

Piotr Wojnar  
Instytut Fizyki, Polskiej Akademii Nauk  
Warszawa, 2016

## Autoreferat

### Spis treści:

1. Imię i Nazwisko .....	2
2. Posiadane dyplomy, stopnie naukowe .....	2
3. Informacja o dotychczasowym zatrudnieniu oraz dłuższych pobytach naukowych.....	2
4. Wskazanie osiągnięcia wynikającego z art. 16 ust. 2 ustawy z dnia 14 marca 2003r. będącego podstawą ubiegania się o stopień doktora habilitowanego.....	2
4.1. Tytuł monotematycznego cyklu publikacji oraz wykaz publikacji wchodzących w jego skład.....	2
4.2. Dane bibliometryczne.....	3
4.3. Wprowadzenie – tło naukowe badań .....	3
4.3.1. Mechanizm wzrostu nanodrutów para-ciecz-ciało stałe.....	5
4.3.2. Heterostruktury w nanodrutach półprzewodnikowych .....	5
4.3.3. Jony magnetyczne w nanodrutach.....	6
4.4. Optycznie aktywne heterostruktury w nanodrutach tellurkowych - opis cyklu publikacji.....	7
5. Omówienie pozostałych osiągnięć naukowo-badawczych .....	16
5.1. Opis dorobku naukowego nie związanego z tematem nanodrutów .....	16
5.3. Prezentacje na konferencjach, seminariach, sympozjach.....	20
5.4. Organizacja konferencji i działalność recenzencka .....	22
5.5. Budowa unikatowej aparatury badawczej .....	22
5.6. Dydaktyka i popularyzacja nauki.....	22

## 1. Imię i Nazwisko

Piotr Benedykt Wojnar

## 2. Posiadane dyplomy, stopnie naukowe

**październik 2002, magister**, Uniwersytet Warszawski, Wydział Fizyki, praca magisterska w Zakładzie Fizyki Ciała Stałego, tytuł pracy magisterskiej: „*Wpływ efektu polaronu magnetycznego na rozpraszanie Ramana z odwróceniem spinu w objętościowym CdMnTe*” pod kierunkiem dr hab. A. Golnika

**październik 2008, doktor**, Instytut Fizyki Polskiej Akademii Nauk, tytuł rozprawy doktorskiej: „*Wytwarzanie i spektroskopia optyczna półmagnetycznych kropek kwantowych CdMnTe*” promotor: prof. dr hab. J. Kossut.

## 3. Informacja o dotychczasowym zatrudnieniu oraz dłuższych pobytach naukowych

- 2003 – 2008 międzynarodowe studia doktoranckie w Instytucie Fizyki Polskiej Akademii Nauk.
- 2004 – miesięczny pobyt badawczy na Uniwersytecie w Cincinnati, USA
- 2007 – 2008, 2 miesięczny pobyt badawczy na Uniwersytecie w Dortmund, Niemcy
- 2008 – 2009, staż podoktorski w Instytucie Néela należącego do CNRS (Centre National de la Recherche Scientifique – Narodowego Centrum Badań Naukowych), Grenoble, Francja
- od października 2009 zatrudniony na stanowisku adiunkta w Instytucie Fizyki PAN w Środowiskowym Laboratorium Fizyki i Wzrostu Kryształów Niskowymiarowych

## 4. Wskazanie osiągnięcia wynikającego z art. 16 ust. 2 ustawy z dnia 14 marca 2003r. będącego podstawą ubiegania się o stopień doktora habilitowanego

### 4.1. Tytuł monotematycznego cyklu publikacji oraz wykaz publikacji wchodzących w jego skład

Osiągnięciem naukowym będącym podstawą ubiegania się o stopień naukowy doktora habilitowanego jest cykl sześciu prac opublikowanych w czasopismach o międzynarodowym zasięgu zatytułowany: **”Optycznie aktywne heterostruktury w nanodrutach tellurkowych”**.

Publikacje wchodzące w skład cyklu:

H1 **P. Wojnar**, M. Szymura, W. Zaleszczyk, Ł. Kłopotowski, E. Janik, M. Wiater, L. T. Baczewski, S. Kret, G. Karczewski, J. Kossut, and T. Wojtowicz, „*Activation of an intense near band edge emission from ZnTe/ZnMgTe core/shell nanowires grown on silicon*” *Nanotechnology* **24**, 365201 (2013), *impact factor* 3.8

H2 **P. Wojnar**, E. Janik, L.T. Baczewski, S. Kret, G. Karczewski, T. Wojtowicz, M. Goryca, T. Kazimierzczuk, P. Kossacki, „*Growth and optical properties of CdTe quantum dots in ZnTe nanowires*”, Appl. Phys. Lett. **99**, 113109 (2011), impact factor 3.3

H3 **P. Wojnar**, J. Płachta, W. Zaleszczyk, S. Kret, Ana M. Sanchez, R. Rudniewski, K. Raczkowska, M. Szymura, G. Karczewski, L. T. Baczewski, A. Pietruczik, T. Wojtowicz, J. Kossut, *Coexistence of optically active radial and axial CdTe insertions in single ZnTe Nanowire*, Nanoscale **8**, 5720 – 5727 (2016), impact factor 7.3

H4 **P. Wojnar**, M. Zielinski, E. Janik, W. Zaleszczyk, T. Wojciechowski, R. Wojnar, M. Szymura, L. Kłopotowski, L.T. Baczewski, A. Pietruczik, M. Wiater, S. Kret, G. Karczewski, T. Wojtowicz, and J. Kossut, *Strain-induced energy gap variation in ZnTe/ZnMgTe core/shell nanowires* Appl. Phys. Lett. **104** 163111 (2014), impact factor 3.3

H5 **P. Wojnar**, E. Janik, L.T. Baczewski, S. Kret, E. Dynowska, T. Wojciechowski, J. Suffczyński, J. Papierska, P. Kossacki, G. Karczewski, J. Kossut, T. Wojtowicz, „*Giant spin splitting in optically active ZnMnTe/ZnMgTe core/shell nanowires*” NanoLetters **12** 3404, (2012), impact factor 13.6

H6 M. Szymura, **P. Wojnar**, Ł. Kłopotowski, J. Suffczyński, M. Goryca, T. Smoleński, P. Kossacki, W. Zaleszczyk, T. Wojciechowski, G. Karczewski, T. Wojtowicz, J. Kossut, „*Spin Splitting Anisotropy in Single Diluted Magnetic Nanowire Heterostructures*”, NanoLetters **15**, 1972-1978 (2015), impact factor 13.6

Wyżej wymieniony monotematyczny cykl publikacji złożony jest zatem z 6 publikacji, które zostały opublikowane w latach 2011-2016. W jego skład wchodzi: dwie publikacje w NanoLetters, jedna w Nanoscale, dwie publikacje w Applied Physics Letters oraz jedna w Nanotechnology. Łączny *impact factor* czasopism tego cyklu wynosi 44.9.

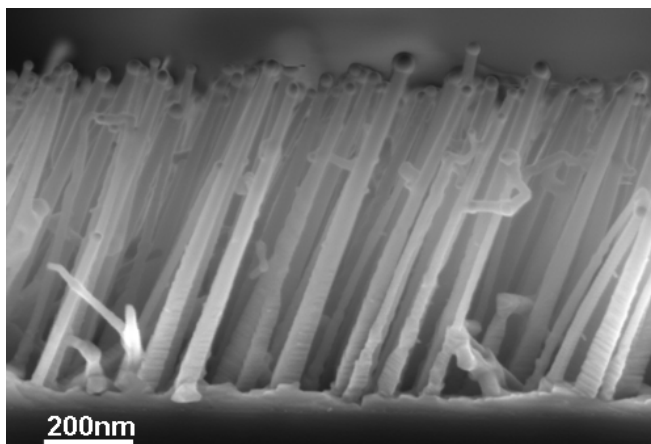
## 4.2. Dane bibliometryczne

Na mój dorobek naukowy składa się **77 publikacji** indeksowanych w *Journal of Citation Reports*, z czego w czasopismach posiadających *impact factor* ukazało się **57 publikacji**, a pozostałe 20 publikacje są publikacjami konferencyjnymi. Sumaryczny *impact factor* publikacji naukowych według tej listy wynosi **174.9**, a całkowita liczba cytowań - **737**, bez uwzględniania auto-cytowań - **506**. Indeks Hirscha moich publikacji wynosi **15**. Na dorobek naukowy składają się prace z różnych czasopism naukowych, takich jak: Physcal Review B – 18 publikacji, Acta Physica Polonica – 18 publikacji, Applied Physics Letters 4 publikacje, Physcial Review Letters – 3 publikacje, Journal of Applied Physics - 3 publikacje, NanoLetters – 2 publikacje, Nanotechnology – 2 publikacje, Solid State Communications - 2 publikacje, oraz Nanoscale, Journal of Crystal Growth, Crystal Growth and Design, European Physics Letters, Journal of Luminescence, Physica Status Solidi B - po jednej publikacji. Powyższe dane zostały odczytane na podstawie *Web of Science* (stan z dnia 21 marca 2016 roku).

## 4.3. Wprowadzenie – tło naukowe badań

Nanodrutry półprzewodnikowe należą do jednych z najczęściej badanych obecnie struktur o rozmiarach nanometrycznych. Są to pojedyncze kryształy posiadające typowo średnicę wynoszącą od kilku do kilkudziesięciu nanometrów przy długości kilku mikrometrów.

Zainteresowanie nanodrutami związane jest z wieloma ich możliwymi zastosowaniami w elektronice [1,2], fotonice [3,4], fotowoltaice [5], a także w sensorach chemicznych i biologicznych [6,7].



Rys. 1 Nanodruty ZnTe wytworzone przez mnie w Instytucie Fizyki PAN na podłożu GaAs przy użyciu wzrostu katalitycznego para-ciecz-ciało stałe w układzie do epitaksji z wiązek molekularnych

Pomimo tego, że pierwsze nanodrut zostały wytworzone już ponad 15 lat temu [8], zainteresowanie środowiska naukowego tymi strukturami wciąż rośnie. Tylko w 2015 roku liczba publikacji związanych z tematem nanodrutów wynosiła ponad 20 000 [9].

Wyżej wymieniony cykl prac H1-H6 opisuje wytwarzanie i własności optyczne nanodrutów zbudowanych jednocześnie z kilku półprzewodników bazujących na anionie telluru, takich jak ZnTe, (Zn,Mg)Te, (Zn,Mn)Te, CdTe, (Cd,Mn)Te przy użyciu epitaksji z wiązek molekularnych. Wszystkie te półprzewodniki posiadają prostą przerwę energetyczną w punkcie  $\Gamma$  strefy Brillouina odpowiadającą długości fali z obszaru światła widzialnego. Są zatem potencjalnie dobrymi emiterami i detektorami światła w tym zakresie spektralnym. Jest to istotne zarówno ze względu na możliwość zastosowań w optoelektronicznych przyrządach takich jak diody świecące, detektory światła lub baterie słoneczne, jak i z punktu widzenia badań podstawowych. Obecność luminescencji związanej z przerwą energetyczną, tak zwanej luminescencji krawędziowej, daje nam możliwość wglądu we własności struktury pasmowej w okolicy punktu  $\Gamma$  strefy Brillouina, z którego pochodzi emisja optyczna. W szczególności możemy badać wielkość przerwy energetycznej, rozszczepienie pasm dziur lekkich i ciężkich oraz rozszczepienie spinowe (Zeemana) krawędzi pasmowych w obecności pola magnetycznego.

Zainteresowanie półprzewodnikami bazującymi na anionie telluru związane jest często z dobrą rozpuszczalnością w nich jonów magnetycznych manganu. Nawet niewielka ich koncentracja powoduje natomiast znaczne zwiększenie efektów związanych ze spinem nośników będących efektem oddziaływania wymiennego *sp-d* z jonami magnetycznymi [10]. Oddziaływanie to jest cechą charakterystyczną klasy materiałów zwanych półprzewodnikami półmagnetycznymi lub też rozcieńczonymi półprzewodnikami magnetycznymi. Jednym z najważniejszych efektów wywołanych poprzez oddziaływanie wymienne *sp-d* jest znaczne zwiększenie rozszczepienia Zeemana krawędzi pasmowych, nawet o kilka rzędów wielkości, oraz polaryzacja spinowa nośników pasmowych. Bezpośredni wgląd w te efekty można uzyskać dzięki metodom spektroskopii optycznej, na przykład dzięki pomiarowi położenia energetycznego i polaryzacji luminescencji krawędziowej w zewnętrznym polu magnetycznym [11].

Celem moich badań jest wytworzenie heterostruktur zarówno osiowych jak i radialnych w nanodrutach tellurkowych, które charakteryzowałaby obecność intensywnej luminescencji krawędziowej, a następnie wykorzystanie tej emisji do badania takich efektów jak zmiany przerwy energetycznej wywołane naprężeniem występującym w nanodrutach, obecność rozszczepienia pasm dziur ciężkich i lekkich, a także zwiększenie rozszczepienia Zeemana w nanodrutach zawierających magnetyczne jony manganu wywołane poprzez oddziaływanie wymienne  $sp-d$ .

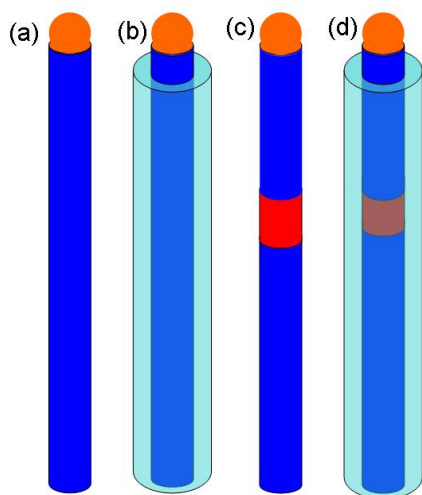
W ramach wprowadzenia do tematu moich badań naukowych zostanie najpierw przedstawiony mechanizm para-ciecz-ciało stałe, który stosujemy do wytwarzania nanodrutów tellurkowych, rozdział 4.3.1. Następnie, w rozdziale 4.3.2, opisane zostaną pokrótce różne rodzaje heterostruktur w nanodrutach półprzewodnikowych. Ostatnia część wprowadzenia, rozdział 4.3.3, poświęcony będzie przeglądowi literatury dotyczącemu nanodrutów zawierających jony magnetyczne. Nacisk położony będzie tutaj przede wszystkim na badaniach dotyczących oddziaływania wymiennego  $sp-d$  między nośnikami pasmowymi, a jonami magnetycznymi w tych strukturach. Rozdział 4.4 natomiast poświęcony będzie w całości opisowi wyników zawartych w poszczególnych pracach z cyklu H1-H6.

#### 4.3.1. Mechanizm wzrostu nanodrutów para-ciecz-ciało stałe

Jeden z najczęściej stosowanych sposobów wytwarzania nanodrutów polega na zastosowaniu mechanizmu para-ciecz-ciało stałe, w którym metaliczne nanocząstki, np. złota, pełnią rolę katalizatorów. Nanodruły wytwarzane są w temperaturze, w której te nanocząstki znajdują się w fazie ciekłej. Często tworzą one stop eutektyczny z atomami podłoża, co obniża ich temperaturę topnienia. Na powierzchni katalizatorów dochodzi do zwiększonej adsorpcji reagentów, które dostarczane są w stanie gazowym, np.: w formie wiązek cząsteczkowych. Szybko dochodzi do osiągnięcia stanu przesylenia reagentów w kroplach, a następnie do rekryształizacji na złączu ciecz-ciało stałe. W efekcie rośnie nanodrut *pod* kroplą katalityczną. Z tego powodu na wierzchołku każdego nanodrutu znajduje się kropla katalityczna, co jest dobrze widoczne na rys. 1. Średnica kropli zadaje nam średnicę nanodrutu, a czas wzrostu - jego długość. Mechanizm para-ciecz-ciało stałe został po raz pierwszy zastosowany już w latach 60-tych do wytwarzania struktur o średnicy mikrometrycznej [12]. Wykorzystanie tego mechanizmu do wytwarzania drutów krzemowych i germanowych o średnicy nanometrycznej stanowiło natomiast impuls do rozwoju badań nad tematyką nanodrutów półprzewodnikowych pod koniec lat 90-tych [8]. Wszystkie nanodruły opisywane w dalszej części autoreferatu są wytworzone przy użyciu mechanizmu para-ciecz-ciało stałe. Należy jednak pamiętać o tym, że nanodruły wytwarzane są obecnie także przy użyciu wielu innych metod nie wykorzystujących katalizatorów z obcego metalu [13,14].

#### 4.3.2. Heterostruktury w nanodrutach półprzewodnikowych

Znaczne zwiększenie możliwości potencjalnych zastosowań nanodrutów można osiągnąć łącząc kilka półprzewodników w pojedynczym nanodrucie. W zależności od kierunku wzrostu można otrzymać zarówno osiowe jak i radialne heterostruktury w nanodrutach. Okazuje się ponadto, że w geometrii nanodrutu można łączyć półprzewodniki ze znacznie większym niedopasowaniem sieciowym niż jest to możliwe w przypadku struktur planarnych [15].



Rys. 2 Przykładowe rodzaje heterostruktur w nanodrutach: (a) nanodrut wytworzony przy użyciu mechanizmu para-ciecz-ciało stałe z kropką metaliczną na wierzchołku (b) heterostruktura radialna typu rdzeń/otoczka (core/shell) (c) heterostruktura osiowa (d) heterostruktura osiowa z radialną otoczką

Obecność radialnej otoczki w nanodrucie typu rdzeń/otoczka (core/shell) przedstawionym schematycznie na rys. 2b może mieć istotny wpływ na własności nośników pasmowych znajdujących się w rdzeniu nanodrutu. W szczególności obserwowany jest znaczny wzrost ruchliwości elektronów w takich strukturach ze względu na pasywację stanów powierzchniowych [16,17]. Z tego samego powodu zaobserwowano również znaczne zwiększenie intensywności fotoluminescencji z nanodrutów posiadających otoczkę w przypadku nanodrutów bazujących na półprzewodnikach III-V [18]. Nanodruity ze strukturą radialną typu rdzeń/otoczka mogą być stosowane ponadto jako elementy optycznie aktywne w wielokolorowych diodach świecących [19,20], a także laserach [21]. Radialne złącza p-i-n natomiast znajdują zastosowanie w prototypach przyrządów fotowoltaicznych [5,22,23].

Jedną z najczęstszych motywacji do badania osiowych heterostruktur w nanodrutach [24], jest wytworzenie zero-wymiarowych kropek kwantowych, rys. 2c. Obiekty takie otrzymywane są w sytuacji gdy długość wstawki osiowej z półprzewodnika o mniejszej przerwie energetycznej ma rozmiary zbliżone do promienia Bohra ekscytonu w tym materiale [25-29]. Emisja optyczna z kropek kwantowych wzbudza szerokie zainteresowanie środowiska naukowego ze względu na szczególny charakter emitowanych fotonów. Stanowią one mianowicie źródło pojedynczych fotonów [30], co z kolei może znaleźć zastosowanie w kryptografii kwantowej, której dążeniem jest, aby informacja zapisywana była na indywidualnych fotonach. Zaletą kropek kwantowych znajdujących się w nanodrutach jest możliwość względnie prostego wykonania do nich kontaktów elektrycznych oraz ukierunkowanie emisji optycznej wzdłuż osi nanodrutu poprzez efekt światłowodowy [31]. Osiowe heterostruktury w nanodrutach mogą ponadto być zastosowane także do wytwarzania efektywnych przyrządów fotowoltaicznych [32] oraz kodów paskowych o rozmiarach nanometrycznych [33].

#### 4.3.3. Jony magnetyczne w nanodrutach

Jak już wspomniałem na wstępie, jedną z głównych motywacji badań nanodrutów tellurkowych jest możliwość wprowadzenia do nich jonów magnetycznych manganu, co umożliwi badania oddziaływania wymiennego *sp-d* między nośnikami pasmowymi a jonami magnetycznymi w strukturach o rozmiarach nanometrycznych.

Zainteresowanie środowiska naukowego nanodrutami zbudowanymi z rozcieńczonych półprzewodników magnetycznych związane jest zarówno z badaniami podstawowymi wpływu rozmiaru i wymiarowości nanodrutów na ich własności magnetyczne jak i z możliwymi zastosowaniami w elektronice wykorzystującej spin nośników - spintronice. W nanodrutach, dzięki anizotropii ich kształtu, może występować szereg efektów nie spotykanych w kryształach objętościowych. Na przykład, obroty spinu nośników mogą być ograniczone tylko do jednej osi - do osi nanodrutu. Ponadto proces relaksacji spinowej w nanodrutach może silnie zależeć od rozmiaru poprzecznego nanodrutu. W szczególności, może być on znacząco spowolniony lub nawet zablokowany [34]. W przypadku nanodrutów o większej średnicy, dla której nie występuje jednowymiarowe ograniczenie kwantowe, możliwy jest natomiast porządek ferromagnetyczny jonów magnetycznych wywołany oddziaływaniem wymiennym  $p-d$  [35]. Efektywna magnetyzacja może mieć kierunek zarówno równoległy [36], albo prostopadły do osi nanodrutu [37] w zależności od naprężenia. W cienkich, jednowymiarowych nanodrutach natomiast porządek ferromagnetyczny nie jest stanem podstawowym. Możliwe są natomiast zupełnie inne bardziej nietypowe rodzaje porządku magnetycznego, jak na przykład - fale gęstości spinowej.

Istnieje wiele publikacji poświęconych wprowadzaniu jonów magnetycznych do nanodrutów włączając w to półprzewodniki II-VI [38-40], III-V [36,37,41-43] a także z półprzewodniki z grupy IV [44,45]. Tylko pojedyncze prace natomiast opisują efekty związane z oddziaływaniem wymiennym  $sp-d$  elektronów i dziur pasmowych z jonami magnetycznymi. W tym celu wykorzystywane są przede wszystkim pomiary transportu nośników w pojedynczym nanodrucie w polu magnetycznym [36,46,47], albo pomiary magnetycznego dichroizmu promieniowania X [48].

Bezpośredni wgląd w oddziaływanie wymienne  $sp-d$  można uzyskać natomiast w pomiarach luminescencji krawędziowej poprzez obserwację wielkości rozszczepienia Zeemana stanów ekscytonowych, jak zostało to pokazane dla kryształów objętościowych [49]. Jednakże, nie zawsze są takie pomiary możliwe. W przypadku półprzewodników domieszkowanych manganem, których przerwa energetyczna jest większa niż 2.0 eV-2.2 eV należy brać pod uwagę obecność przejścia wewnątrz-manganowego powodującego efektywny transfer wzbudzenia do jonów  $Mn^{2+}$ , a w konsekwencji znaczne osłabienie, a najczęściej całkowity zanik luminescencji krawędziowej [50]. Taka sytuacja występowała na przykład w przypadku nanodrutów (Zn,Mn)S [51], (Cd,Mn)S [39] i (Ga,Mn)N [52]. W przypadku nanodrutów zawierających (Ga,Mn)As natomiast nie obserwuje się zazwyczaj luminescencji krawędziowej ze względu na konieczność wykonywania tych struktur w niskiej temperaturze, co prowadzi do powstawania defektów punktowych powodujących zanik emisji krawędziowej. Półprzewodniki tellurkowe, (Cd,Mn)Te i (Zn,Mn)Te, ze względu na odpowiednią szerokość przerwy energetycznej, która jest porównywalna z energią przejścia wewnątrz-manganowego, mogą natomiast zostać zastosowane do pomiarów rozszczepienia Zeemana stanów ekscytonowych. Dzięki temu możemy uzyskać wgląd w wielkość oddziaływania wymiennego  $sp-d$  w tych strukturach charakteryzujących się rozmiarami nanometrycznymi.

#### 4.4. Optycznie aktywne heterostrukтуры w nanodrutach tellurkowych, opis cyklu publikacji H1-H6

Tematem nanodrutów tellurkowych zająłem się na etapie, kiedy w pomiarach optycznych nie zaobserwowana została jeszcze luminescencja krawędziowa, czyli luminescencja związana z przejściami optycznymi w energiach odpowiadających przerwie energetycznej. Emisja

optyczna z nanodrutów ZnTe ograniczona była do świecenia defektowego związanego najprawdopodobniej z lukami cynkowymi, a także do świecenia wewnątrz-manganowego w przypadku nanodrutów (Zn,Mn)Te [54]. Opracowana natomiast była już sama procedura wzrostu nanodrutów ZnTe [53] i (Zn,Mn)Te [54] przy użyciu mechanizmu para-ciecz-ciało stałe w układzie do epitaksji z wiązek molekularnych. Brak świecenia krawędziowego z analogicznie wykonanych nanodrutów ZnTe został również potwierdzony w zespole prof. H. Mariette'a i prof. J. Ciberta z francuskiego Narodowego Centrum Badań Naukowych w Grenoble. Zachodziła zatem obawa, że pomiary fotoluminescencji krawędziowej w przypadku nanodrutów ZnTe są niemożliwe. Spekulowano nawet nad możliwymi powodami tego stanu rzeczy. Jednym z nich mogłoby być wbudowywanie się atomów Au do nanodrutów ZnTe podczas wzrostu katalitycznego para-ciecz-ciało stałe. Mogłoby to z kolei prowadzić to do powstawania głębokich stanów domieszkowych, a w efekcie do zaniku luminescencji krawędziowej. Pomimo tego, moje badania były skoncentrowane w pierwszej kolejności na uzyskaniu świecenia krawędziowego z nanodrutów tellurkowych. Okazało się, że głównym efektem odpowiedzialnym za brak luminescencji krawędziowej z nanodrutów ZnTe są stany powierzchniowe, a nie wytrącanie się atomów Au. Dzięki temu udało mi się uzyskać względnie intensywną luminescencję krawędziową w szeregu heterostruktur bazujących na nanodrutach tellurkowych.

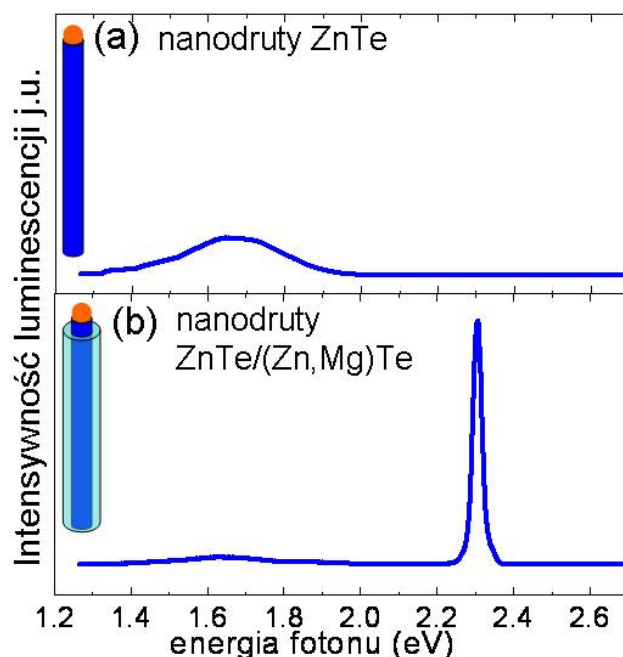
Publikacje H1, H2 i H3 poświęcone są wytwarzaniu heterostruktur w nanodrutach tellurkowych posiadających intensywną emisję krawędziową oraz badaniu ich własności optycznych. Luminescencja krawędziowa została aktywowana zarówno w heterostrukturach radialnych typu rdzeń/otoczka, H1, osiowych kropkach kwantowych H2, heterostrukturach radialnych z wieloma otoczkami H3, oraz heterostrukturach osiowych otoczonych dodatkowo radialną otoczką, H3. Na uwagę zasługuje fakt, że w naszych pracach nie ograniczamy się do obserwacji luminescencji z zespołu nanodrutów, ale badamy także własności luminescencyjne pojedynczych nanodrutów przy pomocy katodoluminescencji i mikro-fotoluminescencji. W pracy H4 wykorzystana została luminescencja krawędziowa do badania wpływu naprężenia na wielkość przerwy energetycznej w nanodrutach typu rdzeń/otoczka. Natomiast wprowadzenie jonów magnetycznych manganu do nanodrutów tellurkowych opisane jest szczegółowo w publikacji H5. Również w tym przypadku badana jest luminescencja krawędziowa, a najważniejszym wynikiem jest bezpośrednia obserwacja zwiększenia rozszczepienia Zeemana nawet o 1-2 rzędy wielkości wywołana oddziaływaniem wymiennym *sp-d* w nanodrutach. W publikacji H6 wykazujemy natomiast w unikatowym eksperymencie, że rozszczepienie Zeemana stanów ekscytonowych w nanodrutach (Zn,Mn)Te/(Zn,Mg)Te typu rdzeń/otoczka silnie zależy od kierunku przyłożonego pola magnetycznego względem osi nanodrutu. Pokazujemy, że spin dziury 'zablokowany' jest wzdłuż osi nanodrutu, tak że przyłożenie prostopadłego pola magnetycznego nie ma na niego żadnego wpływu. Efekt ten związany jest z rozszczepieniem pasm dziur ciężkich i lekkich. W publikacji H6 opisujemy ponadto wytwarzanie magnetycznych wstawek osiowych (Cd,Mn)Te w niemagnetycznych nanodrutach ZnTe. W strukturach tych obserwujemy także zwiększenie rozszczepienia Zeemana o 1-2 rzędy wielkości oraz jego anizotropię związaną z geometrią nanodrutu.

### Aktywacja luminescencji krawędziowej w nanodrutach ZnTe/(Zn,Mg)Te typu rdzeń/otoczka, H1

W pierwszej kolejności podjęliśmy prace mające na celu aktywację luminescencji krawędziowej w nanodrutach ZnTe. Wytworzone zostały nanodrutu w różnych warunkach wzrostu, takich jak temperatura podłoża i stosunek strumieni cząsteczkowych Zn/Te. Nie



doprowadziło to jednak do pojawienia się emisji krawędziowej. Również wygrzewanie nanodrutów ZnTe w atmosferze Zn nie przyniosło oczekiwanych wyników, pomimo że analogiczna procedura w przypadku nanodrutów ZnSe znacznie zwiększyła intensywność świecenia krawędziowego w tych strukturach [55]. Skuteczne okazało się natomiast dodanie względnie cienkiej otoczki radialnej z (Zn,Mg)Te, czyli półprzewodnika z większą przerwą energetyczną, rys 3. Jej zadaniem jest odsunięcie powierzchni od rdzenia nanodrutu ZnTe, a tym samym pasywacja stanów powierzchniowych. Za brak emisji krawędziowej odpowiedzialne są zatem głównie stany powierzchniowe, a nie wbudowywanie się atomów złota do struktury nanodrutu.



Rys. 3 Aktywacja luminescencji krawędziowej w nanodrutach ZnTe. (a) Widmo fotoluminescencji nanodrutów ZnTe bez otoczki, gdzie występuje tylko luminescencja defektowa w energii 1.65 eV oraz (b) widmo fotoluminescencji nanodrutów ZnTe/(Zn,Mg)Te typu rdzeń/otoczka, w którym pojawia się luminescencja krawędziowa w 2.3 eV. Temperatura pomiaru 10 K, pobudzenie laserem 405 nm.

Aktywacja świecenia krawędziowego w nanodrutach ZnTe została opisana w pracy H1. Szczególną uwagę zwracamy tutaj na rolę użytego podłoża do wzrostu nanodrutów. Nawet o rząd wielkości bardziej intensywne świecenie krawędziowe uzyskane zostało na strukturach wytworzonych na podłożach Si niż na GaAs pomimo podobnych własności krystalicznych tych nanodrutów. Co więcej, w przypadku nanodrutów wytworzonych na podłożu GaAs obserwujemy względnie intensywne świecenie defektowe, które jest o rząd wielkości słabsze w nanodrutach wytworzonych na Si. Wnioskujemy zatem, że najprawdopodobniej obecność atomów Ga w kropli katalitycznej Au/Ga oraz jego wytrącenie podczas wzrostu katalitycznego para-ciecz-ciało stałe odpowiedzialne jest za osłabienie emisji krawędziowej w nanodrutach wytworzonych na podłożach GaAs. Z tego względu w pracach: H3, H4, H6, wykorzystywane były już tylko podłoża krzemowe.

W publikacji H1 wykazujemy przy użyciu pomiarów katodoluminescencji, że zaobserwowana emisja rzeczywiście pochodzi głównie od nanodrutów, a nie na przykład od warstwy ZnTe, która wyrosła pomiędzy nanodrutami. Mapowanie sygnału katodoluminescencji w energiach odpowiadających luminescencji krawędziowej pokazuje jednoznacznie, że obiekty emitujące w tym zakresie spektralnym są podłużne, a ich położenie odpowiada położeniu nanodrutów. Ponadto wykazujemy, że intensywność świecenia krawędziowego z nanodrutów jest wystarczająco duża, żeby można było badać emisję od pojedynczych nanodrutów także przy użyciu mikro-fotoluminescencji. Pokazujemy ponadto, że emisja z pojedynczych nanodrutów jest spolaryzowana liniowo najprawdopodobniej

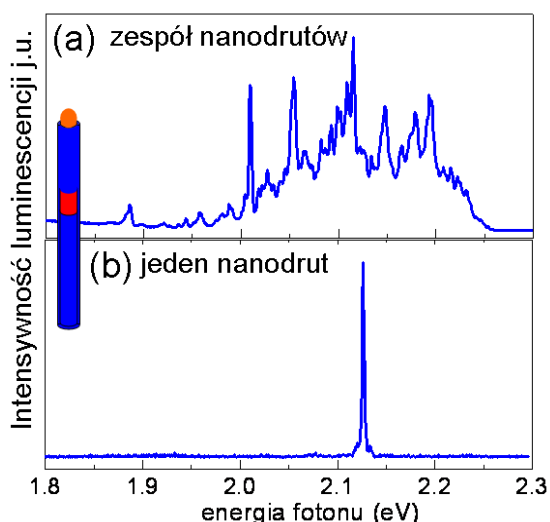
wzdłuż osi nanodrutu, co może być spowodowane dużym kontrastem stałych dielektrycznych między nanodrutem, a otoczeniem [56].

Otoczki, które pasywują stany powierzchniowe, a tym samym polepszają własności optyczne nanostruktur, dodawane były w przypadku wielu innych nanostruktur, na przykład do nanodrutów zrobionych z półprzewodników III-V [18]. My natomiast zastosowaliśmy ten pomysł do nanodrutów z półprzewodników II-VI, co aktywowało w nich luminescencję krawędziową i umożliwiło dalsze badania optyczne heterostruktur zbudowanych z półprzewodników tellurkowych.

Spójna z naszymi wynikami jest obserwacja fotoluminescencji z nanodrutów ZnTe wytworzonych zupełnie innymi metodami (chemicznymi) po uprzedniej stabilizacji powierzchni kwasem oleinowym [57]. Wynik ten potwierdza istotną rolę stanów powierzchniowych na własności optyczne nanodrutów ZnTe. Warto zauważyć ponadto, że luminescencja krawędziowa z nanodrutów ZnTe bez otoczki jest również obserwowana, ale tylko w przypadku struktur o bardzo dużych średnicach wynoszących około 500 nm [58,59]. W takich strukturach wpływ stanów powierzchniowych jest znacznie mniejszy niż w naszym przypadku, kiedy to średnica wynosi około 30 nm. W przypadku dużych średnic nanodrutów natomiast nie jest możliwa obserwacja efektów kwantowych, a w szczególności wytwarzanie kropek kwantowych w nanodrutach.

### Kropki kwantowe CdTe w nanodrutach ZnTe, H2

Jak już pisałem na wstępie, struktura złożona z niewielkiego osiowego segmentu z półprzewodnika o mniejszej przerwie energetycznej w nanodrucie z półprzewodnika o szerszej przerwie energetycznej może stanowić efektywne źródło światła o szczególnym charakterze emitowanych fotonów. W sytuacji, gdy długość wstawki osiowej będzie odpowiednio mała, porównywalna z promieniem Bohra ekscytonu, mamy do czynienia z obiektem zero wymiarowym – kropką kwantową. Obiekt taki stanowi źródło pojedynczych fotonów, co z kolei może znaleźć zastosowanie w kryptografii kwantowej.



Rys. 4 Luminescencja z kropek kwantowych CdTe w nanodrutach ZnTe – pomiar przy użyciu mikro-fotoluminescencji: (a) wiele kropek pobudzanych jednocześnie (b) widmo od pojedynczej kropki kwantowej w nanodrucie zmierzone po rozrzuconiu nanodrutów na podłożu krzemowym. Temperatura pomiaru 10 K, pobudzenie laserem 405 nm.

W publikacji H2 opisane zostało wytworzenie kropek kwantowych CdTe w nanodrutach ZnTe. Były to pierwsze tego typu struktury zrobione z półprzewodników bazujących na anionie telluru. W pracy tej opisujemy na początku identyfikację przejść optycznych od

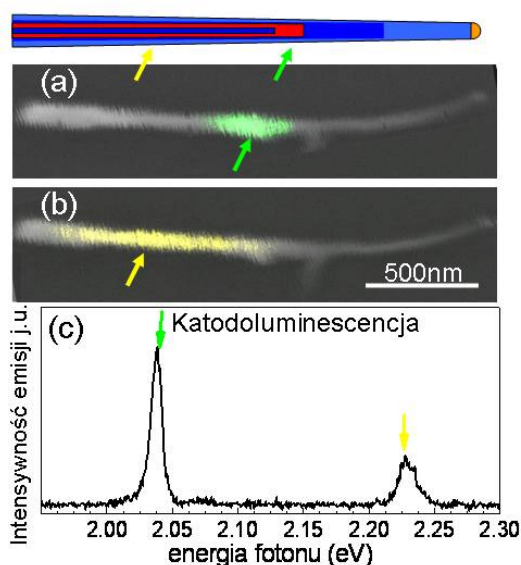
kropek kwantowych CdTe, rys 4. W kolejnym kroku wykazujemy silną polaryzację liniową emisji od pojedynczych kropek, która świadczy o tym, że struktury te znajdują się rzeczywiście w nanodrutach, ze względu na duży kontrast stałych dielektrycznych między nanodrutem i otoczeniem. Na koniec wykazujemy jednofotonowy charakter emisji z pojedynczej kropki kwantowej w pomiarach korelacji fotonów przy użyciu standardowego układu Hanburego-Browna-Twiss'a. Wynik ten potwierdza zero-wymiarowy charakter ograniczenia kwantowego w tych strukturach.

Należy zauważyć ponadto, że w powyższej pracy nanodrut nie były pasywowane dodatkową otoczką radialną (Zn,Mg)Te. W tym przypadku pasywacja powierzchni kropek kwantowych zachodzi dzięki cienkiej otoczce radialnej ZnTe powstałej wokół kropki kwantowej CdTe poprzez względnie niską temperaturę nakładania górnego segmentu nanodrutu ZnTe. Znacznie bardziej intensywną emisję z kropek kwantowych w nanodrutach można natomiast uzyskać po intencjonalnym dodaniu zewnętrznej otoczki (Zn,Mg)Te, czyli po wytworzeniu analogicznej struktury jak zostało to przedstawione na rysunku 2d. Tego typu heterostrukтуры są częściowo tematem pracy H3.

### Wytwarzanie optycznie aktywnych heterostruktur radialnych i osiowych w pojedynczym nanodrucie, H3

W publikacji H3 podsumowujemy nasze badania dotyczących wprowadzania optycznie aktywnych wstawek CdTe do nanodrutów ZnTe. Wszystkie badane struktury są dodatkowo otoczone radialną otoczką (Zn,Mg)Te zapewniającą ich dobre własności optyczne. Wykazujemy w szczególności, że w zależności od parametrów wzrostu jesteśmy w stanie wytworzyć zarówno osiowe jak i radialne wstawki CdTe. Te ostatnie heterostrukтуры składają się zatem z kilku radialnych otoczek ZnTe/CdTe/ZnTe/(Zn,Mg)Te, przy czym optycznie aktywna jest otoczka CdTe, ze względu na najmniejszą przerwę energetyczną.

Kierunek wzrostu wstawek CdTe w nanodrutach ZnTe kontrolowany jest głównie poprzez temperaturę wzrostu tego segmentu. W 350 °C segment CdTe rośnie tylko osiowo, podczas gdy w 310 °C i 290 °C występuje znaczne osadzanie CdTe na ściankach nanodrutów powodując powstanie struktury radialnej. Nadmierne podwyższenie temperatury wzrostu, powyżej 360 °C, powoduje natomiast brak osadzania się warstw CdTe ze względu na efektywną termiczną desorpcję tego materiału.

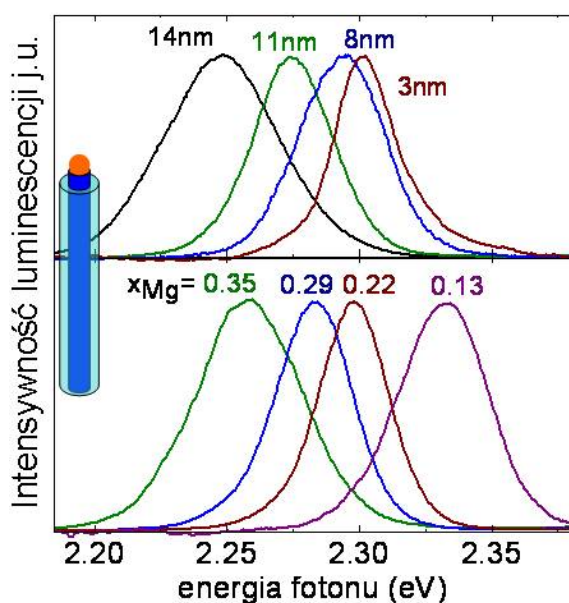


Rys. 5 Pomiar katodoluminescencji z pojedynczego nanodrutu zawierającego jednocześnie wstawki osiowe i radialne CdTe. (a) obraz ze skaningowego mikroskopu elektronowego wraz z mapą sygnału katodoluminescencji (zielony kolor) w energii 2.03eV odpowiadającej wstawce osiowej oraz (b) w energii 2.23 eV odpowiadającej wstawce radialnej (kolor żółty). (c) Widmo katodoluminescencji od badanego nanodrutu. Temperatura pomiaru 8 K, pobudzenie emisji prądem próbki 500 pA, przy napięciu przyspieszającym 15 kV.

Na nasze badania składają się spójne wyniki uzyskane za pomocą katodoluminescencji i spektrometrii dyspersyjnej promieniowania X (EDX - Energy Dispersive X-ray Spectroscopy). Wykazują one w szczególności, że przy odpowiedniej temperaturze wzrostu można uzyskać struktury, w których współlistnieją zarówno wstawki osiowe jak i otoczki radialne CdTe w nanodrutach ZnTe. Dzięki pomiarom mapowania katodoluminescencji udało się zidentyfikować linie emisyjne od obydwu rodzajów heterostruktur, rys. 5, a w pomiarach mikro-fotoluminescencji wykazujemy silną liniową polaryzację linii emisyjnych wzdłuż osi nanodrutu od obydwu rodzajów struktur.

#### Naprężenia w strukturze radialnej typu rdzeń/otoczka i ich wpływ na wielkość przerwy energetycznej w rdzeniu nanodrutu, H4

Nieodłączną własnością nanodrutów typu rdzeń/otoczka jest naprężenie wynikające z niedopasowania sieciowego pomiędzy półprzewodnikiem rdzenia i półprzewodnikiem otoczki. Aktywacja świecenia krawędziowego w tego typu strukturach pozwoliła nam na badanie wpływu naprężenia na szerokość przerwy energetycznej w rdzeniu nanodrutu, H4. Jest to naprężenie rozciągające ze względu na większą stałą sieci otoczki (Zn,Mg)Te. Parametrami pozwalającymi kontrolować naprężenie jest natomiast zawartość Mg w otoczce, oraz grubość otoczki. W zależności od tych parametrów obserwujemy znaczną zmianę przerwy energetycznej ZnTe wynosząca maksymalnie aż 80 meV w pomiarach fotoluminescencji, rys 6.



Rys 6 Zmiana energii emisji krawędziowej z rdzenia nanodrutów ZnTe/(Zn,Mg)Te w zależności od naprężenia, które jest zadane albo (a) przez grubość otoczki, albo (b) przez koncentrację Mg w otoczce,  $x_{Mg}$ . Zwiększenie obydwu parametrów powoduje zwiększenie naprężenia i znaczne przesunięcie emisji w stronę niższych energii. Wszystkie widma zostały unormalizowane. Temperatura pomiaru 10 K, pobudzenie linią lasera 405 nm.

Im większa zawartość Mg i grubość otoczki tym mniejszą przerwę energetyczną w rdzeniu ZnTe wykazywały pomiary fotoluminescencji krawędziowej. Przeprowadzone zostały obliczenia teoretyczne potwierdzające, że tak duże zmiany przerwy energetycznej są wywołane poprzez naprężenie.

O ile temat naprężeń w nanodrutach rdzeń/otoczka był tematem wielu publikacji w literaturze światowej, to wpływ tego efektu na strukturę pasmową w nanodrutach jest względnie słabo zbadany. Pojedyncze prace na ten temat opisywały przeważnie półprzewodniki z klasy III-V [18,60]. Publikacja H4 potwierdziła, że znaczne zmiany przerwy energetycznej pod wpływem naprężeń możliwe są również w przypadku nanodrutów wykonanych z półprzewodników II-VI. Szczególnie korzystny w naszym układzie jest fakt, że inne efekty mogące wpłynąć na

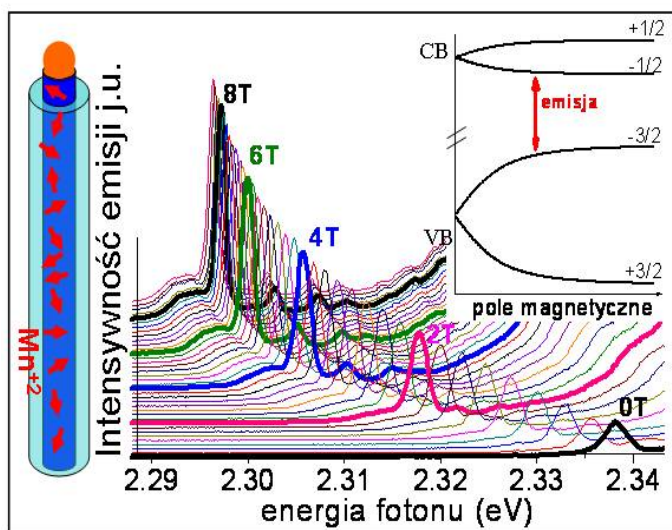


wielkość przerwy energetycznej, takie jak ograniczenie kwantowe lub dyfuzja atomów pomiędzy rdzeniem a otoczką, zmieniałyby przerwę energetyczną w przeciwnym kierunku niż naprężenie. Wyniki doświadczalne opublikowane w pracy H4 potwierdziły ponadto słuszność modelu analitycznego opisującego naprężenia w nanodrutach zaproponowanego prawie jednocześnie przez zespół francuski [61,62].

### Oddziaływanie wymienne $sp-d$ w nanodrutach $(Zn,Mn)Te/(Zn,Mg)Te$ typu rdzeń otoczką, H5

Jednym z najważniejszych osiągnięć opisywanym powyższym cyklu publikacji jest wytworzenie nanodrutów zawierających względnie niewielką koncentrację jonów magnetycznych oraz wykazanie, że jony te oddziałują z nośnikami pasmowymi poprzez oddziaływanie wymienne  $sp-d$ .

Optycznie aktywne nanodrutki zawierające jony magnetyczne manganu wytworzyliśmy poprzez niewielką modyfikację procedury wzrostu nanodrutów  $ZnTe/(Zn,Mg)Te$  typu rdzeń/otoczką opisaną szczegółowo w H1. Zmiana ta polegała na dodaniu względnie niewielkiego strumienia cząsteczkowego manganu do strumienia cząsteczkowego cynku podczas wzrostu rdzenia nanodrutów w układzie do epitaksji z wiązek molekularnych. Wytworzona została seria próbek z różną zawartością manganu ściśle kontrolowaną poprzez wielkość strumieni cząsteczkowych. Zawartość manganu nie przekracza w żadnej próbce 10%. Obecność jonów manganu w naszych strukturach została potwierdzona poprzez zwiększenie się przerwy energetycznej wraz ze wzrostem zawartości manganu oraz za pomocą spektrometrii dyspersyjnej promieniowania X, gdzie zostały zaobserwowane charakterystyczne linie promieniowania X odpowiadające przejściom między-powłokowym w atomach manganu.



Rys. 7 Gigantyczne rozszczepienie Zeemana w pojedynczym nanodrucie  $(Zn,Mn)Te/(Zn,Mg)Te$  typu rdzeń/otoczką. Linia luminescencyjna przesuwana się o ponad 40 meV podczas gdy w niemagnetycznych strukturach przesunięcie wynosi 3-5 meV. W prawym górnym rogu pokazany jest schemat rozszczepienia Zeemana wraz z obserwowanym przejściem optycznym i spinami nośników. CB – dno pasma przewodnictwa, VB – wierzchołek pasma walencyjnego.

Najistotniejszy wynik uzyskaliśmy natomiast badając luminescencją krawędziową z nanodrutów po przyłożeniu zewnętrznego pola magnetycznego (w konfiguracji Faradaya wzdłuż osi nanodrutu). Obserwujemy tutaj znaczne przesuwanie się linii luminescencyjnych w stronę niższych energii oraz ich częściową polaryzację kołową. Obydwa te efekty są o co najmniej rząd wielkości większe niż w przypadku nanodrutów nie zawierających jonów magnetycznych i skalują się wraz z ich zawartością. Efekt ten spowodowany jest zwiększeniem rozszczepienia Zeemana o co najmniej rząd wielkości ze względu na

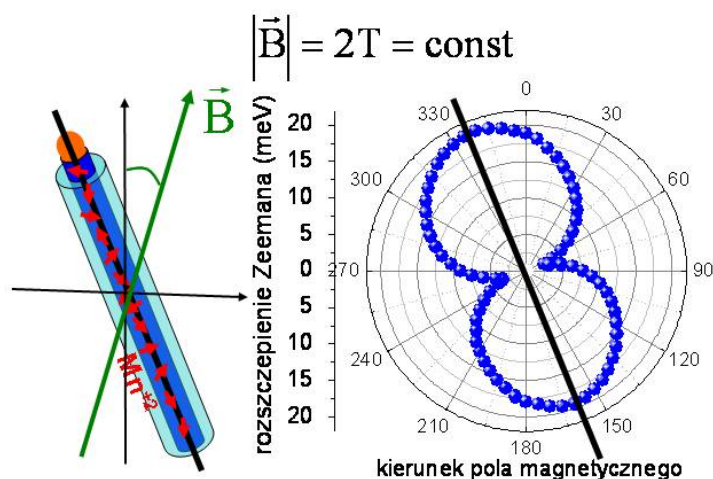
oddziaływanie wymienne *sp-d* nośników pasmowych z jonami magnetycznymi. Za polaryzację kołową emisji odpowiada natomiast polaryzacja spinowa nośników pasmowych.

Zwiększenie rozszczepienia Zeemana szczególnie dobrze jest widoczne w doświadczeniu przeprowadzonym na pojedynczych nanodrutach przy użyciu mikro-fotoluminescencji, rys. 7. Dzięki mikrometrycznym rozmiarom wiązki lasera pobudzana jest względnie niewielka liczba nanodrutów jednocześnie. Ponieważ świecenie od różnych nanodrutów ma miejsce w nieco innej energii możemy łatwo odizolować świecenie od pojedynczego nanodrutu. Względnie niewielka szerokość tych linii emisyjnych, rzędu 1 meV, powoduje, że przesunięcie o ponad 40 meV w zewnętrznym polu magnetycznym jest tutaj szczególnie dobrze widoczne, rys 7. Dla porównania, w przypadku niemagnetycznych nanodrutów przesunięcie to wynosi typowo około 3-5 meV w 8 T. Nasze badania wykazują ponadto, że koncentracja Mn w różnych nanodrutach wykonanych w tym samym procesie wzrostu niewiele różni się od siebie. Na przykład dla nanodrutów ze średnią koncentracją Mn równą 3.5%, koncentracja Mn w poszczególnych nanodrutach zmienia się od 2.5% do 4.5%. Nie ma natomiast sytuacji, że jeden nanodrut zawiera jony magnetyczne, a drugi już nie.

Podobne do naszych wyników uzyskane były tylko na nanodrutach (Zn,Mn)Se [63]. Jednakże autorzy tej pracy przyznają, że emisja optyczna z ich struktur zawierała również świecenie niekoniecznie związane z samymi nanodrutami, ale także ze strukturami, które wyrosły jednocześnie razem z nimi. Nie badają oni natomiast pojedynczych nanodrutów, tylko ich zespół. Z tego powodu nasza praca ma znaczący wpływ na literaturę światową dotyczącą nanodrutów zawierających jony magnetyczne..

### Anizotropia rozszczepienia spinowego w pojedynczych nanodrutach, H6

Półmagnetyczne nanodrutu (Zn,Mn)Te/(Zn,Mg)Te typu rdzeń/otoczka zostały wykorzystane do unikatowego doświadczenia, w którym zbadany został wpływ kierunku pola magnetycznego względem osi nanodrutu na wielkość rozszczepienia spinowego, H6. Badania te przeprowadzono na kilku pojedynczych nanodrutach. Okazało się, że rozszczepienie spinowe jest zawsze kilka razy większe w konfiguracji, gdy pole magnetyczne przyłożone jest wzdłuż osi nanodrutu, niż gdy przyłożone jest prostopadłe do niego. Ażeby potwierdzić, że wynik ten związany jest z geometrią nanodrutu wykonany został kolejny eksperyment, w którym w sposób ciągły zmieniany był kierunek pola magnetycznego przy stałej jego wartości, a mierzona była wielkość rozszczepienia spinowego. Okazało się, że największe rozszczepienie występuje dla pola magnetycznego równoległego do osi nanodrutu, a najmniejsze dla pola magnetycznego prostopadłego do niej, rys. 8.



Rys. 8 Wpływ kierunku pola magnetycznego względem osi nanodrutu na wielkość rozszczepienia Zeemana. Największe rozszczepienie jest zmierzone dla pola równoległego do osi nanodrutu. Pole magnetyczne  $B = 2\text{ T}$ , temperatura pomiaru  $2\text{ K}$ , pobudzenie laserem o długości fali  $405\text{ nm}$

Interpretacja tego wyniku związana jest ze strukturą pasmową półprzewodnika rdzenia nanodrutu, a w szczególności z rozszczepieniem pasm dziur ciężkich i lekkich, które może być wywołane naprężeniem rdzenia (Zn,Mn)Te poprzez obecność niedopasowanej sieciowo otoczki (Zn,Mg)Te. W rezultacie spin dziury zostaje 'zablokowany' wzdłuż osi nanodrutu, a przyłożenie prostopadłego pola magnetycznego nie ma na niego dużego wpływu. Przeprowadzone zostały szczegółowe obliczenia potwierdzające wyżej wymienianą interpretację oraz wyznaczona została wielkość rozszczepienia pasm dziur ciężkich i lekkich dla kilku pojedynczych nanodrutów. Zastosowana przez nas procedura eksperymentalna daje zatem unikatową możliwość wglądu we własności struktury elektronowej pojedynczych nanodrutów. Dzięki niej możemy jednoznacznie rozróżnić, czy stanem podstawowym są dziury ciężkie, czy też dziury lekkie.

W publikacji H6 opisujemy ponadto wytworzenie nanodrutów ZnTe z osiowymi wstawkami (Cd,Mn)Te zawierającymi magnetyczne jony manganu. Sama procedura wzrostu była analogiczna jak było opisane to w publikacji H2 z różnicą polegającą na włączeniu niewielkiego strumienia manganu tylko podczas wzrostu wstawki osiowej (Cd,Mn)Te. Podobnie jak w przypadku pracy H3, struktury te otoczone zostały dodatkowo otoczką (Zn,Mg)Te, aby zapewnić intensywną emisję krawędziową. Pomiar luminescencji tych struktur wykazują również znaczne zwiększenie rozszczepienia Zemana będącego następstwem oddziaływaniem wymiennego *sp-d* jonów magnetycznych z elektronami i dziurami. Wynik ten jest szczególnie ważny ze względu na fakt, że w do tej pory nie było w literaturze publikacji opisujących wytwarzanie kropek kwantowych w nanodrutach, które zawierałyby jony magnetyczne. Emisja z kropek kwantowych w nanodrutach wykazuje również silną anizotropię rozszczepienia Zemana w zależności od kierunku pola magnetycznego. Na efekt ten oprócz naprężenia może dodatkowo wpływać ograniczenie kwantowe wzdłuż osi nanodrutu, które dodatkowo rozszczepia stany lekko i ciężkodziurowe.

W dalszym toku prac będziemy starali się zbadać, czy istnieją znaczne różnice pomiędzy własnościami półmagnetycznych kropek kwantowych w nanodrutach, i półmagnetycznych kropek kwantowych wytworzonych w cienkich warstwach poprzez samoorganizację. Różnice te mogłyby być związane na przykład z formowaniem się spontanicznego uporządkowania magnetycznego - polaronu magnetycznego lub też jego brakiem.

### Najważniejsze osiągnięcia - podsumowanie

Podsumowując, do najważniejszych osiągnięć zaprezentowanych w powyższym cyklu prac H1-H6 zaliczam:

- Uzyskanie świecenia krawędziowego z nanodrutów ZnTe wykonanych w modzie wzrostu para-ciecz-ciało stałe przy użyciu epitaksji z wiązek molekularnych poprzez dodanie cienkiej radialnej otoczki pasywującej stany powierzchniowe, H1, H5.
- Wytworzenie optycznie aktywnych kropek kwantowych CdTe w nanodrutach ZnTe oraz wykazanie, że ich emisja optyczna ma charakter jednofotonowy, H2.
- Uzyskanie kontroli nad kierunkiem wzrostu wstawek CdTe w nanodrucie ZnTe poprzez zmianę temperatury wzrostu, dzięki czemu wytworzone zostały optycznie aktywne nanodrut z wieloma radialnymi otoczkami oraz heterostrukury, w których współistnieją osiowe i radialne wstawki CdTe, H3.
- Identyfikacja emisji optycznej od osiowych i radialnych heterostruktur w pojedynczych nanodrutach przy użyciu katodoluminescencji i mikro-fotoluminescencji, H1-H3.

- Zbadanie wpływu naprężenia występującego w nanodrutach typu rdzeń/otoczka na wielkość przerwy energetycznej w tych strukturach, H4.
- Wprowadzenie jonów magnetycznych manganu zarówno do nanodrutów (Zn,Mn)Te/(Zn,Mg)Te typu rdzeń/otoczka, H5, jak i do osiowych wstawek (Cd,Mn)Te w niemagnetycznych nanodrutach ZnTe, H6.
- Wykazanie znacznego zwiększenia rozszczepienia Zemana odzwierciedlającego bezpośrednio oddziaływanie wymienne *sp-d* między nośnikami pasmowymi, a jonami magnetycznymi w obydwu rodzajach struktur zawierających jony magnetyczne, H5, H6.
- Wykazanie silnej anizotropii rozszczepienia Zemana zależnej od kierunku pola magnetycznego względem osi nanodrutu dającej nam możliwość wglądu w strukturę pasmową pojedynczego nanodrutu, a w szczególności w rozszczepienie pasm lekko i ciężkodziurowych, H6.

Na koniec opisu cyklu prac H1-H6 chciałbym podkreślić mój wiodący wkład we wszystkich wymienionych publikacjach. Kierowałem pracami począwszy od pomysłu na doświadczenie, wytworzenie próbek z nanodrutami, charakteryzację przy użyciu fotoluminescencji i skaningowego mikroskopu elektronowego, aż do pomiarów bardziej zaawansowanych, takich jak mikro-fotoluminescencja i katodoluminescencja. W przypadku pracy H6, część pomiarów magneto-optycznych została przeprowadzona przez doktorantkę mgr Małgorzatę Szymurę, oraz jej opiekuna dr Łukasza Kłopotowskiego z Instytutu Fizyki PAN. Moim wkładem był pomysł eksperymentu, wykonanie próbek, udział w pomiarach optycznych pojedynczych nanodrutów typu rdzeń/otoczka, a także część obliczeń teoretycznych opisujących wpływ rozszczepienia pasm dziur ciężkich i lekkich na anizotropię rozszczepienia spinowego w nanodrutach typu rdzeń/otoczka. W przypadku pracy H4, dr hab. Michał Zieliński z Uniwersytetu Mikołaja Kopernika przeprowadził większość obliczeń teoretycznych.

## 5. Omówienie pozostałych osiągnięć naukowo-badawczych

### 5.1. Opis dorobku naukowego nie związanego z tematem nanodrutów półprzewodnikowych

Mój dorobek naukowy związany jest z wytwarzaniem i spektroskopią optyczną struktur niskowymiarowych wykonanych z półprzewodników II-VI. Oprócz głównego tematu optycznie aktywnych nanodrutów, który jest podstawą niniejszej rozprawy habilitacyjnej, intensywnie zajmuję się również tematem samoorganizujących się kropek kwantowych, oraz pomiarami optycznymi różnego rodzaju struktur emitujących w zakresie spektralnym światła widzialnego. Moje dane bibliometryczne zostały szczegółowo przestawione w rozdziale 4.2.

Tematem mojego doktoratu było wytwarzanie samoorganizujących się kropek kwantowych w półprzewodnikach II-VI. W pierwszej kolejności uprościłem procedurę samoorganizacji kropek kwantowych CdTe w barierze ZnTe zaproponowaną przez Tinjod i współautorów [64], oraz opracowałem względnie prosty i powtarzalny sposób wprowadzanie jonów magnetycznych do tych struktur [N1,N2]. Zaletą tej procedury była możliwość kontroli koncentracji jonów magnetycznych w kropkach kwantowych. Wykonałem kropki kwantowe zawierające średnio około 100 jonów na jedną kropkę kwantową [N2], około 10 jonów na kropkę [N1], a także zawierające tylko jeden jon  $Mn^{+2}$  [N3]. W tej ostatniej pracy układ złożony z pojedynczego jonu  $Mn^{+2}$  znajdującego się w kropce kwantowej CdTe posłużył współpracownikom z Uniwersytetu Warszawskiego do badań nad sterowaniem tym pojedynczym spinem przy użyciu metod spektroskopii optycznej. Jest to najbardziej cytowana



praca, w której jestem współautorem (około 100 razy), a mój udział w niej polegał przede wszystkim na wytworzeniu badanej struktury.

Często podejmowałem się pomiarów fotoluminescencji w ramach projektów niezwiązanych bezpośrednio z głównym tematem mojej działalności naukowej. Zmierzyłem na przykład widma fotoluminescencji kryształów objętościowych (Cd,Mn)Te wykonanych z myślą o zastosowaniu w detektorach promieniowania X i promieniowania gamma [N4]. Ponadto zapoczątkowałem w naszym zespole wspólnie z dr Ewą Przeździecką badania fotoluminescencji z kryształów objętościowych ZnO wykazujących przewodnictwo typu p [N5,N6].

W trakcie rocznego stażu podoktorskiego w Instytucie Neela należącego do Narodowego Centrum Badań Naukowych (Centre National de la Recherche Scientifique – CNRS) w Grenoble we Francji pracowałem nad sprzężeniem ze sobą kilku kropek kwantowych. W tym celu wykonywałem struktury złożone z wielu warstw kropek kwantowych [N7]. Po powrocie do kraju kontynuowałem wytwarzanie podobnych próbek, w których ostatecznie udało się zaobserwować sprzężenie kropek kwantowych [N8,N9]. Wiodącą rolę w pomiarach optycznych tych próbek miał dr Łukasz Kłopotowski. Mój wkład polegał na wytworzeniu struktur, wskazaniu tematu oraz na konsultacjach merytorycznych.

Po zakończeniu stażu we Francji i zatrudnieniu w Instytucie Fizyki PAN nie traciłem kontaktu z zespołami badającymi samoorganizujące się kropki kwantowe, a w szczególności z Instytutem Fizyki Doświadczalnej Uniwersytetu Warszawskiego. Dobra jakość optyczna wytwarzanych przeze mnie heterostruktur z półprzewodników II-VI stanowiła podstawę do przeprowadzenia intensywnych badań nad własnościami luminescencji z pojedynczych kropek kwantowych CdTe i (Cd,Mn)Te. W ramach współpracy wytworzyłem szereg próbek zawierających samoorganizujące się kropki kwantowe, które w zależności od konkretnego projektu znajdowały się w bardziej skomplikowanych strukturach, np. w złączu p-n. Zarówno wytwarzanie próbek z kropkami kwantowymi, jak i konsultacje merytoryczne owocowały moim współautorstwem w ponad 40 publikacjach w czasopiśmie o międzynarodowym zasięgu już po ukończeniu doktoratu. Stanowią one główną część mojej aktywności nie związanej bezpośrednio z tematem rozprawy habilitacyjnej.

Można wśród nich wyszczególnić prace dotyczące formowania się polaronów magnetycznych w kropkach kwantowych z manganem [N10,N11], manipulacji pojedynczym jonem  $Mn^{2+}$  w kropce kwantowej [N12-N16], transferu ekscytonów i spinów między dwoma kropkami kwantowych znajdującymi się obok siebie w płaszczyźnie próbki [N17-N19], sterowania wielkością subtelnego rozszczepienia linii ekscytonowej przez przyłożenie zewnętrznego pola magnetycznego [N20], spektroskopii pojedynczych kropek kwantowych w polu elektrycznym [N12,N13], dynamiki ciemnych ekscytonów w kropkach kwantowych [N15,N21], a także wielkości energii wymiany elektron-elektron i elektron-dziura nośników znajdujących się w kropkach kwantowych CdTe [N22-N24].

Jestem ponadto współautorem pracy przeglądowej pt.: „Molecular beam epitaxy of semi-magnetic quantum dots”: będącej rozdziałem w książce “Molecular Beam Epitaxy: From research to mass production” edytowanej przez M. Heniniego [N25].

N1. **Wojnar P**, Suffczynski J, Kowalik K, Gołnik A, Karczewski G, and Kossut J 2007 Phys. Rev. B **75** 155301

- N2. **Wojnar P**, Suffczynski J, Kowalik K, Aleszkiewicz M, Karczewski G, and Kossut J 2008 *Nanotechnology* **19** 235403
- N3. Goryca M, Kazimierzczuk T, Nawrocki M, Golnik A, Gaj J A, Kossacki P, **Wojnar P**, and Karczewski G 2009 *Phys. Rev. Lett.* **103** 087401
- N4. Mycielski A, Burger A, Sowinska M, Groza M, Szadkowski A, **Wojnar P**, Witkowska B, Kaliszek W, and Siffert P 2005 *Physica Status Solidi C - Conferences and Critical Reviews*, Vol 2, No 5 **2** 1578
- N5. Kaminska E, Piotrowska A, Kossut J, Barcz A, Butkute R, Dobrowolski W, Dynowska E, Jakiela R, Przedziecka E, Lukasiewicz R, Aleszkiewicz M, **Wojnar P**, and Kowalczyk E 2005 *Solid State Commun.* **135** 11
- N6. Kaminska E, Piotrowska A, Kossut J, Butkute R, Dobrowolski W, Lukasiewicz R, Barcz A, Jakiela R, Dynowska E, Przedziecka E, Aleszkiewicz M, **Wojnar P**, and Kowaczyk E 2005 *E-Mrs 2004 Fall Meeting Symposia C and F* **2** 1119
- N7. **Wojnar P**, Bougerol C, Bellet-Amalric E, Besombes L, Mariette H, and Boukari H 2011 *J. Cryst. Growth* **335** 28
- N8. Kłopotowski L, **Wojnar P**, Kret S, Parlinska-Wojtan M, Fronc K, Wojtowicz T, Karczewski G 2014 *J. Appl. Phys.* **117** 224306
- N9. Kłopotowski L, **Wojnar P**, Cywinski L, Jakubczyk T, Goryca M, Fronc K, Wojtowicz T, and Karczewski G 2015 *Phys. Rev. B* **92** 075303
- N10. Kłopotowski L, Cywinski L, Szymura M, Voliotis V, Grousson R, **Wojnar P**, Fronc K, Kazimierzczuk T, Golnik A, Karczewski G, and Wojtowicz T 2013 *Phys. Rev. B* **87** 245316
- N11. Kłopotowski L, Cywinski L, **Wojnar P**, Voliotis V, Fronc K, Kazimierzczuk T, Golnik A, Ravaro M, Grousson R, Karczewski G, and Wojtowicz T 2011 *Phys. Rev. B* **83** 081306
- N12. Kuklinski K, Kłopotowski L, Fronc K, Wiater M, **Wojnar P**, Rutkowski P, Voliotis V, Grousson R, Karczewski G, Kossut J, and Wojtowicz T 2011 *Appl. Phys. Lett.* **99** 141906
- N13. Kłopotowski L, Voliotis V, Kudelski A, Tartakovskii A, I, **Wojnar P**, Fronc K, Grousson R, Krebs O, Skolnick M, Karczewski G, and Wojtowicz T 2011 *Phys. Rev. B* **83** 155319
- N14. Goryca M, Kazimierzczuk T, Nawrocki M, Golnik A, Gaj J, Kossacki P, **Wojnar P**, and Karczewski G 2009 *Phys. Rev. Lett.* **103** 087401
- N15. Goryca M, Plochocka P, Kazimierzczuk T, **Wojnar P**, Karczewski G, Gaj J, Potemski M, and Kossacki P 2010 *Phys. Rev. B* **82** 165323
- N16. Goryca M, Koperski M, **Wojnar P**, Smolenski T, Kazimierzczuk T, Golnik A, and Kossacki P 2014 *Phys. Rev. Lett.* **113** 227202

- N17. Koperski M, Goryca M, Kazimierczuk T, Smolenski T, Golnik A, **Wojnar P**, and Kossacki P 2014 Phys. Rev. B **89** 075311
- N18. Kazimierczuk T, Suffczynski J, Golnik A, Gaj J, **Wojnar P**, and Kossacki P 2008 Journal of the Korean Physical Society **53** 154
- N19. Kazimierczuk T, Suffczynski J, Golnik A, Gaj J, Kossacki P, and **Wojnar P** 2009 Phys. Rev. B **79** 153301
- N20. Kowalik K, Krebs O, Golnik A, Suffczynski J, **Wojnar P**, Kossut J, Gaj J, and Voisin P 2007 Phys. Rev. B **75** 195340
- N21. Smolenski T, Kazimierczuk T, Goryca M, Jakubczyk T, Kłopotowski L, Cywinski L, **Wojnar P**, Golnik A, and Kossacki P 2012 Phys. Rev. B **86** 241305
- N22. Kazimierczuk T, Golnik A, Goryca M, **Wojnar P**, Gaj J, and Kossacki P 2009 Acta Phys. Pol. , A **116** 882
- N23. Kazimierczuk T, Smolenski T, Goryca M, Kłopotowski L, **Wojnar P**, Fronc K, Golnik A, Nawrocki M, Gaj J, and Kossacki P 2011 Phys. Rev. B **84** 165319
- N24. Kazimierczuk T, Smolenski T, Kobak J, Goryca M, Pacuski W, Golnik A, Fronc K, Kłopotowski L, **Wojnar P**, and Kossacki P 2013 Phys. Rev. B **87** 195302
- N25. **Wojnar P**, Kłopotowski Ł, Kossut J. „Molecular beam epitaxy of semi-magnetic quantum dots”. w: Henini M, editor. “Molecular Beam Epitaxy: From research to mass production”. Elsevier Inc., 2013. p. 529–545. 3/3

## 5.2. Kierowanie i uczestnictwo w grantach

### Kierowanie grantami:

W latach 2012-2014 byłem kierownikiem grantu Iuventus Plus nr IP2011 061171, zatytułowanego „*Wytwarzanie i spektroskopia optyczna półmagnetycznych nanodrutów*” przyznanego przez Ministerstwo Edukacji i Szkolnictwa Wyższego. Realizacja tego grantu uzyskała w 2014 roku pozytywną ocenę.

Od 2011 roku jestem kierownikiem grantu Narodowego Centrum Nauki nr. 2011/01/D/ST5/05039 „*Wytwarzanie optycznie aktywne radialnych i osiowych heterostruktur w nanodrutach tellurkowych*” przyznawanego dla młodych doktorów na okres 5 lat. Po trzech latach realizacji grantu uzyskał on pozytywną ocenę, dającą możliwość kontynuacji przez kolejne dwa lata, czyli do grudnia 2016 roku.

### Uczestnictwo w grantach:

- Od 2014 roku jestem jednym z wykonawców w granicie Maestro Narodowego Centrum Nauki, 2013/08/A/ST3/00297 pt. „*Magnetyczne półprzewodnikowe kropki kwantowe z miedzią*”, którego kierownikiem jest prof. dr hab. Jacek Kossut. Moim zadaniem jest wytwarzanie samoorganizujących się kropek kwantowych CdTe i CdSe zawierających jony miedzi, oraz stwierdzenie czy znajdują się one w niemagnetycznym stanie ładunkowych  $\text{Cd}^{1+}$ , czy też w magnetycznie aktywnym stanie  $\text{Cu}^{+2}$ .

- W latach 2011-2014 byłem wykonawcą grantu dr Łukasza Kłopotowskiego typu Opus przyznanego przez Narodowego Centrum Nauki nr. 2011/01/B/ST3/02287 pt.: „*Magnetyczne molekuly z kropek kwantowych CdMnTe*”, w ramach którego wytwarzałem wielowarstwy kropek kwantowych.

- W trakcie doktoratu byłem głównym wykonawcą grantu promotorskiego nr N202 050 32/1187 przyznanego przez Komitet Badań Naukowych: „*Wytwarzanie i spektroskopia optyczna półmagnetycznych kropek kwantowych*”, którego kierownikiem był mój promotor prof. dr hab. Jacek Kossut.

- Po powrocie ze stażu doktorskiego zostałem zatrudniony w Instytucie Fizyki PAN w ramach projektu NanoBiom Nr. POIG.01.01.02-00-008/08 „*Kwantowe nanostruktury do zastosowań w biologii i medycynie – rozwój i komercjalizacja nowej generacji urządzeń diagnostyki molekularnej opartych o nowe polskie przyrządy półprzewodnikowe*” w ramach Programu Operacyjnego Innowacyjna Gospodarka w latach 2007-2013,

- Brałem również udział w europejskim projekcie SANDiE – „*Self-Assembled semiconductor Nanostructures for new Devices in photonics and Electronics*”, w ramach którego wykonywałem badania na Uniwersytecie w Dortmund w latach 2007-2008. Łączny okres wyjazdów badawczych wynosił 2 miesiące.

### 5.3. Prezentacje na konferencjach, seminariach, sympozjach

Wygłosiłem 5 referatów zaproszonych związanych z tematem habilitacji na konferencjach międzynarodowych i krajowych:

- I1. „*Giant spin splitting in ZnMnTe/ZnTgTe core/shell nanowires*” 16th International Conference on II-VI Compounds and Related Materials, 9 – 13 września, 2013, Nagahama, Japonia.
- I2. „*Spin splitting enhancement in ZnMnTe diluted magnetic nanowires*”, Workshop – Optical properties of individual nanowires and quantum dots in high magnetic field, 24-26 września 2014, Tuluza, Francja
- I3. „*Spin splitting enhancement in ZnMnTe diluted magnetic nanowires*”, Energy Materials Nanotechnology - Meeting on Nanowires”, 16-19 maja 2016, Amsterdam Holandia
- I4. „*Growth of optically active diluted magnetic ZnMnTe/ZnMgTe core/shell nanowires*”, Polish-Japanese Workshop Spintronics - from new materials to applications, Warszawa, 15-18 listopada 2011.
- I5. „*Aktywne optycznie nanodrutki związków II-VI*” III Konferencja Kwantowe Nanostruktury Półprzewodnikowe do Zastosowań w Biologii i Medycynie, Warszawa 2011,

Na zaproszenie wygłosiłem również 7 seminariów, z czego 5 związanych jest z tematem habilitacji, a 2 z tematem doktoratu:

- S1. „*Nanodrutki ZnTe i ZnMnTe - aktywacja luminescencji okołoprzerwowej*”, Seminarium z Fizyki Ciała Stałego, Uniwersytet Warszawski, 22 Luty, 2013, Warszawa
- S2. „*Nanodrutki z półprzewodników tellurkowych - wytwarzanie i badania optyczne*”, Seminarium na Wydziale Fizyki Uniwersytetu Mikołaja Kopernika, 15 kwietnia, 2013, Toruń,
- S3. „*Napężenie i anizotropia magneto-optyczna w nanodrutkach ZnMnTe/ZnMgTe typu rdzeń/otoczka*” Seminarium Fizyki Ciała Stałego, 30 maja 2014 Uniwersytet Warszawski

- S4. „Wytwarzanie nanodrutów z półprzewodników tellurkowych oraz ich badania optyczne”, Seminarium Teorii Ośrodków Ciągłych, Instytut Podstawowych Problemów Techniki PAN, 28 marca 2014
- S5. „Nanodrutu typu core-shell: Gigantyczne rozszczepienie spinowe w nanodrutach Zn(Mn)Te”, Sympozjum Narodowego Laboratorium Technologii Kwantowych, Politechnika Wrocławska, 20 października 2014
- S6. „Wytwarzanie i własności kropek kwantowych CdTe /ZnTe“, Seminarium Zakładu Teorii Ośrodków Ciągłych, Instytut Podstawowych Problemów Techniki PAN, 23 kwiecień 2010
- S7. „Wielowarstwy kropek kwantowych CdTe/ZnTe“, Seminarium Fizyki Ciała Stałego, Wydział Fizyki Uniwersytetu Warszawskiego, 19 marca 2010

Wygłosiłem ponadto 10 referatów na konferencjach krajowych i międzynarodowych:

- R1. "Strain induced energy gap variation and valence band mixing in (Zn,Mn)Te/(Zn,Mg)Te core/shell nanowires", **P. Wojnar**, M. Szymura, Ł. Kłopotowski, M. Wiater, W. Zaleszczyk, J. Suffczyński, T. Smoleński, P. Kossacki, E. Janik, M. Zieliński, S. Kret, T. Wojciechowski, L.T. Baczewski, G. Karczewski, T. Wojtowicz, J. Kossut, 17th International Conference on II-VI Compounds, 13 - 18 września, 2015, Paryż, Francja
- R2. "Energy gap variation and valence band mixing in strained (Zn,Mn)Te/(Zn,Mg)Te core/shell nanowires", **P. Wojnar**, M. Szymura, Ł. Kłopotowski, M. Wiater, W. Zaleszczyk, J. Suffczyński, T. Smoleński, P. Kossacki, E. Janik, M. Zieliński, S. Kret, T. Wojciechowski, L.T. Baczewski, G. Karczewski, T. Wojtowicz, J. Kossut, 44th "Jaszowiec" International School and Conference on the Physics of Semiconductors, 20-25 czerwca, 2015, Wisła, Polska
- R3. "Magneto-optical anisotropy of ZnMnTe/ZnMgTe core/shell nanowires" **P. Wojnar**, J. Suffczyński, T. Smoleński, E. Janik, W. Zaleszczyk, S. Kret, T. Wojciechowski, P. Kossacki, G. Karczewski, T. Wojtowicz, J. Kossut, 43rd "Jaszowiec" International School Conference on the physics of Semiconductors, 7 czerwca 2014r., Wisła, Polska
- R4. „Giant spin splitting in ZnMnTe/ ZnMgTe core/shell nanowires" **P. Wojnar**, E. Janik, J. Suffczyński, J. Papierska, P. Kossacki, M. Szymura, W. Zaleszczyk, Ł. Kłopotowski, S. Kret, T. Wojciechowski, L.T. Baczewski, G. Karczewski, T. Wojtowicz, J. Kossut, 5th International Conference on One dimensional Nanomaterials, ICON 2013, 23-26 września, 2013, Annecy, Francja.
- R5. „Giant spin splitting in optically active ZnMnTe/ ZnMgTe core/shell nanowires“ **P. Wojnar**, E. Janik, J. Suffczyński, J. Papierska, M. Szymura, S. Kret, Ł. Kłopotowski, T. Wojciechowski, L.T. Baczewski, G. Karczewski, T. Wojtowicz, and J. Kossut, 17th European Molecular Beam Epitaxy Workshop, 10-13 marca 2013 Levi, Finlandia.
- R6. „Aktywacja intensywnego świecenia krawędziowego z nanodrutów ZnTe/ZnMgTe typu „core/shell“ wytworzonych na podłożach krzemowych“, **P. Wojnar**, V Konferencja Kwantowe Nanostruktury Półprzewodnikowe do Zastosowań w Biologii i Medycynie, 17 – 18 kwietnia 2013, Warszawa
- R7. „Near band edge emission of Te-based nanowire heterostructures" **P. Wojnar**, E. Janik, S. Kret, E. Dynowska, L. T. Baczewski, G. Karczewski, T. Wojtowicz, , 15th International Conference on II-VI Compounds, 21-26 sierpnia, 2011 Mayan Riviera, Meksyk.
- R8. „Growth of optically active CdTe quantum nanowires“ **P. Wojnar**, E. Janik, S. Kret, A. Petrouchik, M. Goryca, T. Kazimierzczuk, P. Kossacki, G. Karczewski, and T. Wojtowicz, , 40th

„Jaszowiec“ International School and Conference on the Physics of Semiconductors. 25 czerwca – 1 lipca 2011r., Krynica, Polska

R9. „Wytwarzanie i charakteryzacja radialnych i osiowych heterostruktur w nanodrutach tellurkowych” **P. Wojnar**, E. Janik, L. Baczewski, S. Kret, E. Dynowska, T. Wojtowicz, M. Goryca, T. Kazimierzczuk, P. Kossacki, Konferencja „Technologie Kwantowe 2011”, marzec 2011, Warszawa,

R10. „Growth and micro-luminescence from diluted magnetic quantum dots“, **P. Wojnar**, G. Karczewski, J. Suffczyński, M. Goryca, A. Golnik, K. Kowalik, and J. Kossut, E-MRS Fall Meeting, 13-17, wrzesień 2010, Warszawa.

Ogółem liczba wszystkich prezentacji konferencyjnych, w których byłem współautorem (także tych nie zawartych w bazie Journal of Citation Reports) wynosi **98**, z czego z tematem habilitacji związane są **32** prezentacje.

#### 5.4. Organizacja konferencji, działalność recenzencka i edytorska

W 2012 roku współorganizowałem konferencję „41st School and Conference on the Physics of Semiconductors, Jaszowiec 2012” w Krynicy Zdrój na stanowisku sekretarza naukowego (8 – 15 czerwca 2012r.). Następnie byłem gościnnym edytorem konferencyjnego wydania Acta Physica Polonica A, vol 122 no 6.

Byłem także recenzentem dla czasopism naukowych, takich jak: Journal of Alloy and Compounds – 3 recenzje, Thin Solid Films – 2 recenzje, Nanoresearch - 1 recenzja, Journal of Applied Physics - 4 recenzje, Physica E – 1 recenzja, Acta Physica Polonica – 10 recenzji.

#### 5.5. Budowa unikatowej aparatury badawczej

Brałem udział w zakupie oraz budowie dwóch układów badawczych w Instytucie Fizyki PAN: do katodoluminescencji niskotemperaturowej, oraz do mikro-spektroskopii optycznej w zewnętrznym polu magnetycznym.

#### 5.6. Dydaktyka i popularyzacja nauki

Prowadziłem zajęcia laboratoryjne ze studentami Wydziału Fizyki Politechniki Warszawskiej w ramach Laboratorium Nanostruktur w latach 2014 - 2015. Mój temat dotyczył wytwarzania nanodrutów półprzewodnikowych przy użyciu epitaksji z wiązek molekularnych. Prowadzącym całego Laboratorium Nanotechnologii był dr hab. Tomasz Pietrzyk z Wydziału Fizyki Politechniki Warszawskiej.

Prowadziłem we współpracy z dr Łukaszem Kłopotowskim i mgr Wojciechem Zaleszczykiem zajęcia ze studentami II roku kierunku Inżynieria Nanostruktur Uniwersytetu Warszawskiego w ramach przedmiotu „Technologie i projektowanie nowych materiałów”. Osobą koordynującą cały przedmiot jest prof. dr hab. Maria Kamińska z Uniwersytetu Warszawskiego.

Opiekowałem się stażami studenckimi w Instytucie Fizyki PAN:

Rafała Rudniewskiego – studenta Wydziału Fizyki, Uniwersytetu Warszawskiego

Emmy Grodzickiej – studentki Wydziału Fizyki, Uniwersytetu Warszawskiego

Jakuba Płachty – studenta Wydziału Fizyki, Politechniki Warszawskiej

Obecnie opiekuję się pracą licencjacką Emmy Grodzickiej z ramienia Instytutu Fizyki PAN oraz jestem opiekunem naukowym studiów doktoranckich mgr inż. Jakuba Płachty od października 2015r.

#### Popularyzacja nauki:

W latach 2012-2016 prowadziłem wielokrotnie lekcje pokazowe dla uczniów liceum i gimnazjum w laboratorium do epitaksji z wiązek molekularnych, które należą do oferty wykładów popularyzatorskich Instytutu Fizyki PAN (kilkanaście lekcji na semestr).

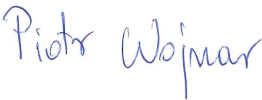
W 2015 roku przeprowadziłem razem z prof. dr hab. Jackiem Kossutem lekcje pokazowe w laboratorium do epitaksji z wiązek molekularnych dla studentów z Politechniki w Eindhoven przebywających w Polsce w ramach Stowarzyszenia van der Waalsa.

W latach 2012-2014 brałem trzykrotnie udział w warsztatach Krajowego Funduszu na rzecz Dzieci, podczas których prowadziłem jeden z tematów zatytułowany „Świeące nanostruktury”. Głównym organizatorem z ramienia Instytutu Fizyki PAN był wtedy dr hab. Grzegorz Grabecki.

W latach 2011-2014 współorganizowałem coroczny Dzień Nanotechnologii w Instytucie Fizyki PAN, który jest organizowany głównie z myślą o studentach 3-4 roku Wydziału Mechatroniki Politechniki Warszawskiej. Mój wkład polegał na wygłoszeniu wykładu popularyzatorskiego, pt. „Wytwarzanie struktur nisko-wymiarowych – nanotechnologia” w latach 2011 i 2013, oraz na prowadzeniu lekcji pokazowych w laboratorium do epitaksji z wiązek molekularnych w latach 2012, 2014.

#### 5.7 Nagrody

Otrzymałem Nagrodę Naukową Dyrektora Instytutu Fizyki PAN za najlepszą publikację w 2015 roku. Jest to publikacja H6 z cyklu publikacji habilitacyjnych.

  
Piotr Wojnar

#### **Bibliografia**

- [1] Lu W and Lieber C M 2007 Nat. Mater. **6** 841
- [2] Yan H, Choe H S, Nam S W, Hu Y J, Das S, Klemic J F, Ellenbogen J C, and Lieber C M 2011 Nature **470** 240
- [3] Hayden O, Agarwal R, and Lu W 2010 Nano Today **3** 12

- [4] Pauzauskie P J and Yang P 2006 *Materials Today* **9** 36
- [5] Tian B, Zheng X, Kempa T J, Fang Y, Yu N, Yu G, Huang J, and Lieber C M 2007 *Nature* **449** 885
- [6] Cui Y, Wei Q, Park H, and Lieber C M 2001 *Science* **293** 1289
- [7] Patolsky F and Lieber C M 2005 *Materials Today* **8** 20
- [8] Morales A M and Lieber C M 1998 *Science* **279** 208
- [9] Dane na podstawie *ISI Web of Knowledge* po wyszukiwaniu haseł 'nanowire' AND 'nanowires' dla 2015 roku
- [10] Kossut J and Dobrowolski W 1997 "*Properties of diluted magnetic semiconductors*" in "*Narrow gap II VI compounds for optoelectronic and electromagnetic applications*" edited by P. Capper, Chapman & Hall, 1997, London, UK
- [11] J.A.Gaj and J.Kossut, 2010, "*Introduction into Physics of Diluted Magnetic Semiconductors*", Springer Series in Material Science 144
- [12] Wagner R S and Ellis W C 1964 *Appl. Phys. Lett.* **4** 89
- [13] Calleja E, Sanchez-Garcia M A, Sanchez F J, Calle F, Naranjo F B, Munoz E, Jahn U, and Ploog K 2000 *Phys. Rev. B* **62** 16826
- [14] Morral A F I, Spirkoska D, Arbiol J, Heigoldt M, Morante J R, and Abstreiter G 2008 *Small* **4** 899
- [15] Glas F 2006 *Phys. Rev. B* **74** 121302
- [16] Jiang X, Xiong Q, Nam S, Qian F, Li Y, and Lieber C M 2007 *Nano Lett.* **7** 3214
- [17] Xiang J, Lu W, Hu Y, Wu Y, Yan H, and Lieber C M 2006 *Nature* **441** 489
- [18] Sköld N, Karlsson L S, Larsson M W, Pistol M E, Selfert W, Tragardh J, and Samuelson L 2005 *Nano Lett.* **5** 1943
- [19] Qian F, Li Y, Gradecak S, Wang D L, Barrelet C J, and Lieber C M 2004 *Nano Lett.* **4** 1975
- [20] Qian F, Gradecak S, Li Y, Wen C Y, and Lieber C M 2005 *Nano Lett.* **5** 2287
- [21] Qian F, Li Y, Gradecak S, Park H G, Dong Y J, Ding Y, Wang Z L, and Lieber C M 2008 *Nat. Mater.* **7** 701
- [22] Fan Z Y, Razavi H, Do J W, Moriwaki A, Ergen O, Chueh Y L, Leu P W, Ho J C, Takahashi T, Reichertz L A, Neale S, Yu K, Wu M, Ager J W, and Javey A 2009 *Nat. Mater.* **8** 648
- [23] Williams B, Taylor A, Mendis B, Phillips L, Bowen L, Major J, and Durose K 2014 *Appl. Phys. Lett.* **104** 053867



- [24] Björk M T, Ohlsson B J, Sass T, Persson A I, Thelander C, Magnusson M H, Deppert K, Wallenberg L R, and Samuelson L 2002 *Nano Lett.* **2** 87
- [25] Aichele T, Tribu A, Sallen G, Bocquel J, Bellet-Amalric E, Bougerol C, Poizat J P, Kheng K, Andre R, Tatarenko S, and Mariette H 2009 *J. Cryst. Growth* **311** 2123
- [26] Borgstrom M T, Zwiller V, Muller E, and Imamoglu A 2005 *Nano Lett.* **5** 1439
- [27] Bounouar S, Elouneq-Jamroz M, Den Hertog M, Morchutt C, Bellet-Amalric E, Andre R, Bougerol C, Genuist Y, Poizat J, Tatarenko S, and Kheng K 2012 *Nano Lett.* **12** 2977
- [28] Tchernycheva M, Cirlin G E, Patriarche G, Travers L, Zwiller V, Perinetti U, and Harmand J C 2007 *Nano Lett.* **7** 1500
- [29] van Weert M H M, Akopian N, Kelkensberg F, Perinetti U, van Kouwen M P, Rivas J G, Borgstrom M T, Algra R E, Verheijen M A, Bakkers E P A M, Kouwenhoven L P, and Zwiller V 2009 *Small* **5** 2134
- [30] Michler P, Kiraz A, Becher C, Schoenfeld W V, Petroff P M, Zhang L D, Hu E, and Imamoglu A 2000 *Science* **290** 2282
- [31] Reimer M E, Bulgarini G, Akopian N, Hocevar M, Bavinck M B, Verheijen M A, Bakkers E P, Kouwenhoven L P, and Zwiller V 2012 *Nature Communications* **3** 737
- [32] Wallentin J, Anttu N, Asoli D, Huffman M, Aberg I, Magnusson M H, Siefer G, Fuss-Kailuweit P, Dimroth F, Witzigmann B, Xu H, Samuelson L, Deppert K, and Borgstrom M T 2013 *Science* **339** 1057
- [33] Qin L, Banholzer M J, Millstone J E, and Mirkin C A 2007 *Nano Lett.* **7** 3849
- [34] Holleitner A, Sih V, Myers R, Gossard A, and Awschalom D 2006 *Phys. Rev. Lett.* **97** 052108
- [35] Dietl T, Ohno H, Matsukura F, Cibert J, and Ferrand D 2000 *Science* **287** 1019
- [36] Butschkow C, Reiger E, Rudolph A, Geissler S, Neumaier D, Soda M, Schuh D, Woltersdorf G, Wegscheider W, and Weiss D 2013 *Phys. Rev. B* **87** 245303
- [37] Siusys A, Sadowski J, Sawicki M, Kret S, Wojciechowski T, Gas K, Szuszkiewicz W, Kaminska A, and Story T 2014 *Nano Lett.* **14** 4263
- [38] Chen L, Klar P J, Heimbrodt W, Brieler F J, Froba M, von Nidda H A, Kurz T, and Loidl A 2003 *J. Appl. Phys.* **93** 1326
- [39] Na C W, Han D S, Kim D S, Kang Y J, Lee J Y, Park J, Oh D K, Kim K S, and Kim D 2006 *J. Phys. Chem. B* **110** 6699
- [40] Oh E, Choi J H, Oh D K, and Park J 2008 *Appl. Phys. Lett.* **93** 041911
- [41] Borschel C, Messing M E, Borgstrom M T, Paschoal W, Jr., Wallentin J, Kumar S, Mergenthaler K, Deppert K, Canali C M, Pettersson H, Samuelson L, and Ronning C 2011 *Nano Lett.* **11** 3935

- [42] Bouravleuv A, Cirlin G, Sapega V, Werner P, Savin A, and Lipsanen H 2013 J. Appl. Phys. **113** 144303
- [43] Sadowski J, Dluzewski P, Kret S, Janik E, Lusakowska E, Kanski J, Presz A, Terki F, Charar S, and Tang D 2007 Nano Lett. **7** 2724
- [44] Kazakova O, Kulkarni J S, Holmes J D, and Demokritov S O 2005 Phys. Rev. B **72** 094415
- [45] Seong H K, Kim U, Jeon E K, Park T E, Oh H, Lee T H, Kim J J, Choi H J, and Kim J Y 2009 Journal of Physical Chemistry C **113** 10847
- [46] Liang W, Yuhas B D, and Yang P 2009 Nano Lett. **9** 892
- [47] Kumar S, Paschoal W, Jr., Johannes A, Jacobsson D, Borschel C, Pertsova A, Wang C H, Wu M K, Canali C M, Ronning C, Samuelson L, and Pettersson H 2013 Nano Lett. **13** 5079
- [48] Hegde M, Farvid S S, Hosein I D, and Radovanovic P V 2011 Acs Nano **5** 6365
- [49] J.A.Gaj and J.Kossut, 2010, *"Introduction into Physics of Diluted Magnetic Semiconductors"*, Springer Series in Material Science 144
- [50] Nawrocki M, Rubo Y, Lascaray J P, and Coquillat D 1995 Phys. Rev. B **52** R2241
- [51] Chen L, Kirilenko D, Stesmans A, Nguyen X S, Binnemans K, Goderis B, Vanacken J, Lebedev O, Van Tendeloo G, and Moshchalkov V V 2010 Appl. Phys. Lett. **97** 041918
- [52] Radovanovic P V, Barrelet C J, Gradecak S, Qian F, and Lieber C M 2005 Nano Lett. **5** 1407
- [53] Janik E, Sadowski J, Dluzewski P, Kret S, Baczewski L T, Pettroutchik A, Lusakowska E, Wrobel J, Zaleszczyk W, Karczewski G, Wojtowicz T, and Presz A 2006 Appl. Phys. Lett. **89** 133114
- [54] Zaleszczyk W, Janik E, Presz A, Dluzewski P, Kret S, Szuszkiewicz W, Morhange J F, Dynowska E, Kirmse H, Neumann W, Pettroutchik A, Baczewski L T, Karczewski G, and Wojtowicz T 2008 Nano Lett. **8** 4061
- [55] Philipose U, Xu T, Yang S, Sun P, Ruda H E, Wang Y, and Kavanagh K 2006 J. Appl. Phys. **100** 084316
- [56] Wang J, Gudixsen M S, Duan X, Cui Y, and Lieber C M 2001 Science **293** 1455
- [57] Hou L, Zhang Q, Ling L, Li C X, Chen L, and Chen S 2013 J. Am. Chem. Soc. **135** 10618
- [58] Song M S and Kim Y 2014 Nanotechnology **25** 505605
- [59] Moon S R, Kim J H, and Kim Y 2012 Journal of Physical Chemistry C **116** 10368
- [60] Rigutti L, Jacopin G, Largeau L, Galopin E, Bugallo A, Julien F, Harmand J, Glas F, and Tchernycheva M 2011 Phys. Rev. B **83** 155320

- [61] Artioli A, Rueda-Fonseca P, Stepanov P, Bellet-Amalric E, Den Hertog M, Bougerol C, Genuist Y, Donatini F, Andre R, Nogues G, Kheng K, Tatarenko S, Ferrand D, and Cibert J 2013 Appl. Phys. Lett. **103** 222106
- [62] Ferrand D and Cibert J 2014 European Physical Journal-Applied Physics **67** 30403
- [63] Cooley B J, Clark T E, Liu B Z, Eichfeld C M, Dickey E C, Mohny S E, Crooker S A, and Samarth N 2009 Nano Lett. **9** 3142
- [64] Tinjod F, Gilles B, Moehl S, Kheng K, and Mariette H 2003 Appl. Phys. Lett. **82** 4340