karierze naukowej dr Marta Gładysiewicz-Kudrawiec odbyła cztery staże naukowe, trwające w sumie 11 miesięcy, w dwóch ośrodkach naukowych: Laurence Berkeley National Laboratory w USA oraz na Wilfrid Laurier University w Kanadzie. Odbyte staże zaowocowały międzynarodową współpracą naukową, między innymi z dr. Markiem Watrakiem z Department of Physics and Computer Science Wilfrid Laurier University, które obejmują badania teoretyczne studni kwantowych GeSn oraz InGaIn/GaN. W mojej ocenie dotychczasowe doświadczenia we współpracy międzynarodowej dają szansę na ich rozszerzenie w przyszłości. Na podkreślenie zasługuje bardzo dobra współpraca z grupą badawczą z Instytutu Wysokich Ciśnień PAN w Warszawie. Potwierdza to znaczenie pracy badawczej dr Marty Gładysiewicz-Kudrawiec dla rozwoju technologii azotków.

Dr Marta Gładysiewicz-Kudrawiec była zaangażowana w 7 projektów badawczych, w tym w 3 jako kierownik. Aktualnie jest kierownikiem projektu „Struktura pasmowa, wzmocnienie optyczne oraz inne parametry nowoczesnych laserów półprzewodnikowych”, SONATA BIS, finansowanego w kwocie 1 455 700 zł, ze środków Narodowego Centrum Badań w latach 2014-2017. Świadczy to o jej ugruntowanej pozycji środowisku naukowym i dużej samodzielności naukowej.

W mojej opinii, zaprezentowana przez dr Martę Gładysiewicz-Kudrawiec rozprawa habilitacyjna w pełni spełnia wymagania ustawowe konieczne do uzyskania stopnia doktora habilitowanego. Jednocześnie wysoko oceniam pozostałe osiągnięcia naukowo badawcze, które świadczą o jej samodzielności naukowej. Jej dorobek dydaktyczny i popularyzacyjny jest znaczący. Całość w pełni uzasadnia wniosek o nadanie jej stopnia doktora habilitowanego nauk fizycznych w dyscyplinie fizyka. Dlatego wnoszę o dopuszczenie dr Marty Gładysiewicz-Kudrawiec do dalszych etapów przewodu habilitacyjnego.

A handwritten signature in blue ink, appearing to read 'Wypióch', is positioned in the upper right quadrant of the page.