

Autoreferat

1. Imię i Nazwisko: **Wojciech Pacuski**

2. Posiadane dyplomy, stopnie naukowe – z podaniem nazwy, miejsca i roku ich uzyskania oraz tytułu rozprawy doktorskiej:

Magisterium – r. 2003, Uniwersytet Warszawski, Wydział Fizyki, specjalność fizyka ciała stałego

Tytuł pracy magisterskiej: **Magnetospektroskopia domieszkowanych studni kwantowych**

Opiekun: prof. dr hab. Piotr Kossacki.

Doktorat – r. 2007, Uniwersytet Warszawski, Wydział Fizyki oraz Université Joseph Fourier w Grenoble (podwójny doktorat w ramach programu cotutelle)

Tytuł rozprawy doktorskiej: „Spektroskopia optyczna szerokoprzerwowych półprzewodników półmagnetycznych na bazie ZnO i GaN”

Promotorzy: prof. Joel Cibert, prof. dr hab. Piotr Kossacki,

3. Informacje o dotychczasowym zatrudnieniu w jednostkach naukowych:

2008-2009 staż podoktorski na Uniwersytecie w Bremie, w grupie prof. Detlefa Hommela, w ramach programów: Marie Curie, DAAD i stypendium Fundacji Humboldta. W sumie 20 miesięcy w Bremie.

od **2009** – adiunkt na Wydziale Fizyki Uniwersytetu Warszawskiego

4. Wskazanie osiągnięcia* wynikającego z art. 16 ust. 2 ustawy z dnia 14 marca 2003 r. o stopniach naukowych i tytule naukowym oraz o stopniach i tytule w zakresie sztuki (Dz. U. nr 65, poz. 595 ze zm.)

a) Tytuł osiągnięcia (cyklu publikacji powiązanych tematycznie):

Zaprojektowanie, wytworzenie i zbadanie metodami optycznymi nowych układów mikrowętek i struktur kwantowych zawierających jony magnetyczne

Zał. 2. Autoreferat

b) Publikacje (autorzy, tytuł, nazwa wydawnictwa, rok wydania),

H1. **W. Pacuski**, C. Kruse, S. Figge, and D. Hommel,

"High-reflectivity broadband distributed Bragg reflector lattice matched to ZnTe",

Applied Physics Letters 94, 191108 (2009).

H2. C. Kruse, **W. Pacuski**, T. Jakubczyk, J. Kobak, J. A. Gaj, K. Frank, M. Schowalter, A. Rosenauer, M. Florian, F. Jahnke, and D. Hommel,

"Monolithic ZnTe-based pillar microcavities containing CdTe quantum dots",

Nanotechnology 22, 285204 (2011).

H3. **W. Pacuski**, T. Jakubczyk, C. Kruse, J. Kobak, T. Kazimierczuk, M. Goryca, A. Golnik, P. Kossacki, M. Wiater, P. Wojnar, G. Karczewski, T. Wojtowicz, D. Hommel,

"Micropillar cavity containing a CdTe quantum dot with a single manganese ion",

Crystal Growth & Design 14, 988 (2014).

H4. J. Kobak, T. Smoleński, M. Goryca, M. Papaj, K. Gietka, A. Bogucki, M. Koperski, J.-G. Rousset, J. Suffczyński, E. Janik, M. Nawrocki, A. Golnik, P. Kossacki, **W. Pacuski**,

"Designing quantum dots for solotronics"

Nature Communications 5, 3191 (2014).

H5. **W. Pacuski**,

"Individual cobalt and manganese ions in semiconductor quantum dots and photonic structures",

Proc. SPIE 9167, Spintronics VII, 91670K (2014); doi:10.1117/12.2063774.

H6. T. Smoleński, **W. Pacuski**, M. Goryca, M. Nawrocki, A. Golnik, and P. Kossacki,

"Optical spin orientation of an individual Mn²⁺ ion in a CdSe/ZnSe quantum dot",

Physical Review B 91, 045306 (2015).

H7. J.-G. Rousset, B. Piętka, M. Król, R. Mirek, K. Lekenta, J. Szczytko, J. Borysiuk, J. Suffczyński, T. Kazimierczuk, M. Goryca, T. Smoleński, P. Kossacki, M. Nawrocki, **W. Pacuski**,

"Strong coupling and polariton lasing in Te based microcavities embedding (Cd,Zn)Te quantum wells",

Applied Physics Letters 107, 201109 (2015).

H8. T. Smoleński, T. Kazimierczuk, J. Kobak, M. Goryca, A. Golnik, P. Kossacki, **W. Pacuski**,
"Magnetic Ground State of an Individual Fe²⁺ Ion in Strained Semiconductor Nanostructure",
Nature Communications 7, 10484 (2016).

H9. J.-G. Rousset, J. Kobak, E. Janik, M. Parlinska-Wojtan, T. Slupinski, A. Golnik, P. Kossacki,
M. Nawrocki, **W. Pacuski**,
"Distributed Bragg reflectors obtained by combining Se and Te compounds: Influence on the
luminescence from CdTe quantum dots",
Journal of Applied Physics 119, 183105 (2016).

c) omówienie celu naukowego ww. prac i osiągniętych wyników wraz z omówieniem ich ewentualnego wykorzystania.

Wprowadzono następujące oznaczenia referencji:

- Prace oznaczone literą H, czyli [H1], [H2],... to prace wchodzące w skład osiągnięcia habilitacyjnego wymienione na początku autoreferatu.
- Prace oznaczone literą S, czyli [S1], [S2],... to prace powiązane tematycznie z habilitacją, ale nie wchodzące w skład osiągnięcia habilitacyjnego. Wymienione są w części „Pozostałe osiągnięcia”.
- Prace [1], [2], to pozostałe referencje, umieszczone na końcu.

1.0 Stan wiedzy przed podjęciem tematyki.

1.1 Wstęp o projektowaniu zwierciadeł Bragga, mikrownęk i struktur fotonicznych

Zwierciadło Bragga powstaje poprzez nałożenie na siebie naprzemiennie warstw o małym i dużym współczynniku załamania. Aby uzyskać konstruktywną interferencję dla odbitej fali świetlnej o długości λ (w powietrzu), grubość każdej warstwy w zwierciadle Bragga powinna wynosić $\lambda/4n$, gdzie n to współczynnik załamania warstwy. Umieszczając dwa zwierciadła Bragga w niewielkiej odległości od siebie (np. λ/n) tworzymy mikrownękę, która może posłużyć do wzmocnienia i ukierunkowania emisji ze struktur kwantowych: np. kropek kwantowych i studni kwantowych. Jednak praktyczne połączenie mikrownęki z niskowymiarowymi strukturami półprzewodnikowymi wymaga dokładnego zaplanowania całej struktury i zazwyczaj wiąże się z koniecznością opracowania szeregu nowych technologii. Po pierwsze, wysokiej jakości struktury kwantowe o wąskich spektralnie liniach muszą być wytwarzane na podłożach monokrystalicznych o odpowiednio dopasowanej stałej sieci kryształu. Oznacza to, że w praktyce musimy dobrać do planowanych struktur stałe sieci materiałów z których są zbudowane zwierciadła Bragga. Same zwierciadła też muszą spełniać kilka warunków, np. aby uniknąć

wielokrotnej relaksacji sieci kryształicznej warstwy o różnych współczynnikach załamania muszą mieć te same stałe sieci, natomiast aby stać się użytecznymi muszą być przezroczyste w zakresie, w którym świecą planowane struktury kwantowe. Dodatkowo, połączenie ze sobą różnych materiałów i struktur półprzewodnikowych może być ograniczone ze względów technologicznych, np. poprzez ograniczoną liczbę pierwiastków dostępnych w komorze wzrostu albo poprzez niebezpieczeństwo zanieczyszczenia jednych struktur pierwiastkami potrzebnymi do budowy innych.

1.2 Znane systemy mikrowętek i sformułowanie celu pracy

Celem prezentowanego tutaj cyklu prac było zrozumienie wpływu oddziaływań wymiennych na struktury niskowymiarowe i fotoniczne, a dokładniej celem było rozwinięcie technologii nowych półprzewodnikowych systemów struktur fotonicznych i niskowymiarowych, a następnie użycie ich do magneto-optycznych badań układów kwantowo uwięzionych nośników oddziałujących wymiennie z jonami magnetycznymi. Najbardziej interesujące było wytworzenie systemów, w których oddziaływania wymienne mogłyby być obserwowane dla pojedynczych obiektów: pojedynczych elektronów, pojedynczych dziur i pojedynczych jonów magnetycznych. Pierwszym roboczym celem, sformułowanym we wstępie pracy [H1] było wytworzenie mikrowętek z kropkami kwantowymi z pojedynczymi jonami magnetycznymi. Przed podjęciem przeze mnie tej tematyki istniały już dobre systemy półprzewodnikowe pozwalające na budowanie mikrowętek ze studniami [1,2,3,4,5] i kropkami kwantowymi [6,7,8,9], jednak ich zastosowania do spintroniki i magneto-optycznego badania układów z oddziaływaniem wymiennym były bardzo ograniczone. Większość światowych badań nad półprzewodnikowymi strukturami fonicznymi bazuje na dobrze rozpoznanym systemie arsenkowym, czyli na strukturach zbudowanych z Ga, Al, In, As. W systemie tym rozszczepienia wywołane polem magnetycznym są stosunkowo małe [10] i trudno je zwiększyć poprzez oddziaływania wymienne z jonami magnetycznymi, bo np. domieszkowanie metalami przejściowymi takimi jak np. Mn powoduje pojawienie się ogromnych ilości dodatkowych nośników i ogólną degradację właściwości optycznych: poszerzenie linii spektralnych, osłabienie luminescencji [11,12]. Dlatego do założonych celów, czyli do zrozumienia efektów oddziaływania wymiennego w strukturach niskowymiarowych i fotonicznych, lepiej pasują systemy zbudowane z półprzewodników II-VI, w których przynajmniej niektóre jony magnetyczne, np. Mn nie powodują takiego poszerzenia linii spektralnych, które uniemożliwiłoby badanie relatywnie słabych oddziaływań i małych rozszczepień. Jednak żaden z mikrowętkowych systemów II-VI nie został przed podjęciem tej tematyki zoptymalizowany do badań magneto-optycznych. Np. bardzo wysoką dobroć mikrowętki można osiągnąć stosując warstwy Zn(S,Se) naprzemiennie ze dopasowanym stałą sieci stopem cyfrowym MgS/(Zn,Cd)Se [7,13]. Do takiej mikrowętki można dopasować studnie (Zn,Cd)Se/ZnSe lub kropki kwantowe CdSe/ZnSe. Jednak w jedynym laboratorium, w którym umiano efektywnie produkować takie struktury (na Uniwersytecie w Bremie), nie było dostępnych jonów magnetycznych w komorze II-VI i nie było oczywiście czy warto kupić i wstawić do komory źródło Mn, bo przed podjęciem przeze mnie tej tematyki, uważano, że zarówno selenkowe kropki jak i studnie kwantowe domieszkowane Mn nie będą świecić lub będą słabo świecić ze względu na przejścia bezpromieniste związane z wewnątrz-centrowymi przejściami jonów manganu. Inny znakomity system II-VI, to mikrowętki zbudowane z naprzemiennie ułożonych warstw (Cd,Mg)Te i (Cd,Mn)Te o tej samej stałej sieci [3,14,15,16,17,18,19,20]. Do takich mikrowętek można efektywnie wstawiać studnie kwantowe CdTe, a nawet (Cd,Mn)Te, co już pozwala na użycie oddziaływanie wymiennego *s,p-d* do wzmocnienia rozszczepienia pasm i efektywnie polarytonów. Jednak jeden element takich struktur powodował komplikacje w badaniach magneto-optycznych – otóż pólmagnetyczne były zarówno studnie były jak i otaczające je zwierciadła Bragga, więc trudno było odseparować pochodzące od nich efekty magneto-optyczne. Natomiast najpopularniejszy, a do

pewnego momentu jedyny, system do badania pojedynczych jonów magnetycznych jakim jest kropka kwantowa CdTe/ZnTe z pojedynczym jonem Mn [21], nie pasował zupełnie do żadnego znanego systemu mikrownęk. Dlatego rozpocząłem prezentowany tutaj cykl prac od opracowania składników mikrownęk w które można by wstawiać kropki kwantowe CdTe/ZnTe, a w dalszych etapach zająłem się poszerzeniem zbioru systemów kwantowych, w których można badać pojedyncze jony magnetyczne.

2.0 Najważniejsze wyniki naukowe stanowiące przedmiot habilitacji

2.1 Opracowanie zwierciadła Bragga dopasowanego do stałej sieci ZnTe [H1]

Aby móc wstawić kropki kwantowe CdTe/ZnTe do mikrownęki, powinna ona być sformowana przez zwierciadła Bragga zbudowane z dwóch materiałów o stałej sieci ZnTe i przerwach energetycznych takich jak ZnTe lub wyższych, a różnych współczynnikach załamania. Naturalnym kandydatem na materiał o wysokim współczynniku załamania jest po prostu samo ZnTe. Natomiast od dawna problem stanowiło pytanie co może być w ramach półprzewodników II-VI materiałem o mniejszym współczynniku załamania, czyli wyższej przerwie energetycznej. Nie może to być materiał dwuskładnikowy, ani nawet trzyskładnikowy, dopiero przy czterech składnikach, np. (Zn,Mg)(Te,Se) można by sobie wyobrazić, półprzewodnik o stałej sieci ZnTe, a przerwie energetycznej znacznie wyższej niż ZnTe, nawet w zakresie niebieskim lub ultrafiolecie (w porównaniu do zakresu zielonego dla przerwy energetycznej ZnTe). Jednak wzrost takiego materiału o ściśle dobranych proporcjach składników jest niezwykle trudny, co zostało nawet sprawdzone jeszcze przed moim przyjazdem na Uniwersytet w Bremie [22]. Analizując opracowane kilka lat wcześniej zwierciadła Bragga dopasowane do ZnSe [8] byłem przekonany, że rozwiązaniem mogą być odpowiednio zaprojektowane supersieci albo stopy cyfrowe. Zauważyłem, że takie supersieci będą musiały zawierać więcej warstw składowych niż dawniej używane dwie warstwy i zaproponowałem supersieć ZnTe/MgSe/MgTe/ZnTe o grubości warstw składowych nie przekraczającej kilku monowarstw [H1]. Z praktycznego punktu widzenia zaproponowana supersieć jest nowym materiałem o wielu zaletach: (i) składa się z jedynie dwuskładnikowych warstw, (ii) dobranie stałej sieci osiąga się nie poprzez kalibrację strumieni, ale poprzez dobranie stosunku grubości MgSe do MgTe, (iii) może uzyskać przerwę energetyczną regulowaną przy pomocy grubości warstw ZnTe, w przedziale od przerwy energetycznej ZnTe w obszarze zielonym do bliskiego ultrafioletu, (iv) może mieć współczynnik załamania znacznie mniejszy od ZnTe, nawet o 20%, (v) może być trzymany na powietrzu wiele lat bez degradacji.

Pomysł supersieci ZnTe/MgSe/MgTe/ZnTe jako składnika zwierciadła Bragga udało mi się szybko potwierdzić eksperymentalnie hodując odpowiednią strukturę przy pomocy epitaksji z wiązek molekularnych. Zwierciadło Bragga złożone z 15 par naprzemiennie ułożonych warstw ZnTe i supersieci ZnTe/MgSe/MgTe/ZnTe wykazywało odbicie wynoszące ok 99%, a widmo odbicia udało się opisać bardzo wiernie symulacją, która potwierdziła wyznaczony wcześniej współczynnik załamania supersieci ZnTe/MgSe/MgTe/ZnTe. Oprócz publikacji w APL [H1] wynalazek został zgłoszony do Europejskiego Urzędu Patentowego (numer EP 2211431 A1). Pomysł został doceniony także przez Fundację Humboldta, która przyznała mi grant (Humboldt Research Fellowship) na jego realizację na początku stażu podoktorskiego w Niemczech. Wynaleziona supersieć jest obecnie używana w trzech laboratoriach MBE i to już nie tylko jako materiał o niskim współczynniku załamania [H2,H3,H9, S1,S2,S3,S7] ale także znajduje nowe zastosowania, np. jako bariera dla kropek kwantowych CdTe [23].

2.2 Wytworzenie mikrownęki z kropkami kwantowymi CdTe [H2]

Aby udowodnić funkcjonalność nowych zwierciadeł Bragga o stałej sieci ZnTe wyhodowałem serię mikrownęk składających się z 20 par Bragga na dole, jednej wnęki o długości λ/n zawierającej w środku kropki kwantowe CdTe/ZnTe i 18 par Bragga na górze [H2]. Podobnie jak przy zwierciadle Bragga widma odbicia świetnie się zgadzały z symulacjami, udało się osiągnąć dobroć Q powyżej 3000, udało się wzajemnie dopasować energie rezonansowe wnęki i emisji kropek kwantowych. Co więcej, przy pomocy skupionej wiązki jonów (FIB – Focused Ion Beam) udało się wytrawić wnękę mikrofilarów, która stanowi już strukturę fotoniczną o kolejnych interesujących właściwościach optycznych. W pracy [H2] zaprezentowaliśmy strukturę energetyczną modów (eksperymentalną i teoretyczną), natomiast w kolejnych pracach bazujących na tych próbkach udało się zobrazować rozkład przestrzenny modów wnękowych [S3] i zaobserwować efekt Purcella [S2], czyli przyspieszenie emisji ekscytonów z kropek kwantowych. Najbardziej spektakularnym zastosowaniem tych mikrofilarów było otoczenie ich radialnym zwierciadłami Bragga, które blokują świecenie z mikrofilara na boki i w ten sposób powodują wydłużenie czasu życia ekscytonów w kropkach kwantowych [S1]. Takie struktury mogą w przyszłości pozwolić na niemal 100% skuteczność wprowadzania fotonów ze struktur półprzewodnikowych.

2.3 Mikrownęka filarowa z kropką kwantową zawierającą pojedynczy jon manganu [H3]

Dysponując systemem zwierciadeł Bragga dopasowanych do bariery ZnTe można było podjąć próbę umieszczenia kropki kwantowej CdTe/ZnTe z pojedynczym jonem Mn w mikrownęce. Na Uniwersytecie w Bremie, gdzie pracowałem, brakowało tylko źródła molekularnego Mn w komorze wzrostu półprzewodników II-VI. Dlatego musiałem opracować technologię hodowania mikrownęki etapami. Najpierw wyhodowałem dolne zwierciadło Bragga i $\frac{1}{4}$ wnęki na wierzchu, a całość przykryłem amorficznym tellurem aby zabezpieczyć powierzchnię. Przesłałem strukturę do Instytutu Fizyki PAN, gdzie została wyhodowana kolejna $\frac{1}{4}$ wnęki, kropki kwantowe CdTe/ZnTe z jonami Mn i znów około $\frac{1}{4}$ wnęki. Struktura znów została przykryta tellurem i przesłana do mnie na Uniwersytet w Bremie. Rozpoczynając kolejny wzrost wiedziałem, że muszę bardzo precyzyjnie wyhodować warstwę, która domknie mikrownękę. Dzięki przygotowanym wcześniej symulacjom wiedziałem jak po położeniu modu w widmie odbicia rozpoznać grubość ostatnich warstw, dzięki czemu udało się poprawnie zakończyć wnękę i wyhodować na niej górne zwierciadło Bragga o centralnej długości fali zgodnej z tą zdefiniowaną przez dolne zwierciadło Bragga (dla tego akurat kawałka dużej próbki). Na wyhodowanej strukturze wytrawiłem mikrofilary o średnicach kilku mikrometrów i znacznie większe kwadraty o boku 20 mikrometrów. Przy pomocy pomiarów mikroftoluminescencji sprawdziłem, że w stosunkowo małych mikrofilarach nie ma kropek z pojedynczym jonem Mn, co zgadzało się tym, że prawdopodobieństwo znalezienia takiej kropki jest bardzo małe, w najlepszym razie co 100 kropka ma jeden jon Mn. Ale na szczęście znalazłem taką kropkę w większym kwadracie, wyznaczyłem dokładnie jej pozycję i dokonując kolejnych etapów trawienia wytrawiłem wnękę mikrofilarów o boku 4 mikrometrów, w której kropka kwantowa z pojedynczym jonem Mn została nienaruszona.

Zastosowaniem struktur mikrownękowych z kropkami kwantowymi z pojedynczymi jonami Mn jest rezonansowa spektroskopia taka jak rezonansowa fluorescencja czy mieszanie czterech fal [24]. Potencjalnie takie struktury pozwolą także na kształtowanie obsadzenia i struktury energetycznej pojedynczych domieszek poprzez wpływanie na czas życia ekscytonów w różnych stanach. W dalszej przyszłości takie struktury dają nadzieję na kontrolowane oddziaływanie oddalonych od siebie jonów magnetycznych w różnych kropkach kwantowych, ale w jednej mikrownęce [25], dzięki czemu badane systemy stałyby się poważnymi kandydatami na kubity przyszłych komputerów kwantowych.

Załącznik 2. Autoreferat

Ubočnym, ale istotnym skutkiem pracochłonnego wytworzenia wnęki mikrofilarowej z kropką kwantową z pojedynczym jonem Mn było zrozumienie jak muszą być projektowane maszyny MBE, w których podobne systemy mogłyby być skutecznie produkowane. Widza ta leży u podstaw pozostałych osiągnięć zaprezentowanych w tej pracy.

2.4 Założenie laboratorium MBE

Założenie pierwszego, i jak do tej pory jedyne, laboratorium MBE na Uniwersytecie Warszawskim było wieloletnim przedsięwzięciem zrealizowanym wspólnie z dr. Tomaszem Słupińskim, który obecnie kieruje częścią laboratorium przygotowaną do wzrostu półprzewodników III-V. Przygotowując się do budowy nowego laboratorium odbyliśmy wieloletnie szkolenia w ośrodkach zagranicznych i odwiedziliśmy najważniejsze laboratoria dysponujące interesującym nas technologiami. Przeprowadziliśmy także wiele rozmów z kierownikami laboratoriów MBE i z firmami produkującymi urządzenia do epitaksji. W rezultacie zamówiliśmy zbudowanie maszyny o dwóch komorach wzrostu – jednej do półprzewodników II-VI, a drugiej do półprzewodników III-V. W każdej komorze znajduje się 10 portów na źródła molekularne. Pierwszą próbkę w kierowanej przeze mnie części laboratorium II-VI wyhodowałem w styczniu 2012, niecałe 5 lat po rozpoczęciu przygotowań. Wraz z uruchomieniem laboratorium, dzięki otrzymaniu grantu Lider NCBR, zebrałem zespół współpracowników, w tym przede wszystkim dwóch doktorantów, dla których jestem promotorem pomocniczym. Doktorantem pracującym nad kropkami kwantowymi jest mgr Jakub Kobak, a jego głównym promotorem jest prof. Andrzej Golnik, a doktorantem pracującym nad mikrownękami jest mgr Jean-Guy Rousset, a jego głównym promotorem jest prof. Michał Nawrocki. Wspólnie rozpoczęliśmy wzrosty warstw półprzewodnikowych: ZnSe, ZnTe, CdTe na podłożach GaAs. Ponieważ już po kilku wyhodowanych próbkach warstwy miały rozsądne właściwości optyczne, czyli np. wąskie linie spektralne przejść ekscytonowych, szybko przeszliśmy do wzrostu struktur niskowymiarowych: studni kwantowych [S10] i kropek kwantowych [S4,S5,S6,S9], oraz do wzrostu półprzewodników półmagnetycznych z manganem i kobaltem [S8]. Tu także uzyskaliśmy rozsądne wyniki już po kilku tygodniach i przystąpiliśmy do wzrostu struktur nowatorskich, wchodzących w skład prezentowanego tutaj osiągnięcia habilitacyjnego.

2.5 Nowe systemy kropek kwantowych z pojedynczymi jonami magnetycznymi [H4, H6, H8]

Gdy wraz z nowo powołanym zespołem przystępowałem do wzrostu kropek kwantowych domieszkowanych pojedynczymi jonami magnetycznymi, znane były na świecie jedynie dwa takie systemy: kropki kwantowe CdTe/ZnTe [21] i InAs/GaAs [26], oba z pojedynczymi jonami Mn. Poszukiwania nowych systemów były hamowane poprzez powszechną świadomość złych właściwości optycznych struktur półprzewodnikowych domieszkowanych innymi jonami magnetycznymi niż Mn. Oprócz poszerzenia linii, formowania się wytrąceń metalicznych, powszechnie znane było zjawisko wygaszania luminescencji ekscytonowej poprzez nieradiacyjne przejścia wewnątrzcentrowe metali przejściowych z grupy żelaza. Jedynie mangan ma energię najniższej położonych stanów wewnątrzcentrowych na tyle wysoką (ok 2.1 eV), że dla półprzewodników z przerwą energetyczną w podczerwieni i w zakresie czerwonym (czyli InAs i CdTe), ekscytony na dnie pasm nie mogą wzbudzić jonów magnetycznych ze względu na zbyt małą energię. Jednak dla półprzewodników z szeroką przerwą takich jak np. ZnSe czy ZnO, zachodzi transfer energii od ekscytonów do wszystkich jonów magnetycznych, nawet do manganu [27,28,29,30,31,32,33,34]. Dlatego ryzykownym był pomysł

domieszkowania jakichkolwiek kropek kwantowych kobaltem, albo domieszkowania manganem kropek kwantowych CdSe/ZnSe świecących w energiach ok. 2.3-2.5 eV.

Jednak obawy o wygaszanie luminescencji nie potwierdziły się w przypadku pojedynczych domieszek w kropce kwantowej i już w pierwszej próbce z kropkami kwantowymi CdTe:Co/ZnTe udało się znaleźć dobrze świecące kropki kwantowe z pojedynczymi jonami kobaltu. Dzięki temu w pracy [H4] mogliśmy jako pierwsi opisać widmo luminescencji kropki kwantowej z pojedynczym jonem kobaltu. W takiej kropce linia ekscytonu jest rozszczepiona na cztery składowe za względu na cztery możliwe rzuty spinu Co^{2+} ($S = 3/2$) na oś wzrostu, która jest jednocześnie osią kwantyzacji ekscytonu w kropce kwantowej. Jednak intensywność linii zewnętrznych i wewnętrznych nie jest równa ze względu na to, że stany kobaltu o spinie $\pm 3/2$ mają niższą energię niż stany kobaltu o spinie $\pm 1/2$, a zatem są częściej obsadzone. Identyfikacja linii kropek kwantowych z kobaltem jest potwierdzona pomiarami magnetofotoluminescencji, które są zgodne z zaproponowanym przez nas modelem ekscytonu oddziałującego z anizotropowym jonem kobaltu.

Aby zweryfikować, czy faktycznie zanedbywalne jest wygaszanie luminescencji ekscytonowej przez przejścia wewnątrzcentrowe, porównaliśmy czasy życia ekscytonów w kropkach kwantowych z pojedynczym kobaltem i bez niego i nie zauważyliśmy znaczących różnic, co oznacza, że jeżeli wygaszanie ma miejsce, to musi być bardzo słabe [H4]. Podobne wnioski otrzymaliśmy dla drugiego otrzymanego przez nas systemu jakim jest kropka kwantowa CdSe/ZnSe z pojedynczym jonem Mn [H4]. Choć system ten jest podobny do znanych już kropek CdTe/ZnTe z pojedynczym Mn, to wyróżnia go kilka interesujących właściwości. Po pierwsze, stosunkowo łatwo zorientować optycznie spin jonu Mn w kropce CdSe/ZnSe – wystarczy nierezonansowo pobudzić próbkę spolaryzowanym światłem [H6]. Po drugie, czas relaksacji Mn w kropce kwantowej CdSe/ZnSe jest o około rząd wielkości dłuższy [H4] niż w przypadku Mn w kropkach CdTe/ZnTe [35]. Przypisujemy to słabszemu oddziaływaniu spin-orbitalnemu w selenkach w stosunku do tellurków, co związane jest z mniejszą masą atomową selenu. Ta zależność natchnęła nas [pomysł opublikowany w H4] do jeszcze jednej innowacji związanej z faktem, że oprócz oddziaływania spin-orbita, istotnym czynnikiem wpływającym na relaksację (mierzoną czasem T_2) jest oddziaływanie spinów elektronowych z powłoki d jonu magnetycznego ze spinami jądrowym. A skoro wygaszanie luminescencji nie jest problemem, można pomyśleć o wprowadzeniu do kropek kwantowych jonów magnetycznych bez spinu jądrowego [H4]. Dla Mn i Co wszystkie izotopy mają spin jądrowy, ale np. w przypadku żelaza 98% atomów ma zerowy spin jądrowy. Można wprawdzie argumentować, że z punktu widzenia czasu koherencji jonu magnetycznego (T_1), spin jądrowy jest tak wolnozmienny, że nie powinien przyspieszać relaksacji, ale przy takim podejściu i tak warto się pozbyć spinu jądrowego, gdyż nie mamy nad nim kontroli takiej jak nad spinem elektronowym. Dlatego zdecydowałem się wytworzyć jeszcze jeden nowy system – kropkę kwantową CdSe/ZnSe z pojedynczym jonem żelaza [H8]. Najchętniej bym widział w takiej kropce Fe^{3+} , czyli jon o konfiguracji elektronowej d^5 , takiej jak Mn^{2+} . Konfiguracja taka dzięki zapełnionej do połowy powłoce d ma zerowy moment orbitalny co daje nadzieję na długie czasy relaksacji [36]. Natomiast nieparzysta liczba elektronów zapewnia zdegenerowany, czyli magnetyczny stan podstawowy. Jednak w półprzewodnikach II-VI najbardziej prawdopodobną konfiguracją dla żelaza jest Fe^{2+} , czyli d^6 . Konfiguracja taka wzmacnia efekty związane z oddziaływaniem spin-orbitalnym (np. podatność na naprężenie), a ze względu na parzystą liczbę elektronów może prowadzić do stanów niezdegenerowanych, czyli niemagnetycznych, o zerowym spinie [37,38,39,40,41,42,43,44,45,46]. Efekt taki występuje we wszystkich półprzewodnikach o strukturze blendy cynkowej i wurcytu - stan podstawowy Fe^{2+} jest niezdegenerowany, czyli właściwie nieprzydatny dla spintroniki. Natomiast pozostałe stany są położone przynajmniej 2 meV wyżej, czyli w temperaturach helowych są niemal nieobsadzone. Zatem pojedynczego jonu Fe^{2+} w kropce kwantowej powinniśmy nie móc zaobserwować: skoro Fe^{2+} ma zerowy spin, nie oddziałuje wymiennie z nośnikami w kropce kwantowej.

Jednak rzeczywistość okazała się bardziej skomplikowana: w wyniku naprężenia kropki kwantowej (niedopasowania stałych sieci CdSe i ZnSe), konfiguracja spinowa Fe^{2+} ulega takiemu przekształceniu, że stan podstawowy jest zdegenerowany i składa się z poziomów o spinie ± 2 [H8]. Delikatne rozszczepienie tych poziomów nie zmienia faktu, że stany takie mogą oddziaływać z ekscytonami i być zaobserwowane w pomiarach fotoluminescencji. Można by mieć wątpliwość, czy takie stany mogą zostać optycznie zorientowane – nasz eksperyment pokazuje, że nie jest to wprawdzie możliwe w zerowym polu magnetycznym, ale już przyłożenie niewielkiego pola magnetycznego (0,2 T) pozwala na efektywną optyczną orientację spinową pojedynczego jonu Fe^{2+} , co czyni go bardzo obiecującym systemem do koherentnej manipulacji pojedynczym spinem [H8].

2.6 Nowe mikrownęki do badania studni i kropek kwantowych z jonami magnetycznymi [H5,H7,H9]

Podczas przygotowywania pracy [H3] o mikrownęce z kropką zawierającą jon magnetyczny sądziłem, że największą technologiczną trudnością takiej pracy jest konieczność transportu zwierciadeł Bragga pomiędzy urządzeniami MBE, w których są odpowiednie źródła molekularne. W związku z tym spodziewałem się, że podobne projekty będą znacznie prostsze w nowym MBE na Uniwersytecie Warszawskim. Był to nadmierny optymizm – umieszczenie wielu źródeł molekularnych w jednej maszynie MBE ma też swoje wady, mianowicie czasem trudno się pozbyć niechcianych pierwiastków w strukturach wymagających wysokiej czystości. A dokładniej, okazało się, że w mikrownękach zbudowanych na bazie supersieci ZnTe/MgSe/ZnTe/MgTe, kropki kwantowe mają na tyle poszerzone linie, że trudno mieć nadzieję na rozdzielanie spektralne linii kropki z pojedynczym jonem magnetycznym [H9]. Efekt ten jest związany z preferencyjnym wbudowywaniem się selenu zamiast telluru do kropek kwantowych CdTe [H9,S6]. Na szczęście można ten efekt wyeliminować hodując kropki kwantowe znacznie później (np. 24h później) niż zwierciadła Bragga, dając w ten sposób dużo czasu na schłodzenie źródła selenu i przywrócenie wysokiej czystości komory wzrostu. Tak wytworzona struktura ma już znakomite właściwości optyczne, w tym wąskie linie spektralne pozwalające rozdzielić linie kropek kwantowych z pojedynczymi jonami Mn [H9]. Jednak nie jest to bardzo praktyczna procedura na dłuższą metę i zawiera większość komplikacji, które pojawiły się przy przygotowaniu pierwszej pracy, czyli [H3]. Dlatego zaproponowałem mgr. Jean-Guy Rousset rozwinięcie jeszcze jednego systemu mikrownękowego, który nie będzie wymagał użycia selenu, a jedynie tellur.

Poszukując materiałów na nowe mikrownęki wpadliśmy na następujący pomysł nowych zwierciadeł Bragga o dopasowanej stałej sieci kryształu: jeżeli rozważymy $(Cd,Zn)Te$ o stałej sieci dopasowanej do $MgTe$, to dodając różne ilości Mg do takiego $(Cd,Zn)Te$ i trzymając stały stosunek Zn do Cd nie będziemy zmieniać stałej sieci kryształu $(Cd,Zn,Mg)Te$. W ten sposób możemy otrzymać nawet trzy materiały o jednej stałej sieci, ale różnych przerwach energetycznych: np. $(Cd,Zn)Te$ – materiał studni kwantowej, $(Cd,Zn,Mg)Te$ z małą ilością Mg (ok 10%) jako materiał na barierę studni i jednocześnie materiał o wysokim współczynniku załamania, i w końcu $(Cd,Zn,Mg)Te$ o dużej zawartości Mg (około 50%), jako materiał o niskim współczynniku załamania. Zaletami tego nowego systemu są prostota i uniknięcie używania manganu, który był potrzebny do dawniej hodowanych zwierciadeł Bragga [3,14], a który byłby przeszkodą w badaniach magnetooptycznych (trudno byłoby rozdzielić efekty związane ze strukturami kwantowymi i fonicznymi). Dobre właściwości optyczne naszego nowego systemu zostały udowodnione w pracy [H7], gdzie pokazaliśmy silne sprzężenie i laserowanie polarytonowe w mikrownęce bazującej na $(Cd,Zn,Mg)Te$ zbudowanej w wyżej opisanym sposobie i zawierającej jony Mn jedynie w studniach kwantowych. Dzięki temu, że dając cieńszą warstwę CdTe (ok 1 nm) można wyhodować kropki kwantowe CdTe/ $(Cd,Mg)Te$ zamiast studni kwantowej CdTe/ $(Cd,Mg)Te$, nasz nowy system staje się bardzo obiecujący dla koherentnej i rezonansowej spektroskopii kropek kwantowych z pojedynczymi jonami magnetycznymi [24]. Pomysł ten i podsumowanie innych pomysłów na

struktury foniczne z kropkami kwantowymi zawierającymi pojedyncze jony magnetyczne zostały opisane w przeglądowej pracy [H5].

3.0 Podsumowanie osiągnięcia habilitacyjnego

Zaprojektowano i wytworzono następujące nowe struktury półprzewodnikowe:

- Zwierciadła Bragga o stałej sieci ZnTe [H1]
- Zwierciadła Bragga o stałej sieci MgTe [H7]
- Mikrownęki z kropkami kwantowymi CdTe [H2], w tym pierwsze na świecie mikrownęki z kropkami kwantowymi zawierającymi pojedyncze jony magnetyczne [H3,H5,H9]
- Pierwsze na świecie kropki kwantowe z pojedynczymi jonami kobaltu [H4] i żelaza [H8]
- Pierwsze na świecie kropki kwantowe z pojedynczymi jonami magnetycznymi o zerowym spinie jądrowym [H8]
- Pierwsze na świecie kropki kwantowe CdSe/ZnSe domieszkowane pojedynczymi jonami magnetycznymi [H4]

Struktury te pozwoliły na osiągnięcie wysokiej kontroli nad właściwościami domieszek, struktur kwantowych i fonicznych. Pozwoliły także zrozumieć i rozwiązać szereg problemów technicznych wynikających ze specyfiki stosowanych pierwiastków, materiałów i struktur.

Pomiary spektroskopowe nowych struktur doprowadziły do odkryć, z których najbardziej znaczące są:

- Zanedbywalnie słaby efekt wygaszania luminescencji ekscytonowej przez pojedyncze jony magnetyczne w kropkach kwantowych [H4].
- Dobre właściwości optyczne, w tym laserowanie polarytonowe w mikrownękach ze studniami kwantowymi domieszkowanymi jonami magnetycznymi [H7]
- Skomplikowana anizotropia Co^{2+} wywołana naprężeniem struktur półprzewodnikowych [H4].
- Wydłużenie czasu relaksacji pojedynczego jonu magnetycznego w materiałach o słabym oddziaływaniu spin-orbita [H4].
- Wyindukowanie magnetycznych właściwości domieszki Fe^{2+} poprzez naprężenie nanostruktury [H8]
- Znalezienie prostej metody optycznej orientacji spinu jonów magnetycznych w kropkach CdSe/ZnSe [H6,H8]

3.1 Znaczenie osiągnięcia habilitacyjnego dla dziedziny

- Otwarcie nowych możliwości wytwarzania i badania kropek kwantowych z pojedynczymi jonami magnetycznymi: zapoczątkowanie kontynuowanych już obecnie w innych laboratoriach badań kropek kwantowych z szeroką przerwą energetyczną [47] i z innymi metalami przejściowymi niż Mn [48,49].
- Opracowanie technologii i wytworzenie struktur do badań wykraczających poza prezentowane osiągnięcia habilitacyjne [S1-S10,24,50,51], a dotyczących polarytonów półmagnetycznych, sprzężonych wnęk, efektu Purcella, anizotropii zero-wymiarowych nośników, mieszania czterech fal na pojedynczych kropkach kwantowych.

Załącznik 2. Autoreferat

Omówienie pozostałych osiągnięć naukowo - badawczych (niewchodzących w skład osiągnięcia habilitacyjnego).

Osiągnięcia te można podzielić na 3 grupy związane tematycznie: a) ze strukturami prezentowanymi w osiągnięciu habilitacyjnym, b) z doktoratem i c) z pracą magisterską.

a) Wybrane prace powstałe dzięki technologiom i strukturom i przedstawionym w osiągnięciu habilitacyjnym:

[S1] T. Jakubczyk, H. Franke, T. Smoleński, M. Ściesiek, **W. Pacuski**, A. Golnik, R. Schmidt-Grund, M. Grundmann, C. Kruse, D. Hommel, P. Kossacki, "Inhibition and Enhancement of the Spontaneous Emission of Quantum Dots in Micropillar Cavities with Radial Distributed Bragg Reflectors", **ACS Nano** 8, 9970 (2014).

[S2] T. Jakubczyk, **W. Pacuski**, T. Smoleński, A. Golnik, M. Florian, F. Jahnke, C. Kruse, D. Hommel, P. Kossacki, "Pronounced Purcell enhancement of spontaneous emission in CdTe/ZnTe quantum dots embedded in micropillar cavities", **Applied Physics Letters** 101, 132105 (2012).

[S3] T. Jakubczyk, **W. Pacuski**, T. Smoleński, A. Golnik, M. Florian, F. Jahnke, C. Kruse, D. Hommel, P. Kossacki, "Light-matter coupling in ZnTe-based micropillar cavities containing CdTe quantum dots", **Journal of Applied Physics** 113, 136504 (2013).

[S4] K. Sawicki, F. K. Malinowski, K. Gałkowski, T. Jakubczyk, P. Kossacki, **W. Pacuski**, J. Suffczyński, "Single-color, in situ photolithography marking of individual CdTe/ZnTe quantum dots containing a single Mn²⁺ ion", **Applied Physics Letters** 106, 012101 (2015).

[S5] A. Bogucki, T. Smoleński, M. Goryca, T. Kazimierzczuk, J. Kobak, **W. Pacuski**, P. Wojnar, and P. Kossacki, "Anisotropy of in-plane hole g factor in CdTe/ZnTe quantum dots", **Physical Review B** 93, 235410 (2016).

[S6] M. Ściesiek, J. Suffczyński, **W. Pacuski**, M. Parlińska-Wojtan, T. Smoleński, P. Kossacki, A. Golnik, "Effect of electron-hole separation on optical properties of individual Cd(Se,Te) quantum dots", **Physical Review B** 93, 195313 (2016).

[S7] J.-G. Rousset, J. Kobak, E. Janik, T. Jakubczyk, R. Rudniewski, P. Piotrowski, M. Ściesiek, J. Borysiuk, T. Slupinski, A. Golnik, P. Kossacki, M. Nawrocki, **W. Pacuski**, "MBE grown microcavities based on selenium and tellurium compounds", **Journal of Crystal Growth** 401, 499 (2014).

[S8]. K. Gietka, J. Kobak, E. Janik, J.G. Rousset, J. Borysiuk, M. Nawrocki, A. Golnik, P. Kossacki, **W. Pacuski**, "The impact of position of Mn delta-doping on the formation of CdTe/ZnTe quantum dots with single magnetic ions", **Journal of Crystal Growth** 401, 640 (2014).

[S8]. M. Papaj, J. Kobak, J.G. Rousset, E. Janik, M. Nawrocki, P. Kossacki, A. Golnik, **W. Pacuski**, "Photoluminescence studies of giant Zeeman effect in MBE-grown cobalt-based dilute magnetic semiconductors", **Journal of Crystal Growth** 401, 644 (2014).

[S9]. J. Kobak, J.-G. Rousset, R. Rudniewski, E. Janik, T. Stupiński, P. Kossacki, A. Golnik, **W. Pacuski**, "Ultra low density of CdTe quantum dots grown by MBE", **Journal of Crystal Growth** 378, 274 (2013).

[S10]. J.-G. Rousset, J. Kobak, T. Slupinski, T. Jakubczyk, P. Stawicki, E. Janik, M. Tokarczyk, G. Kowalski, M. Nawrocki, **W. Pacuski**, "MBE growth and characterization of a II-VI distributed Bragg reflector and microcavity lattice-matched to MgTe", **Journal of Crystal Growth** 378, 266 (2013).

Załącznik 2. Autoreferat

Prace te bazują na wytworzonych przeze mnie mikrowędkach [S1,S2,S3] i kropkach kwantowych [S3,S4,S5]. Natomiast prace [S7,S8,S9,S10] opisują rozwijanie technologii epitaksjalnych w początkowej fazie działania nowego laboratorium MBE.

Według mnie największym osiągnięciem bazującym na moich próbkach jest wytworzenie nowego rodzaju struktury fotonicznej – mikrofilara otoczonego radialnymi zwierciadłami Bragga [S1] i udowodnienie, że struktura taka może dzięki efektowi Purcella zarówno wydłużać jak i skracać czas życia ekscytonów w kropkach kwantowych. W przyszłości takie struktury mogą pozwolić na osiągnięcie skuteczność ekstrakcji fotonów zbliżającej się do 100%.

b) Wybrane prace o magnetospektroskopii półprzewodników półmagnetycznych z szeroką przerwą energetyczną, w tym prace związane z tematem pracy doktorskiej:

[WGDMS1] **W. Pacuski**, "Optical Spectroscopy of Wide-Gap Diluted Magnetic Semiconductors", Rozdział w pracy książce „Introduction to the Physics of Diluted Magnetic Semiconductors” pod redakcją Jana A. Gaja i Jacka Kossuta, **Springer Series in Materials Science** Vol. 144, Pp. 37-63 (2010).

[WGDMS2] **W. Pacuski**, P. Kossacki, D. Ferrand, A. Golnik, J. Cibert, M. Wegscheider, A. Navarro-Quezada, A. Bonanni, M. Kiecana, M. Sawicki, T. Dietl, "Observation of strong-coupling effects in a diluted magnetic semiconductor $Ga_{1-x}Fe_xN$ ", **Physical Review Letters** 100, 037204 (2008),

[WGDMS3] **W. Pacuski**, D. Ferrand, J. Cibert, C. Deparis, J. A. Gaj, P. Kossacki, C. Morhain, "Effect of the s, p-d exchange interaction on the excitons in (Zn,Co)O epilayers", **Physical Review B** 73, 035214 (2006).

[WGDMS4] **W. Pacuski**, J. Suffczyński, P. Osewski, P. Kossacki, A. Golnik, J. A. Gaj, C. Deparis, C. Morhain, E. Chikoidze, Y. Dumont, D. Ferrand, J. Cibert, T. Dietl, "Influence of s,p-d and s-p exchange couplings on exciton splitting in (Zn,Mn)O", **Physical Review B** 84, 035214 (2011).

[WGDMS5] **W. Pacuski**, D. Ferrand, J. Cibert, J. A. Gaj, A. Golnik, P. Kossacki, S. Marcet, E. Sarigiannidou, H. Mariette, "Excitonic giant Zeeman effect in $GaN:Mn^{3+}$ ", **Physical Review B** 76, 165304 (2007).

[WGDMS6] J. Suffczyński, A. Grois, **W. Pacuski**, A. Golnik, J. A. Gaj, A. Navarro-Quezada, B. Faina, T. Devillers, A. Bonanni, "Effects of s,p-d and s-p exchange interactions probed by exciton magnetospectroscopy in (Ga,Mn)N", **Physical Review B** 83, 094421 (2011).

[WGDMS7] J.-G. Rousset, J. Papierska, **W. Pacuski**, A. Golnik, M. Nawrocki, W. Stefanowicz, S. Stefanowicz, M. Sawicki, R. Jakieła, T. Dietl, A. Navarro-Quezada, B. Faina, T. Li, A. Bonanni, J. Suffczyński, "Relation between exciton splittings, magnetic circular dichroism, and magnetization in wurtzite (Ga,Fe)N", **Physical Review B** 88, 115208 (2013).

[WGDMS8]. E. Przeździecka, E. Kamińska, M. Kiecana, M. Sawicki, Ł. Kłopotowski, **W. Pacuski**, J. Kossut, "Magneto-optical properties of the diluted magnetic semiconductor p-type ZnMnO", **Solid State Communications** 139, 541 (2006).

[WGDMS9]. "Effect of magnetic field on intraionic photoluminescence of (Zn,Co)Se", M.J. Grzybowski, A. Golnik, M. Sawicki, **W. Pacuski**, **Solid State Communications** 208, 7 (2015).

[WGDMS10] J. Papierska, A. Ciechan, P. Bogusławski, M. Boshta, M. M. Goma, E. Chikoidze, Y. Dumont, A. Drabińska, H. Przybylińska, A. Gardias, J. Szczytko, A. Twardowski, M. Tokarczyk, G.

Kowalski, B. Witkowski, K. Sawicki, **W. Pacuski**, M. Nawrocki, J. Suffczyński, **Physical Review B** 94, 224414 (2016).

Prace te opisują kompleksowo wpływ jonów magnetycznych na właściwości optyczne nowej klasy materiałów: półprzewodników półmagnetycznych z szeroką przerwą energetyczną, takich jak (Zn,Co)O, (Zn,Mn)O, (Ga,Mn)N, (Ga,Fe)N, (Zn,Fe)O, (Zn,Co)Se. Najważniejszym odkryciem jest tu niewątpliwie obserwacja, że choć $N_0\beta$ - całka wymiany $p-d$ generalnie się zwiększa przy przejściu od półprzewodników półmagnetycznych z dużą stałą sieci (i małą przerwą energetyczną) do półprzewodników półmagnetycznych z małą stałą sieci (i dużą przerwą energetyczną), to w zakresie bardzo silnego sprzężenia $p-d$, rozszczepienie pasm staje się stosunkowo małe i ma przeciwny znak do obserwowanego zazwyczaj. Wiąże się to z wytworzeniem stanu związanego w przypadku bardzo silnego oddziaływania $p-d$. Wnioski te opisane są w pracach [WGDMS1 i WGDMS2], ale składają się na nie właściwie wszystkie wymienione prace.

c) Prace o magnetycznych i magneto-optycznych właściwościach studni kwantowych (Cd,Mn)Te, w tym prace związane z tematem pracy magisterskiej.

[QW1]. M. Goryca, D. Ferrand, P. Kossacki, M. Nawrocki, **W. Pacuski**, W. Maślana, J. A. Gaj, S. Tatarenko, J. Cibert, T. Wojtowicz, G. Karczewski, "Magnetization Dynamics Down to a Zero Field in Dilute (Cd,Mn)Te Quantum Wells", **Physical Review Letters** 102, 046408 (2009),

[QW2]. C. Aku-Leh, F. Perez, B. Jusserand, D. Richards, **W. Pacuski**, P. Kossacki, M. Menant, G. Karczewski, "Measuring the spin polarization and Zeeman energy of a spin-polarized electron gas: Comparison between Raman scattering and photoluminescence", **Physical Review B** 76, 155416 (2007).

[QW3] P. Kossacki, **W. Pacuski**, W. Maślana, J.A. Gaj, M. Bertolini, D. Ferrand, J. Bleuse, S. Tatarenko, J. Cibert, "Spin engineering of carrier-induced magnetic ordering in (Cd,Mn)Te quantum wells", **Physica E** 21, 943-946 (2004).

W pracach tych zajmowałem się wpływem naprężenia i struktury pasmowej na spinowe własności układu dziur i jonów Mn w studniach kwantowych (Cd,Mn)Te. Oprócz pomiarów magneto-optycznych robiłem symulacje k^*p pasma walencyjnego, które pozwalały wnioskować o przyczynach obserwowanych właściwości magnetycznych.

Podsumowanie dorobku naukowego (pełna lista znajduje się w załączniku).

- Trzy rozwijane techniki badawcze:
 - Epitaksja z wiązek molekularnych
 - Magneto-spektroskopia optyczna
 - Modelowanie optycznych właściwości struktur półprzewodnikowych
- 62 artykuły w czasopismach z listy filadelfijskiej, w tym dwa artykuły w Nature Communications, jeden w ACS Nano, dwa w Physical Review Letters, 11 w Physical Review B, 4 w Applied Physics Letters, po dwa w Journal of Applied Physics, Journal of Physics: Condensed Matter, Solid State Communications i Physica E, po jednym w Crystal Growth & Design, Nanotechnology, Superlattices and Microstructures, 5 w Journal of Crystal Growth.
- 10 referatów zaproszonych na konferencjach międzynarodowych w tym na The International Conference on II-VI Compounds, i na dużych konferencjach amerykańskich i europejskich

Załącznik 2. Autoreferat

towarzystw naukowych: American Physical Society March Meeting i The international Society for Optics and Photonics (SPIE), European Materials Research Society Fall Meeting.

- 16 referatów ustnych na konferencjach międzynarodowych, w tym na dwa ICPS, dwa na International Conference on II-VI compounds, jeden na The international conference on Molecular Beam Epitaxy
- Kierowanie 4 projektami: Lider NCBR, Sonata Bis NCN, dwoma luventus Plus MNiSW
- Uruchomienie i kierowanie laboratorium MBE, dzięki któremu powstały w ciągu 4 lat 23 artykuły, w tym publikacje w prestiżowych czasopismach.
- Opieka w charakterze promotora pomocniczego nad dwoma doktorantami kończącymi właśnie swoje prace. Obaj osiągnęli znaczące sukcesy naukowe.
- Opieka nad 5 pracami magisterskimi i 5 pracami licencjackimi, których autorzy kontynuują karierę naukową, w tym opieka nad pracą Michała Papaja, która została nagrodzona Złotym Medal Chemii za najlepszą pracę z chemii w Polsce w r. 2014.
- Zainicjowanie autorskiego wykładu na Wydziale Fizyki UW: „Technologia i strukturyzacja materiałów półprzewodnikowych”, (r. 2011 i kontynuacja w latach 2012-2016)
- Udział w Komitecie programowym International Conference on Molecular Beam Epitaxy.
- Zagraniczne staże naukowe – we Francji w czasie studiów (3 miesiące) i w czasie podczas przygotowywania doktoratu (15 miesięcy), oraz w Niemczech na stażu podoktorskim ok 20 miesięcy
- Osobista współpraca zagraniczna ze znanymi naukowcami z takich ośrodków jak Institut NÉEL, CEA Grenoble, CRHEA Valbonne, Institut des NanoSciences de Paris, Uniwersytet Versailles, Uniwersytet w Bremie, Uniwersytet w Linzu, Instytut Fizyki PAN.
- 42 recenzowane artykuły
- Popularyzacja nauki: audycje radiowe, wykłady dla uczniów, popularnonaukowe notatki prasowe

¹ C. Weisbuch, M. Nishioka, A. Ishikawa, Y. Arakawa, Phys. Rev. Lett. 69, 3314 (1992).

² B. Lambert, Y. Toudic, Y. Rouillard, M. Gauneau, M. Baudet, F. Alard, I. Valiente and J. C. Simon, Appl. Phys. Lett., 66, 442 (1995).

³ Le Si Dang, D.Heger, R.André, F.Boeuf, R.Romestain, Phys.Rev.Lett.81, 3920 (1998).

⁴ J.-F. Carlin, J. Dorsaz, E. Feltin, R. Butté, N. Grandjean, M. Ilegems, M. Laügt, Appl. Phys. Lett. 86, 031107 (2005).

⁵ S. P. Guo, O. Maksimov, M. C. Tamargo, F. C. Peiris, J. K. Furdyna, Appl. Phys. Lett. 77, 4107 (2000).

⁶ J.M. Gérard, B.Sermage, B.Gayral, B.Legrand, E.Costard, V.Thierry-Mieg, Phys. Rev.Lett. 81, 1110 (1998).

⁷ J. P. Reithmaier, G. Seogonk, A. Löffler, C. Hofmann, S. Kuhn, S. Reitzenstein, L. V. Keldysh, V. D. Kulakovskii, T. L. Reinecke, A. Forchel, Nature 432, 197 (2004).

⁸ C. Kruse, S. M. Ulrich, G. Alexe, E. Roventa, R. Kröger, B. Brendemühl, P. Michler, J. Gutowski, D. Hommel, Phys. Stat. Sol. (b) 241, 731 (2004).

⁹ H. Lohmeyer, C. Kruse, K. Sebald, J. Gutowski and D. Hommel, Appl. Phys. Lett. 89, 091107 (2006).

¹⁰ B. Pietka, D. Zygmont, M. Król, M. R. Molas, A. A. L. Nicolet, F. Morier-Genoud, J. Szczytko, J. Łusakowski, P. Zieba, I. Tralle, P. Stepnicki, M. Matuszewski, M. Potemski, and B. Deveaud, Phys. Rev. B 91, 075309 (2015).

¹¹ J. Szczytko, W. Mac, A. Twardowski, F. Matsukura, H. Ohno, Phys. Rev. B 59, 12935 (1999).

¹² M. Poggio, R. C. Myers, N. P. Stern, A. C. Gossard, and D. D. Awschalom, Phys. Rev. B 72, 235313 (2005).

¹³ K. Sebald, M. Seyfried, S. Klemmt, C. Kruse, Optics Express 19, 19422 (2011).

¹⁴ H. Ulmer-Tuffigo, J. Bleuse, F. Kany, R. André, and L. S. Dang, Superlattice Microst. 22, 383 (1997).

¹⁵ M. Haddad, R. André, R. Frey, and C. Flytzanis, Solid State Commun. 111, 61 (1999).

¹⁶ D. Pereda Cubian, M. Haddad, R. André, R. Frey, G. Roosen, J. L. Arce Diego, and C. Flytzanis, Phys. Rev. B 67, 045308 (2003).

¹⁷ J. Sadowski, H. Mariette, A. Wasiela, R. André, Y. Merle d'Aubigné, and T. Dietl, Phys. Rev. B 56, R1664 (1997).

-
- ¹⁸ A. Brunetti, M. Vladimirova, D. Scalbert, and R. André, Phys. Status Solidi C 2, 3876 (2005).
- ¹⁹ A. Brunetti, M. Vladimirova, D. Scalbert, M. Nawrocki, A. V. Kavokin, I. A. Shelykh, and J. Bloch, Phys. Rev. B 74, 241101 (2006).
- ²⁰ A. Brunetti, M. Vladimirova, D. Scalbert, R. André, D. Solnyshkov, G. Malpuech, I. A. Shelykh, and A. V. Kavokin, Phys. Rev. B 73, 205337 (2006).
- ²¹ L. Besombes, Y. L ger, L. Maingault, D. Ferrand, H. Mariette, J. Cibert Phys. Rev. Lett. 93, 207403 (2004).
- ²² A. Ueta, D. Hommel, Physica Status Solidi (c) 1,1010 (2004).
- ²³ S.V. Sorokin, I.V. Sedova, S.V. Gronin, G.V. Klimko, K.G. Belyaev, M.V. Rakhlin, I.S. Mukhin, c, A.A. Toropov, S.V. Ivanov, J. Cryst. Growth., Available online 6 December (2016).
- ²⁴ W. Pacuski, J.-G. Rousset, V. Delmonte, T. Jakubczyk, K. Sawicki, E. Janik, J. Kasprzak, wysłane do Cryst. Growth Design. (2016).
- ²⁵ J. A. Andrade, A. A. Aligia, G. F. Quinteiro, Phys. Rev. B 85, 165421 (2012).
- ²⁶ A. Kudelski, A. et al., Phys. Rev. Lett. 99, 247209 (2007).
- ²⁷ Oka, Y. et al., J. Lumin. 83–84, 83 (1999).
- ²⁸ X. Tang et al., J. Cryst. Growth 251, 586 (2003).
- ²⁹ S. Lee, M. Dobrowolska, J. K. Furdyna, Phys. Rev. B 72, 075320 (2005).
- ³⁰ R. Beaulac, P. I. Archer, J. van Rijssel, A. Meijerink, D. R. Gamelin, Nano Lett. 8, 2949 (2008).
- ³¹ R. Beaulac, et al., Nano Lett. 8, 1197 (2008).
- ³² W. Zhong, J. Liang, J. Yu, Spectrochim. Acta A Mol. Biomol. Spectrosc. 74, 603 (2009).
- ³³ D. A. Bussian, et al. Nat. Mater. 8, 35 (2009).
- ³⁴ Yamamoto, S., J. Appl. Phys. 111, 094310 (2012).
- ³⁵ M. Goryca et al., Phys. Rev. Lett. 103, 087401 (2009).
- ³⁶ M. Blume, R. Orbach, Phys. Rev 127, 1587 (1962).
- ³⁷ G. A. Slack, S. Roberts, F. S. Ham, Phys. Rev. 155, 170 (1967).
- ³⁸ G. A. Slack, S. Roberts, J. T. Vallin, Phys. Rev 187, 511 (1969).
- ³⁹ J. T. Vallin, G. A. Slack, C. C. Bradley, Phys. Rev. B 2, 4406 (1970).
- ⁴⁰ A. Mycielski, J. Appl. Phys. 63, 3279–3284 (1988).
- ⁴¹ D. Scalbert, J. A. Gaj, A. Mauger, J. Cernogora, C. Benoit a la Guillaume, Phys. Rev. Lett. 62, 2865 (1989).
- ⁴² D. Scalbert, J. Cernogora, A. Mauger, C. Benoit a la Guillaume, A. Mycielski, Solid State Commun. 69, 453 (1989).
- ⁴³ A. Twardowski, J. Appl. Phys. 67, 5108 (1990).
- ⁴⁴ M. K. Udo et al., Phys. Rev. B 46, 7459 (1992).
- ⁴⁵ E. Malguth, A. Hoffmann, M. R Phillips, Phys. Status Solidi B 245, 455 (2008).
- ⁴⁶ D. Heiman, et al., Phys. Rev. Lett. 60, 1876 (1988).
- ⁴⁷ R. Fainblat, C. J. Barrows, E. Hopmann, S. Siebeneicher, V. A. Vlaskin, D. R. Gamelin, G. Bacher, Nano Lett. 16, 6371 (2016).
- ⁴⁸ A. Lafuente-Sampietro, H. Utsumi, H. Boukari, S. Kuroda, L. Besombes, Phys. Rev. B 93 (2016).
- ⁴⁹ A. Lafuente-Sampietro, H. Utsumi, H. Boukari, S. Kuroda, L. Besombes, Appl. Phys. Lett. 109, 053103 (2016).
- ⁵⁰ R. Mirek, M. Król, K. Lekenta, J.-G. Rousset, M. Nawrocki, J. Szczytko, M. Kulczykowski, M. Matuszewski, W. Pacuski, B. Pi tka, arXiv:1609.00405 (2016).
- ⁵¹ J. Kobak, A. Bogucki, T. Smoleński, M. Papaj, M. Koperski, M. Potemski, P. Kossacki, A. Golnik, W. Pacuski, arXiv:1610.05732 (2016).

dr Wojciech Pacuski
W Pacuski