

Ocena osiągnięcia naukowego i dorobku dr. inż. Marcina Syperka w związku z postępowaniem o nadanie stopnia doktora habilitowanego

1. Sylwetka naukowa habilitanta

Dr inż. Marcin Syperek obronił magisterium w październiku roku 2004 na Politechnice Wrocławskiej. W styczniu 2005 roku rozpoczął staż na Uniwersytecie w Dortmundzie w grupie prof. Manfreda Bayera. Spędził tam trzy i pół roku, a uzyskane wyniki stały się materiałem jego pracy doktorskiej. Rozprawę pod tytułem *Electron and hole spin coherence in confined semiconductor structures* obronił we wrześniu 2008 roku. Promotorami pracy byli prof. Manfred Bayer oraz prof. dr hab. Jan Misiewicz z Politechniki Wrocławskiej. Po obronie doktoratu pan Syperek został zatrudniony na Politechnice Wrocławskiej, początkowo na Wydziale Elektroniki, Mikrosystemów i Fotoniki, a następnie na Wydziale Podstawowych Problemów Techniki, gdzie pracuje do dziś.

Zainteresowania naukowe dr inż. Syperka koncentrują się wokół dynamicznych właściwości elektronów, dziur i ekscytonów w nanostrukturach półprzewodnikowych, zwłaszcza takich które mogą znaleźć zastosowania jako źródła światła w tzw. oknach telekomunikacyjnych, czyli w bliskiej podczerwieni. Jest to tematyka którą habilitant podjął w czasie pobytu w Dortmundzie, a którą następnie rozwinął po powrocie do Wrocławia. Habilitant stworzył wtedy unikalne na skalę kraju układy eksperymentalne do badania dynamiki fotoluminescencji oraz absorpcji przejściowej zoptymalizowane na zakres widmowy bliskiej i średniej podczerwieni. Po uzyskaniu doktoratu odbył jeszcze dwa staże zagraniczne (dłuższe niż miesiąc) - jeden w Dortmundzie, a drugi na Uniwersytecie Nauki i Technologii w Taipei. Kariera naukowa dr inż. Syperka jest więc bardzo ściśle związana z Politechniką Wrocławską, ale - jak opiszę poniżej - jego badania naukowe odbywają się we współpracy z innymi ośrodkami naukowymi. Opublikował 72 artykuły, które były cytowane łącznie 652 razy. Jego indeks Hirscha wynosi 14. Dr Syperek jest laureatem nagród Rektora Politechniki Wrocławskiej, stypendystą Fundacji na Rzecz Nauki Polskiej, stypendystą w ramach programu Młoda Kadra PWR, a także stypendystą Niemieckiej Agencji Wymiany Akademickiej.

2. Omówienie i ocena osiągnięcia habilitacyjnego

Tematem cyklu prac zgłoszonego jako osiągnięcie habilitacyjne są właściwości dynamiczne nośników i ekscytonów w półprzewodnikowych kropkach kwantowych emitujących światło w zakresie bliskiej podczerwieni. Nanostruktury te, wytwarzane metodami epitaksjalnymi, są intensywnie badane w wielu ośrodkach na świecie od kątów możliwych zastosowań jako źródeł

światła pracujących w zakresie spektralnym odpowiadającym tzw. oknom telekomunikacyjnym, czyli zakresom transmisji światłowodów krzemionkowych używanych obecnie w telekomunikacji. Tematyka habilitanta stanowi część bardzo gwałtownie rozwijającej się dziedziny fizyki półprzewodników, w której badacze koncentrują się na zrozumieniu właściwości spektroskopowych nanostruktur i, w konsekwencji, na możliwości projektowania ich pod kątem konkretnych zastosowań. Badania jakie habilitant podjął stanowią próbę rozwiązania konkretnych problemów technologicznych związanych z wytworzeniem lub optymalizacją wspomnianych źródeł światła. W zgłoszonym cyklu prac habilitant udziela odpowiedzi na konkretne pytania związane z właściwościami nośników ładunku w kropkach, odpowiedzi które mają posłużyć nie tylko lepszemu zrozumieniu fizyki tych układów, ale które są potrzebne dla właściwego modelowania i projektowania konkretnych urządzeń. Osiągnięcie naukowe habilitanta wpisuje się zatem w kierunek badań, którym zainteresowani są nie tylko naukowcy prowadzący badania podstawowe, ale także inżynierowie projektujący lub wytwarzający realne urządzenia. W pracach składających się na osiągnięcie (jak również w autoreferacie), habilitant wyraźnie podkreśla jaki wpływ mają jego wyniki na rozwój urządzeń opartych o badane przez niego struktury. W moim przekonaniu nie jest to pusty marketing, ale odpowiedzialna ocena przydatności badanych materiałów w zastosowaniach. Chociaż większość eksperymentów przeprowadzona była w temperaturach kriogenicznych, habilitant uzasadnia ich podjęcie z punktu widzenia rozwiązania konkretnego technologicznego problemu i zaznacza, czego należy się spodziewać w przypadku urządzenia pracującego w temperaturze pokojowej.

Badania stanowiące osiągnięcie prowadzone były na próbkach wyhodowanych w laboratoriach grupy prof. Forchela (Uniwersytet w Würzburgu), grupy prof. Reithmaiera (Uniwersytet w Kassel), grupy prof. Michlera (Uniwersytet w Stuttgarcie), grupy prof. Hoeflinga (Würzburg i St. Andrews) oraz przez F. Lelarge'a (z laboratorium w Marcoussis). Są to wiodące ośrodki europejskie zajmujące się wytwarzaniem i badaniem nanostruktur półprzewodnikowych ze związków pierwiastków grup III i V. Habilitant miał zatem do dyspozycji wysokiej jakości próbki. Należy podkreślić, że chociaż badania habilitanta odbywały się we współpracy z wyżej wymienionymi świetnymi ośrodkami, część pomiarowa badań prowadzona była prawie wyłącznie na Politechnice Wrocławskiej (z wyjątkiem badań jakie habilitant przeprowadził w czasie stażu na Uniwersytecie w Dortmundzie). Było to możliwe dzięki stworzeniu przez habilitanta warsztatu doświadczalnego specjalnie dedykowanemu badaniom dynamik nośników i ekscytonów w zakresie widzialnym i bliskiej/średniej podczerwieni.

Jako osiągnięcie naukowe habilitant zgłosił cykl dziewięciu prac. Cztery z nich zostały opublikowane w *Physical Review B*, pięć w *Applied Physics Letters*. We wszystkich oprócz jednej habilitant jest pierwszym autorem. W pracach tego cyklu habilitant zaplanował badania spektroskopowe, większość z nich przeprowadził, zinterpretował oraz napisał pierwsze wersje tych manuskryptów, których był pierwszym autorem. Uczestniczył także w proponowaniu koncepcji obliczeń teoretycznych służących interpretacji wyników. Nie ma wątpliwości, że habilitant miał wiodący wkład w zgłoszone prace. Jego deklarowany procentowy wkład własny w powstanie prac waha się w okolicach 50% i sędzę, że może być niedoszacowany.

Prace [H1], [H2] i [H3] dotyczą kropek kwantowych z arsenku indu wyhodowanych na podłożach z fosforu indu. Kropki z InAs są zazwyczaj hodowane na podłożach z GaAs i ten układ materiałowy jest bardzo dobrze zbadany. Zakres długości fali emisji tych kropek leży w okolicy 1 mikrona. Habilitant podjął badania kropek z InAs wyhodowanych w innych warunkach: w barierach dopasowanych sieciowo do podłoża z InP. W takich warunkach niedopasowanie sieciowe między materiałem kropki i bariery jest znacznie mniejsze niż w systemie InAs/GaAs co niesie za sobą dwie ważne konsekwencje. Po pierwsze powstałe kropki są większe, więc długość fali emitowanego przez nie światła jest większa i może być dopasowana do okolic 1.5 mikrona, czyli do tzw. pasma C trzeciego okna telekomunikacyjnego. Większy rozmiar powoduje także zupełnie inne warunki uwięzienia kwantowego nośników w potencjale kropki, a więc inne szybkości relaksacji międzypasmowej i rekombinacji promienistej. Po wtóre, powstałe kropki są w różnym stopniu wydłużone i asymetria ta wpływa na ich strukturę energetyczną i właściwości spektroskopowe. W pracy [H1] habilitant porównał wyniki pomiaru rozdzielonej czasowo fotoluminescencji i absorpcji przejściowej zespołu kropek w celu uzyskania odpowiedzi na pytania o to, jak szybko odbywa się relaksacja międzypasmowa w tych strukturach, jaki jest czas życia ekscytonów i jak te parametry zależą od rozmiaru kropki. Uzyskane wyniki pozwoliły stwierdzić, iż czasy życia ekscytonu są istotnie dłuższe niż w "klasycznym" układzie InAs/GaAs ze względu na słabsze związanie nośników potencjałem kropki. Zaobserwowano także, iż charakterystyczny czas relaksacji wewnątrzpasmowej rośnie od 40 do 250 ps wraz z obniżaniem energii próbkowanego stanu wzbudzonego. Wynik ten został zinterpretowany w oparciu o obliczenia teoretyczne, które wskazały, że zmniejszenie energii kwantyzacji wymusza stosunkowo nieefektywną relaksację przez niskoenergetyczne wzbudzenia fononowe.

Kwestie szybkości rekombinacji i relaksacji wewnątrzpasmowej zostały także podjęte w pracy [H3], gdzie została przedstawiona obszerna analiza tych parametrów w szerokim zakresie energii emisji. W szczególności przedstawione wyniki pozwoliły zrozumieć dynamikę fotoluminescencji z kropek charakteryzujących się pośrednim reżimem uwięzienia kwantowego. Ponadto pokazano jak asymetria nanostruktury wpływa na charakter stanu podstawowego. W oparciu o model teoretyczny wykazano, że domieszka stanu lekko-dziurowego oraz anizotropowe oddziaływanie elektron-dziura skutkują różnymi siłami oscylatora dla przejść optycznych w dwóch prostopadłych polaryzacjach liniowych. Efekt ten został eksperymentalnie potwierdzony poprzez pomiar polaryzacji liniowej fotoluminescencji i jej zależności od gęstości pobudzania. Wnioski z pracy [H3] mogą być uogólnione na inne systemy materiałowe, co stanowi o jej wysokiej wartości dla środowiska naukowców badających świecenie obiektów kwantowych. Można żałować, że istnienie dwóch stanów ekscytonowych rozszczepionych przez oddziaływanie wymienne i mających różne siły oscylatora nie zostało bezpośrednio potwierdzone w pomiarze widma pojedynczej kropki kwantowej. Taki eksperyment jednak jest prawdopodobnie bardzo trudny ze względu na dużą gęstość powierzchniową badanych kropek.

Problem relaksacji do stanu podstawowego w tych nanostrukturach został podjęty w pracy [H2], gdzie habilitant badał możliwość wytworzenia nierównowagowej polaryzacji spinowej poprzez odpowiednio spolaryzowane wzbudzenie. Okazało się, że w przypadku pobudzania nierezonansowego obserwuje się jedynie polaryzację związaną z asymetrią struktury, opisaną

szczegółowo w pracy [H3]. Inicjalizacja spinu przez dwuwymiarowe stany w warstwie zwilżającej pozwoliła na obserwację polaryzacji spinowej stanu podstawowego, ale wielkość tej wytworzonej światłem polaryzacji wyniosła tylko około 20%. Natomiast zastosowanie pobudzenia kwazi-rezonansowego z udziałem rozpraszania na fononach podłużnych optycznych doprowadziło do wytworzenia polaryzacji spinowej większej o kolejne 20%. Autorzy oszacowali jej czas życia na leżący w granicach 15 ns. Ze względu poznawcze te badania są istotne dla zrozumienia procesów relaksacji spinu i energii, i ich dynamiki w asymetrycznych kropkach. Z punktu widzenia zastosowań w pamięciach spinowych dostarczają istotnych (choć niezbyt pozytywnych) informacji o trwałości polaryzacji spinowej.

Kluczowe dla zastosowania kropek w optoelektronice jest zapewnienie efektywnego wychwytywania przez nie nośników. Ponieważ gęstość stanów elektronowych związanych z warstwą kropek jest niewielka, w celu zwiększenia efektywności wychwytu zaproponowano struktury hybrydowe ze studnią kwantową, gdzie gęstość stanów jest duża. Habilitant badał takie struktury w pracach [H4], [H6] i [H9]. W czasie podejmowania tych prac w literaturze dominowało wyobrażenie o układzie sprzężonym będącym sumą dwóch podsystemów o różnej wymiarowości. Prace habilitanta pokazały jednoznacznie, że w rzeczywistości sprzężenie tunelowe między studnią i kropkami prowadzi do tak istotnej hybrydyzacji stanów elektronowych, że rozważanie osobno tych podsystemów nie ma sensu. Wspomniane prace opisują bardzo rzetelnie zaprojektowane eksperymenty, w których właściwości spektroskopowe układu sprzężonego porównywane są z układem referencyjnym zawierającym tylko kropki kwantowe. Wnioski wsparte są obliczeniami teoretycznymi modelującymi strukturę energetyczną sprzężonych układów. W pracy [H4] pokazano, że istotnie badana struktura charakteryzuje się zwiększoną efektywnością wychwytu nośników, ale zarówno relaksacja wewnątrzpaśmowa, jak i rekombinacja są spowolnione. Rachunki pokazały, że dzieje się tak dlatego, że oba procesy wymagają relaksacji pomiędzy stanami zlokalizowanymi przestrzennie w innym obszarze struktury. Podobne spowolnienie relaksacji do stanu podstawowego kropek zostało zaobserwowane w pracy [H6] i zinterpretowane w oparciu o rachunki modelowe jako skutek powolnego tunelowania między studnią i kropkami. Praca [H9] zawiera porównanie dynamiki fotoluminescencji dla serii układów hybrydowych różniących się głębokością i szerokością studni kwantowej. Habilitant wskazał jak te parametry wpływają na hybrydyzację stanu podstawowego oraz jaki może być ich wpływ na działanie realnych urządzeń. Jego wnioski są poparte wynikami badań nad laserami z wstrzykiwaniem tunelowym opublikowanymi uprzednio przez innych autorów.

Zagadnieniem oddziaływania kropek z otoczeniem habilitant zajął się także w pracy [H7], w której badał kropki z materiału stopowego InGaAs. Obecność galu miała na celu zwiększenie siły oscylatora przejścia optycznego z kropki, co z kolei jest ważne dla uzyskania silnego sprzężenia wzbudzenia z modem wnęki rezonansowej. Obniżona zawartość indu skutkuje powstaniem kropek o silnej asymetrii kształtu (podobnie jak w opisywanym powyżej układzie dopasowanym sieciowo do podłoż z InP), a także do wytworzenia istotnej liczby zero-wymiarowych defektów w warstwie zwilżającej. Habilitant pokazał, że obecność tych stanów prowadzi do istotnej modyfikacji dynamiki fotoluminescencji, która zostaje w tym wypadku zdeterminowana przez zależne od temperatury procesy migracji nośników pomiędzy zero-wymiarowymi stanami w warstwie zwilżającej i w

warstwie kropek. Procesy te zostały opisane szczegółowym modelem teoretycznym wspierającym wnioski uzyskane z badań doświadczalnych.

Dostrojenie długości fali światła emitowanego przez kropki z InAs do okien telekomunikacyjnych można uzyskać także przez zastosowanie bariery ze stopu GaInNAs o niewielkiej zawartości azotu. Warstwa ta może też stanowić studnię kwantową zwiększającą efektywność wychwytu nośników. W pracy [H5] habilitant zaprezentował wyniki badań dynamiki fotoluminescencji ze struktury, w której kropki także zawierają niewielkie ilości atomów azotu. Badania te były bezpośrednio związane z rozwojem urządzeń laserowych działających w oparciu o kropki z InNAs, dla których procesy relaksacji energii nośników nie były wcześniej zbadane. Habilitant pokazał jak optymalizacja procesu wzrostu poprawia wydajność świecenia, jak wpływa na rozmiar kropek i prowadzi do dostrojenia długości fali emisji do długości fali 1.3 mikrona (drugie okno telekomunikacyjne).

Praca [H8] dotyczy nieco innego tematu niż pozostałe prace cyklu, chociaż też wpisuje się w badania właściwości dynamicznych nośników w kropkach kwantowych z InP. W pracy [H8] habilitant jest zainteresowany odpowiedzią na pytanie o czas defazowania precesji spinów elektronów i dziur. Informację o nim uzyskuje poprzez pomiar zjawiska Kerra - skręcenia płaszczyzny polaryzacji światła odbitego od próbki wywołanego polaryzacją spinową nośników. Pomiar w polu magnetycznym dostarcza informacji o czynnikach Landégo (g -czynnikach) dla elektronów i dziur, i ich anizotropii w płaszczyźnie kropek. W pracy [H8] zaobserwowano, że g -czynnik dla elektronu jest izotropowy, jak należało się spodziewać w związku z symetrią typu s jego funkcji falowej. Dla dziur związanych w kropkach, funkcja falowa ma zazwyczaj symetrię typu p i autorzy pracy (jak i czytelnicy) spodziewali się anizotropii g -czynnika dziurowego w płaszczyźnie kropki. Jednak bardzo szczegółowe badania zależności skręcenia Kerra od kąta w płaszczyźnie kropki pokazały, że g -czynnik dziurowy jest również izotropowy. Autorzy argumentują, iż efekt ten jest spowodowany bardzo słabym uwięzieniem kwantowym dziur w kropkach z InP w barierach z GaInP. Pomiar zjawiska Kerra pozwala na rejestrację precesji spinów elektronów i dziur w poprzecznym polu magnetycznym i pozwala wyznaczyć czasy defazowania. W przypadku elektronów jest ono powodowane niejednorodnością elektronowych g -czynników, jak bardzo przekonująco pokazują wyniki doświadczalne. W przypadku dziur problem ten jest bardziej skomplikowany, gdyż szybkość defazowania dziur nie zależy od zewnętrznego pola magnetycznego. Ponieważ odbywa się ono znacznie szybciej niż dla elektronów (w zakresie niezbyt wysokich pól magnetycznych), autorzy sugerują, że przyczyną defazowania jest oddziaływanie spin-orbitalne, które nie zostało osłabione przez trójwymiarowe uwięzienie kwantowe jak w wypadku elektronów. Interpretacja ta jest zatem spójna z obserwacją izotropowego g -czynnika dziur powodowanego bardzo płytkim potencjałem wiążącym w paśmie walencyjnym.

Jak wynika z powyższego omówienia, prace zgłoszone przez habilitanta jako osiągnięcie naukowe stanowią spójny i jednotematyczny cykl dotyczący procesów relaksacji spinu i energii nośników w szczególnych nanostrukturach o potencjalnych zastosowaniach w telekomunikacji. Gdybym miał jednym słowem określić ten cykl, to powiedziałbym że są to prace potrzebne, udzielające odpowiedzi na konkretne pytania związane z optymalizacją badanych materiałów dla

potrzeb zastosowań. Ta ocena może być poparta całkowitą liczbą cytowań zgłoszonych prac, która wynosi (na dzień 24 listopada) 75, a należy pamiętać że dwie ze zgłoszonych prac zostały opublikowane w ciągu ostatniego roku. Nie są to prace inżynierskie. Publikacje stanowiące osiągnięcie habilitanta zawierają istotną analizę fizyki badanych układów. Wnioski w nich zawarte mogą w części zostać przeniesione na podobne układy. Na przykład kropki kwantowe z CdTe hodowane w barierach z ZnTe podobnie jak kropki z InP charakteryzują się słabym uwięzieniem kwantowym dziur, więc spodziewałbym się dla podobnych efektów, jak opisane przez habilitanta. Także koncepcje badań jakie habilitant zaproponował mogą zostać użyte do badań podobnych układów.

3. Ocena pozostałego dorobku naukowego

Po uzyskaniu stopnia doktora, oprócz prac zgłoszonych jako osiągnięcie naukowe, habilitant opublikował 42 inne prace. W szczególności habilitant badał lokalizację nośników w kwazi-zerowymiarowych strukturach wytwarzanych w materiałach objętościowych i studniach kwantowych oraz dynamikę nośników w studniach drugiego rodzaju. Ponadto, uczestniczył w badaniach zjawisk związanych z generacją pojedynczych fotonów i par splątanych fotonów z nanostruktur zerowymiarowych. Chociaż pojedyncze fotony na żądanie są uzyskiwane z kropek kwantowych wytwarzanych różnymi technikami z różnych materiałów, bardzo mało jest doniesień o ich generacji w "telekomunikacyjnych" długościach fal. Doniosłość prac nad źródłami pojedynczych fotonów, w których habilitant uczestniczył, jest odzwierciedlona w wysokiej liczbie ich cytowań. Warto dodać, że badania te wymagały zastosowania zaawansowanych, chłodzonych helem nadprzewodzących detektorów pojedynczych fotonów, a więc były trudniejsze w realizacji od poszukiwań takich źródeł w zakresie widzialnym. Spośród pozostałego dorobku habilitanta szczególnie interesujące są dla mnie prace o cieczach polarytonowych i kondensatach polarytonowych (jedna z nich opublikowana w *Physical Review Letters*). W opisywanych eksperymentach habilitant był odpowiedzialny za mapowanie rozkładu kondensatu z pikosekundową dokładnością przy użyciu kamery smugowej.

Wkład habilitanta w prace spoza zgłoszonego osiągnięcia habilitacyjnego związany jest głównie z badaniami dynamicznych właściwości spektroskopowych nanostruktur półprzewodnikowych. Świadczy to o tym, że habilitant ma dobrze określoną dziedzinę, w której się specjalizuje.

4. Ocena innej działalności

Dr inż. Syperek kierował dwoma projektami z Narodowego Centrum Nauki i jednym z Niemieckiej Agencji Wymiany Naukowej. Był wykonawcą w 16 innych projektach. Wygłosił siedem wykładów zaproszonych oraz 10 innych referatów na międzynarodowych konferencjach i warsztatach. Oprócz dorobku publikacyjnego dr inż. Syperek ma też znaczący dorobek dydaktyczny. Przygotował i poprowadził siedem wykładów dla studentów I-szego i II-giego stopnia, część z nich w języku angielskim, oraz liczne ćwiczenia rachunkowe. Jest także opiekunem specjalistycznych projektów badawczych, jakie studenci II-giego stopnia wykonują na Wydziale Podstawowych Problemów Techniki PWr. Ponadto, był promotorem 12 prac magisterskich i 9 inżynierskich oraz promotorem

pomocniczym w jednym przewodzie doktorskim. Jeśli są jakieś obszary aktywności habilitanta, w których mógłby on być bardziej czynny, to jest to działalność popularyzatorska. Dr inż. Syperek jest członkiem Polskiego Towarzystwa Fizycznego oraz członkiem wspierającym Akademię Młodych Uczonych i Artystów. Jest także członkiem panelu ekspertów oceniających wnioski dla Wrocławskiego Centrum Akademickiego. Te członkostwa jednak nie przekładają się na widoczną aktywność skierowaną do szerszej publiczności spoza środowiska akademickiego.

5. Podsumowanie

Dr inż. Marcin Syperek jest dojrzałym badaczem o znaczącym dorobku. Ma wyrobioną specjalizację, jaką są doświadczalne badania dynamicznych właściwości elektronów, dziur i ekscytonów w nanostrukturach półprzewodnikowych. Jego dorobek naukowy związany zarówno z tworzeniem warsztatu pracy jak i opublikowanymi artykułami oceniam bardzo wysoko. Prowadzi badania we współpracy z najlepszymi ośrodkami europejskimi i osiąga wyniki, jakimi zainteresowane jest środowisko badaczy fizyki nanostruktur. Również jego aktywność dydaktyczna jest bardzo intensywna. Podsumowując, uważam że zarówno przedstawione jako podstawa habilitacji osiągnięcie, jak i pozostały dorobek badawczy, organizacyjny i dydaktyczny w pełni uzasadniają wniosek dr. inż. Syperka o nadanie mu stopnia doktora habilitowanego. Bez zastrzeżeń wniosek ten popieram.


dr hab. Łukasz Kłopotowski