Warszawa, 20. kwietnia 2021 r.

Prof. dr hab. Grzegorz Karczewski
Instytut Fizyki Polskiej Akademii Nauk
al. Lotników 32/46, 02-668 Warszawa

Ocena dorobku naukowego oraz recenzja rozprawy habilitacyjnej doktora Wojciecha Rudno-Rudzińskiego z Politechniki Wrocławskiej

A. Ocena dorobku naukowego dr. Wojciecha Rudno-Rudzińskiego

Dr Rudno-Rudziński pracuje na Wydziale Podstawowych Problemów Techniki Politechniki Wrocławskiej od 2006 roku, początkowo na stanowisku asystenta, a od 2008 roku na stanowisku adiunkta. Jest absolwentem Politechniki Wrocławskiej, studiował na Wydziale Podstawowych Problemów Techniki, który ukończył z wyróżnieniem w 2002 roku pracą magisterską pt.: „Zastosowanie spektroskopii foto-odbiciowej do badania zjawiska intermixingu w laserowych strukturach półprzewodnikowych" wykonaną pod kierunkiem prof. dr. hab. inż. Jana Misiewicza. Prof. Misiewicz był również promotorem pracy doktorskiej Habilitanta. Doktorat z dziedziny nauk fizycznych uzyskał on w 2006 r. za wyróżnioną rozprawę pt.: „Spektroskopia optyczna niskowymiarowych struktur półprzewodnikowych z uwzględnieniem technik pomiarowych o wysokiej rozdzielczości przestrzennej".

Według bazy Web of Sciences na dorobek naukowy Habilitanta składa się 37 publikacji cytowanych 320 razy (274 bez autocytowań). Indeks Hirsha Habilitanta równy jest 10. Dr Rudno-Rudziński prezentował swoje wyniki również konferencjach krajowych i międzynarodowych, 10 z tych prezentacji było prezentacjami ustnymi. Gros artykułów dr. Rudno-Rudzińskiego (26) opublikowanych zostało po uzyskaniem stopnia doktora, co dobrze ilustruje rozwój naukowy Habilitanta. Choć liczba cytowani prac Habilitanta nie jest imponująca trzeba odnotować, że systematycznie rośnie osiągając obecnie poziom ok. 30 cytowań rocznie. Może to świadczyć o rosnącym poziomie naukowym prac dr Rudno-Rudzińskiego lub o podejmowaniu przez niego coraz istotniejszych zagadnień badawczych. Z drugiej strony, znacząca część publikacji Habilitanta była cytowana jednokrotnie lub nie cytowana wcale. Nie jest to zarzut, bowiem jest to zjawisko dość powszechne i dotyczy, przede wszystkim, krótkich komunikatów konferencyjnych. Stwierdzam, że z punktu widzenia statystyki dorobek publikacyjny dr. Rudno-Rudzińskiego jest wystarczający do ubiegania się o stopień doktora habilitowanego.

Przechodząc do strony merytorycznej dorobku naukowego Habilitanta trzeba wyróżnić w nim kilka interesujących pozycji, docenionych i cytowanych przez specjalistów. Poniżej omówię najbardziej

cytowane publikacje, w których Habilitant jest pierwszym autorem, a które nie weszły w skład cyklu 10 publikacji będących osiągnięciem habilitacyjnym.

Najczęściej cytowaną pracą współautorstwa dr. Rudno-Rudzińskiego (36 cytowań) jest praca z 2006 roku opublikowana w Applied Physics Letters pt.: "Photoreflectance-probed excited states in InAs/InGaAlAs quantum dashes grown on InP substrate". Praca ta jest bardzo charakterystyczna dla dorobku Habilitanta, ponieważ dotyczy badań półprzewodnikowych struktur kwantowych o obniżonej wymiarowości zawansowanymi metodami optycznymi. W przypadku tej pracy raportowane są wyniki pomiarów foto-odbicia nanostruktur zawierających tzw. kreski kwantowe InAs/InGaAlAs. Za pomocą pomiarów foto-odbicia wykryte i zidentyfikowane zostały przejścia optyczne związane ze wszystkimi częściami badanej struktury, w tym przejścia optyczne w kreskach kwantowych, zarówno ze stanu podstawowego jak i wzbudzonego. Zaobserwowano wyraźny efekt kwantyzacji przestrzennej wyrażający się przesunięciem energii luminescencji od prawie 2 do 1,5 μm wraz ze zmniejszaniem rozmiaru kresek kwantowych.

Druga najczęściej cytowana praca Habilitanta (30 cytowań) pt.: „Optically probed wetting layer in InAs/InGaAlAs/InP quantum-dash structures" ukazała się rok wcześniej (2005) również w Applied Physics Letters. W pracy badane były takie same nanostruktury zawierające kreski kwantowe, ale uwaga autorów skupiła się warstwie zwilżającej InAs, w szczególności na identyfikacji i charakteryzacji przejść optycznych związanych ze stanem podstawowym w tej warstwie. Stwierdzono, że energia tych przejść jest niezależna od nominalnej grubości warstwy InAs w przeciwieństwie do przejść optycznych związanych z kreskami kwantowymi, które przesuwają się w kierunku czerwieni wraz ze wzrostem rozmiaru kresek. Interpretacja wyników poparta została obliczeniami poziomów energetycznych pokazującymi, że warstwa zwilżająca musi mieć grubość około 2 monowarstw atomowych i że w tak cienkiej studni związany może być tylko jeden stan dla każdego rodzaju nośników, tj. elektronów, ciężkich i lekkich dziur.

Kolejna praca Habilitanta (27 cytowań) dotyczy badań obiektów zero-wymiarowych - kropek kwantowych InAs/GaAs. Praca ta zatytułowana "The formation of self-assembled InAs/GaAs quantum dots emitting at 1.3 μm followed by photoreflectance spectroscopy" ukazała się Journal of Applied Physics w 2007 r. Autorzy badali ewolucję własności optycznych próbek różniących się nominalną grubością warstwy InAs w zakresie od 1 do 2,5 warstw atomowych. Przeanalizowali różne przejścia optyczne oraz ich ewolucję w funkcji grubości warstwy epitaksjalnej InAs i na tej podstawie otrzymali cenne informacje o morfologii badanych struktur, jak np. grubość krytyczną warstwy InAs w GaAs (1,6 ml). Dla próbek, w których warstwa InAs przekraczała grubość krytyczną obserwowano przejścia związane z kropkami kwantowymi. Zależność energii tych przejść od grubości nominalnej InAs wskazuje, że w zakresie grubości 1,7 – 2 ml rozmiary kropek kwantowych zwiększają się a po przekroczeniu grubości 2 ml dodatkowy materiał InAs zwiększa gęstość QD, a nie ich rozmiary. Wskazuje to na istnienie efektu ograniczenia rozmiaru w procesie wzrostu samoorganizujących się kropek kwantowych.

Następną ważną publikacją w dorobku Habilitanta, jest praca z 2009 roku, cytowana 25 razy, opublikowana w JAP pt.: „Room temperature free carrier tunneling in dilute nitride based quantum well - quantum dot tunnel injection system for 1.3 μm". Praca ta, podobnie jak i poprzednia, ma ważny aspekt aplikacyjny, ponieważ badane są w niej struktury kwantowe, w których energie przejść optycznych zlokalizowane są w paśmie 1,3 μm, ważnym dla zastosowań w telekomunikacji. Struktury badane w tej pracy były bardziej złożone niż omawiane poprzednio, ponieważ składały się z dwóch obiektów kwantowych: ze studni kwantowej InGaAsN oraz z warstwy kropek kwantowych. Autorzy wykryli w tych strukturach efekt tunelowego wstrzykiwania nośników ze studni do kropek kwantowych. W wyniku tego wstrzykiwania następuje skrócenie czasu narastania fotoluminescencji w porównaniu z referencyjną strukturą zawierającą wyłącznie kropki kwantowe.

Na koniec tego krótkiego przeglądu dorobku naukowego dr. Rudno-Rudzińskiego trzeba wspomnieć jego najnowszą, niecytowaną jeszcze publikację zatytułowaną „Magneto-Optical Characterization of Trions in Symmetric InP-Based Quantum Dots for Quantum Communication Applications" opublikowaną w tym roku (2021) w Materials. Przytaczam tę publikację, ponieważ różni się ona od pozostałych zarówno obiektem badań jak i metodyką. Obiektem badań w tej pracy były triony zlokalizowane dużych i symetrycznych kropkach kwantowych InP o emisji w trzecim oknie telekomunikacyjnym. Głównym narzędziem badawczym w tym przypadku były metody magnetooptyczne. Wyznaczone zostały parametry trionów, takie jak współczynniki diamagnetyczne w płaszczyźnie kropek i poza płaszczyzną nią oraz współczynniki rozczepienia spinowego g. Autorzy stwierdzili, że wyznaczone eksperymentalnie bardzo małe wartości współczynników g czynią badane kropki obiecującymi dla elektrycznego dostrajania znaku współczynnika g, niezbędnego dla kontroli pojedynczego spinu w zastosowaniach qubitowych.

Tych kilka przykładów z dorobku Habilitanta pokazuje, że on jest sprawnym eksperymentatorem, który potrafi posługiwać się zaawansowanymi metodami spektroskopii optycznej, w szczególności techniką modulacyjnego foto-odbicie, która od lat jest specjalnością fizyków wrocławskich. Efektywnie wykorzystuje te metody do charakteryzacji struktur półprzewodnikowych o obniżonej wymiarowości oraz do badania zjawisk kwantowych zachodzących w takich strukturach. Prace Habilitanta pokazują, że w połączeniu z obliczeniami numerycznymi poziomów energetycznych metody te mogą dostarczać wielu cennych informacji technologicznych, które są niezbędne do prawidłowego projektowania i wykonania struktur kwantowych. Stąd widoczne w dorobku naukowym Habilitanta, zainteresowanie współpracą z nim wielu wiodących ośrodków zajmujących się technologią nanostruktur (jak Uniwersytety w Wurzburgu i Kassel, czy laboratorium w Marccoussi pod Paryżem"). W ośrodkach tych hodowane były próbki do wspólnych badań a wyniki uzyskane przez Habilitanta służyły doskonaleniu technologii. Sprzężenie badań eksperymentalnych z technologią jest cenne i bardzo widoczne w dorobku Habilitanta.

Habilitant współpracował nie tylko z zagranicznymi instytucjami naukowymi, ale również z licznymi firmami komercyjnymi, takimi jak OPTO, France-Telecom, Alcatel (Francja), Mitel Semiconductor AB (Szwecja), Nanoplus, NL Semiconductor, Merge Optics (Niemcy), Bookham Technology PCI (Wielka

Brytania) oraz Modullight (Finlandia). Współprace te odbywały się w ramach realizacji dużych projektów europejskich takich, jak GIFT, ZODIAC, DeLight oraz 5, 6 i 7 Program Ramowy Unii Europejskiej. Ma on zatem duże doświadczenie we współpracy z ośrodkami zagranicznymi oraz w pracy zagranicą, odbył bowiem zagraniczne staże naukowe w Strasbourgu (2 miesiące), roczny staż po-doktorki w Lyonie oraz krótki staż w Berlinie. Ponadto dr Rudno-Rudziński był również wykonawcą w 7 projektach polskich, w tym w dwu projektach Opus, Harmonii, Maestro etc.

Habilitant jest doświadczonym nauczycielem akademickim o czym świadczą liczne prowadzone przez niego wykłady, ćwiczenia i pracownie studenckie. Jest doświadczonym organizatorem i aktywnym popularyzatorem nauki.

Reasumując uważam, że poziom naukowy prac dr. Rudno-Rudzińskiego, jego bogate doświadczenie we współpracy międzynarodowej, w realizacji zadań badawczych, dydaktyce etc. predestynują go do dalszej, samodzielnej pracy naukowej.

B. Recenzja rozprawy habilitacyjnej dr. Rudno-Rudzińskiego pt.: „Badania zjawisk zachodzących w obszarach aktywnych struktur telekomunikacyjnych laserów półprzewodnikowych wykorzystujących tunelowanie między studnią kwantową a kropkami kwantowymi"

Rozprawa habilitacyjna dr. Wojciecha Rudno-Rudzińskiego pt.: „Badania zjawisk zachodzących w obszarach aktywnych struktur telekomunikacyjnych laserów półprzewodnikowych wykorzystujących tunelowanie między studnią kwantową a kropkami kwantowymi" składa się z cyklu 10 artykułów naukowych opublikowanych w renomowanych pismach specjalistycznych o zasięgu światowym. Wszystkie artykuły habilitacyjne są wieloautorskie. Trzeba podkreślić wszakże, że dr Rudno-Rudziński jest pierwszym autorem 9 z nich. Artykuły cyklu opublikowane były w następujących czasopismach: po dwa w Applied Physics Letters (IF=3,55), Semiconductor Science and Technology (IF=1.72) i Physica Status Solidi (a) (IF= 1.25), po jednym w Physical Review B (IF=3.76), Optica Applicata (IF=0.36), APl Advances (IF=3/52) oraz Scientific Reports (IF=4.01). Wszystkie wymienione czasopisma należą niewątpliwie do wiodących w dziedzinie fizyki materii skondensowanej, w szczególności w fizyki stosowanej. Według oświadczeń współautorów wkład Habilitanta w powstanie tego cyklu habilitacyjnego był wiodący. Polegał on na przeprowadzeniu większości raportowanych pomiarów, w tym foto-odbicia, fotoluminescencji i wzbudzania fotoluminescencji, analizie danych doświadczalnych, interpretacji wyników w oparciu o symulacje numeryczne, przygotowanie manuskryptów i prezentacji. Habilitant miał również znaczący wkład w opracowanie koncepcji i zaplanowanie badań.

Dr Rudno-Rudziński opatrzył artykuły składające się na rozprawę habilitacyjną obszernym wstępem, który zasługuje na uwagę. Niewątpliwą zaletą tego wprowadzenia jest jego charakter, szeroko i

przystępnie przedstawiający istotę zjawisk, które były przedmiotem badań habilitanta. W szczególności, część wstępna tego wprowadzenia poświęcona jest podstawom fizycznym i opisowi działania laserów półprzewodnikowych, których obszar czynny zbudowany jest z kropek kwantowych. Autor opisuje szczegółowo zalety takich laserów, ale również wymienia problemy jakie ograniczają wydajność takich urządzeń. Rozwiązaniem tych problemów może być zastosowanie struktur hybrydowych, składających się ze studni kwantowej oraz warstwy kropek kwantowych sprzężone kwantowo-mechanicznie przez cienką barierę tunelową. Zgodnie z tą koncepcją obszar czynny lasera tworzy studnia kwantowa, służąca jako rezerwuar nośników oraz sprzężona z nią warstwa kropek kwantowych będąca emiterem. Koncepcja ta nie jest nowa, ale ponieważ jest ona trudna do realizowania w praktyce, jej dopracowanie wymaga dalszych badań. Głównym zagadnieniem, wokół którego koncentrowały się prace cyklu habilitacyjnego, były właśnie problemy związane z praktyczną realizacją takich sprzężonych struktur w różnych systemach i konfiguracjach materiałowych. Głównym celem tych prac było zaprojektowanie struktur (dobór materiałów, grubości warstw etc.), w których stan podstawowy układu zlokalizowany jest w warstwie kropek kwantowych, natomiast wyższe stany związane znajdują się w studni kwantowej i oddzielonej energetycznie od stanu podstawowego o energię fononu optycznego. Dodatkową komplikacją zagadnienia był wymóg związany z zastosowaniem takich struktur w laserach półprzewodnikowych mianowicie, ażeby emisja optyczna z takiej struktury miała energię odpowiadającą tzw. oknom telekomunikacyjnym.

W rezultacie szerokich badań raportowanych w cyklu artykułów habilitacyjnych dr Rudno-Rudziński uzyskał szereg cennych wyników, dotyczących różnych systemów materiałowych i różnych struktur. Przede wszystkim, na podstawie analizy pomiarów optycznych potrafił opisać rozkład stanów energetycznych w badanych obiektach. Wiedza o stanach energetycznych jest niezbędna do poprawnego projektowania i wytwarzania obszarów aktywnych laserów wykorzystujących efekt tunelowego wstrzykiwania nośników w układzie studnia-kropki kwantowe. Habilitant wykazał, że obecność studni kwantowej w badanych strukturach, poprzez modyfikację naprężeń wywołaną obecnością studni, ma duży wpływ na morfologię i własności kropek kwantowych. Efekt ten należy uwzględnić podczas projektowania struktur, aby stosownie skorygować warunki wzrostu i wynikającą z tego morfologię kropek oraz ich stany energetyczne. W przypadku odwrotnej kolejności warstw modulacja kształtu powierzchni wywołana obecnością kropek oraz zmiana rozkładu naprężeń modyfikują potencjał studni. Na tej podstawie Habilitant doszedł do wniosku, że najłatwiejszy do kontrolowania jest wzrost kropek nad studnią dopasowaną sieciowo do podłoża, co w praktyce dla okien telekomunikacyjnych zawęża wybór materiału studni do trójskładnikowego stopu In0,53Ga0,47As. Alternatywami pozwalającymi na większy zakres inżynierii pasm są stopy czteroskładnikowe, np. InGaAlAs lub InGaAsP, których wzrost jest jednak trudniejszy do precyzyjnego kontrolowania. Obecność studni wpływa również na kropki kwantowe poprzez sprzężenie kwantowo-mechaniczne, które efektywnie poszerza potencjał kropek, obniżając energię stanu podstawowego i w konsekwencji podstawowego przejścia optycznego. Ten efekt również musi zostać uwzględniony przy projektowaniu sprzężonych struktur.

Habilitant zajmował się badaniem nieciągłości pasm na granicach różnych materiałów. Pokazał, że zbyt głębokie studnie potencjału mogą powodować przejścia skośne w przestrzeni rzeczywistej, co znacznie wydłuża czas zaniku fotoluminescencji. W przypadku układu kropek kwantowych InxGa1-xAs/GaAs ze studnią InyGa1-yAs może to doprowadzić do sytuacji, w której najniższy stan elektronowy jest przestrzennie zlokalizowany poza warstwą kropek. Natomiast dla kropek kwantowych InAs/In0.53Ga0.23Al0.24As ze studnią z In0,53Ga0,47As stan dziurowy może zostać zlokalizowany w studni. Oba skrajne przypadki są niekorzystne dla uzyskania wydajnej emisji z kropek kwantowych wynikającej z tunelowego wstrzykiwania nośników.

Habilitant zbadał rolę bariery tunelowej oddzielającej studnie od warstwy kropek kwantowych. Szerokość bariery, i w mniejszym stopniu jej wysokość, determinują siłę sprzężenia, a co za tym idzie wydajność procesu wstrzykiwania tunelowego między częścią studniową i kropkową. Stwierdził, że dla barier o szerokości 10 nm studnia w kropki zachowują się niezależnie od siebie. Natomiast gdy bariera jest zbyt wąska (mniejsza od 2 nm) funkcje falowe elektronów stają się zbyt rozciągle i obejmują zarówno studnie jaki i kropki. Ponadto parametry bariery maja wpływ na strukturę stanów związanych w studniach potencjału, a więc także na energię podstawowego przejścia optycznego oraz na separację energetyczną stanów w studni i kropkach. Są to istotne informacje, które trzeba uwzględnić na etapie projektowania struktury.

Następnym zagadnieniem badanym i analizowanym w pracach habilitacyjnych dr. Rudno-Rudzińskiego był wpływ zależnej od temperatury populacji fononów na wydajność wstrzykiwania nośników ze studni do kropek kwantowych. Habilitant pokazał, że w wyższych temperaturach możliwa jest ucieczka nośników z kropek do studni, co skutkuje rosnącą intensywnością emisji ze studni, a zatem jest niekorzystne z punktu widzenia przyrządu bazującego na emisji z kropek kwantowych. stanu podstawowego. W niższych temperaturach, gdy populacja fononów jest mała ten proces nie zachodzi. Habilitant pokazał również, że proces tunelowania nośników ze studni do kropek jest selektywny, co prowadzi do zawężenia linii emisyjnej. Selektywność procesu tunelowania wynika z faktu, że pośredniczą w nim fonony o ściśle określonej energii. Przy tej okazji Habilitant wykazał, że lokalizacja stanów związanych w studni kwantowej oma duże znaczenie dla działania lasera opartego na strukturze tunelowej. Stany silnie zdelokalizowane (o mieszanym charakterze 0D-2D) mogą bowiem służyć jako rezonansowe kanały transferu nośników.

Jak pokazuje powyższy przegląd, rozprawa habilitacyjna dr. Rudno-Rudzińskiego jest z jednej strony dość monotematyczna – dotyczy właściwie jednego typu struktur kwantowych, zawierających studnię kwantową sprzężoną z warstwą kropek kwantowych. Z drugiej strony jednak struktury, którymi zajmował się Habilitant były bardzo różnorodne – zrobione były z różnych półprzewodników, miały rożne konstrukcje, zachodziły w nich różnie zjawiska fizyczne. Każdy rodzaj przyrządu wymagał indywidualnego podejścia eksperymentalnego i rachunkowego. Dr Rudno-Rudziński dobrze poradził sobie z badaniem i opisem tych różnorodnych struktur.

Podsumowując, w swojej rozprawie habilitacyjnej dr Wojciech Rudno-Rudziński przedstawił szereg interesujących wyników dotyczących własności fizycznych sprzężonych struktur studnia-kropki kwantowe, będących obszarem czynnym laserów półprzewodnikowych. Jego prace te są ważne zarówno z punktu widzenia badań podstawowych jak i z punktu widzenia zastosowań. Uważam, że przedstawiona rozprawa habilitacyjna stanowi istotny wkład autora w uprawianą dziedzinę nauki. Stwierdzam, że rozprawa spełnia warunki określone w ustawie i rozporządzeniu o stopniach naukowych. Ponieważ zarówno dorobek naukowy jak i rozprawę habilitacyjną dr. Wojciecha Rudno-Rudzińskiego oceniam pozytywnie, wnoszę o dopuszczenie habilitanta do dalszych etapów przewodu habilitacyjnego.

Grzegorz Karczewski