

*Katedra Fizyki Doświadczalnej*  
*Wydział Podstawowych Problemów Techniki*  
*Politechnika Wroclawska*

*Dr inż. Marcin Syperek*

# AUTOREFERAT

*PRZYGOTOWANY DO CELÓW POSTĘPOWANIA O NADANIE STOPNIA NAUKOWEGO DOKTORA  
HABILITOWANEGO*



# Spis treści

<b>1</b>	<b>Charakterystyka habilitanta</b>	<b>5</b>
1.1	Imię i nazwisko	5
1.2	Stopnie naukowe i tytuły zawodowe	5
1.3	Przebieg zatrudnienia w trakcie kariery zawodowej	5
1.4	Dane bibliometryczne dotyczące dorobku naukowego na dzień 17.06.2018	6
<b>2</b>	<b>Podsumowanie dorobku i osiągnięć naukowych</b>	<b>7</b>
2.1	Tytuł osiągnięcia naukowego	7
2.2	Wykaz publikacji składających się na osiągnięcie naukowe	7
2.3	Omówienie celu osiągnięcia naukowego, najważniejszych uzyskanych rezultatów wraz z określeniem ich znaczenia dla rozwoju dziedziny i stanu wiedzy	8
2.3.1	Relaksacja międzypasmowa ekscytonu w silnie wydłużonych, asymetrycznych kropkach kwantowych InAs na podłożu z InP(001)	11
2.3.2	Relaksacja wewnątrzpasmowa elektronu i dziury w kropkach kwantowych InAs na podłożu z InP(001)	15
2.3.3	Rola nieintencjonalnego otoczenia na relaksację ekscytonu w silnie wydłużonych kropkach kwantowych (In, Ga)As na podłożu z GaAs	17
2.3.4	Rola intencjonalnie modyfikowanego otoczenia na relaksację międzypasmową i wewnątrzpasmową w kropkach kwantowych InAs/GaAs sprzężonych do studni kwantowej (In, Ga)As/GaAs oraz kropkach kwantowych InAs/InAlGaAs/InP(001) sprzężonych do studni kwantowej (In, Ga)As/InAlGaAs/InP(001)	19
2.3.5	Inicjalizacja stanu spinowego i kontrola jego ewolucji w kreskach kwantowych InAs/InAlGaAs/InP oraz kropkach kwantowych InP/(Ga,In)P	24
<b>2.4</b>	<b>Podsumowanie rozdziału 2</b>	<b>29</b>
	Referencje literaturowe do rozdziału 2	30
<b>3</b>	<b>Informacje o pozostałych osiągnięciach habilitanta</b>	<b>33</b>
3.1	Wykaz publikacji naukowych nie włączonych do przewodu habilitacyjnego	33
3.1.1	Publikacje po uzyskaniu stopnia doktor	33
3.1.2	Publikacje przed uzyskaniem stopnia doktora	39
3.2	Wykaz krajowych i międzynarodowych projektów naukowych w których habilitant pełnił rolę kierownika projektu	41
3.3	Wykaz krajowych i międzynarodowych projektów naukowych w których habilitant pełnił funkcję głównego wykonawcy lub wykonawcy	41
3.4	Lista referatów zaproszonych wygłoszonych na krajowych i międzynarodowych konferencjach naukowych	43
3.5	Lista pozostałych referatów konferencyjnych	43
3.6	Wykaz krajowych i międzynarodowych organizacji i towarzystw z którymi współpracuje habilitant	44
3.7	Działalność dydaktyczna	45

3.7.1	Rola promotora pomocniczego w przewodach doktorskich	45
3.7.2	Opieka nad realizacją prac magisterskich i inżynierskich	45
3.7.3	Prowadzone wykłady, ćwiczenia i zajęcia laboratoryjne	46
3.8	Lista staży zagranicznych w ośrodkach naukowych	47
3.9	Udział w zespołach eksperckich i konkursowych	47
3.10	Funkcja recenzenta w międzynarodowych czasopismach naukowych	48
3.11	Współpraca zagraniczna	48
3.12	Nagrody, stypendia i wyróżnienia	48

# 1 Charakterystyka habilitanta

---

## 1.1 Imię i nazwisko

Marcin Syperek

Ur. 11 Luty 1979

## 1.2 Stopnie naukowe i tytuły zawodowe

- 2008.09** Stopień doktora nauk fizycznych, Instytut Fizyki Politechnika Wroclawska
- Tytuł rozprawy “Electron and hole spin coherence in confined semiconductor structures” (pol.: “Koherencja spinu elektronu i dziury w strukturach półprzewodnikowych z ograniczeniem przestrzennym”)
- Promotor I: Prof. Dr hab. Jan Misiewicz (PWr)
- Promotor II: Prof. Manfred Bayer (Uniwersytet w Dortmundzie)
- 2004.10** Tytuł zawodowy magistra inżyniera (specjalność fizyka ciała stałego), Instytut Fizyki Politechnika Wroclawska
- Tytuł pracy: “Spektroskopia fotoodbiciowa warstw epitaksjalnych GaN, AlGaIn oraz heterostruktur AlGaIn/GaN”
- Promotor: Prof. Dr Hab. Jan Misiewicz

## 1.3 Przebieg zatrudnienia w trakcie kariery zawodowej

- 2011.09 – obecnie** Adiunkt na Wydziale Podstawowych Problemów Techniki PWr, Katedra Fizyki Doświadczalnej;
- 2008.09-2011.09** Asystent naukowo-dydaktyczny na Wydziale Podstawowych Problemów Techniki PWr, Instytut Fizyki;
- 2008.10-2011.08** Asystent na Wydziale Elektroniki, Mikrosystemów i Fotoniki PWr zatrudniony do realizacji projektu POIG;
- 2005.01-2008.08** Staż na Uniwersytecie w Dortmundzie (Niemcy) w grupie Experimentelle Physik II Prof. Manfreda Bayera;

## 1.4 Dane bibliometryczne dotyczące dorobku naukowego na dzień 17.06.2018

Dane zaczerpnięte z bazy Web of Science Core Collection.

Łączna liczba publikacji: **71**

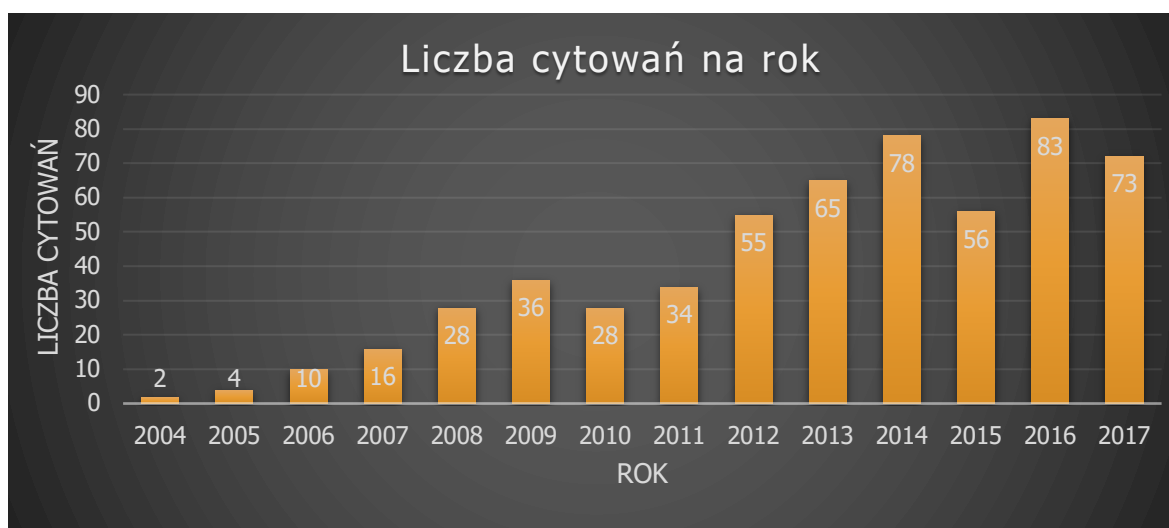
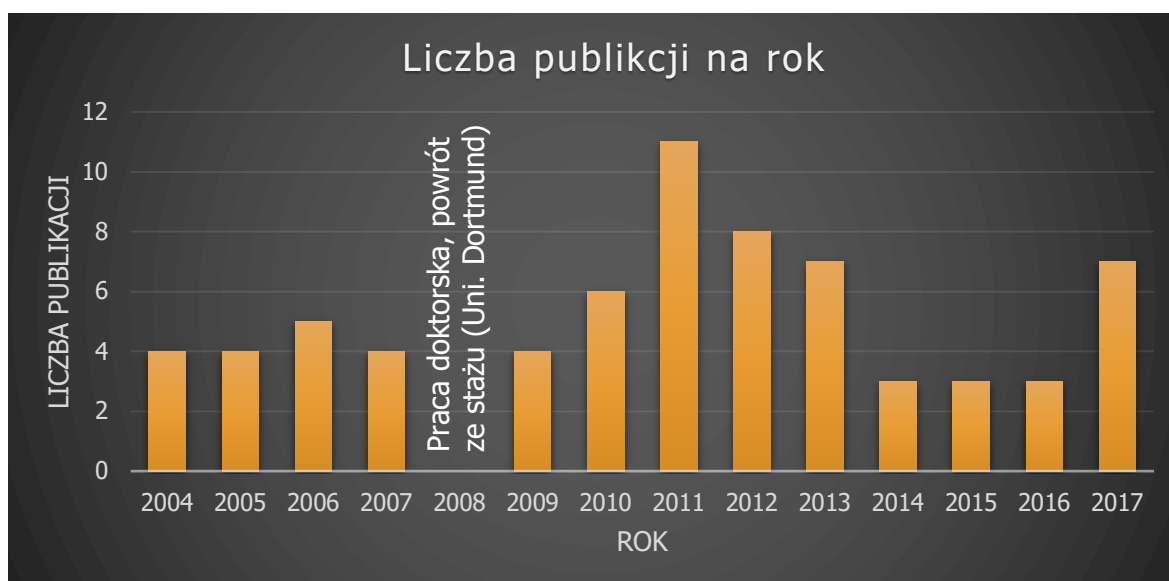
Łączna liczba cytowań: **609**

Łączna liczba cytowań bez autocytowań: **537**

Średnia ilość cytowań na pracę: **8.58**

Sumaryczny *Impact Factor* wg. listy Journal Scitation Reports (JCR): 156.693<sup>\*)</sup>

Indeks Hirsch: **14**



<sup>\*)</sup> zgodnie z rokiem opublikowania

## 2 Podsumowanie dorobku i osiągnięć naukowych

(zgodnie z wymogami 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. 2016 r. poz. 882 ze zm. w Dz. U. z 2016 r, poz. 1311.)

### 2.1 Tytuł osiągnięcia naukowego

Przedkładanym osiągnięciem naukowym, o którym mowa w art. 16 ust. 2 ustawy, jest cykl 9 publikacji pod wspólnym tytułem:

„Dynamika relaksacji międzypasmowej i wewnątrzpasmowej wzbudzenia ładunkowego oraz spinowego w quasi-zero-wymiarowych strukturach półprzewodnikowych związków III-V,,

### 2.2 Wykaz publikacji składających się na osiągnięcie naukowe

#	Autorzy, tytuł, czasopismo, rok publikacji	Wkład własny	IF <sup>1</sup>	Punkty MNiSW
[H1]	<b>M. Syperek</b> , Ł. Dusanowski, J. Andrzejewski, W. Rudno-Rudziński, G. Sęk, J. Misiewicz, and F. Lelarge „ <i>Carrier relaxation dynamics in InAs/GaInAsP/InP(001) quantum dashes emitting near 1.55 μm</i> ” Applied Physics Letters <b>103</b> , 083104 (2013).	55%	3.515	40
Mój wkład w powstanie pracy [H1] polegał na zaplanowaniu badań spektroskopowych, wykonaniu pomiarów odbicia przejściowego i udziale w interpretacji danych oraz napisaniu pierwszej wersji manuskryptu.				
[H2]	<b>M. Syperek</b> , Ł. Dusanowski, M. Gawelczyk, G. Sęk, A. Somers, J. P. Reithmaier, S. Höfling, J. Misiewicz „ <i>Exciton spin relaxation in InAs/InGaAlAs/InP(001) quantum dashes emitting near 1.55 μm</i> ” Applied Physics Letters <b>109</b> , 193108 (2016).	50%	3.124	40
Mój wkład w powstanie pracy [H2] polegał na zaplanowaniu części doświadczalnej badań spektroskopowych, w części na pomiarze dynamiki rozdzielczej w czasie, wstępnej interpretacji wyników pomiarów i napisaniu pierwszej wersji manuskryptu pracy.				
[H3]	M. Gawelczyk, <b>M. Syperek</b> , A. Maryński, P. Mrowiński, Ł. Dusanowski, K. Gawarecki, J. Misiewicz, A. Somers, J. P. Reithmaier, S Höfling, and G. Sęk „ <i>Exciton lifetime and emission polarization dispersion in strongly in-plane asymmetric nanostructures</i> ” Physical Review B <b>96</b> , 245425 (2017).	35%	3.736	35
Mój wkład w postanie pracy [H3] polegał na zaplanowaniu badań spektroskopowych, pomiarze dynamiki rozdzielonej w czasie, wstępnej interpretacji wyników i udziale w redakcji manuskryptu pracy.				
[H4]	<b>M. Syperek</b> , J. Andrzejewski, E. Rogowicz, J. Misiewicz, S. Bauer, V. I. Sichkovskiy, J. P. Reithmaier, and G. Sęk „ <i>Carrier relaxation bottleneck in type-II InAs/InGaAlAs/InP(001) coupled quantum dots-quantum well structure emitting at 1.55 μm</i> ” Applied Physics Letters <b>112</b> , 221901 (2018).	60%	3.411	40

<sup>1</sup> IF – ang. Impact Factor podany na rok publikacji

Mój wkład w postanie pracy [H4] polegał na zaplanowaniu badań optycznych, udziale w pomiarze dynamiki rozdzielonej w czasie, udziale w interpretacji wyników badań doświadczalnych i napisaniu pierwszej wersji manuskryptu.				
[H5]	M. Syperek, R. Kudrawiec, M. Baranowski, G. Sęk, J. Misiewicz, D. Bisping, B. Marquardt, A. Forchel, and M. Fischer, „ <i>Time resolved photoluminescence of In(N)As quantum dots embedded in GaIn(N)As/GaAs quantum well</i> ”, Applied Physics Letters <b>96</b> , 041911 (2010).	48%	3.82	40
Mój wkład w powstanie pracy [H5] polegał na wykonaniu pomiarów w zakresie spektroskopii rozdzielczej w czasie, udziale w interpretacji wyników badań, oraz napisaniu pierwszej wersji manuskryptu.				
[H6]	M. Syperek, P. Leszczyński, J. Misiewicz, E. M. Pavelescu, C. Gilfert, D. Bisping, and J. P. Reithmaier „ <i>Time-resolved photoluminescence spectroscopy of an InGaAs/GaAs quantum well-quantum dots tunnel injection structure</i> ”, Applied Physics Letters <b>96</b> , 011901 (2010).	65%	3.82	40
Mój wkład w powstanie tej pracy [H6] polegał na zaplanowaniu i wykonaniu wszystkich pomiarów optycznych, zaproponowaniu pierwszej koncepcji teoretycznej dla interpretacji wyników oraz napisaniu pierwszej wersji manuskryptu				
[H7]	M. Syperek, M. Baranowski, G. Sęk, J. Misiewicz, A. Löffler, S. Höfling, S. Reitzenstein, M. Kamp, and A. Forchel “ <i>Impact of wetting-layer density of states on the carrier relaxation process in low indium content self-assembled (In,Ga)As/GaAs quantum dots</i> ” Physical Review B <b>87</b> , 125305 (2013).	54%	3.664	35
Mój wkład w powstanie pracy [H7] polegał na zaplanowaniu i wykonaniu wszystkich pomiarów optycznych, zaproponowaniu koncepcji teoretycznej dla interpretacji wyników badań doświadczalnych oraz napisaniu pierwszej wersji manuskryptu.				
[H8]	M. Syperek, D. R. Yakovlev, I. A. Yugova, J. Misiewicz, M. Jetter, M. Schulz, P. Michler, and M. Bayer „ <i>Electron and hole spins in InP/(Ga,In)P self-assembled quantum dots</i> ” Physical Review B <b>86</b> , 125320 (2012).	50%	3.767	35
Mój wkład w powstanie pracy [H8] polegał na wykonaniu wszystkich badań spektroskopowych, udziale w interpretacji wyników badań i ich podsumowaniu we wstępnej wersji manuskryptu.				
[H9]	M. Syperek, J. Andrzejewski, W. Rudno-Rudziński, G. Sęk, J. Misiewicz, E. M. Pavelescu, C. Gilfert, and J. P. Reithmaier „ <i>Influence of electronic coupling on the radiative lifetime in the (In,Ga)As/GaAs quantum dot-quantum well system</i> ” Physical Review B <b>85</b> , 125311 (2012).	52%	3.767	35
Mój wkład w powstanie pracy [H9] polegał na zaplanowaniu i wykonaniu wszystkich badań optycznych, oprócz pomiaru modulowanego odbicia, zaproponowaniu koncepcji teoretycznej dla interpretacji wyników badań oraz napisaniu pierwszej wersji manuskryptu.				

### 2.3 Omówienie celu osiągnięcia naukowego, najważniejszych uzyskanych rezultatów wraz z określeniem ich znaczenia dla rozwoju dziedziny i stanu wiedzy

W celu prowadzenia badań określonych w osiągnięciu naukowym, konieczne było stworzenie warsztatu doświadczalnego, który nie był wcześniej dostępny w Laboratorium Optycznej Spektroskopii Nanostruktur (LOS N) na Wydziale Podstawowych Problemów Techniki (WPPT) Politechniki Wrocławskiej (PWr), gdzie badania były prowadzone. Skonstruowane zostały cztery układy pomiarowe (U1-U4) do badania procesów rozdzielonej w czasie i scałkowanej po czasie emisji i absorpcji, pracujące w łącznym zakresie widmowym 0.27-3.5  $\mu\text{m}$ . Centralną część wszystkich układów opisanych poniżej stanowi zestaw laserów impulsowych zdolny generować impulsy o czasie trwania  $\sim 140$  fs lub  $\sim 2$ -5 ps z powtarzalnością  $\sim 76$  MHz lub niższą:

- U1. Układ do pomiaru widm fotoluminescencji rozdzielonej w czasie oraz całkowanej po czasie z detekcją opartą o kamerę smugową z fotokatodą S20 w zakresie spektralnym 0.2-0.85  $\mu\text{m}$  i maksymalnej rozdzielczości czasowej  $\sim 2$  ps;



- U2.** Układ do pomiaru rozdzielonej w czasie oraz całkowitej fotoluminescencji oparty o chłodzoną termoelektrycznie kamerę smugową z fotokatodą S1 na zakres 0.3-1.6  $\mu\text{m}$  z wydajnością kwantową optymalizowaną w zakresie 0.3-1.1  $\mu\text{m}$  i maksymalną rozdzielczością czasową  $\sim 2$  ps;
- U3.** Układ do pomiaru rozdzielonej w czasie oraz całkowitej fotoluminescencji oparty o prototypowe urządzenia działające z fotokatodą InP/InGaAs chłodzoną do temperatury  $-100$   $^{\circ}\text{C}$ , z wydajnością kwantową optymalizowaną w zakresie bliskiej podczerwieni 1-1.65  $\mu\text{m}$  i o maksymalnej rozdzielczości czasowej  $\sim 20$  ps;
- U4.** Układ do pomiaru rozdzielonego w czasie odbicia/transmisji w konfiguracji pompa-sonda operujący w zakresie widmowym bliskiej i średniej podczerwieni 0.4-3.5  $\mu\text{m}$  i rozdzielczości czasowej ograniczonej długością trwania zastosowanego impulsu laserowego.

Układy **U1** oraz **U2** w chwili uruchomienia (2009 r.) były unikatowe na skalę krajową, dzięki zastosowaniu kamer smugowych. Układ **U3** zawiera prototypowe urządzenie (kamera smugowa). Wyjątkowy jest zakres spektralny pracy aparatury w układzie **U3** mieszczący się w przedziale 1.00- 1.65  $\mu\text{m}$ . Cechą szczególną układu **U4** jest duża czułość dla rejestrowanych sygnałów przejściowego odbicia ( $\Delta R/R \sim 10^{-4}-10^{-5}$ ) i transmisji w zakresie bliskiej i średniej podczerwieni ( $\lambda > 1$   $\mu\text{m}$ ), co stanowi zaletę z uwagi na niską intensywność rejestrowanych sygnałów. O ile układy **U1** do **U4** stanowią obecnie część bazy doświadczalnej LOSN (<http://osn.pwr.edu.pl>), to poniżej opisany układ **U5** został zaadoptowany z istniejącego układu do pomiaru rozdzielonej w czasie rotacji Kerra i przystosowany do wykonywania doświadczeń w zakresie widmowym 500-700 nm. Układ **U5** bazował na podobnych komponentach jak układ **U4** i znajdował się w Laboratorium badawczym Prof. Manfreda Bayera Experimentalle Physik II na Uniwersytecie w Dortmundzie, gdzie autor prowadził badania na stażu w roku 2011.

Zastosowanie stworzonych narzędzi spektroskopowych, w tym w szczególności rozdzielonej w czasie spektroskopii optycznej wspartych danymi spektroskopowymi z innych metod oraz modelowaniem teoretycznym, pozwoliło na osiągnięcie **głównego celu pracy badawczej związanego z określeniem kinetyki procesów optycznych w rozważanych nanostrukturach kwantowych, ale też pozwoliło na znalezienie charakteru oddziaływań towarzyszących wzbudzeniu optycznemu modyfikowanych przez warunki ograniczenia przestrzennego i warunki otoczenia.**

**Badania prowadzone była na wytworzonych metodami epitaksjalnymi quasi-zero-wymiarowych obiektach zwanych kropkami kwantowymi,** w których elektrostatycznie (kulombowsko) skorelowana para elektronu i dziury (ekscyton) związana jest w trójwymiarowym potencjale wiążącym determinowanym przez cechy materiałowe obiektu, jego fizyczne rozmiary, oraz najbliższe otoczenie. Od początków wytwarzania nanostruktur istnieje potrzeba poszukiwań specyficznych parametrów fizyko-chemicznych kropek kwantowych ze względu na zastosowania przyrządowe, jak i chęć obserwacji zjawisk fizycznych wcześniej niemożliwych do zaobserwowania w znacznie bardziej typowych i powszechnie badanych nanostrukturach. Poszukiwania te mogą prowadzić do intencjonalnej lub nieintencjonalnej modyfikacji, tak struktury energetycznej kropek kwantowych, jak i ich otoczenia, a to z kolei może determinować obserwowaną dynamikę relaksacji wzbudzenia ładunkowego i spinowego.

**W podrozdziale 2.3.1** przedstawiono wyniki badań nad relaksacją międzypasmową ekscytonu w silnie wydłużonych w płaszczyźnie wzrostu epitaksjalnego kropkach kwantowych InAs w matrycach z InAlGaAs lub InGaAsP, wytworzonych metodą z wiązki molekularnej na podłożu z InP(001) [**H1**, **H2**, **H3**]. Wydłużone w płaszczyźnie wzrostu obiekty kwantowe, ze względu na swój kształt, nazywane są często kreskami kwantowymi i znajdują zastosowanie w laserach i wzmacniaczach optycznych<sup>[1-3]</sup>, jak również mogą być wykorzystane jako źródła pojedynczych fotonów dla kryptografii kwantowej, czy też schematów kwantowego przetwarzania

informacji<sup>[4, 5, 6, 7]</sup>. Obiekty takie wykazują specyficzne własności kinetyki emisji związane ze strukturą energetyczną silnie wydłużonych kropek kwantowych oraz kulombowskimi korelacjami pomiędzy elektronem i dziurą. Dla ukazania wpływu tych korelacji, m.in. na dynamikę relaksacji międzypasmowej, wyniki badań omówione zostaną w porównaniu do innych uzyskanych dla klasycznego układu „typowych” samorosnących kropek kwantowych (In,Ga)As [H6, H9] i InAs [H5] wytworzonych w matrycy GaAs oraz porównane z rezultatami badań dla niemal symetrycznych w płaszczyźnie wzrostu kropek kwantowych z InAs [H4] w matrycy z InAlGaAs, wytworzonych na podłożu z InP(001).

Modyfikacja struktury pasmowej samorosnących kropek kwantowych, prowadząca do zmiany ograniczenia przestrzennego, może również wpływać na relaksację wewnątrzpasmową wzbudzenia. Kluczowe wyniki badań nad tym zagadnieniem dla silnie asymetrycznych kropek kwantowych InAs z barierami InAlGaAs i InGaAsP zaprezentowane zostały w **podrozdziale 2.3.2**. Parametry relaksacji wewnątrzpasmowej w tych obiektach kwantowych [H1] porównane zostały do tych uzyskanych dla symetrycznych kropek kwantowych InAs w matrycy InAlGaAs na podłożu z InP(001) [H4], o których brak jest niemal jakichkolwiek danych literaturowych.

Relaksacja wewnątrzpasmowa nie musi być determinowana jedynie przez parametry związane z kwantyzacją poziomów energetycznych w potencjale wiążącym quasi-zero-wymiarowego obiektu. Relaksacja ta może być określana również przez lokalne, nieintencjonalne otoczenie kropek kwantowych. W **podrozdziale 2.3.3** omówione zostały wyniki badań nad relaksacją wewnątrzpasmową ekscytonu dla silnie wydłużonych kropek kwantowych (In,Ga)As w matrycy GaAs [H7]. Te ostatnie obiekty zostały specjalnie zaprojektowane dla uzyskania silnego sprzężenia światła z materią w mikro-rezonatorach optycznych.<sup>[20]</sup> Optymalizacja parametrów kropek kwantowych (In,Ga)As/GaAs w celu uzyskania silnego sprzężenia doprowadziła z jednej strony do obiektów, w których ekscyton jest słabo związany w potencjale kropki kwantowej (zakres znacznie osłabionego ograniczenia przestrzennego), z drugiej zaś do nieintencjonalnej generacji stanów pułapkowych w obszarze warstwy zwilżającej, na której kropki są naturalnie osadzone w technice wzrostu Stranski-Krastanow. Quasi-dyskretny charakter gęstości stanów tej nominalnie dwuwymiarowej warstwy znacząco modyfikuje relaksację wzbudzenia do kropek kwantowych, jak również samą relaksację międzypasmową, a zależność ta jest dodatkowo silnie zależna od temperatury oraz stosunku gęstości stanów zlokalizowanych w warstwie zwilżającej do gęstości samych kropek kwantowych.

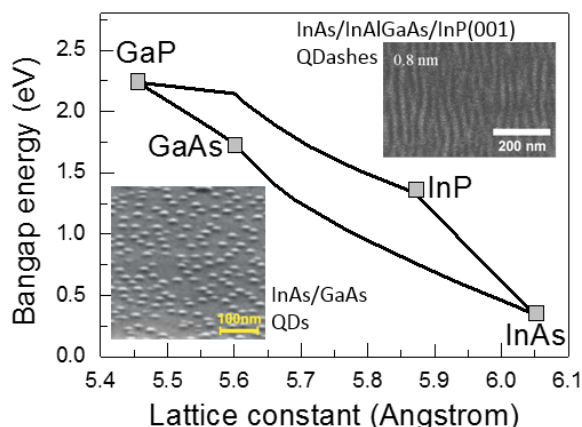
O ile nieintencjonalna modyfikacja otoczenia kropek kwantowych jest zwykle efektem niepożądanym z uwagi na słabą kontrolę tego zjawiska, o tyle zmiana intencjonalna może prowadzić do interesujących efektów np. takich jak rezonansowy lub nieresonansowy transfer nośników ładunku pomiędzy sąsiadującymi jamami potencjału. W **podrozdziale 2.3.4** przedstawiono wyniki badań nad relaksacją wewnątrzpasmową i międzypasmową w układzie sprzężonym kropek kwantowych InAs/GaAs ze studnią kwantową (In,Ga)As przez cienką barierę z GaAs [H6, H9] oraz relaksację wewnątrzpasmową dla układu kropek kwantowych InAs/InAlGaAs sprzężonych ze studnią kwantową (In,Ga)As [H4]. Okazuje się, że w przedstawionym układzie prototypowym przewidzianym na obszar aktywny szybko modulowanych laserów na kropkach kwantowych obecność studni kwantowej może powodować zmiany charakteru przejścia podstawowego układu. Obserwacja kinetyki emisji ze stanu podstawowego układu sprzężonego prowadzi do wniosku, że dla określonych parametrów takiego sprzężonego układu, podstawowy stan elektronowy może być silnie odsprężony z potencjału kropki kwantowej do potencjału studni kwantowej. Co więcej, sprzężenie pomiędzy studnią kwantową, a kropkami kwantowymi może istotnie modyfikować parametry relaksacji wewnątrzpasmowej i prowadzić do jej spowolnienia w stosunku do relaksacji w układach z samymi kropkami kwantowymi.

W **podrozdziale 2.3.5** opisane zostały wyniki prac badawczych nad koherentną relaksacją wzbudzenia spinowego w kropkach kwantowych InP/(Ga,In)P [H8] charakteryzujących się słabym ograniczeniem

przestrzennym dla dziury oraz kreskach kwantowych InAs/InAlGaAs [H2], w których generowane wzbudzenie spinowe powstaje w układzie o tzw. pośrednim ograniczeniu przestrzennym dla ekscytonu (pomiędzy ograniczeniem silnym a słabym). W przypadku kropek kwantowych pokazano istotną rolę, jaką odgrywa brak izolacji stanu spinowego na koherentną dynamikę spinu dziury. W przypadku kresek kwantowych podnoszona jest istotna rola inicjalizacji stanu spinowego ekscytonu na efekt pamięci stanu oraz jej ewolucji.

### 2.3.1 Relaksacja międzypasmowa ekscytonu w silnie wydłużonych, asymetrycznych kropkach kwantowych InAs na podłożu z InP(001)

Silnie wydłużone, asymetryczne w płaszczyźnie wzrostu kropki kwantowe wytworzone w układzie materiałowym InAs na podłożu z InP(001) (InAs/InP(001)) stanowią rozwiązanie konkurujące z rozwiązaniami opartymi o studnie kwantowe w obszarze aktywnym półprzewodnikowych laserów i wzmacniaczy optycznych pracujących w zakresie drugiego (1.26-1.36  $\mu\text{m}$ ), trzeciego ( $\sim$ 1.53-1.565  $\mu\text{m}$ ) i czwartego (1.565-1.625  $\mu\text{m}$ ) okna transmisyjnego światłowodów krzemionkowych. Co więcej, zakres zastosowań tych obiektów można rozszerzyć na źródła pojedynczych fotonów<sup>[4, 5, 6]</sup> oraz fotonów polaryzacyjnie splątanych<sup>[7]</sup> mających kluczowe znaczenie dla rozwoju schematów komunikacji kwantowej w sieciach światłowodowych<sup>[8, 9]</sup> Wydawało się, że fizyka dobrze poznanych kropek kwantowych opartych o materiały InAs i GaAs da się bezpośrednio przełożyć, poprzez różne analogie, na układ kropek kwantowych InAs na InP. Wyniki badań pokazały, że jednak tak nie jest z powodu istotnych różnic m.in. w wielkości obiektów, ich symetrii oraz występujących naprężeń (Wyk. 2.1). Samorosnące kropki kwantowe z InAs na podłożu z GaAs wytwarzane metodą Stranski-Krastanow stanowią zwykle małe i prawie symetryczne w płaszczyźnie wzrostu obiekty z powodu występujących dużych naprężeń ( $\sim$ 7% różnicy stałej sieci krystalicznej pomiędzy InAs i GaAs). Dla kombinacji materiałów InAs i InP, i przy stosowaniu dopasowanych sieciowo do InP wieloskładnikowych materiałów bariery (InAlGaAs, InGaAsP, InAlAs) maksymalna różnica stałych sieciowych wynosi  $\sim$ 3% co sprawia, że w naturalny sposób relaksacja naprężeń w połączeniu z naturalną anizotropią dyfuzji atomów na powierzchni prowadzi do wzrostu dużych i często silnie asymetrycznych obiektów w technologii z wiązek molekularnych (ang. Molecular Beam Epitaxy - MBE) lub z rozpadu związków metaloorganicznych (ang. Metalorganic Vapour Phase Epitaxy - MOVPE) (por. Wyk. 2.1).

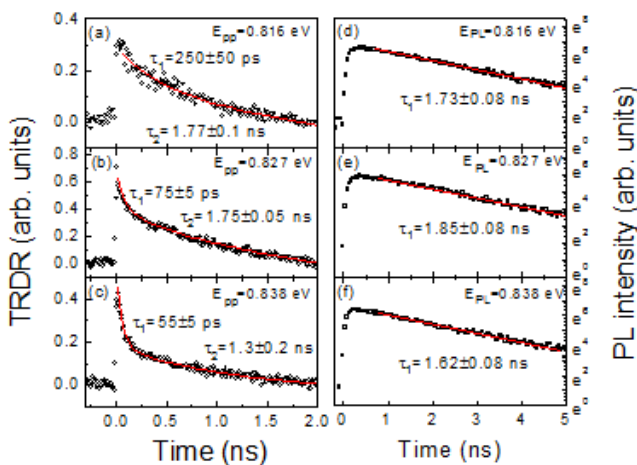


**Wykres 2.1.** Stałe sieciowe materiałów III-V wraz ze zdjęciami powierzchni ilustrującymi typowe obiekty kwantowe wytworzone w procesie epitaksjalnym – kropki kwantowe InAs na podłożu z GaAs (na dole) [H5,H6] oraz silnie wydłużone kropki kwantowe InAs na dopasowanej sieciowo do materiału InP(001) barierze InAlGaAs [H2,H3].

Różnice pomiędzy układami materiałowymi InAs/GaAs [H5, H6] i InAs/InP [H1, H2, H3] nie kończą się na geometrii oraz wielkości obiektów kwantowych. Podczas gdy nieciągłość pasm dla układu materiałowego InAs/GaAs zapewnia głęboki potencjał wiążący dla elektronu, w układzie InAs na InP jest ona kształtowana przez dobór odpowiedniego, zwykle dopasowanego sieciowo do InP materiału bariery. Czynniki te sprawiają, że korelacje dla związanej przestrzennie w potencjale wydłużonej kropki kwantowej pary elektronu i dziury mogą znajdować się w zupełnie innych zakresach ograniczenia przestrzennego<sup>[10]</sup> dla układu InAs/GaAs i

InAs/InP. To z kolei prowadzi do modyfikacji takich parametrów jak moment dipolowy przejścia optycznego, polaryzacja emitowanych fotonów oraz siła oscylatora przejścia optycznego, a zatem i czas życia pary elektron-dziura. [H2, H3] Ta ostatnia kwestia, tzn. parametry promienistej relaksacji międzypasmowej w silnie wydłużonych kropkach kwantowych InAs/InP nie była wcześniej szczegółowo zbadana, co zainspirowało do podjęcia działań i projektów badawczych w tym zakresie.

Badania relaksacji międzypasmowej ekscytonu w tych obiektach emitujących w zakresie trzeciego okna telekomunikacyjnego rozpoczęły się w roku 2013 [H1]. Struktury do badań w postaci silnie wydłużonych kropek kwantowych InAs/Ga<sub>0.2</sub>In<sub>0.8</sub>As<sub>0.4</sub>P<sub>0.6</sub>/InP(001) dostarczone były przez Dr. Francois'a Lelarge'a z III-V Lab w Marcoussis we Francji. Eksperyment wymagał zbudowania nowego układu U4 oraz modyfikacji układu U3 poprzez zastosowanie najnowocześniejszych detektorów na bazie nadprzewodnika, zdolnych rejestrować pojedyncze fotony, oraz zastosowania techniki skorelowanego w czasie zliczania fotonów. Wynikiem wykonanej pracy eksperymentalnej było wyznaczenie po raz pierwszy wartości „efektywnego” czasu rekombinacji promienistej ekscytonu związanego na stanie podstawowym w asymetrycznej kropce kwantowej InAs/Ga<sub>0.2</sub>In<sub>0.8</sub>As<sub>0.4</sub>P<sub>0.6</sub>/InP(001) wynoszącego blisko 1.75 ns dla długości fali emisji ~1.55 μm. Czas ten może być złożeniem czasów relaksacji dwóch stanów ekscytonowych jak opisano poniżej. Parametr ten został uzyskany w eksperymencie typu pompa-sonda wykorzystującym metodę rozdzielonego w czasie odbicia z pompowaniem rezonansowym. Parametry relaksacji międzypasmowej potwierdzone zostały w pomiarze rozdzielonej w czasie fotoluminescencji (Wykr. 2.2.) Zbieżność wyników obydwu eksperymentów, zasugerowała, że efekty relaksacji wewnątrzpasmowej i przejścia niepromieniste nie wpływają istotnie na uzyskiwane parametry przejścia międzypasmowego i można otrzymane wartości w przybliżeniu utożsamiać z promienistym czasem życia neutralnego ekscytonu na stanie podstawowym układu.



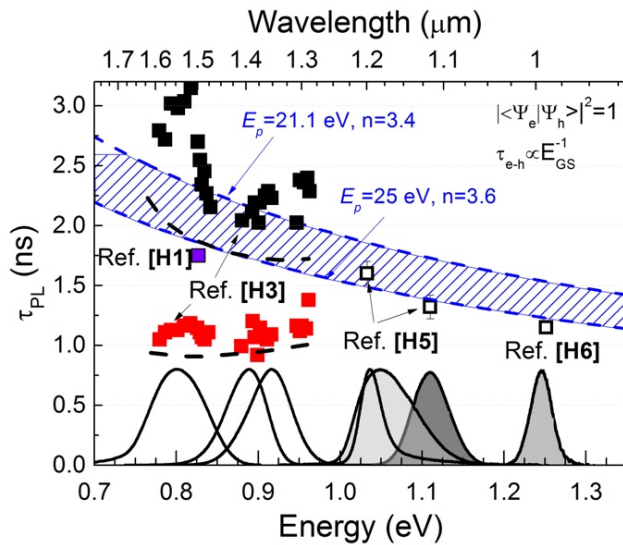
**Wykres 2.2. (a)-(c)** Dynamika relaksacji międzypasmowej i wewnątrzpasmowej mierzona na zbiorze silnie asymetrycznych kropek kwantowych InAs/Ga<sub>0.2</sub>In<sub>0.8</sub>As<sub>0.4</sub>P<sub>0.6</sub>/InP(001) w eksperymencie typu pompa-sonda wykorzystującym metodę rozdzielonego w czasie odbicia dla różnych energii detekcji ( $E_{pp}$ ). **(d)-(f)** Dynamika relaksacji międzypasmowej mierzona w eksperymencie rozdzielonej w czasie fotoluminescencji w konfiguracji ze skorelowanym w czasie zliczaniem pojedynczych fotonów. [H1]

Z punktu widzenia inżynierii układów zawierających silnie asymetryczne kropki kwantowe, wartość uzyskanego parametru relaksacji międzypasmowej ma kluczowe znaczenia dla działania lasera i jest istotna, w szczególności dla poprawnego zamodelowania parametrów laserów wytworzonych w oparciu o tego typu rozwiązanie w obszarze aktywnym. Spośród istotnych własności lasera, które determinowane są przez czas życia pary elektron-dziura na stanie podstawowym potencjału wiążącego kreski kwantowej, można wymienić natężenie (gęstość) prądu progowego oraz temperaturę charakterystyczną. [28, 29, 30] Do tej pory brakowało informacji o tym, co właściwie kryje się za uzyskaną doświadczalnie wartością czasu relaksacji międzypasmowej pary elektron-dziura i skąd wynika jej wartość oraz jak zależy czas życia ekscytonu od wielkości obiektu i jaka jest jego charakterystyczna dyspersja widmowa (energetyczna).

W 2016 roku w pracy [H2] przedstawiono wyniki, które rzuciły nieco więcej światła na procesy fizyczne stojące za obserwowaną kinetyką międzypasmową w silnie wydłużonych nanostrukturach kwantowych InAs na InP. Głównym tematem było badanie takich układów pod kątem optycznie adresowanej pamięci spinowej (omawiana w podrozdziale 2.3.5). Zbadano także ewolucję emisji w czasie ze stanów ekscytonowych tworzących stan podstawowy w kropce kwantowej. Przestrzenna anizotropia potencjału wiążącego ekscyton, wynikająca z kształtu obiektu oraz dodatkowe anizotropie wynikające z rozkładu naprężeń, składu chemicznego, czy też istnienia asymetrii komórki elementarnej kryształu, wpływają na istnienie rozszczepienia stanu podstawowego ekscytonu na cztery stany, z których dwa, tzw. stany jasne, możliwe są do zaobserwowania w eksperymencie optycznym. Te dwa jasne stany ekscytonowe w układzie z anizotropią powinny skutkować generacją fotonów o liniowej polaryzacji światła, ale wzajemnie prostopadłej. W eksperymencie przeprowadzonym na pojedynczej kresce kwantowej zaobserwowano<sup>[4,5]</sup>, iż polaryzacja tych dwóch stanów ekscytonowych nie jest ściśle liniowa, ale raczej eliptyczna, co w konsekwencji daje niezerowy stopień polaryzacji liniowej sięgający kilkudziesięciu procent.[H2] Przyczyną obserwacji polaryzacji eliptycznej (znaczącej wartości stopnia polaryzacji liniowej) jest struktura pasma walencyjnego (i mieszanie się stanów dziur „ciężkich” i „lekkich”) przedkładająca się na parametry przejścia ekscytonowego. Z uwagi na gęstą drabinkę poziomów w paśmie walencyjnym w silnie wydłużonych kropkach kwantowych [H1, H3] funkcja falowa ekscytonu nie jest zbudowana wyłącznie z funkcji falowej elektronu i dziury w tak zwanym paśmie dziur ciężkich, ale posiada również pewną niewielką, ale istotną domieszkę stanów z pasma dziur lekkich. W typowych, „małych” i prawie-symetrycznych kropkach kwantowych InAs/GaAs pasma dziur ciężki i lekkich są od siebie silnie odseparowane energetycznie, a ekscyton można z dobrym przybliżeniem opisywać, jako ciężkodziurowy. Konsekwencją mieszania się stanów dziur w paśmie walencyjnym w silnie asymetrycznych kropkach kwantowych jest obserwacja dwóch rozszczepionych stanów ekscytonowych nie tylko o eliptycznej polaryzacji, ale też o dwóch różnych siłach oscylatora przedkładających się na dwa różne czasy życia ekscytonu w stanie podstawowym takiej nanostruktury. Efekt ten, dla omawianych silnie wydłużonych kropek kwantowych, po raz pierwszy został zaobserwowany i opublikowany w pracy [H2]. Wynik ten dał impuls do dalszych badań tego zagadnienia, czego konsekwencją była publikacja [H3].

W pracy [H3] przedstawiono model teoretyczny dotyczący własności polaryzacyjnych oraz czasów życia ekscytonu dla silnie wydłużonych kropek kwantowych InAs/Al<sub>0.24</sub>Ga<sub>0.23</sub>In<sub>0.53</sub>As/InP(001). Model ten skonfrontowano z danymi doświadczalnymi dotyczącymi stopnia polaryzacji oraz czasów życia emisji rejestrowanych w układzie U3 dla zespołu silnie asymetrycznych nanostruktur. Nanostruktury te dostarczył partner technologiczny z Uniwersytetu w Würzburgu w Niemczech (Laboratorium Prof. Svena Höflinga) i zdolne były emitować, w zależności od próbki i średniego rozmiaru obiektu kwantowego, w szerokim zakresie spektralnym pomiędzy 1.2-1.6  $\mu\text{m}$ , co dawało możliwość obserwacji dyspersji widmowej wspomnianych parametrów (polaryzacji i czasów życia ekscytonów). Analiza danych doświadczalnych ujawniła, że emisja ze stanu podstawowego badanych obiektów kwantowych ma w sobie dwie składowe, które dobrze przystają do przewidywań teoretycznych. Przy czym jeden komponent ma charakterystyczną stałą zaniku rzędu 1 ns i podlega słabej dyspersji energetycznej, natomiast drugi komponent charakteryzuje się blisko 2.5 razy większą stałą zaniku, a jego wartość zwiększa się wraz ze zmniejszaniem się energii emisji stanu podstawowego kresek kwantowych (Wykres 2.4). Wyniki te zostały również potwierdzone przez habilitanta dla innych struktur o

silnej asymetrii kształtu, o innej morfologii i pochodzących z innych laboratoriów technologicznych, z którymi habilitant współpracuje (Prof. J. Faista, ETH Zurich, Prof. J. P. Reithmaier, Uniwersytet w Kassel).



**Wykres 2.4.** Dyspersja parametrów relaksacji międzypasmowej ( $\tau_{PL}$ ) w zależności od energii emisji dla kropek kwantowych InAs/GaAs (otwarte punkty) [H5, H6], oraz kresek kwantowych InAs/InAlGaAs/InP(001) (czarne i czerwone punkty) [H3] i InAs/InGaAsP/InP(001) (fioletowy punkt) [H1]. Niebieski zakreskowany obszar to zakres parametru  $\tau_{PL}$  dla ekscytonu w reżimie silnego wiązania przestrzennego. Przerywana linia czarna to dyspersje parametrów  $\tau_{PL}$  dla kresek kwantowych, gdzie ekscyton znajduje się w reżimie pośredniego wiązania przestrzennego.

Wyniki badań opublikowane w pracy [H3] mają bardziej generalny wydźwięk, co zostało zauważone przez recenzentów pracy jak i zespół edytorski wydania Physical Review B, gdzie artykuł otrzymał wyróżnienie „Editors’ Suggestions”. Są one istotne dla zrozumienia dynamiki i charakteru emisji dla przejść międzypasmowych w obiektach kwantowych charakteryzujących się pośrednim reżimem wiązania przestrzennego ekscytonu. W ogólności, zaobserwowany efekt powinien być widoczny dla kropek kwantowych wytworzonych nie tylko z materiałów z grupy III-V, ale również z innych grup materiałowych, gdzie ekscyton znajduje się w reżimie pośredniego wiązania przestrzennego i gdzie jego funkcja falowa skonstruowana jest m.in. zarówno z funkcji falowych stanu podstawowego dziury ciężkiej jak też stanów wzbudzonych, w tym ze stanów dziury lekkiej. Asymetria potencjału wiążącego obiektu kwantowego może prowadzić do uwydatnienia efektu. Istnienie tego efektu sygnalizowano wcześniej w eksperymencie mieszania czterech fal w kropkach kwantowych (In,Ga)As/GaAs<sup>[31]</sup> i InAs/InP(311)B<sup>[32]</sup>. Jednak tak wyraźny efekt obserwowany w eksperymencie fotoluminescencji rozdzielonej w czasie dla silnie asymetrycznych kresek kwantowych InAs/InP(001) nie był do tej pory obserwowany. Warto nadmienić, że dla symetrycznych w płaszczyźnie wzrostu i mniejszych kropek kwantowych z InAs na podłożu z InP emitujących w zakresie 1.55  $\mu\text{m}$  [H4], nie udało się znaleźć podobnego charakteru emisji z rekombinacji stanu ekscytonowego, która wydaje się być typowa jedynie dla względnie dużych obiektów kwantowych, często z asymetrią potencjału wiążącego.

Oprócz wartości poznawczej, zbadanie relaksacji międzypasmowej w dużych i asymetrycznych nanostrukturach z InAs na podłożu z InP ma niebagatelne znaczenie dla zastosowań, m.in. w konstrukcjach laserów, czy wzmacniaczy telekomunikacyjnych pracujących w zakresie drugiego, trzeciego i czwartego okna telekomunikacyjnego. Demonstracja charakteru stanu podstawowego układu, jako złożonego z dwóch stanów o różnych parametrach emisji, stwarza istotne komplikacje dla projektowania i modelowania urządzeń opartych o ten typ obiektów, ale też daje możliwości ominięcia wynikających z tego faktu problemów technologicznych. Dla przykładu, wspomniana powyżej grupa technologiczna z Uniwersytetu w Kassel zajmująca się wytwarzaniem i charakteryzacją laserów i wzmacniaczy optycznych, zaobserwowała anizotropie parametrów urządzeń, takich jak prąd progowy, czy szybkość modulacji w zależności od geometrii ustawienia kresek kwantowych w stosunku do wnęki rezonansowej urządzenia, co może być w części tłumaczone obserwowanymi efektami będącymi rezultatami badań habilitanta. Efekty te mogą mieć również istotne znaczenie dla

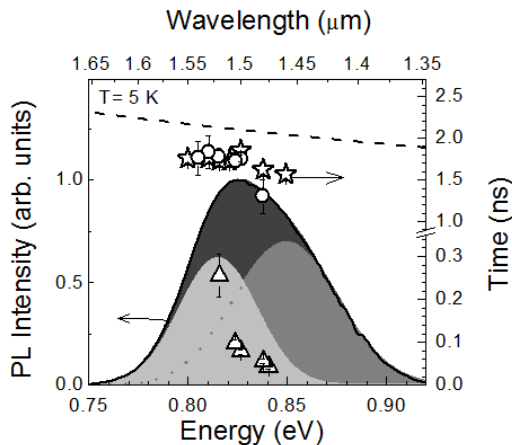
zastosowań jednofotonowych kreszek kwantowych. Odpowiednie ustawienie geometrii emitera względem modu wnęki rezonansowej może prowadzić do wzmocnienia lub osłabienia efektu Purcella, a zatem kontroli szybkości emisji jednofotonowej.

### 2.3.2 Relaksacja wewnątrzpasmowa elektronu i dziury w kropkach kwantowych InAs na podłożu z InP(001)

Relaksacja wewnątrzpasmowa stanowi ważny element determinujący efektywność zapełnienia nośnikami stanu podstawowego układu kwantowego. Dla przypadku kropek kwantowych wytworzonych w oparciu o materiały InAs/InP ważna jest także z punktu widzenia częstości modulacji laserów, czy wzmacniaczy optycznych dedykowanych dla optycznej komunikacji średnio- i daleko-zasięgowej.<sup>[28, 29, 30]</sup> Wiedza na temat relaksacji międzypasmowej w takich obiektach, jak silnie wydłużone kropki kwantowe, może być kluczowa dla zrozumienia mechanizmów relaksacji w quasi-zero-wymiarowych potencjałach. W literaturze parametry tej relaksacji dla kreszek kwantowych InAs z barierą InGaAsP oraz kropek kwantowych InAs z barierą InGaAlAs wytworzonych na podłożu z InP(001) nie były jak do tej pory określone. W przypadku zastosowania narzędzi ultraszybkiej spektroskopii optycznej do uzyskania parametrów relaksacji wewnątrzpasmowej w tych obiektach, zasadniczą trudność stanowi zakres spektralny (bliska podczerwień), wymagana rozdzielczość czasowa (<1 ps) oraz nominalnie niewielkie sygnały odpowiedzi optycznej.

Zbadanie relaksacji wewnątrzpasmowej w kropkach kwantowych InAs na podłożu z InP(001) dodaje w ogólności argument do dyskusji na temat mechanizmów i kinetyki relaksacji w samorosnących kropkach kwantowych. W literaturze, mimo ubiegu kilku dekad, odkąd kropki kwantowe są wytwarzane i badane, mechanizmy relaksacji wciąż stanowią niewiadomą. Z obecnych w literaturze danych ciągle trudno jest uzyskać spójny obraz relaksacji. W tym kontekście niejasna pozostaje np. rola mechanizmów fononowych i kontrowersje związane z istnieniem, bądź też brakiem tzw. wąskiego gardła relaksacji fononowej (ang. *phonon bottleneck*) ściśle związanego z kwantyzacją wewnątrzpasmową w kropkach kwantowych.

W badaniach habilitanta nad relaksacją wewnątrzpasmową, podstawową metodą badawczą był pomiar zależności zmiany współczynnika odbicia w czasie, wykorzystujący konfigurację eksperymentu typu pompa-sonda (układ U4). Wyniki częściowo przedstawiono na Wyk. 2.2 (a)-(c) [H1]. W eksperymencie zastosowane energie fotonów w impulsie pompującym i próbkującym były sobie równe, a zatem proces kreacji par elektron dziura na wybranym stanie w kresce kwantowej następował natychmiastowo, a depopulacja adresowanego stanu na skutek istnienia procesów relaksacji wewnątrzpasmowej i międzypasmowej jest widoczna w zaniku w czasie intensywności wiązki próbkującej. W przeprowadzonych pomiarach udało się zarejestrować czas relaksacji międzypasmowej charakteryzujący się stałą zaniku  $\sim 1.75$  ns, jak wspomniano w podrozdziale 2.3.1, ale również udało się zarejestrować drugi, krótko-żyjący komponent sygnału przejściowego odbicia, przypisany procesowi relaksacji wewnątrzpasmowej. Co więcej, stała czasowa komponentu wydłuża się od 40 ps dla wysokich energii fotonów w impulsie, do blisko 250 ps przy obniżaniu energii adresowanych stanów w kresce kwantowej.



**Wykres 2.5.** Pasma emisji z kresek kwantowych InAs/Ga<sub>0.2</sub>In<sub>0.8</sub>As<sub>0.4</sub>P<sub>0.6</sub>/InP(001) (kolor szary), parametr relaksacji wewnątrzpasmojowej oznaczony jako trójkąt, parametr relaksacji międzypasmojowej oznaczony przez gwiazdkę (eksperyment rozdzielczej w czasie fotoluminescencji) i koło (eksperyment przejściowego odbicia). [H1]

Tak znaczna dyspersja efektywnego czasu relaksacji wewnątrzpasmojowej nie była do tej pory raportowana. Obiekty te ze względu na swoje rozmiary i asymetrię charakteryzują się zwykle obniżeniem energii kwantyzacji w stosunku do bardziej symetrycznych i mniejszych obiektów jakimi są „typowe” kropki kwantowe tego samego układu materiałowego. Wyniki obliczeń struktury pasmojowej [H1] pokazały, że wartość energii kwantyzacji w paśmie przewodnictwa może być znacznie mniejsza od energii fononu optycznego (33-36 meV), a w paśmie walencyjnym wynosić tylko kilka meV. Jeśli przyjąć, że najbardziej efektywnym procesem dyssypacji energii elektronu i dziury podczas sekwencyjnej relaksacji wewnątrzpasmojowej jest oddziaływanie z fononami optycznymi, to w przypadku badanych kresek kwantowych założenie to nie może być spełnione, a w procesie relaksacji muszą uczestniczyć niskoenergetyczne wzbudzenia fononowe (fonony akustyczne) prowadzące do efektywnego spowolnienia procesu relaksacji. W przeprowadzonym eksperymencie wybrano tak zakres adresowanych stanów, aby relaksacja wewnątrzpasmojowa zachodziła możliwie jedynie pomiędzy pierwszym stanem wzbudzonym i stanem podstawowym kropki kwantowej. Co więcej, zmiana energii impulsu adresującego (pompującego) w kierunku niższych jej wartości powinna skutkować wyborem większych kresek kwantowych, dla których wewnątrzpasmojowa kwantyzacja jest niższa, niż dla kresek po wyżej energetycznej stronie przedziału skanowania. To może prowadzić do obserwacji przewidzianej teoretycznie<sup>[11]</sup> charakterystycznej dyspersji czasu relaksacji związanej z wyborem niskoenergetycznych wzbudzeń fononowych uczestniczących w procesie rozpraszania pomiędzy stanem wyższym, a stanem podstawowym w nanostrukturze.

Dla porównania, w roku 2018 przeprowadzono pomiary relaksacji wewnątrzpasmojowej w niemal symetrycznych i małych kropkach kwantowych InAs/In<sub>0.53</sub>Ga<sub>0.23</sub>Al<sub>0.24</sub>As/InP(001) z wykorzystaniem zmodyfikowanego układu U4. Pomiar relaksacji wewnątrzpasmojowej wykonano śledząc ewolucję intensywności odbitej wiązki próbującej od badanej struktury po wzbudzeniu nierezonansowym wiązką impulsów pompujących. Dla badanych obiektów kwantyzacja wewnątrzpasmojowa daje odległości między stanami w paśmie przewodnictwa bliskie wartości fononu optycznego w materiale InAs (~32-36 meV) [H4]. Należało się zatem spodziewać, iż relaksacja wewnątrzpasmojowa może być determinowana w szczególności przez oddziaływanie nośników ładunku z fononami optycznymi, co będzie prowadzić do efektywnego zapełniania stanu podstawowego kropki kwantowej. Nigdy wcześniej nie badano relaksacji wewnątrzpasmojowej w kropkach kwantowych tego układu materiałowego. Istniejące doniesienia dotyczyły głównie standardowych kropek kwantowych InAs/GaAs<sup>[12, 13, 14, 15, 16]</sup> oraz pewnych danych dla kropek InAs/InAlAs/InP(001)<sup>[17]</sup> lub InAs/InP(331)B<sup>[18, 19]</sup>, w których relaksacja wewnątrzpasmojowa zawierała się w przedziale 1-40 ps. W wyniku badań habilitanta pokazano, iż relaksacja wewnątrzpasmojowa w kropkach kwantowych InAs/InAlGaAs/InP(001) może zachodzić w czasie ~8 ps [H4], a więc co najmniej 4 razy krótszym od tego



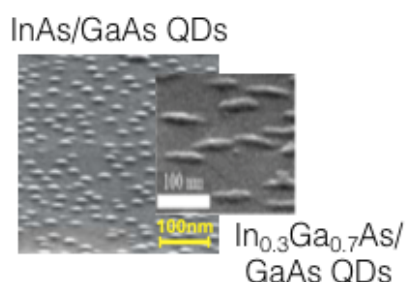
obserwowanego dla silnie wydłużonych nanostruktur InAs/InGaAsP/InP(001) [H4], potwierdzając wcześniejsze hipotezy.

Osiągnięte rezultaty dotyczące relaksacji wewnątrzpasmowej w kreskach kwantowych InAs/InGaAsP/InP(001) oraz kropkach kwantowych InAs/InAlGaAs/InP(001), emitujących w zakresie trzeciego okna telekomunikacyjnego, pokazały jak silnie mogą ulec zmianie mechanizmy relaksacji wewnątrzpasmowej przy odejściu od standardowego obrazu silnego ograniczenia przestrzennego w kropce kwantowej, charakteryzującego się wysoką energią kwantyzacji wewnątrzpasmowej dla elektronu i dziury do znacznie słabszego w silnie wydłużonych i asymetrycznych obiektach. Postulat ten, wynikający z danych doświadczalnych, nie znalazł do tej pory dowodu w pracach teoretycznych, a mechanizmy relaksacji jako takie w ogólności ciągle pozostają elementem badań i żywej dyskusji w literaturze. W typowych kropkach kwantowych dominującą rolę w procesie relaksacji wewnątrzpasmowej mogą mieć mechanizmy związane z relaksacją polaronu oraz rozpraszanie kulombowskie dla dużej gęstości nierównowagowych nośników wygenerowanych w układzie<sup>[16]</sup>. Otrzymane wyniki sugerują, że w przypadku obiektów przewyższających swoim rozmiarem typowe kropki kwantowe, istotne dla relaksacji wewnątrzpasmowej mogą być procesy rozpraszania na niskoenergetycznych wzbudzeniach fononowych, które prowadzą jednocześnie do znacznego wydłużenia czasu relaksacji.

Badania przeprowadzone przez habilitanta mają oprócz wartości poznawczej istotne znaczenie dla zastosowań technologicznych. Czas relaksacji wewnątrzpasmowej silnie determinuje takie parametry jak wzmocnienie różnicowe we wzmacniaczu optycznym, czy też częstość modulacji w laserze. W tym względnie kropki kwantowe wydają się być bardziej efektywne. Dzięki przeprowadzonym badaniom udało się wprowadzić do literatury istotne parametry relaksacji wewnątrzpasmowej w kropkach kwantowych InAs/InAlGaAs/InP(001) oraz kreskach kwantowych InAs/InGaAsP/InP(001), które wypełniają lukę dla parametrów do modeli urządzeń opartych o te rozwiązania materiałowe.

### 2.3.3 Rola nieintencjonalnego otoczenia na relaksację ekscytonu w silnie wydłużonych kropkach kwantowych (In, Ga)As na podłożu z GaAs

Poszukiwania nowych rozwiązań technologicznych bazujących na kropkach kwantowych mogą prowadzić do znaczącej modyfikacji, intencjonalnej lub nie, tak samej kropki kwantowej jak i jej otoczenia. Konsekwencją może być silna modyfikacja mechanizmów relaksacji w takim układzie. Przykładem takiego rozwiązania są kropki kwantowe wytworzone dla efektu silnego sprzężenia emitującego dipola (ekscytonu) z modem mikro-rezonatora optycznego. Spośród wielu istotnych parametrów, kropki takie powinny charakteryzować się dużą siłą oscylatora oraz małą gęstością powierzchniową dla uzyskania sprzężenia jedynie dla pojedynczego emitera z modem wnęki o niewielkiej objętości.<sup>[20, 21, 22]</sup> W systemie materiałowym takim jak InAs/InP, częściowo już omówionym w podrozdziałach 2.3.1 oraz 2.3.2, wykonanie monolitycznej wnęki z materiału półprzewodnikowego ze zwierciadłami Bragga oraz charakteryzującej się wysokim współczynnikiem dobroci (czynnik Q) jest bardzo trudne z uwagi na niski kontrast współczynników załamania  $\eta$  materiałów dopasowanych sieciowo do InP (np.:  $\eta = 0.2$  dla wnęk z InP i InGaAsP).

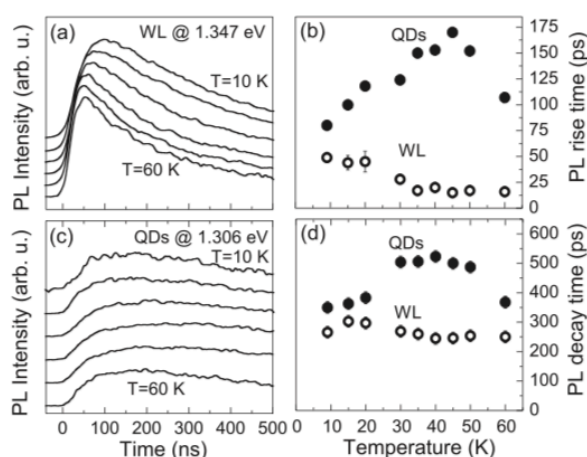


**Rysunek 2.6.** Obrazy ze skaningowego mikroskopu elektronowego przedstawiające powierzchnie z typowymi kropkami kwantowymi InAs/GaAs oraz kropkami kwantowymi In<sub>0.3</sub>Ga<sub>0.7</sub>As/GaAs. Porów. [H5] i [H7].

Problem ten nie jest tak znaczący w przypadku zwierciadeł Bragga wykonanych z materiału AlAs/GaAs dopasowanego sieciowo do GaAs, w przypadku których już dla kilku warstw materiału AlAs/GaAs współczynnik dobroci rezonatora może sięgać od kilku do kilkuset tysięcy.<sup>[20,23]</sup> Aby w układzie materiałowym (In,Ga)As/GaAs uzyskać kropki kwantowe o dużej sile oscylatora, konieczne jest zmniejszenie składu procentowego indu w stopie (In,Ga)As do ok. 30%. W ten sposób formowanie się kropek kwantowych w procesie Stranski-Krastanow na dwuwymiarowej warstwie zwilżającej (2D WL) następuje w innych warunkach naprężeń niż dla typowych kropek kwantowych InAs/GaAs<sup>[24]</sup> i skutkuje [H7]: (a) powstaniem warstwy zwilżającej charakteryzującej się obecnością dużej gęstości stanów zero-wymiarowych (0D WL) (analog studni kwantowej z bocznym potencjałem wiążącym spowodowanym fluktuacją składu materiału studni/bariery oraz grubości studni) oraz (b) powstaniem silnie wydłużonych kropek kwantowych o ~25 nm szerokości, kilku nanometrów wysokości, długości blisko 100 nm i o płytkim potencjale wiążącym, oraz (c) niską gęstością powierzchniową kropek, tak jak pokazano na Rys. 2.6.

Kropki kwantowe użyte do badań zostały wytworzone na Uniwersytecie w Würzburgu w Niemczech (Laboratorium Prof. A. Forchela). Badania spektroskopowe<sup>[25]</sup> wskazały na obecność quasi-zero-wymiarowej gęstości stanów w warstwie zwilżającej oprócz stanów samych kropek kwantowych. Okazało się, iż obecność tej gęstości stanów w połączeniu z płytkim potencjałem wiążącym dużych kropek kwantowych In<sub>0.3</sub>Ga<sub>0.7</sub>As/GaAs oraz niską gęstością powierzchniową kropek prowadzi do zaskakującej, temperaturowo aktywowanej, relaksacji wewnątrzprasmowej, po nierezonansowym wzbudzeniu układu ponad warstwę zwilżającą. Wyniki prac badawczych dotyczących tego tematu opublikowano w pracy [H7].

W niskich temperaturach (~10 K) i przy niskiej gęstości wstrzykiwania nośników w barierę GaAs, relaksacja wewnątrzprasmowa kończy się na lokalizacji nośników w obrębie warstwy zwilżającej, a nośniki nie mogą być efektywnie wychwytywane przez kropki kwantowe. Po podniesieniu temperatury układu nośniki zlokalizowane pierwotnie w quasi-zero-wymiarowej gęstości stanów warstwy zwilżającej zostają termicznie aktywowane do stanów 2D warstwy zwilżającej i dlatego też wtedy zasilają stany w kropkach kwantowych In<sub>0.3</sub>Ga<sub>0.7</sub>As/GaAs. Pokazano, że proces ten ma swoją szczególną kinetykę (Wyk. 2.7), która związana jest z relacją gęstości pomiędzy nieintencjonalnie wprowadzoną gęstością stanów lokalizujących w warstwie zwilżającej i samymi kropkami kwantowymi.



**Wykres 2.7.** (a) Kinetyka procesu emisji w obszarze warstwy zwilżającej (WL), (b) czas narostu fotoluminescencji w funkcji temperatury dla kropek kwantowych (QDs) In<sub>0.3</sub>Ga<sub>0.7</sub>As/GaAs, oraz WL, (c) kinetyka procesu emisji dla kropek kwantowych (QDs) In<sub>0.3</sub>Ga<sub>0.7</sub>As/GaAs, (d) czas zaniku fotoluminescencji w funkcji temperatury dla kropek kwantowych (QDs) In<sub>0.3</sub>Ga<sub>0.7</sub>As/GaAs, oraz WL. [H7]

W typowych kropkach kwantowych wytwarzanych metodą Stranski-Krastanow, gdzie wzrost kropek następuje na dwuwymiarowej warstwie zwilżającej, trudny do obserwacji staje się efekt związany ze spowolnieniem relaksacji nośników ładunku do kropek kwantowych w niskich, a tym bardziej podwyższonych

temperaturach przy wstrzykiwaniu populacji nośników w barierę [H4, H5, H6]. W obszarze warstwy zwilżającej może powstawać gęstość stanów charakteryzujących się trójwymiarowym potencjałem wiążącym dla elektronu i dziury. Potencjały takie zwane są czasem naturalnymi kropkami kwantowymi.<sup>[26, 27]</sup> Zwiększenie się populacji stanów lokalizujących nośniki w warstwie zwilżającej może prowadzić do silnego wzrostu czasu relaksacji wraz ze wzrostem temperatury (Wyk. 2.7 (b)). Badania podsumowane w pracy [H7] pokazały, iż efektu tego nie można tłumaczyć samym procesem opóźnionego, sterowanego temperaturą, procesu uwalniania nośników z gęstości stanów warstwy zwilżającej. W zaproponowanym modelu zjawiska pokazano, że kluczowe znaczenie ma gęstość stanów quasi-zero-wymiarowych w obszarze warstwy zwilżającej i jej stosunek do gęstości epitaksjalnych kropek kwantowych. Parametr ten determinuje czas migracji nośników w obszarze warstwy zwilżającej zanim zostaną one efektywnie wyłapane przez potencjał wiążący kropek kwantowych. Przy takim założeniu model w sposób jakościowy prawidłowo odzwierciedla obserwowaną dynamikę nośników ładunku.

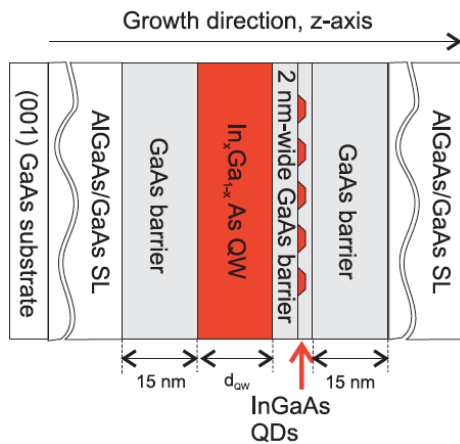
Wynik pracy [H7] jest istotny dla zrozumienia procesów kinetyki relaksacji wewnątrzpasmowej w sprzężonych układach charakteryzujących się stopniem lokalizacji quasi-zero-wymiarowej nośników ładunku. Wprowadza istotny argument w postaci stosunku koncentracji obydwu układów, który znacząco może modyfikować obserwowaną kinetykę relaksacji.

### **2.3.4 Rola intencjonalnie modyfikowanego otoczenia na relaksację międzypasmową i wewnątrzpasmową w kropkach kwantowych InAs/GaAs sprzężonych do studni kwantowej (In, Ga)As/GaAs oraz kropkach kwantowych InAs/InAlGaAs/InP(001) sprzężonych do studni kwantowej (In, Ga)As/InAlGaAs/InP(001)**

Kropki kwantowe w części przypadków nie mogą być traktowane jako odizolowane od otoczenia. Co więcej, ich sprzężenie do otaczającego środowiska jest istotną cechą w wielu rozwiązaniach aplikacyjnych, włączając schematy przetwarzania informacji kwantowej bazujące na wzbudzeniu ładunkowym lub spinowym.<sup>[33, 34]</sup> Jak pokazano w poprzednim podrozdziale, kropki kwantowe mogą oddziaływać z nośnikami w potencjale lokalizującym znajdującymi się w ich pobliżu, jak również z innymi kropkami kwantowymi. Oddziaływanie prowadzi do modyfikacji własności wzbudzenia w kropkach kwantowych, w tym do zmiany obserwowanej kinetyki. Obserwacja kinetyki wzbudzenia może dawać informacje o charakterze wzbudzenia, tak jak dla omawianych poniżej układów, w których kropki kwantowe są intencjonalnie sprzężane ze stanami studni kwantowej. Układ taki został pierwotnie zaproponowany w celu realizacji wydajnego wstrzykiwania nośników ładunku z ich dużego rezerwuaru w ramach gęstości stanów studni kwantowej do kropek kwantowych. Ta koncepcja, z pewnymi modyfikacjami, została wykorzystana w jednoelektronowym tranzystorze<sup>[35, 36]</sup>, laserach z wstrzykiwaniem tunelowym<sup>[37-43]</sup> oraz pamięciach opartych o kropki kwantowe<sup>[44]</sup>.

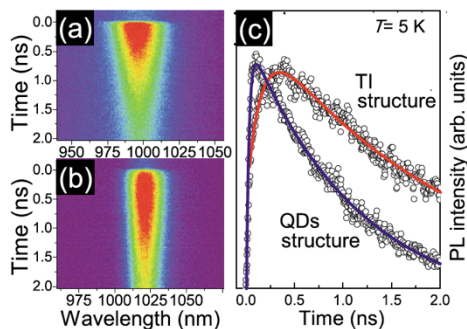
W zastosowaniach laserów z kropkami kwantowymi koncepcja wstrzykiwania nośników ładunku z pobliskiej studni kwantowej przez barierę potencjału ma na celu: (i) zwiększenie kolekcji nośników ładunku, a tym samym ominięcie problemu gorących nośników w kropkach kwantowych; (ii) przyspieszenie relaksacji wewnątrzpasmowej poprzez wstępne „wychłodzenie” nośników ładunku w obszarze studni kwantowej, a następnie ich wstrzyknięcie z wykorzystaniem efektywnego rozpraszania nośników z fononami optycznymi, bądź też w plazmie elektronowo-dziurowej (procesy Augera). Choć koncepcja ta wydaje się interesująca, to zrozumienie takich hybrydowych układów kwantowych było niewielkie. Między innymi ciągle niejasne pozostawały: struktura energetyczna stanów układu sprzężonego, wewnątrzpasmowa i międzypasmowa relaksacja nośników ładunku w tym układzie, jak również mechanizmy transferu nośników ładunku pomiędzy studnią, a kropkami kwantowymi. Obecne w literaturze wyobrażenia układu sprzężonego, złożonego z dwóch podsystemów, o różnej wymiarowości, przeszkadzała w poprawnej interpretacji danych doświadczalnych.

Praca [H6] dała jeden z pierwszych impulsów do zmiany sposobu patrzenia na tego typu układy. W tym wypadku badano kropki kwantowe wykonane z materiału  $\text{In}_{0.5}\text{Ga}_{0.5}\text{As}$  w matrycy GaAs oddzielone 2 nm szerokości barierą z GaAs od studni kwantowej  $\text{In}_{0.3}\text{Ga}_{0.7}\text{As}$  o szerokości 7 nm (Schemat 2.8).



**Schemat 2.8.** Układ warstw w strukturze sprężonej z kropkami kwantowymi InGaAs/GaAs oraz studnią kwantową  $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}/\text{GaAs}$  oddzielonych 2 nm szerokości barierą z GaAs. Struktura wytworzona w procesie z wiązki molekularnej na podłożu z GaAs. (Schemat z pracy [H9])

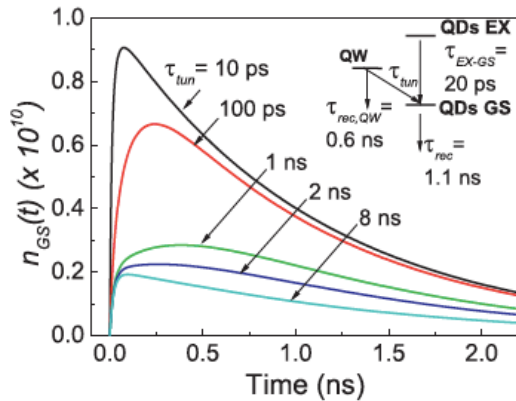
Układ materiałowy (In,Ga)As/GaAs był i jest stosowany dla struktur sprężonych z uwagi na dobrze kontrolowalny proces ich wytwarzania z wiązki molekularnej, co skutkuje strukturami o bardzo dobrej jakości krystalograficznej. Badane układy dostarczone były przez partnera zagranicznego z Instytutu Technologii Analitycznych i Nanostruktur Uniwersytetu w Kassel (Laboratorium Prof. J.P. Reithmaiera), która jest wiodącym ośrodkiem europejskim zajmującym się wytwarzaniem i badaniami laserów opartych o półprzewodnikowe kropki kwantowe. W eksperymencie rozdzielonej w czasie fotoluminescencji zauważono rozbieżności pomiędzy kinetyką narostu i zaniku sygnału fotoluminescencji ze stanu podstawowego dla struktury referencyjnej z samymi kropkami kwantowymi i rozważanej struktury sprężonej (Wykres 2.9). Podczas gdy dla pierwszej ze struktur narost sygnału fotoluminescencji następował w średnim czasie rzędu 28 ps (ograniczonym rozdzielczością układu) to dla struktury sprężonej wynosił ok. 150 ps.



**Wykres 2.9 (a)** mapa ewolucji w czasie emisji stanu podstawowego w układzie sprężonym, **(b)** mapa emisji dla referencyjnej struktury z kropkami kwantowymi, **(c)** – profil ewolucji sygnału fotoluminescencji dla układu sprężonego (ang. TI structure) i referencyjnych kropek kwantowych (ang. QDs structure) dla długości fali odpowiadającej maksimum intensywności pasma emisji. (Rysunek zaczerpnięty z pracy [H6]).

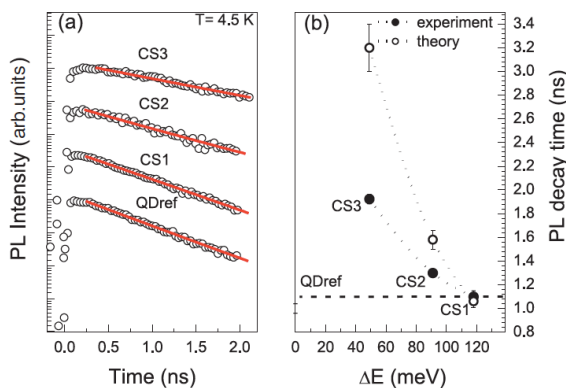
Istotne różnice występowały również dla średnich czasów zaniku fotoluminescencji. Dla struktury z kropkami kwantowymi czas zaniku kształtował się na poziomie  $\sim 1.1$  ns, co jest bliskie przewidywaniom teoretycznym dla wzbudzenia przy silnym ograniczeniu przestrzennym w kropce kwantowej (In, Ga)As/GaAs. Dla struktury sprężonej czas ten wyznaczony został na poziomie  $\sim 2$  ns. Wyniki te jasno wskazywały, że relaksacja wewnątrzpasmowa i międzypasmowa w układzie sprężonym musi być determinowana przez istniejące sprzężenie kwantowo-mechaniczne pomiędzy podukładami. W pierwszym zaproponowanym przybliżeniu, spowolnienie relaksacji wewnątrzpasmowej, widziane jako wydłużony czas narostu fotoluminescencji, będzie powodować zmianę kinetyki obsadzenia stanu podstawowego układu sprężonego i

prowadzić do obserwacji prolongowanej w czasie emisji. Tą hipotezę potwierdził zaproponowany w pracy [H6] model kinetyki przedstawiony na Wykresie 2.10.



**Wykres 2.10.** Model relaksacji nośników ładunku w układzie sprzężonym kropek kwantowych (ang. QDs) i studni kwantowej (ang. QW) wraz z krzywymi kinetyki procesu emisji ze stanu podstawowego układu sprzężonego (ang. QDs GS). Model zakłada zmianę parametru jakim jest czas transferu nośników ( $\tau_{tun}$ ) pomiędzy stanem w studni kwantowej a stanem w kropce kwantowej. (Wykres zaczerpnięty z pracy [H6]).

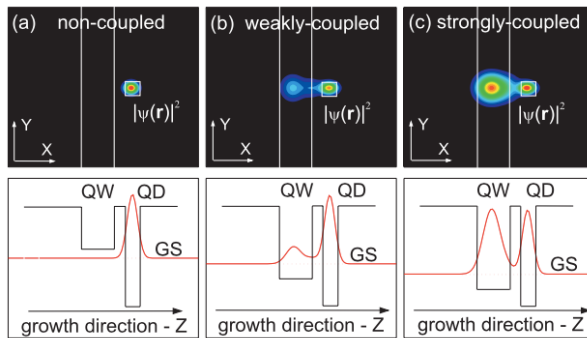
Obserwowane wydłużenie procesu emisji ze stanu podstawowego układu sprzężonego podsuwało jeszcze jeden możliwy do realizacji scenariusz. Jak już wspomniano wcześniej, obecność potencjału studni kwantowej obok zlokalizowanego przestrzennie potencjału kropki kwantowej musi wpływać na stany związane w uwspólnionym (hybrydowym) potencjale układu tak jak dla przypadku np. supersieci ze studniami kwantowymi. O ile dla wyższych stanów w układzie sprzężonym łatwo wyobrazić sobie istnienie takich stanów hybrydowych, tak dla stanu podstawowego nie rozważano jawnie takiej możliwości. Wizja uwspólnionego stanu podstawowego pozostawała w sprzeczności z ideą lasera z medium aktywnym w postaci kropek kwantowych, w którym wykorzystuje się co prawda koncepcje tunelowania, ale stan laserujący ma nadal charakter silnie zlokalizowany przestrzennie w kropce kwantowej. Wyniki badań podsumowane w publikacji [H9] potwierdziły jednak koncepcję istnienia uwspólnionego stanu podstawowego w układzie sprzężonych kropek kwantowych i studni kwantowej. Zwrócono uwagę, iż dla układu sprzężonego (In,Ga)As/GaAs wraz ze zwiększaniem się głębokości potencjału studni kwantowej na skutek wzrostu zawartości indu w materiale studni następuje monotoniczne wydłużenie w czasie obserwowanej emisji stanu podstawowego, który w zamierzeniu miał mieć charakter czysto kropkowy, zatem charakteryzować się czasem emisji  $\sim 1.1$  ns (Wykres 2.11).



**Wykres 2.11 (a)** ewolucja fotoluminescencji dla stanu podstawowego układów sprzężonych (CS1-CS3) oraz kropek kwantowych (ang. QDref). **(b)** charakterystyczny czas emisji stanu podstawowego (punkty zamknięte) wraz z wynikami obliczeń teoretycznych (punkty otwarte). (Wykres zaczerpnięty z pracy [H9]).

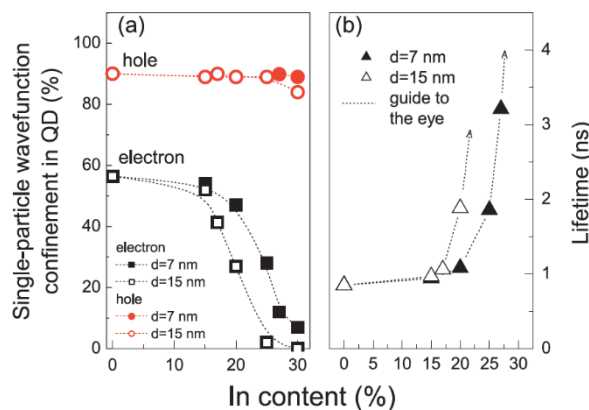
Jak pokazano w pracy [H6], wydłużenie czasu emisji ze stanu podstawowego układu sprzężonego nie tylko może być powodowane procesem zapelnienia stanów, ale również zmianą charakteru przejścia optycznego. Międzypasmowe, podstawowe przejście optyczne układu sprzężonego mogłoby zatem zachodzić pomiędzy zlokalizowanym w kropce kwantowej stanem dziurowym (elektronowym) oraz uwspólnionym na potencjale studni i kropki kwantowej stanem elektronowym (dziurowym) jak pokazano na schemacie 2.12.

Takie przejście optyczne będzie miało charakter skośny w przestrzeni rzeczywistej i prowadzić będzie do obserwacji wydłużonej emisji w czasie.



**Schemat 2.12.** Koncepcja sprzężenia stanu podstawowego w układzie studnia kwantowa-kropki kwantowe. **(a)** układ niesprężony z gęstością prawdopodobieństwa dla elektronu/dziury zlokalizowaną w kropce kwantowej, **(b)** układ słabo sprzężony z gęstością prawdopodobieństwa dla elektronu i dziury rozmytą pomiędzy studnią i kropką kwantową, **(c)** układ silnie sprzężony. (Schemat zaczerpnięty z pracy [H9]).

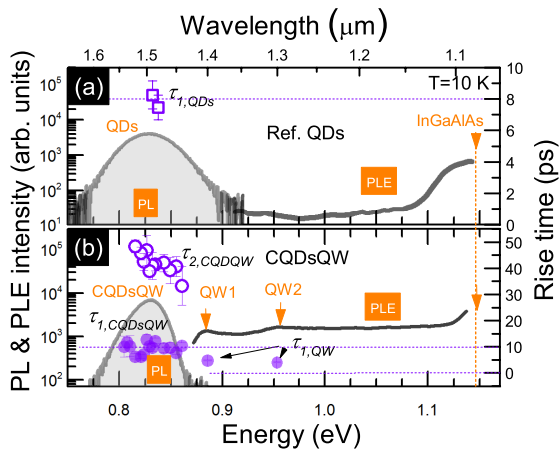
Zaproponowana hipoteza została zweryfikowana i potwierdzona w obliczeniach teoretycznych układów sprzężonych [H9]. Obliczenia pokazały, że dla przypadku układów sprzężonych wykonanych w technologii materiałowej (In,Ga)As/GaAs może zachodzić silne odsprężanie się fundamentalnego poziomu elektronowego kropki kwantowej do potencjału studni kwantowej, podczas gdy poziom podstawowy dla dziur pozostaje silnie związany w potencjale kropki kwantowej (Wykres 2.13). W ogólności efekt ten prowadzi do wydłużenia obserwowanego eksperymentalnie czasu życia pary elektron-dziura na stanie podstawowym układu sprzężonego.



**Wykres 2.13.** **(a)** wyniki obliczeń przestrzennej lokalizacji dziury (ang. hole) i elektronu (ang. electron) w układzie sprzężonym w funkcji zawartości indu w studni kwantowej i jej szerokości. **(b)** obliczony czas życia pary elektron dziura. (Wykres zaczerpnięty z pracy [H9]).

Kilka lat później habilitant rozpoczął również badania nad układem sprzężonym, w którym medium aktywne stanowiły kropki kwantowe InAs/In<sub>0.53</sub>Ga<sub>0.23</sub>Al<sub>0.24</sub>As na podłożu z InP(001) sprzężone przez 4 nm barierę In<sub>0.53</sub>Ga<sub>0.23</sub>Al<sub>0.24</sub>As do naprężonej, 5 nm szerokości studni kwantowej In<sub>0.64</sub>Ga<sub>0.36</sub>As z barierą In<sub>0.53</sub>Ga<sub>0.23</sub>Al<sub>0.24</sub>As. Struktury te również pochodziły z Uniwersytetu w Kassel (Laboratorium prof. J.P. Reithmaiera). Głównym celem badań było porównanie relaksacji wewnątrzpasmowej w układzie sprzężonym do tej obserwowanej w samych kropkach kwantowych InAs/In<sub>0.53</sub>Ga<sub>0.23</sub>Al<sub>0.24</sub>As. Tym razem, zamiast eksperymentu fotoluminescencji rozdzielczej w czasie, tak jak w pracy [H6], użyto dwu-kolorowego eksperymentu pompa-sonda o wysokiej rozdzielczości czasowej (0.3 ps) i wykorzystano stosownie zmodyfikowany układ U4. Dzięki możliwości niezależnego przestrajania energii fotonów w impulsie pompującym i w impulsie sondującym możliwe było sprawdzenie kinetyki procesu relaksacji wewnątrzpasmowej w różnych częściach gęstości stanów układu sprzężonego. W pracy [H4] pokazano, iż relaksacja wewnątrzpasmowa w układzie sprzężonym, w obszarze zhybrydyzowanej gęstości stanów studni

kwantowej i kropek kwantowych, może być szybsza niż w przypadku samych kropek kwantowych (~4 ps vs. ~8 ps) (Wyk. 2.14) i zbliżona jest do tej obserwowanej dla relaksacji w studniach kwantowych (~0.1-1 ps).



**Wykres 2.14** (a) fotoluminescencja (szary obszar), wzbudzenie fotoluminescencji (czarna krzywa), czas relaksacji wewnątrzprasmowej (otwarte fioletowe punktu) dla kropek kwantowych InAs/In<sub>0.53</sub>Ga<sub>0.23</sub>Al<sub>0.24</sub>As /InP(001). (b) fotoluminescencja (szary obszar), wzbudzenie fotoluminescencji (czarna krzywa) oraz czas relaksacji wewnątrzprasmowej (punkty otwarte i zamknięte) w układzie sprzężonym kropek kwantowych jak w (a) do studni kwantowej In<sub>0.64</sub>Ga<sub>0.36</sub>As/In<sub>0.53</sub>Ga<sub>0.23</sub>Al<sub>0.24</sub>As. (Wykres z pracy [H4]).

Udowodniono, iż w układzie sprzężonym istnieje efekt istotnego spowolnienia procesu relaksacji wewnątrzprasmowej (z ~4 ps do ~45 ps) dokładnie taki, jak wcześniej obserwowany w fotoluminescencji rozdzielczej w czasie dla układu sprzężonego na bazie (In, Ga)As/GaAs. Efekt spowolnienia relaksacji nośników ładunku prawdopodobnie związany jest ze znaczną „niezgodnością” stanu początkowego i końcowego, gdzie stan początkowy ma charakter studniowy (związany jest silnie w obszarze studni kwantowej), natomiast stan podstawowy ma charakter kropkowy (związany jest w potencjale kropki kwantowej przy uwzględnieniu efektu rozmycia stanu na obszar studni kwantowej.)

Wyniki badań przeprowadzonych nad strukturami sprzężonymi kropek kwantowych i studni kwantowej pozwoliły lepiej zrozumieć kinetykę procesów relaksacji wewnątrzprasmowej i międzypasmowej w tego typu systemach opartych o układ materiałowy InGaAs/GaAs [H4] oraz InAs/InAlGaAs/InP(001) [H6]. Najważniejsze wnioski to:

- (a) relaksacja wewnątrzprasmowa w układzie sprzężonym w ogólności potrafi być kilka razy wolniejsza od tej obserwowanej dla samych kropek kwantowych;
- (b) kinetyka emisji stanu podstawowego w układzie sprzężonym determinowana jest przez dwa czynniki: (i) relaksację wewnątrzprasmową oraz (ii) charakter podstawowego przejścia optycznego w przestrzeni rzeczywistej;
- (c) modyfikacja struktury sprzężonej poprzez sterowanie parametrami studni kwantowej prowadzi, w badanych przypadkach do odsprzęgnięcia się fundamentalnego stanu elektronowego w kropce kwantowej do potencjału studni kwantowej, podczas gdy stan podstawowy dziury dla układu sprzężonego pozostaje silnie związany w kropce kwantowej;

Wyniki te mają duże znaczenie dla projektowania układów bazujących na kropkach kwantowych InGaAs/GaAs oraz InAs/InAlGaAs/InP(001) przewidzianych do zastosowań w laserach telekomunikacyjnych, gdzie sprzężenie studni kwantowej do kropek kwantowych jest istotne z punktu widzenia zarówno fizyki tych układów jak i ich aplikacji. Pokazują, że koncepcja analizy odseparowanych podukładów i ich parametrów jest kontrowersyjna. Co więcej, pokazywane do tej pory w literaturze wyniki dla laserów na kropkach kwantowych, wykorzystujących tunelowe wstrzykiwanie nośników ze studni kwantowej, powinny być zweryfikowane z uwagi na fakt, że stan podstawowy układu sprzężonego nie jest często czystym stanem związanym w kropce

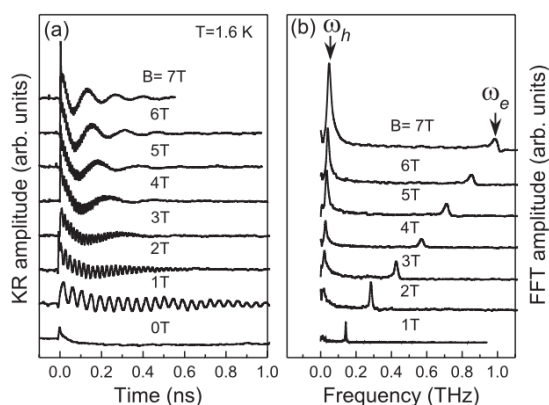
kwantowej, ale raczej stanem hybrydowym stworzonym z mieszaniny stanów zero- i dwuwymiarowych. Dopiero odpowiednia inżynieria struktury energetycznej, połączona z zastosowaniem innych materiałów półprzewodnikowych, mogłaby doprowadzić do osiągnięcia specyfikacji układu koniecznej w kontekście oczekiwanego działania urządzenia opartego o układ sprzężony – zagadnienie to wymagać więc będzie dalszych badań.

### 2.3.5 Inicjalizacja stanu spinowego i kontrola jego ewolucji w kreskach kwantowych InAs/InAlGaAs/InP oraz kropkach kwantowych InP/(Ga,In)P

Wzbudzenie spinowe w kropkach kwantowych jest wciąż znacznie słabiej poznane i mniej intensywnie badane od wzbudzenia ładunkowego. Dotychczas zgromadzona wiedza ogranicza się niemal wyłącznie do badania wzbudzeń spinowych w kropkach kwantowych (In,Ga)As/GaAs, gdzie elektron/dziura/ekscyton doznają tzw. silnego ograniczenia przestrzennego. W ten sposób własności spinu elektronu/dziury/ekscytonu słabo zależą od otoczenia kropki kwantowej oraz struktury stanów wewnątrz kropki. W układach z osłabionym ograniczeniem przestrzennym własności spinowe mogą znacząco odbiegać od tych w znanych układach. Dlatego też w tym kontekście podjęto się badań dwóch rodzajów nanostruktur: kropek kwantowych InP/(Ga,In)P [H8] oraz kresek kwantowych InAs/InAlGaAs/InP [H2].

Struktury z samorosnącymi kropkami kwantowymi z InP w matrycy  $\text{Ga}_{0.51}\text{In}_{0.49}\text{P}$  wytworzone zostały na podłożu GaAs w technice wzrostu ze związków metaloorganicznych w laboratorium Prof. P. Michlera na Uniwersytecie w Stuttgardzie (Niemcy). Kropki te charakteryzują się dość specyficznymi własnościami w sensie ograniczenia przestrzennego. Potencjał w paśmie przewodnictwa sprawia, iż elektron pozostaje silnie związany w kropce kwantowej, inaczej jest natomiast dla dziur. Nieciągłość pasm pomiędzy nienaprzężonymi materiałami InP oraz  $\text{Ga}_{0.51}\text{In}_{0.49}\text{P}$  jest ujemna i osiąga  $-45\text{ meV}$ , co sprawia, że dziura znajduje się zawsze poza materiałem kropki kwantowej.<sup>[45]</sup> Naprężenia modyfikują tę sytuację, zmieniając nieciągłość pasm w kierunku wartości dodatnich. Pomimo tego, że dziura staje się związana w potencjale kropki kwantowej tj. w materiale kropki, to wartość energii wiązania jest mała. Dodatkowo, na wiązanie dziury w potencjale kropki kwantowej InP/(Ga,In)P może mieć też wpływ potencjał elektrostatyczny elektronu silnie zlokalizowanego w kropce.<sup>[45, 46, 47, 48]</sup> W pracy [H8] podsumowane zostały badania nad efektem takiego ograniczenia przestrzennego na koherentną dynamikę spinu zarówno elektronu jak i dziury. W pracy wykorzystany został eksperyment rozdzielonej w czasie rotacji Kerra<sup>[49]</sup>, w którym dynamika zmiany magnetyzacji ośrodka, powodowana kołowo spolaryzowanym laserowym impulsem pompującym, testowana jest przez kąt skręcenia płaszczyzny polaryzacji liniowo spolaryzowanego impulsu sondującego (układ pomiarowy U5). Dynamika magnetyzacji ośrodka związana jest ze złożoną ewolucją stanu spinowego elektronu lub dziury, który podlega precesji Larmora w zewnętrznym polu magnetycznym przyłożonym prostopadle do kierunku wzrostu struktury (w płaszczyźnie wzrostu kropek kwantowych). Jaka jest kinetyka sygnału rotacji Kerra z badanych kropek kwantowych InP/(Ga,In)P w funkcji amplitudy pola magnetycznego pokazano na wykresie 2.15. Część (a) pokazuje, że sygnał zawierał dwie charakterystyczne składowe, co zostało potwierdzone poprzez analizę fourierowską mierzonego sygnału rotacji Kerra (część (b) wykresu 2.15).

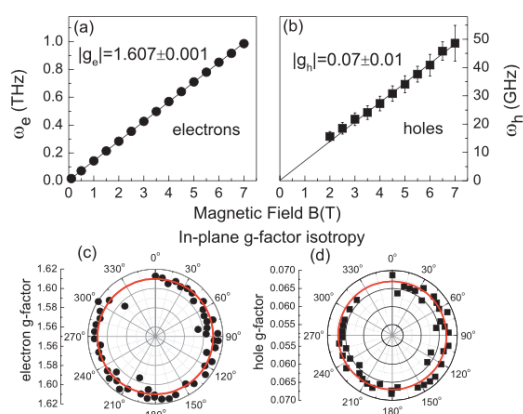




**Wykres 2.15 (a)** ewolucja w czasie sygnału rotacji Kerra dla kropek kwantowych InP/(Ga,In)P, **(b)** analiza fourierowska (FFT) oscylacji w sygnale Kerra wskazująca na dwa obecne komponenty związane z precesją Larmora dziury ( $\omega_h$ ) oraz elektronu ( $\omega_e$ ) w zewnętrznym polu magnetycznym B w temperaturze 4.2 K. (Wykres zaczerpnięty z [H8])

Pierwsza z tych składowych, charakteryzująca się większą częstotliwością precesji Larmora ( $\omega_e$ ), związana jest z koherentną ewolucją spinu elektronu w związku ze spodziewanym istnieniem dużego rozszczepienia Zeemana spinowego stanu elektronowego ( $g_e \approx 1.6$ ), podczas gdy druga komponenta ( $\omega_h$ ), o znacznie mniejszej wartości częstotliwości precesji Larmora, związana jest z precesją spinu dziury. W ten sposób uzyskano informacje o rozszczepieniu Zeemana pomiędzy dwoma stanami własnymi spinu dziury z charakterystycznym czynnikiem  $g_h$  określającym to rozszczepienie bliskim 0.07. Była to pierwsza obserwacja koherentnej ewolucji spinu dziury, zaobserwowana dla kropek kwantowych InP/(Ga,In)P.

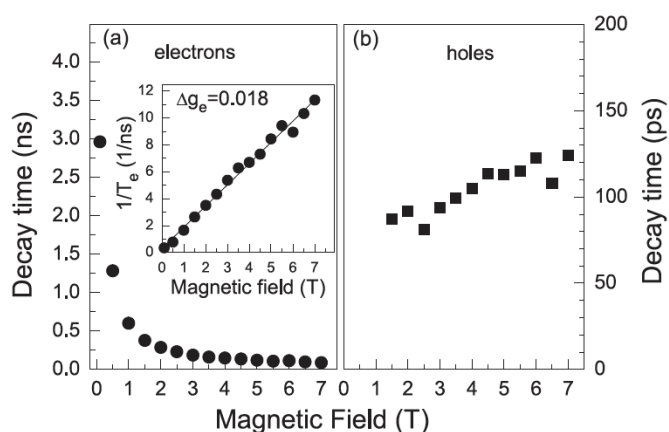
Dodatkową informację można było uzyskać przez analizę anizotropii czynnika g w płaszczyźnie wzrostu kropki kwantowej. Z uwagi na symetrię typu s orbitali atomowych tworzących pasmo przewodnictwa w materiale InP kropki kwantowej, spodziewana jest obecność w przybliżeniu izotropowego charakteru  $g_e$ . Sytuacja powinna być inna dla czynnika  $g_h$  związanego z dziurą z uwagi na symetrię orbitali typu p tworzących pasmo walencyjne kropki kwantowej. Efekt ten pokazano wcześniej dla typowych kropek kwantowych (In,Ga)As/GaAs, w których dziura pozostaje silnie związana w materiale (In,Ga)As, a sama anizotropia  $g_h$  sięgała 50%.<sup>[50, 51]</sup> Brak anizotropii  $g_h$  pokazany na wykresie 2.16 (d) dla kropek kwantowych InP/(Ga,In)P sugeruje, że dziura doznaje słabego ograniczenia przestrzennego. Podobnie jak dla wydłużonych kropek kwantowych opisywanych w podrozdziałach 2.3.1 i 2.3.2, stan dziury w reżimie słabego ograniczenia jest tworzony ze stanów materiału kropki oraz bariery, co wpływa na osłabienie anizotropowego charakteru czynnika dziury.



**Wykres 2.16 (a), (b)** zależność częstotliwości precesji Larmora odpowiednio dla elektronu ( $\omega_e$ ) i dziury ( $\omega_h$ ) od amplitudy pola magnetycznego przyłożonego w płaszczyźnie wzrostu kropek kwantowych InP/(Ga,In)P. **(c), (d)** izotropowy charakter odpowiednio czynnika g elektronu i dziury w płaszczyźnie wzrostu kropek kwantowych. (Wykres zaczerpnięty z [H8])

Obok informacji o częstotliwości precesji Larmora spinu elektronu i dziury oraz wartościach czynnika g rozszczepienia Zeemana obwiednia przebiegu rotacji Kerra daje wgląd w czas defazowania stanu spinowego

( $T_2^*$ ) w niejednorodnym zbiorze stanów spinowych. Dla spinu elektronu czas ten ( $T_2^* \approx 3 \text{ ns}$  dla  $B = 0.1 \text{ T}$ ) okazał się porównywalny z wartościami uzyskiwanymi dla podobnych kropek kwantowych InAs/(Ga,In)P.<sup>[52]</sup> Co więcej, okazał się być również porównywalny z podobnymi czasami dla spinu elektronu w potencjale kropki kwantowej (In,Ga)As/GaAs ( $T_2^* \approx 2 \text{ ns}$  dla  $B = 0.25 \text{ T}$ )<sup>[53]</sup> oraz CdSe/(Zn,S)Se ( $T_2^* \approx 5.6 \text{ ns}$  dla  $B = 0.25 \text{ T}$ )<sup>[54]</sup>. Obserwowany czas defazowania stanu spinowego elektronu znacznie przewyższa średni czas życia pary elektron-dziura w badanych kropkach kwantowych InP/(Ga,In)P (ten ostatni został zmierzony na poziomie 320 ps w eksperymencie rozdzielonej w czasie fotoluminescencji). Wynik ten sugeruje, iż w eksperymencie rotacji Kerra składowa sygnału związana ze spinem elektronu pochodzi z ujemnie naładowanego kompleksu ekscytonowego, w którym po anihilacji pary elektron-dziura pozostaje nadal widoczna koherentna ewolucja spinu rezydentnego elektronu w kropce kwantowej. Charakter procesu defazowania spinu elektronu, opisywany jako ten pochodzący głównie od obecnych niejednorodności w testowanym zbiorze spinów, które można sparametryzować za pomocą rozrzutu  $g$ -czynnika ( $\Delta g_e \approx 0.018$ ), oraz który został potwierdzony poprzez wykazanie charakterystycznej zależności czasu defazowania od amplitudy pola magnetycznego ( $T_2^* \propto 1/B$ ) jak pokazano na wykresie 2.17 (a). Tego samego nie można powiedzieć o stanie spinowym dziury. Czas defazowania dla spinu dziury uwidoczniony na wyk. 2.17 (b) jest w przybliżeniu stały na poziomie 100 ps w całym zakresie zastosowanych pól magnetycznych. Czas ten jest znacząco krótszy od obserwowanego czasu życia pary elektron-dziura. Należy zauważyć, iż obserwowany sygnał rotacji Kerra dla dziury, pochodzi z fotowzbudzonego stanu, a zatem w ogólności czas koherentnej precesji dziury powinien zbliżyć się do czasu życia pary elektron-dziura. Istnieje przypuszczenie, że ta obserwacja eksperymentalna związana jest z istnieniem silnych mechanizmów relaksacji spinowej dziury, prowadzących do utraty koherencji spinowej w krótkim czasie, co jest związane z utratą izolacji stanu spinowego dziury.



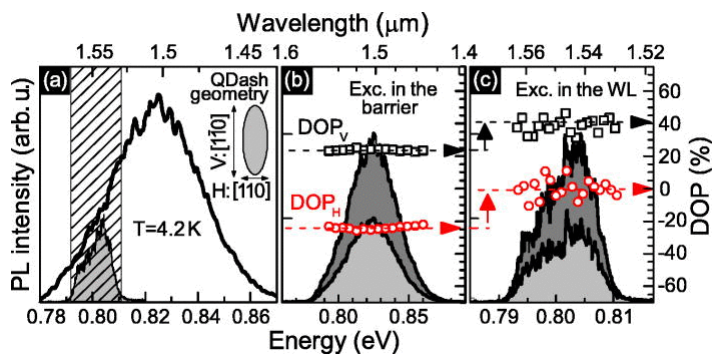
**Wykres 2.17 (a)** Zależność czasu defazowania dla elektronu w funkcji amplitudy pola magnetycznego, **(b)** zależność czasu defazowania dziury w funkcji pola magnetycznego. (Wykres zaczerpnięty z [H8])

Wyniki badań przeprowadzonych nad koherentną dynamiką spinu elektronu i dziury w kropkach kwantowych InP/(Ga,In)P pozwoliły lepiej zrozumieć proces utraty koherencji spinowej w tym układzie materiałowym, gdzie elektron pozostaje silnie związany w objętości kropki w odróżnieniu od dziury pozostającej w reżimie słabego ograniczenia przestrzennego, determinowanego przez warunki potencjału wiążącego w naprężonym układzie materiałowym InP/(Ga,In)P. Najważniejsze wnioski z tej pracy to:

- (a) Czas defazowania spinu rezydentnego elektronu jest porównywalny z tym obserwowanym w eksperymencie rozdzielonej w czasie rotacji Faradaya i Kerra dla kropek kwantowych (In,Ga)As/GaAs i CdSe/(Zn,S)Se;
- (b) Zmierzono po raz pierwszy czas defazowania i  $g$  czynnik rozszczepienia Zeemana w płaszczyźnie kropki kwantowej dla fotowzbudzonej dziury;

(c) krótki czas defazowania dziury rzędu 100 ps związany jest z udozwolnieniem dodatkowych procesów dekoherencji stanu spinowego z uwagi na osłabienie izolacji stanu dziury w potencjale kropki kwantowej;

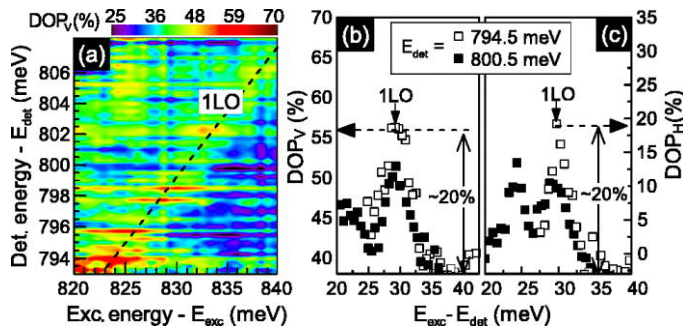
Przedstawione wyniki badań wniosły istotny wkład do dyskusji nad mechanizmami dekoherencji spinowej w kropkach kwantowych. W tym kontekście m.in. wydaje się zaskakujące, że czas defazowania dla spinu elektronu w kropkach kwantowych InP/(Ga,In)P, (In,Ga)As/GaAs oraz CdSe/(Zn,S)Se jest podobny. Do tej pory uważa się, iż jednym z najważniejszych mechanizmów dekoherencji stanu spinowego w kropkach kwantowych jest oddziaływanie ze spinem jąder atomowych (*ang. hyperfine interaction*). Jeśli tak, to izotopowy skład chemiczny kropek kwantowych powinien determinować siłę sprzężenia pomiędzy spinami jąder atomowych a spinem elektronu. Habilitant badał ten aspekt. W pracy <sup>[54]</sup> pokazano, że dla kropek kwantowych wytworzonych ze stabilnych izotopów indu i fosforu sprzężenie to powinno być większe niż dla kropek kwantowych (In,Ga)As i kropek CdSe. Wyniki eksperymentalne sugerują jednak, że być może należy poszukiwać innych mechanizmów dekoherencji stanu spinowego elektronu, który pozwoli lepiej zrozumieć i uszeregować publikowane w literaturze wyniki badań. W kontekście oddziaływania spinu jąder atomowych ze spinem dziury mechanizm ten, prowadzący z punktu widzenia teorii do silnej dekoherencji stanu spinowego elektronu, powinien być nieefektywny dla stanu spinowego dziury, z uwagi na funkcję falową dziury skonstruowaną głównie z orbitali typu p. Należy jednak zauważyć, że symetria p-typu funkcji falowej dziury może być obserwowana w zasadzie dla przypadku silnej izolacji dziury w potencjale wiążącym kropki. W przypadku obniżenia wiązania przestrzennego symetria ta może być silnie zmieniona na skutek domieszania do stanu podstawowego dziury orbitali wyższych stanów o różnych symetriach w tym symetrii typu s. W ten sposób prowadzić to może do efektywnej relaksacji spinu w rozważanym typie mechanizmu defazowania. W ekstremalnym przypadku obniżenia wiązania przestrzennego, obserwowanym dla rozważanych kropek kwantowych InP/(Ga,In)P, pod uwagę należy brać mechanizmy dekoherencji typowe dla materiałów objętościowych.



**Wykres 2.18** (a) pasmo emisji zbioru kresek kwantowych InAs/InAlGaAs/InP(001), (b) stopień polaryzacji liniowej emisji z kresek przy inicjalizacji wzbudzenia spinowego w barierze, lub (c) w obszarze warstwy zwilżającej. (Wykres zaczerpnięty z [H2]).

O ile kropki kwantowe InP/(Ga,In)P są interesujące głównie z poznawczego punktu widzenia ze względu na specyficzny charakter wiązania przestrzennego elektronu i dziury, o tyle silnie wydłużone i asymetryczne kropki kwantowe InAs/In<sub>0.53</sub>Ga<sub>0.23</sub>Al<sub>0.24</sub>As/InP(001) omawiane w podrozdziałach 2.3.2 oraz 2.3.3 mogą mieć również istotne znaczenie aplikacyjne w zakresie telekomunikacyjnym bliskiej podczerwieni, również w kontekście wzbudzenia spinowego. Komunikacja kwantowa może bazować na przesyłaniu stanu fotonu, w którym informacja kodowana jest za pomocą stanu polaryzacji. Odpowiednio spolaryzowany stan fotonu, zaabsorbowany na stanie podstawowym kropki kwantowej, będzie generował stan spinowy elektronu/ekscytonu, który można przetwarzać w bardziej skomplikowanych układach, a następnie możliwa jest konwersja stanu spinowego elektronu/ekscytonu z powrotem do stanu fotonu i przesłanie go dalej. Ten rodzaj interfejsu jest szczególnie istotny w kwantowej telekomunikacji dalekozasięgowej, która wymaga stosowania tzw. powtarzacza kwantowego (*ang. quantum repeater*), dla którego konieczne jest przechowywanie

w pamięci jednego ze splątanych stanów kwantowych pary dwóch fotonów.<sup>[55, 56]</sup> W pracy [H2] podsumowano wyniki badań nad możliwością inicjalizacji, przechowywania i odczytu stanu kwantowego fotonu w silnie asymetrycznych kropkach kwantowych, również w kontekście poszukiwania możliwości generacji polaryzacyjnie splątanych par fotonów z takich kropek w obszarze trzeciego okna światłowodowego.<sup>[7]</sup>



**Wykres 2.19** (a) mapa spektralna rejestrowanego stopnia polaryzacji przy wzbudzeniu stanu emitera w schemacie z pompowaniem przez fonon optyczny, (b) wybrane profile mapy spektralnej jak w (a) pokazujące wzmocnienie obserwowanego stopnia polaryzacji emisji. (wykres zaczerpnięty z [H2])

Wyniki badań pokazały, że w przypadku kresek kwantowych proces z nierezonansową konwersją polaryzacji fotonu do stanu ekscytonu i z powrotem jest mało wydajnym. Polaryzacja ta zostaje gwałtownie utracona w skutek efektywnej relaksacji wzbudzenia spinowego przy jego transferze z obszaru bariery InAlGaAs do stanu podstawowego w kreskach kwantowych. Co więcej, pokazano, iż w przypadku kresek kwantowych wynikowa polaryzacja emisji musi być mierzona na tle dużej tzw. polaryzacji wbudowanej (Wyk. 2.18 (a)) wynikającej z anizotropowych własności potencjału wiążącego kreski kwantowej. Zagadnienie to zostało przybliżone w podrozdziale 2.3.2.

W pracy [H2] pokazano, że problem relaksacji spinowej przy inicjalizacji stanu spinowego w barierze InAlGaAs da się po części ominąć stosując inicjalizację spinu w obszarze warstwy zwilżającej dla obiektów samorosnących w technice Stranski-Krastanow. W tym wypadku obserwowany jest przyrost wynikowego stopnia polaryzacji emisji o kilkanaście procent ponad stopień polaryzacji naturalnej (wbudowanej), co świadczy o istnieniu pamięci spinowej w badanych obiektach. Jednakże obserwowany kontrast stopnia polaryzacji nie był zadowalający. Dopiero propozycja z inicjalizacją stanu spinowego poprzez quasi-rezonansowe pompowanie stanu podstawowego ekscytonu z wykorzystaniem koherentnego rozpraszania z fononami optycznymi okazała się najbardziej skuteczną metodą zwiększenia kontrastu obserwowanej polaryzacji wynikowej. Uzyskany stopień polaryzacji liniowej emisji w powyższym schemacie inicjalizacji wzbudzenia spinowego (Wyk. 2.19) był o blisko 20% większy, niż w przypadku użycia pobudzenia z inicjalizacją spinu w obszarze warstwy zwilżającej.

Ostatecznie udało się pokazać, iż kropki kwantowe przy użyciu odpowiedniego schematu inicjalizacji wzbudzenia spinowego mogą stanowić element pamięci spinowej dedykowanej dla schematów przetwarzania informacji a zakresie trzeciego okna telekomunikacyjnego. Pokazano również, że kreski kwantowe InAs/InAlGaAs/InP mają istotne ograniczenia w tym kontekście związane z charakterem potencjału wiążącego. Odejście od zakresu silnego ograniczenia przestrzennego pary elektron-dziura oraz silna anizotropia potencjału wiążącego sprawiają, iż obserwowany jest duży, naturalny stopień polaryzacji liniowej emisji. Czynniki te sprawiają, że nawet przy użyciu schematu z inicjalizacją spinu na stanie podstawowym układu z wykorzystaniem koherentnego rozpraszania z fononami optycznymi czas obserwacji polaryzacji spinowej ogranicza się do kilkunastu nanosekund w zakresie temperatur kriogenicznych.

## 2.4 Podsumowanie

Osiągnięcia naukowe habilitanta „**Dynamika relaksacji międzypasmowej i wewnątrzpasmowej wzbudzenia ładunkowego oraz spinowego w quasi-zero-wymiarowych strukturach półprzewodnikowych związków III-V**”, składa się z dwóch części:

- I. stworzenie od podstaw warsztatu eksperymentalnego, w pewnym zakresie unikatowego na skalę kraju;
- II. zbadania dynamiki międzypasmowej i wewnątrzpasmowej wzbudzenia ładunkowego i spinowego w kropkach kwantowych wykonanych z półprzewodnikowych związków III-V;

Najważniejszymi rezultatami przeprowadzonych badań są:

- (a) wyznaczenie efektywnego parametru promienistej rekombinacji międzypasmowej ekscytonu dla silnie wydłużonych w płaszczyźnie wzrostu kropek kwantowych InAs/InGaAsP/InP(001);
- (b) wyjaśnienie dynamiki przejść międzypasmowych w kropkach kwantowych, w których kulombowsko związana para elektronu i dziury znajduje się w zakresie pośredniego wiązania przestrzennego;
- (c) wyznaczenie energetycznej dyspersji czasu rekombinacji międzypasmowej dla silnie wydłużonych, asymetrycznych kropek kwantowych InAs/InAlGaAs/InP(001);
- (d) wyznaczenie parametrów relaksacji wewnątrzpasmowej nośników ładunku w kropkach kwantowych InAs/InGaAsP/InP(001) o niskiej kwantyzacji poziomów energetycznych, w których przewidywanym mechanizmem dyssypacji energii jest rozpraszanie na fononach akustycznych;
- (e) wyznaczenie parametrów relaksacji wewnątrzpasmowej nośników ładunku w bliskosymetrycznych kropkach kwantowych InAs/InAlGaAs/InP(001) o silnej kwantyzacji poziomów energetycznych, w których przewidywanym mechanizmem dyssypacji energii jest rozpraszanie na fononach optycznych;
- (f) wykazanie wpływu nieintencjonalnie wprowadzonego otoczenia na kontrolowaną temperaturowo relaksację wewnątrzpasmową w silnie wydłużonych kropkach kwantowych (In,Ga)As/GaAs. Wskazanie, iż relaksacja pomiędzy dwoma zbiorami stanów quasi-zero-wymiarowych zależy od relacji ich wzajemnej gęstości przestrzennej;
- (g) wykazanie rodzaju przejścia międzypasmowego w układach sprzężonych typu kropka kwantowa-studnia kwantowa wykonanych z materiałów na bazie InAs/GaAs oraz InAs/InP oraz zaobserwowanie efektu spowolnienia relaksacji wewnątrzpasmowej w układzie sprzężonym;
- (h) wyznaczenie parametrów koherentnej relaksacji spinu elektronu i dziury w układzie z kropkami kwantowymi InP/(Ga,In)P charakteryzującymi się płytkim potencjałem wiążącym dla dziur oraz obserwacja zachowania się koherencji spinowej elektronu i dziury w funkcji temperatury oraz przyłożonego zewnętrznego pola magnetycznego;

- (i) obserwacja wydajności procesów inicjalizacji spinu w układzie zawierającym silnie wydłużone, asymetryczne kropki InAs/InAlGaAs/InP(001);

Rezultaty te poszerzają wiedzę na temat procesów relaksacji nośników ładunku i spinu w quasi-zero-wymiarowych obiektach kwantowych, dla których podstawowe wzbudzenie (ładunkowe lub spinowe) nie wchodzi w zakres silnego wiązania przestrzennego. Wykazano, iż może to silnie determinować zarówno mechanizmy fizyczne towarzyszące relaksacji wzbudzenia, jak również parametry kinetyki relaksacji. Zdobyta wiedza ma nie tylko istotne znaczenie poznawcze, ale również może służyć do modelowania i konstruowania urządzeń bazujących na kropkach kwantowych.

## Referencje literaturowe do rozdziału 2

- [1] M. Z. M. Khan, T. K. Ng, and B. S. Ooi, *Prog. Quantum Electron.* 38, 237 (2014).
- [2] F. Lelarge, B. Dagens, J. Renaudier, R. Brenot, A. Accard, F. van Dijk, D. Make, O. Le Gouezigou, J.-G. Provost, F. Poingt, J. Landreau, O. Drisse, E. Derouin, B. Rousseau, F. Pommereau, and G.-H. Duan, *J. Sel. Top. Quantum Electron.* 13, 111 (2007).
- [3] J. P. Reithmaier, G. Eisenstein, and A. Forchel, *Proc. IEEE* 95, 1779 (2007).
- [4] Ł. Dusanowski, **M. Syperak**, W. Rudno-Rudziński, P. Mrowiński, G. Sęk, J. Misiewicz, A. Somers, J.P. Reithmaier, S. Höfling, A. Forchel *Appl. Phys. Lett.* 103, 253113 (2013).
- [5] Ł. Dusanowski, **M. Syperak**, P. Mrowiński, W. Rudno-Rudziński, J. Misiewicz, A. Somers, S. Höfling, M. Kamp, J. P. Reithmaier and G. Sęk *Appl. Phys. Lett.* 105, 021909 (2014).
- [6] Ł. Dusanowski, **M. Syperak**, J. Misiewicz, J. Misiewicz, A. Somers, S. Höfling, M. Kamp, A. Kavokin, J. P. Reithmaier, and G. Sęk *Applied Physics Letter* 108, 163108 (2016);
- [7] P. Mrowiński, A. Musiał, A. Maryński, **M. Syperak**, J. Misiewicz, A. Somers, J. P. Reithmaier, S. Höfling and G. Sęk *Applied Physics Letters* 106, 053114 (2015).
- [8] C. H. Bennett and G. Brassard. "Quantum cryptography: Public key distribution and coin tossing". In *Proceedings of IEEE International Conference on Computers, Systems and Signal Processing*, volume 175, page 8. New York, 1984.
- [9] Artur Ekert "Quantum cryptography based on Bell's theorem". *Phys. Rev. Lett.* 67, 661 (1991).
- [10] A.I. L. Efros and A. L. Efros, *Sov. Phys. Semicond.*, 16, 772 - 775 (1982).
- [11] U. Bockelmann, in *Confined Electrons and Photons: New Physics and Applications NATO ASI Series* (Plenum New York 1995).
- [12] T. S. Sosnowski, T. B. Norris, H. Jiang, J. Singh, K. Kamath, and P. Bhattacharya, *Phys. Rev. B* 57, R9423 (1998).
- [13] D. Morris, N. Perret, and S. Fafard, *Appl. Phys. Lett.* 75, 3593 (1999).
- [14] S. Marcinkevicius, A. Gaarder, and R. Leon, *Phys. Rev. B* 64, 115307 (2001).
- [15] J. Urayama, T. B. Norris, J. Singh, and P. Bhattacharya, *Phys. Rev. Lett.* 86, 4930 (2001).
- [16] H. Kurtze, J. Seebeck, P. Gartner, D. R. Yakovlev, D. Reuter, A. D. Wieck, M. Bayer, and F. Jahnke, *Phys. Rev. B* 80, 235319 (2009).
- [17] E. Péronne, F. Fossard, F. H. Julien, J. Brault, M. Gendry, B. Salem, G. Bremond, and A. Alexandrou, *Phys. Rev. B* 67, 205329 (2003).
- [18] P. Miska, J. Evan, O. Dehaese, and X. Marie, *Appl. Phys. Lett.* 92, 191103 (2008).

- [19] P. Miska, J. Even, X. Marie, and O. Dehaese, *Appl. Phys. Lett.* 94, 061916 (2009).
- [20] J.P. Reithmaier, G. Şek, A. Löffler, C. Hofmann, S. Kuhn, S. Reitzenstein, L. V. Keldysh V. D. Kulakovskii, T. L. Reinecke, A. Forchel *Nature* 432, 197-200 (2004).
- [21] T. Yoshie, A. Scherer, J. Hendrickson, G. Khitrova, H. M. Gibbs, G. Rupper, C. Ell, O. B. Shchekin, D. G. Deppe *Nature* 432, 200-2003 (2004).
- [22] E. Peter, P. Senellart, D. Martrou, A. Lemaître, J. Hours, J. M. Gérard, and J. Bloch *Phys. Rev. Lett.* 95, 067401 (2005).
- [23] C. Schneider, P. Gold, S. Reitzenstein, S. Höfling, M. Kamp *Appl. Phys. B* 19, 122 (2016).
- [24] A. Löffler, J. P. Reithmaier, A. Forchel, A. Sauerwald, D. Peskes, T. Kümmell, and G. Bacher, *J. Cryst. Growth* 286, 6 (2006).
- [25] G. Şek, A. Musiał, P. Podemski, **M. Syperrek**, J. Misiewicz, A. Löffler, S. Höfling, L. Worschech, A. Forchel, *J. Appl. Phys.* 107, 096106 (2010).
- [26] A. Babiński, J. Borysiuk, S. Kret, M. Czyż, A. Golnik, S. Raymond, and Z. R. Wasilewski *Appl. Phys. Lett.* 92, 171104 (2008).
- [27] T. Kazimierzczuk, A. Golnik, P. Kossacki, J. A. Gaj, Z. R. Wasilewski, and A. Babiński, *Phys. Rev. B* 84, 115325 (2011);
- [28] *Quantum Dot Devices*, eds. Zhiming M.Wang (Springer-Verlag New York, 2012).
- [29] *Ultrafast Lasers Based on Quantum Dot Structures: Physics and Devices*, E. U. Rafailov, M. A. Cataluna, and E. A. Avrutin (WILEY-VCH Verlag and Co. KGaA, Weinheim, Germany, 2011)
- [30] *Nonlinear and Nonequilibrium Dynamics of Quantum Dot Optoelectronic Devices*, Benjamin Lingnau (Springer, 2015).
- [31] W. Langbein, P. Borri, U. Woggon, V. Stavarache, D. Reuter, and A. D. Wieck *Phys. Rev. B* 70, 033301 (2004).
- [32] H. Tahara, Y. Ogawa, and F. Minami, K. Arkahane, and M. Sasaki, *Phys. Rev. B* 87, 035304 (2013).
- [33] *Semiconductor Quantum Bits*, edited by F. Henneberger and O. Benson (World Scientific, Singapore, 2008).
- [34] *Optical Generation and Control of Quantum Coherence in Semiconductor Nanostructures*, edited by G. Slavcheva and Ph. Roussignol (Springer-Verlag, Berlin, 2010).
- [35] K. K. Likharev, *Proc. IEEE* 47, 606 (1999).
- [36] D. L. Klein, R. Roth, A. K. L. Lim, A. P. Alivisatos, and P. L. McEuen, *Nature (London)* 389, 699 (1997).
- [37] H. C. Sun, L. Davis, S. Sethi, J. Singh, and P. Bhattacharya, *IEEE Photon. Technol. Lett.* 5, 870(1993).
- [38] P. Bhattacharya, J. Singh, H. Yoon, X. Zhang, A. Gutierrez-Aitken, *IEEE J. Quantum Electron.* 32, 1620 (1996).
- [39] K. Kamath, D. Klotzkin, and P. Bhattacharya *Proc. IEEE LEOS 10th Annual Mtg.* 2, 498 (1997).
- [40] P. Bhattacharya, X. K. Zhang, Y. S. Yuan, K. Kamath, D. Klotzkin, C. Caneau, and R. Bath *Proc. SPIE* 3283, 702 (1998).
- [41] G. Walter, N. Holonyak Jr., J. H. Ryou, and R. D. Dupuis, *Appl. Phys. Lett.* 79, 1956 (2001).
- [42] T. Chung, G. Walter, and N. Holonyak Jr., *Appl. Phys. Lett.* 79, 4500 (2001).
- [43] Z. Mi, S. P. Bhattacharya, and S. Fathpour, *Appl. Phys. Lett.* 86, 153109 (2005).

- [44] A. Marent, T. Nowozin, M. Geller, and D. Bimberg, *Semicond. Sci. Technol.* **26**, 014026 (2011).
- [45] C. Pryor, M.-E. Pistol, and L. Samuelson, *Phys. Rev.* **56**, 10404 (1997).
- [46] M. Hayne, R. Provoost, M. K. Zundel, Y. M. Manz, K. Eberl, and V. V. Moshchalkov, *Phys. Rev. B* **62**, 10324 (2000).
- [47] K. L. Janssens, B. Partoens, and F. M. Peeters, *Phys. Rev. B* **67**, 235325 (2003).
- [48] M. Tadić and F. M. Peeters, *Phys. Rev. B* **70**, 195302 (2004).
- [49] D. R. Yakovlev and M. Bayer, in *Spin Physics in Semiconductors* edited by M. I. Dyakonov (Springer, Berlin, 2008), p. 135.
- [50] S. A. Crooker, J. Brandt, C. Sandfort, A. Greilich, D. R. Yakovlev, D. Reuter, A. D. Wieck, and M. Bayer, *Phys. Rev. Lett.* **104**, 036601 (2010).
- [51] A. Schwan, B.-M. Meiners, A. Greilich, D. R. Yakovlev, M. Bayer, A. D. B. Maia, A. A. Quivy, and A. B. Henriques, *Appl. Phys. Lett.* **99**, 221914 (2011).
- [52] Y. Masumoto, S. Oguchi, B. Pal, and M. Ikezawa, *Phys. Rev. B* **74**, 205332 (2006).
- [53] A. Greilich, D. R. Yakovlev, A. Shabaev, A. L. Efros, I. A. Yugova, R. Oulton, V. Stavarache, D. Reuter, A. Wieck, and M. Bayer, *Science* **313**, 341 (2006).
- [54] M. Syperek, D. R. Yakovlev, I. A. Yugova, J. Misiewicz, I. V. Sedova, S. V. Sorokin, A. A. Toropov, S. V. Ivanov, and M. Bayer, *Phys. Rev. B* **84**, 085304 (2011).
- [55] D. Bouwmeester, P.J.-W. Pan, K. Mattle, Klaus, M. Eibl, H. Weinfurter, A. Zeilinger, *Nature* **390**, 575 (1997).
- [56] N. Sangouard, C. Simon, H. De Riedmatten, N. Gisin, *Reviews of Modern Physics*, **83** 33 (2011).



### 3 Informacje o pozostałych osiągnięciach habilitanta

#### 3.1 Wykaz publikacji naukowych nie włączonych do przewodu habilitacyjnego

##### 3.1.1 Publikacje po uzyskaniu stopnia doktora

Obok prac badawczych związanych bezpośrednio z tematyką przewodu habilitanta podejmuje on szereg działań naukowych w wielu dziedzinach dotyczących zagadnień fizyki fazy skondensowanej. W szczególności zainteresowania te dotyczą:

- kinetyki cieczy polarytonowych i oddziaływań propagujących polarytonów w strukturach półprzewodnikowych studni kwantowych zamkniętych w mikrorezonatorze; [A4, A10]
- poszukiwania kwantowych źródeł pojedynczych fotonów oraz par polaryzacyjnie splątanych fotonów wykorzystujących kwazi-zero wymiarowe epitaksjalne kreski lub kropki kwantowe. [A3, A8, A11, A12-A13, A18-A20, A37]
- efektów związanych z lokalizacją nośników ładunku w kwazi-zero wymiarowych potencjalach wiążących w układach objętościowych (3D) oraz studniach kwantowych charakteryzujących się niejednorodnościami sieci krystalicznej generowanymi w procesie wzrostu tychże materiałów; [A14-A15, A17, A21-A25, A29, A30, A33, A41]
- Efektów związanych z kinetyką zmiany struktury pasmowej w systemach studni kwantowych z przestrzenną separacją nośników ładunku [A9, A24, A29]

#	Autorzy, tytuł, czasopismo , rok publikacji	IF	Punkty MNiSW
	2018		
[A1]	W. Rudno-Rudziński, <b>M. Syperek</b> , A. Maryński, J. Andrzejewski, J. Misiewicz, S. Bauer, V. I. Sichkovskiy, J. P. Reithmaier, M. Schowalter, B. Gerken, A. Rosenauer, G. Sęk “Control of Dynamic Properties of InAs/InAlGaAs/InP Hybrid Quantum Well-Quantum Dot Structures Designed as Active Parts of 1.55 $\mu\text{m}$ Emitting Lasers” Phys. Stat. Sol. A 215, 1700455(2018). Mój wkład w powstanie tej pracy polegał na przygotowaniu koncepcji doświadczeń w zakresie kinetyki procesów optycznych w strukturach z tunelowaniem typu studnia kwantowa-kropki kwantowe. Mój udział procentowy szacuję na 5%.	1.775	25
	2017		
[A2]	W. Rundo-Rudziński, <b>M. Syperek</b> , J. Andrzejewski, A. Maryński, J. Misiewicz, A. Somers, S. Höfling, J. P. Reithmaier, and G. Sęk “Carrier delocalization in InAs/InGaAlAs/InP quantum-dash-based tunnel injection system for 1.55 $\mu\text{m}$ emission” AIP Advances 7, 015117 (2017). Mój wkład w powstanie tej pracy polegał na przygotowaniu koncepcji doświadczeń w zakresie kinetyki procesów optycznych w strukturach z tunelowaniem typu studnia kwantowa-kropki kwantowe, wykonaniu doświadczeń w tym zakresie. Mój udział procentowy szacuję na 5%.	1.43	25

[A3]	Ł. Dusanowski, P. Mrowiński, <b>M. Syperek</b> , J. Misiewicz, A. Somers, S. Höfling, J. P. Reithmaier, and G. Sęk, “ <i>Confinement regime in self-assembled InAs/InAlGaAs/InP quantum dashes determined from exciton and biexciton recombination kinetics</i> ” Appl. Phys. Lett. 111, 253106 (2017). <i>Mój wkład w powstanie tej pracy polegał na współudziale w interpretacji danych z dynamiki ekscytynu i bieksytynu w kreskach kwantowych i przygotowaniu końcowej wersji manuskryptu. Mój udział procentowy szacuję na 5%.</i>	3.411	40
[A4]	M. Pieczarka, <b>M. Syperek</b> , Ł. Dusanowski, A. Opala, F. Langer, C. Schneider, S. Höfling, and G. Sęk “ <i>Relaxation Oscillations and Ultrafast Emission Pulses in a Disordered Expanding Polariton Condensate</i> ” Sci. Rep. 7, 7094 (2017). <i>Mój wkład w powstanie tej pracy polegał nad wykonaniem eksperymentu rozdzielonej w czasie fotoluminescencji i współudziale dyskusji wyników. Mój udział procentowy szacuję na 6%.</i>	4.847	40
[A5]	M. Pieczarka, <b>M. Syperek</b> , D. Biegańska, C. Gilfert, E. M. Pavelescu, J. P. Reithmaier, J. Misiewicz, and G. Sęk “ <i>Lateral carrier diffusion in InGaAs/GaAs coupled quantum dot-quantum well system</i> ” Appl. Phys. Lett. 110, 221104 (2017). <i>Mój wkład w powstanie tej pracy polegał na pomocy w interpretacji danych doświadczalnych i redakcji manuskryptu. Mój udział procentowy szacuję na 5%.</i>	3.411	40
[A6]	A. Maryński, <b>M. Syperek</b> , M. Pieczarka, M. Gawelczyk, J. Misiewicz, V. Liverini, M. Beck, J. Faist, and G. Sęk “ <i>Lateral interdot coupling among dense ensemble of InAs quantum dots grown on InP substrate observed at cryogenic temperatures</i> ” Journal of Physics: Conf. Series 906, 012008 (2017). <i>Mój wkład w powstanie tej pracy polegał na udziale w interpretacji danych doświadczalnych i redakcji manuskryptu. Mój udział procentowy szacuję na 8%.</i>		Konf.
[A7]	<b>M. Syperek</b> , J. Andrzejewski, W. Rudno-Rudziński, A. Maryński, G. Sęk, J. Misiewicz, J. P. Reithmaier, A. Somers, S. Höfling, “ <i>The issue of 0D-like ground state isolation in GaAs- and InP-based coupled quantum dots-quantum well systems</i> ” Journal of Physics: Conf. Series 906, 012019 (2017). <i>Mój wkład w powstanie tej pracy polegał na udziale w interpretacji danych doświadczalnych, wykonaniu pomiarów dynamiki relaksacji międzypasmowej i redakcji manuskryptu. Mój udział procentowy szacuję na 45%.</i>		Konf.
<b>2016</b>			
[A8]	Ł. Dusanowski, <b>M. Syperek</b> , J. Misiewicz, J. Misiewicz, A. Somers, S. Höfling, M. Kamp, A. Kavokin, J. P. Reithmaier, and G. Sęk „ <i>Single photon emission of InAs/InP quantum dashes at 1.55 μm and temperature up to 80 K</i> ” Applied Physics Letter 108, 163108 (2016). <i>Mój wkład w powstanie tej pracy polegał na merytorycznym nadzorze nad przeprowadzonymi doświadczeniami, udziale w interpretacji wyników doświadczeń oraz współredagowaniu tekstu manuskryptu. Mój udział procentowy szacuję na 10%.</i>	3.142	45
[A9]	<b>M. Syperek</b> , K. Ryczko, M. Dallner, M. Dyksik, M. Motyka, M. Kamp, S. Höfling, J. Misiewicz, G. Sęk “ <i>Room temperature carrier kinetics in the W-type GaInAsSb/InAs/AlSb quantum well structure emitting in mid-infrared spectra range</i> ” Acta. Phys. Polonica A 130 1224 (2016). <i>Mój wkład w powstanie tej pracy polegał na przygotowaniu koncepcji badania ultraszybkich procesów związanych z kinetyką nośników ładunku w strukturach półprzewodnikowych emitujących w zakresie średniej podczerwieni, wykonaniu eksperymentu pompa-sonda, przygotowanie danych doświadczalnych, interpretacja oraz napisanie pierwszej wersji manuskryptu. Mój udział procentowy szacuję na 70%.</i>	0.525	15
<b>2015</b>			
[A10]	M. Pieczarka, <b>M. Syperek</b> , Ł. Dusanowski, J. Misiewicz, F. Langer, A. Forchel, M. Kamp, C. Schneider, S. Höfling, A. Kavokin, and G. Sęk „ <i>Ghost branch photoluminescence from a polariton fluid under nonresonant excitation</i> ” Physical Review Letters 186401, 115 (2015). <i>Mój wkład w powstanie tej pracy polegał na wykonaniu pomiarów rozdzielczych w czasie rozpywania się kondensatu polarytonowego, udziale w interpretacji wyników doświadczalnych oraz współredagowaniu tekstu manuskryptu i dyskusji z recenzentami. Mój udział procentowy szacuję na 12%.</i>	7.645	45
[A11]	Ł. Dusanowski, <b>M. Syperek</b> , A. Maryński, H. L. H. Li, J. Misiewicz, S. Höfling, M. Kamp, A. Fiore, and G. Sęk “ <i>Single photon emission up to liquid nitrogen temperature from charged excitons confined in GaAs-based epitaxial nanostructures</i> ” Applied Physics Letters 106, 233107 (2015).	3.142	40

	<i>Mój wkład w powstanie tej pracy polegał na zaproponowaniu idei wykorzystania kolumnowych kropek kwantowych jako emiterów pojedynczych fotonów w zakresie widzialnym spectrum promieniowania, nadzorze merytorycznym nad wykonywanymi doświadczeniami oraz współredagowaniu tekstu manuskryptu. Mój udział procentowy szacuję na 15%.</i>		
[A12]	P. Mrowiński, A. Musiał, A. Maryński, <b>M. Syperek</b> , J. Misiewicz, A. Somers, J. P. Reithmaier, S. Höfling and G. Sęk „ <i>Magnetic field control of the neutral and charged exciton fine structure in single quantum dashes emitting at 1.55 μm</i> ” Applied Physics Letters 106, 053114 (2015). <i>Mój wkład w powstanie tej pracy polegał na interpretacji części wyników doświadczalnych dot. badań kompleksów ekscytonowych w polu magnetycznym oraz współredagowaniu manuskryptu. Mój udział procentowy szacuję na 5%.</i>	3.142	40
<b>2014</b>			
[A13]	Ł. Dusanowski, <b>M. Syperek</b> , P. Mrowiński, W. Rudno-Rudziński, J. Misiewicz, A. Somers, S. Höfling, M. Kamp, J. P. Reithmaier and G. Sęk „ <i>Single photon emission at 1.55 μm from charged and neutral exciton confined in a single quantum dash</i> ” Appl. Phys. Lett. <b>105</b> , 021909 (2014). <i>Mój wkład w powstanie tej pracy polegał merytorycznym nadzorze nad przeprowadzonymi doświadczeniami, udziale w interpretacji wyników doświadczeń oraz współredagowaniu tekstu manuskryptu. Mój udział procentowy szacuję na 8%.</i>	3.302	40
[A14]	M. Gładysiewicz, R. Kudrawiec, <b>M. Syperek</b> , J. Misiewicz, M. Siekacz, G. Cywiński, A. Khachapuridze, T. Suski, C. Skierbiszewski „ <i>Influence of quantum well inhomogeneities on absorption, spontaneous emission, photoluminescence decay time, and lasing in polar InGaN quantum wells emitting in the blue-green spectral region</i> ” Applied Physics A 115, 1015 (2014). <i>Mój wkład w powstanie tej pracy polegał na pomiarze widm fotoluminescencji rozdzielczej w czasie dla studni kwantowych InGaN oraz dyskusji uzyskanych rezultatów ze współautorami manuskryptu. Mój udział procentowy szacuję na 5%.</i>	1.704	25
[A15]	M. Baranowski, R. Kudrawiec, <b>M. Syperek</b> , J. Misiewicz, T. Sermiento, and J. S. Harris „ <i>Time-resolved photoluminescence studies of annealed 1.3 μm GaInNAsSb quantum wells</i> ” Nanoscale Research Letters 9, 81(2014). <i>Mój wkład w powstanie tej pracy polegał na merytorycznym nadzorze nad przeprowadzonymi doświadczeniami w zakresie pomiaru widm rozdzielczych w czasie oraz współudziale w interpretacji wyników doświadczeń. Mój udział procentowy szacuję na 5%.</i>	2.779	35
<b>2013</b>			
[A16]	J. Kutrowska, P. Bugajny, M. Baranowski, L. Bryja, <b>M. Syperek</b> , A. Wójs, J. Misiewicz, M. Wiater, G. Karczewski, T. Wojtowicz „ <i>Time Resolved Photoluminescence Study of the Wide (Cd,Mn)Te/(Cd,Mg)Te Quantum Well</i> ” Acta Physica Polonica 124, 895 (2013). <i>Mój wkład w powstanie tej pracy polegał na przygotowaniu koncepcji przeprowadzonych doświadczeń, wykonaniu 80% badań doświadczalnych, interpretacji wyników oraz napisaniu manuskryptu.. Mój udział procentowy szacuję na 70%.</i>	0.604	15
[A17]	M. Baranowski, R. Kudrawiec, M. Latkowska, <b>M. Syperek</b> , J. Misiewicz, T. Sarmiento, and J. S. Harris „ <i>Enhancement of photoluminescence from GaInNAsSb quantum wells upon annealing: improvement of material quality and carrier collection by the quantum well</i> ” J. Phys.: Condens. Matter 25, 065801 (2013). <i>Mój wkład w powstanie tej pracy polegał na merytorycznym nadzorze nad przeprowadzonymi doświadczeniami w zakresie pomiaru widm rozdzielczych w czasie oraz współudziale w interpretacji wyników doświadczeń.. Mój udział procentowy szacuję na 5%.</i>	2.223	30
[A18]	Ł. Dusanowski, <b>M. Syperek</b> , W. Rudno-Rudziński, P. Mrowiński, G. Sęk, J. Misiewicz, A. Somers, J.P. Reithmaier, S. Hofling, A. Forchel „ <i>Exciton and biexciton dynamics in single self-assembled InAs/InGaAlAs/InP quantum dash emitting near 1.55 μm</i> ” Appl. Phys. Lett. 103, 253113 (2013). <i>Mój wkład w powstanie tej pracy polegał na merytorycznym nadzorze nad przeprowadzonymi doświadczeniami, interpretacji wyników doświadczeń oraz współredagowaniu tekstu manuskryptu. Mój udział procentowy szacuję na 12%.</i>	3.515	40
[A19]	Ł. Dusanowski, A. Golnik, <b>M. Syperek</b> , J. Sufczyński, M. Nawrocki, G. Sęk, J. Misiewicz, T. W. Schleretch, C. Schneider, S. Höfling, M. Kamp, and A. Forchel „ <i>Properties of InGaAlAs/AlGaAs quantum dots for single photon emission in the near infrared and visible spectral range</i> ” AIP Conf. Proc. 1566, 540 (2013). <i>Mój wkład w powstanie tej pracy polegał na koncepcji wykorzystania kropek kwantowych InGaAlAs/AlGaAs jako jednofotonowego źródła promieniowania oraz na zaplanowaniu kroków doświadczalnych w kierunku potwierdzenia założonych tez. Mój udział procentowy szacuję na 6%.</i>		Konf.

2012			
[A20]	<p>Ł. Dusanowski, A. Golnik, <b>M. Syperek</b>, M. Nawrocki, G. Sęk, J. Misiewicz, T. W. Schlereth, C. Schneider, S. Höfling, M. Kamp, and A. Forchel „<i>Single photon emission in the red spectra range from a GaAs-based self-assembled quantum dots</i>” Appl. Phys. Lett. 101, 103108 (2012).</p> <p><i>Mój wkład w powstanie tej pracy polegał na koncepcji wykorzystania kropek kwantowych InGaAlAs/AlGaAs jako jednofotonowego źródła promieniowania oraz na zaplanowaniu kroków doświadczalnych w kierunku potwierdzenia założonych tez. Mój udział procentowy szacuję na 6%.</i></p>	3.794	40
[A21]	<p>M. Baranowski, R. Kudrawiec, M. Latkowska, <b>M. Syperek</b>, J. Misiewicz, and J. A. Gupta „<i>Dynamics of localized excitons in Ga<sub>0.69</sub>In<sub>0.31</sub>N<sub>0.015</sub>As<sub>0.985</sub>/GaAs quantum well: Experimental studies and Monte-Carlo simulations</i>” Appl. Phys. Lett. 100, 202105 (2012).</p> <p><i>Mój wkład w powstanie tej pracy polegał na merytorycznym nadzorze nad przeprowadzonymi doświadczeniami w zakresie pomiaru widm rozdzielczych w czasie oraz udziale w interpretacji wyników doświadczeń. Mój udział procentowy szacuję na 4%.</i></p>	3.794	40
[A22]	<p>M. Baranowski, M. Latkowska, R. Kudrawiec, <b>M. Syperek</b>, J. Misiewicz, K. Giri Sadasivam, J. Shim, and J. K. Lee „<i>Time-resolved photoluminescence studies of the optical quality of InGaN/GaN quantum well grown by MOCVD—antimony surfactant effect</i>” Semicond. Sci. Technol. 27 105027 (2012).</p> <p><i>Mój wkład w powstanie tej pracy polegał na merytorycznym nadzorze nad przeprowadzonymi doświadczeniami w zakresie pomiaru widm rozdzielczych w czasie oraz interpretacji wyników doświadczeń. Mój udział procentowy szacuję na 5%.</i></p>	1.921	30
[A23]	<p>M. Baranowski, R. Kudrawiec, M. Latkowska, <b>M. Syperek</b>, J. Misiewicz „<i>Monte Carlo Simulations of the Influence of Localization Centers on Carrier Dynamics in GaInNAs Quantum Wells</i>” Act. Phys. Polonica A 122, 1022 (2012).</p> <p><i>Mój wkład w powstanie tej pracy polegał na merytorycznym nadzorze nad przeprowadzonymi doświadczeniami w zakresie pomiaru widm rozdzielczych w czasie oraz udziale w dyskusji warstwy teoretycznej pracy. Mój udział procentowy szacuję na 4%.</i></p>	0.531	15
[A24]	<p>M. Baranowski, <b>M. Syperek</b>, R. Kudrawiec, J. Misiewicz, J. A. Gupta, X. Wu, and R. Wang „<i>Carrier dynamics in type-II GaAsSb/GaAs quantum Wells</i>” J. Phys.: Condens. Matter 24 185801(2012).</p> <p><i>Mój wkład w powstanie tej pracy polegał na zaporponowaniu koncepcji badań nad układem studni kwantowych drugiego typu z wykorzystaniem czasowo-spektralnej tomografii, merytorycznym nadzorze nad przeprowadzonymi doświadczeniami, udziale w interpretacji wyników oraz przygotowaniu pierwszej wersji manuskryptu. Mój udział procentowy szacuję na 12%.</i></p>	2.355	30
[A25]	<p>R. Kudrawiec, <b>M. Syperek</b>, M. Latkowska, J. Misiewicz, V.-M. Korpijärvi, P. Laukkanen, J. Pakarinen, M. Dumitrescu, M. Guina, and M. Pessa „<i>Influence of non-radiative recombination on photoluminescence decay time in GaInNAs quantum wells with Ga- and In-rich environments of nitrogen atoms</i>” J. Appl. Phys. 111, 063514 (2012).</p> <p><i>Mój wkład w powstanie tej pracy polegał na przygotowaniu koncepcji badań kinetyki procesów relaksacji w studniach kwantowych GaInNAs, wykonaniu pomiarów fotoluminescencji rozdzielczej w czasie, przygotowaniu wyników doświadczeń oraz ich interpretacji. Mój udział procentowy szacuję na 15%.</i></p>	2.21	30
2011			
[A26]	<p><b>M. Syperek</b>, D. R. Yakovlev, I. A. Yugova, J. Misiewicz, I. V. Sedova, S. V. Sorokin, A. A. Toropov, S. V. Ivanov, M. Bayer, „<i>Long-lived elektron spin coherence in CdSe/Zn(S,Se) self-assembled quantum dots</i>” Physical Review B 84, 085304 (2011). <i>Mój wkład w powstanie tej pracy polegał na przygotowaniu układu doświadczalnego, wykonaniu wszystkich badań doświadczalnych, przygotowaniu wyników doświadczeń oraz ich wstępnej interpretacji, napisaniu pierwszej wersji manuskryptu. Mój udział procentowy szacuję na 55%.</i></p>	3.691	35
[A27]	<p>J. Akhtar, M. Afzaal, M. Banski, A. Podhorodecki, <b>M. Syperek</b>, J. Misiewicz, U. Bangert, S.J.O. Hardman, D.M. Graham, W.R. Flavell, D.J. Binks, S. Gardonio, P.</p>	9.907	40

	O'Brien, „Controlled Synthesis of Tuned Bandgap Nanodimensional Alloys of $PbS(x)Se(1-x)$ ”, Journal of the American Chemical Society. 133, 5602 (2011). Mój wkład w powstanie tej pracy polegał na przygotowaniu koncepcji badań nad dynamiką sygnału fotoluminescencji z badanych struktur, przeprowadzenie doświadczeń oraz przygotowanie wyników doświadczeń wraz ze wstępną interpretacją. Mój udział procentowy szacuję na 5%.		
[A28]	M. Siekacz, M. Sawicka, H. Turski, G. Cywiński, A. Khachapuridze, P. Perlin, T. Suski, M. Boćkowski, J. W. Smalec-Koziorowska, M. Kryško, R. Kudrawiec, <b>M. Syperek</b> , J. Misiewicz, Z. R. Wasilewski, S. Porowski, C. Skierbiszewski, „Optically pumped 500 nm InGaN green lasers grown by Plasma-Assisted Molecular Beam Epitaxy” J. Appl. Phys. 110, (2011). Mój wkład w powstanie tej pracy polegał na przeprowadzenie doświadczeń w zakresie pomiaru kinetyki sygnału fotoluminescencji ze studni kwantowych InGaN oraz przygotowanie wyników doświadczeń. Mój udział procentowy szacuję na 2%.	2.168	30
[A29]	M. Baranowski, <b>M. Syperek</b> , R. Kudrawiec, J. Misiewicz, J. A. Gupta, X. Wu, and R. Wang, “Carrier dynamics between delocalized and localized states in type-II GaAsSb/GaAs quantum wells” Appl. Phys. Lett. 98, 061910 (2011). Mój wkład w powstanie tej pracy polegał na zaproponowaniu koncepcji badań nad układem studni kwantowych drugiego typu z wykorzystaniem czasowo-spektralnej tomografii, merytorycznym nadzorze nad przeprowadzonymi doświadczeniami, interpretacji wyników oraz współredagowaniu pierwszej wersji manuskryptu. Mój udział procentowy szacuję na 15%	3.844	40
[A30]	Baranowski. M, Kudrawiec. <b>Syperek. M</b> , Misiewicz J, Zhao .H, Sadeghi. M, Wang S.M. “Contactless electroreflectance, photoluminescence and time resolved photoluminescence of GaInNAs quantum wells obtained by the MBE method with N-irradiation”, Semiconductor Science and Technology 26, 045012 (2011). Mój wkład w powstanie tej pracy polegał na przygotowaniu koncepcji badań nad dynamiką sygnału fotoluminescencji studni kwantowych GaInNAs, merytorycznym nadzorze nad prowadzonymi doświadczeniami w zakresie pomiaru widm rozdzielczych w czasie, udziale w interpretacji wyników doświadczeń. Mój udział procentowy szacuję na 5%.	1.723	30
[A31]	A. Podhorodecki, P. Gluchowski, G. Zatoryb, <b>M. Syperek</b> , J. Misiewicz, W. Lojkowski, W. Stręk, “Influence of Pressure-Induced Transition from Nanocrystals to Nanoceramic Form on Optical Properties of Ce-Doped Y3Al5O12” J. Am. Ceram. Soc. B 1-6 (2011). Mój wkład w powstanie tej pracy polegał na przygotowaniu koncepcji badań nad dynamiką sygnału fotoluminescencji z badanych struktur, przeprowadzenie doświadczeń oraz przygotowanie wyników doświadczeń wraz ze wstępną interpretacją. Mój udział procentowy szacuję na 5%.	2.272	45
[A33]	C. Boney, I. Hernandez, R. Pillai, D. Starikov, A. Bensasoula, M. Henini, <b>M. Syperek</b> , J. Misiewicz, and R. Kudrawiec “Growth and characterization of InGaN for photovoltaic devices” Phys. Stat. Sol. C 8, 2460 (2011). Mój wkład w powstanie tej pracy polegał na przygotowaniu koncepcji badań nad dynamiką sygnału fotoluminescencji z badanych struktur, przeprowadzenie doświadczeń oraz przygotowanie wyników doświadczeń wraz ze wstępną interpretacją. Mój udział procentowy szacuję na 2%.		Konf.
[A33]	M. Gładysiewicz, R. Kudrawiec, <b>M. Syperek</b> , J. Misiewicz, M. Siekacz, G. Cywiński, C. Skierbiszewski, T. Suski “Theoretical simulations of radiative recombination time in polar InGaN quantum wells” Phys. Stat. Sol. C 8, 2273 (2011). Mój wkład w powstanie tej pracy polegał na przygotowaniu koncepcji badań nad dynamiką sygnału fotoluminescencji z badanych struktur, przeprowadzenie doświadczeń oraz przygotowanie wyników doświadczeń wraz ze wstępną interpretacją. Mój udział procentowy szacuję na 5%.		Konf.
[A34]	<b>M. Syperek</b> , A. Musiał, G. Sęk, P. Podemski, J. Misiewicz, A. Löffler, S. Höfling, L. Worschech, and A. Forchel “Impact of the localized wetting layer states on carrier relaxation processes in GaAs-based quantum dash structures” AIP Conf. Proc. 1399, 563 (2011). Mój wkład w powstanie tej pracy polegał na przygotowaniu koncepcji badań doświadczalnych nad kreskami kwantowymi InAs/GaAs w zakresie rozpoznania dynamiki ładunku/ekscytynu w tych strukturach. Wykonaniu badań doświadczalnych, przygotowaniu wyników doświadczeń oraz ich wstępnej interpretacji oraz napisaniu pierwszej wersji manuskryptu.. Mój udział procentowy szacuję na 54%.		Konf.

2010			
[A35]	G. Sęk, A. Musiał, P. Podemski, <b>M. Syperek</b> , J. Misiewicz, A. Löffler, S. Höfling, L. Worschech and A. Forchel, " <i>Exciton kinetics and a few particle effects in self-assembled GaAs-based quantum dashes</i> " J. Appl. Phys. 107,096106 (2010). <i>Mój wkład w powstanie tej pracy polegał na dyskusji wyników doświadczalnych i udziale w interpretacji danych. Mój udział procentowy szacuję na 5%.</i>	2.064	30
[A36]	C. Boney, I. Hernandez, R. Pillai, D. Starikov, A. Bensaoula, M. Henini, <b>M. Syperek</b> , J. Misiewicz, and R. Kudrawiec " <i>Growth and characterizarion of InGaN for photovoltaic devices</i> " 35 <sup>th</sup> IEEE Photovoltaic Specialists Conference 3316 (2010). <i>Mój wkład w powstanie tej pracy polegał na przygotowaniu koncepcji badań nad dynamiką sygnału fotoluminescencji z badanych struktur, przeprowadzenie doświadczeń oraz przygotowanie wyników doświadczeń wraz ze wstępną interpretacją. Mój udział procentowy szacuję na 2%.</i>		Konf.
[A37]	A. Musiał, G. Sęk, P. Podemski, <b>M. Syperek</b> , J. Misiewicz, A. Löffler, S. Höfling, and A. Forchel " <i>Excitonic complexes in InGaAs/GaAs quantum dash structures</i> " J. Phys.: Conf. Series 245, 012054 (2010). <i>Mój wkład w powstanie tej pracy polegał na dyskusji wyników doświadczalnych i udziale w interpretacji danych. Mój udział procentowy szacuję na 4%.</i>		Konf.
[A38]	W. Rudno-Rudziński, J. Andrzejewski, G. Sęk, <b>M. Syperek</b> , J. Misiewicz, E. M. Pavelescu, C. Gilfert, and J. P. Reithmaier " <i>Tunnel injection structures based on InGaAs/GaAs quantum dots: optical properties and energy structure</i> " J. Phys.: Conf. Series 245, 012047 (2010). <i>Mój wkład w powstanie tej pracy polegał na dyskusji wyników doświadczalnych i udziale w interpretacji danych. Mój udział procentowy szacuję na 5%.</i>		Konf.
2009			
[A39]	W. Rudno-Rudziński, G. Sęk, K. Ryczko, <b>M. Syperek</b> , J. Misiewicz, E. S. Semenova, A. Lemaitre, A. Ramdane „ <i>Optical properties and energy transfer in InGaAsN quantum well - InAs quantum dots tunnel injection structures for 1.3 μm emission</i> " Phys. Stat. Sol. A 206, 826 (2009). <i>Mój wkład w powstanie tej pracy polegał na dyskusji wyników i udziale w interpretacji danych. Mój udział procentowy szacuję na 5%.</i>	1.228	25
[A40]	W. Rudno-Rudziński, G. Sęk, K. Ryczko, <b>M. Syperek</b> , J. Misiewicz, E. S. Semenova, A. Lemaitre, and A. Ramdane „ <i>Room temperature free carrier tunneling in dilute nitride based quantum well - quantum dot tunnelinjection system for 1.3 μm</i> " Appl. Phys. Lett. 94, 171906 (2009). <i>Mój wkład w powstanie tej pracy polegał na przygotowaniu koncepcji badań nad dynamiką sygnału fotoluminescencji w strukturach tunelowych, wykonanie doświadczeń, przygotowanie danych oraz udziale w ich interpretacji. Mój udział procentowy szacuję na 5%.</i>	3.554	40
[A41]	R. Kudrawiec, <b>M. Syperek</b> , P. Poloczek, J. Misiewicz, R. H. Mari, M. Shafi, M. Henini, Y. Galvão Gobato, S. V. Novikov, J. Ibáñez, M. Schmidbauer, and S. I. Molina " <i>Carrier localization in GaBiAs probed by photomodulated transmittance and photoluminescence</i> " J. Appl. Phys. 106, 023518 (2009). <i>Mój wkład w powstanie tej pracy polegał na przygotowaniu koncepcji badań nad dynamiką sygnału fotoluminescencji w warstwach GaBiAs, wykonanie doświadczeń, przygotowanie danych oraz udziale w ich interpretacji. Mój udział procentowy szacuję na 12%.</i>	2.072	30
[A42]	W. Rudno-Rudziński, K. Ryczko, G. Sęk, <b>M. Syperek</b> , J. Misiewicz, E. M. Pavelescu, C. Gilfert, J. P. Reithmaier " <i>Optical methods used to optimize of semiconductor laser structures with tunnel injection from quantum well to InGaAs/GaAs quantum dots</i> " Optica Applicata 39, 923 (2009). <i>Mój wkład w powstanie tej pracy polegał na dyskusji wyników doświadczalnych i udziale w interpretacji danych. Mój udział procentowy szacuję na 5%.</i>	0.358	15

### 3.1.2 Publikacje przed uzyskaniu stopnia doktora

Przed uzyskaniem stopnia doktora nauk fizycznych habilitant podejmował tematykę skoncentrowaną na dwóch zagadnieniach:

- własności optyczne struktur na bazie szerokoprzerwowych materiałów półprzewodnikowych GaN, AlGa<sub>N</sub>, AlN i heterostruktur zbudowanych w oparciu o te materiały;
- koherentna dynamika elektronu i dziury w studniach kwantowych na bazie GaAs oraz CdTe;

Lp.	Autorzy, tytuł, czasopismo , rok publikacji	IF	Punkty MNiSW
<b>2007</b>			
[B1]	<b>M. Syperek</b> , D. R. Yakovlev, A. Greilich, J. Misiewicz, M. Bayer, D. Reuter, and A. Wieck <i>“Spin coherence of holes in GaAs/AlGaAs quantum wells”</i> , Phys. Rev. Lett. 99, 187401 (2007). <i>Mój wkład w powstanie tej pracy polegał na przygotowaniu układu doświadczalnego, wykonaniu wszystkich badań doświadczalnych, przygotowaniu wyników doświadczeń oraz ich wstępnej interpretacji, napisaniu pierwszej wersji manuskryptu. Mój udział procentowy szacuję na 60%.</i>	6.994	45
[B2]	M. Motyka, R. Kudrawiec, <b>M. Syperek</b> , J. Misiewicz, M. Rudziński, P.R. Hageman and P.K. Larsen, <i>“Screening effect in contactless electroreflectance spectroscopy observed for AlGa<sub>N</sub>/Ga<sub>N</sub> heterostructures with two dimensional electron gas”</i> , Thin Solid Films 515, 4662-4665 (2007). <i>Mój wkład w powstanie tej pracy polegał na wykonaniu pomiarów widm fotoodbicia, przygotowaniu wyników oraz ich wstępnej interpretacji. Mój udział procentowy szacuję na 10%.</i>	1.693	30
[B3]	<b>M. Syperek</b> , M. Motyka, R. Kudrawiec, J. Misiewicz, M. Rudziński, P. R. Hageman, and P. K. Larsen <i>“Investigation of built-in electric fields in AlGa<sub>N</sub>/Ga<sub>N</sub> heterostructures grown on misoriented 4H-SiC substrate by contactless electroreflectance”</i> Phys. Stat. Sol C 4, 366 (2007). <i>Mój wkład w powstanie tej pracy polegał na przygotowaniu układu doświadczalnego, wykonaniu badań doświadczalnych, przygotowaniu wyników doświadczeń oraz ich wstępnej interpretacji, napisaniu pierwszej wersji manuskryptu. Mój udział procentowy szacuję na 40%.</i>		Konf.
[B4]	<b>M. Syperek</b> , D. R. Yakovlev, A. Greilich, M. Bayer, J. Misiewicz, D. Reuter, and A. Wieck <i>“Spin coherence of holes in GaAs/AlGaAs quantum wells”</i> AIP. Conf. Proc. 893, 1303 (2007). <i>Mój wkład w powstanie tej pracy polegał na przygotowaniu układu doświadczalnego, wykonaniu wszystkich badań doświadczalnych, przygotowaniu wyników doświadczeń oraz ich wstępnej interpretacji, napisaniu pierwszej wersji manuskryptu. Mój udział procentowy szacuję na 60%.</i>		Konf.
<b>2006</b>			
[B5]	M. Motyka, <b>M. Syperek</b> , R. Kudrawiec and J. Misiewicz, M. Rudzinski, P. R. Hageman, P. K. Larsen, <i>“Investigation of Ga<sub>N</sub> surface quantum well in AlGa<sub>N</sub>/Ga<sub>N</sub> transistor heterostructures by contactless electroreflectance spectroscopy”</i> , Appl. Phys. Lett. 89, 231912 (2006). <i>Mój wkład w powstanie tej pracy polegał na wykonaniu pomiarów widm fotoodbicia oraz fotoluminescencji, interpretacji wyników badań, wprowadzenie koncepcji powierzchniowej studni kwantowej Ga<sub>N</sub>/AlGa<sub>N</sub> oraz napisaniu pierwszej wersji manuskryptu. Mój udział procentowy szacuję na 35%.</i>	3.977	40
[B6]	R. Kudrawiec, <b>M. Syperek</b> , M. Motyka, and J. Misiewicz, R. Paszkiewicz, B. Paszkiewicz, and M. Tłaczała, <i>„Contactless electromodulation Spectroscopy of AlGa<sub>N</sub>/Ga<sub>N</sub> heterostructures with a two dimensional elektron gas: a comparision of photorefectance and contactless electroreflectance”</i> J. App. Phys. 100 , 013501 (2006). <i>Mój wkład w powstanie tej pracy polegał na wykonaniu pomiarów widm fotoodbicia, przygotowaniu wyników oraz ich wstępnej interpretacji. Mój udział procentowy szacuję na 24%.</i>	2.316	30

[B7]	R. Kudrawiec, M. Nyk, <b>M. Syperek</b> , A. Podhorodecki, J. Misiewicz, and W. Stręk, „ <i>Photoluminescence from GaN nanopowder: The size effect associated with the surface-to-volume ratio</i> ” Appl. Phys. Lett. 88, 181916 (2006). <i>Mój wkład w powstanie tej pracy polegał na wykonaniu pomiarów widm fotoluminescencji, przygotowaniu wyników oraz ich wstępnej interpretacji. Mój udział procentowy szacuję na 20%.</i>	3.977	40
[B8]	B. Paszkiewicz, R. Paszkiewicz, A. Szyszka, M. Wośko, W. Macherzyński, M. Tłaczała, R. Kudrawiec, <b>M. Syperek</b> , J. Misiewicz, E. Dumiszewska, and W. Strupiński “ <i>Study of activation process of Mg dopant in GaN:Mg layers</i> ” Phys. Stat. Sol. C 3, 579 (2006). <i>Mój wkład w powstanie tej pracy polegał na wykonaniu pomiarów widm fotoodbicia, przygotowaniu wyników oraz ich wstępnej interpretacji. Mój udział procentowy szacuję na 2%.</i>		Konf.
[B9]	R. Kudrawiec, <b>M. Syperek</b> , J. Misiewicz, M. Rudziński, A. P. Grzegorzczak, P. R. Hageman, and P. K. Larsen “ <i>Below bandgap transitions in an AlGaIn/GaN transistor heterostructure observed by photoreflectance spectroscopy</i> ” Phys. Stat. Sol. C 3, 2117 (2006). <i>Mój wkład w powstanie tej pracy polegał na wykonaniu pomiarów widm fotoodbicia, przygotowaniu wyników oraz ich wstępnej interpretacji. Mój udział procentowy szacuję na 25%.</i>		Konf.
2005			
[B10]	R. Kudrawiec, <b>M. Syperek</b> , J. Misiewicz, M. Rudziński, AP Grzegorzczak, P.R. Hageman, P.K. Larsen „ <i>Photoreflectance investigations of a donor-related transition in AlGaIn/GaN transistor structures</i> ”, App. Phys. Lett. 87, 153502 (2005). <i>Mój wkład w powstanie tej pracy polegał na wykonaniu pomiarów widm fotoodbicia, przygotowaniu wyników oraz ich wstępnej interpretacji. Mój udział procentowy szacuję na 25%.</i>	4.127	40
[B11]	<b>M. Syperek</b> , R. Kudrawiec, J. Misiewicz, R. Korbutowicz, R. Tłaczała, „ <i>Photoreflectance investigation of trick GaN layers prepared by HVPE technique</i> ”, Optica Applicata 35, 529(2005). <i>Mój wkład w powstanie tej pracy polegał na wykonaniu pomiarów widm fotoodbicia, przygotowaniu wyników oraz ich interpretacji wraz z przygotowaniem pierwszej wersji manuskryptu. Mój udział procentowy szacuję na 40%.</i>	0.459	15
[B12]	J. Misiewicz, R. Kudrawiec, <b>M. Syperek</b> , R. Paszkiewicz, B. Paszkiewicz and M. Tłaczała „ <i>Investigations of AlGaIn/GaN field-effect transistor structures by photoreflectance spectroscopy</i> ”, Microelectronics Journal 36, 442 (2005). <i>Mój wkład w powstanie tej pracy polegał na wykonaniu pomiarów widm fotoodbicia, przygotowaniu wyników oraz ich wstępnej interpretacji. Mój udział procentowy szacuję na 12%.</i>	0.836	20
[B13]	R. Kudrawiec, <b>M. Syperek</b> , J. Misiewicz, R. Paszkiewicz, B. Paszkiewicz, M. Tłaczała “ <i>Photoreflectance studies of undoped and Si-doped AlGaIn/GaN heterostructures with a two-dimensional electron gas</i> ” AIP Conf. Proc. 772, 417 (2005). <i>Mój wkład w powstanie tej pracy polegał na wykonaniu pomiarów widm fotoodbicia, przygotowaniu wyników oraz ich wstępnej interpretacji. Mój udział procentowy szacuję na 20%.</i>		Konf.
2004			
[B14]	R. Kudrawiec, <b>M. Syperek</b> , J. Misiewicz, R. Paszkiewicz, B. Paszkiewicz, M. Tłaczała “ <i>Photoreflectance Investigations of AlGaIn/GaN heterostructures with a two dimensional elektron gas</i> ” Superlattices and Microstructures, vol. 36, pp. 633-641 (2004). <i>Mój wkład w powstanie tej pracy polegał na wykonaniu pomiarów widm fotoodbicia, przygotowaniu wyników oraz ich wstępnej interpretacji. Mój udział procentowy szacuję na 20%.</i>	2.097	25
[B15]	R. Kudrawiec, <b>M. Syperek</b> , J. Misiewicz, R. Paszkiewicz, B. Paszkiewicz, M. Tłaczała “ <i>Photoreflectance study of p-type GaN layers</i> ” Superlattices and Microstructures, vol. 36, pp. 643-649 (2004). <i>Mój wkład w powstanie tej pracy polegał na wykonaniu pomiarów widm fotoodbicia, przygotowaniu wyników oraz ich wstępnej interpretacji. Mój udział procentowy szacuję na 20%.</i>	2.097	25
[B16]	R. Kudrawiec, R. Korbutowicz, R. Paszkiewicz, <b>M. Syperek</b> and J. Misiewicz “ <i>Photoreflectance and photoluminescence of thick GaN layers grown by HVPE</i> ” Opto-Electronics Review 12(4), 435-439 (2004).	1.413	20



	<i>Mój wkład w powstanie tej pracy polegał na wykonaniu pomiarów widm fotoodbicia, przygotowaniu wyników oraz ich wstępnej interpretacji. Mój udział procentowy szacuję na 20%.</i>		
--	---	--	--

### 3.2 Wykaz krajowych i międzynarodowych projektów naukowych w których habilitant pełnił rolę kierownika projektu

Lp.	Okres trwania	Fundator/Kraj realizacji projektu	Tytuł projektu	Miejsce realizacji
1	2007/06/01-2007/11/30	DAAD/Niemcy	Dynamics of optical coherent processes in (In,Ga)As-based quantum dots and quantum wells	Uniwersytet w Dortmundzie, Niemcy
2	2011/04/20-2013/12/19	MNiSW/NCN/Polska N N515 496640	Dynamika procesów relaksacji promienistej i bezpromienistej w strukturach półprzewodnikowych z kreskami kwantowymi na podłożu InP(001) przewidzianych na lasery i wzmacniacze optyczne pracujące w zakresie bliskiej podczerwieni	Politechnika Wroclawska, LOSN
3	2012/06/11-2014/06/10	MNiSW/NCN/Polska IP2011053371	Dynamika nośników ładunku oraz ekscytonów w czteroskładnikowych kropkach kwantowych InAlGaAs na podłożu z GaAs przeznaczonych do zastosowań laserowych	Politechnika Wroclawska, LOSN

### 3.3 Wykaz krajowych i międzynarodowych projektów naukowych w których habilitant pełnił funkcję głównego wykonawcy lub wykonawcy

Liczba projektów obejmuje 16 pozycji. Zdecydowana większość projektów realizowana jest we współpracy międzynarodowej.

Lp.	Okres trwania	Fundator/nr projektu/kraj	Tytuł projektu	Miejsce realizacji
1	2008/09/01-2012/07/31	7PR UE/Projekt międzynarodowy	Development of low-cost technologies for the fabrication of high-performance telecommunication lasers (DeLight)	Politechnika Wroclawska/ LOSN
2	01.04.2015-31.03.2018	UE "Horyzont 2020"/Projekt międzynarodowy	In-line Cascade Laser Spectrometer for Process Control (iCSpec)	Politechnika Wroclawska/ LOSN
3	01/04/2016-31/03/2019	NCBiR/2/POLBER-2/2016/Projekt polsko-niemiecki	Półprzewodnikowe źródło pojedynczych fotonów do bezpiecznej światłowodowej komunikacji kwantowej w zakresie 1.3 μm	Politechnika Wroclawska/LOS N
4	2011/02/03-2014/08/27	MNiSW, NCN, DFG/Projekt polsko-niemiecki	Emitery promieniowania podczerwonego wykorzystujące efekt polarytonowy przeznaczone do zastosowań w telekomunikacji światłowodowej	Politechnika Wroclawska/ LOSN
5	09/06/2014-08/01/2018	NCN "Harmonia 6" UMO-2013/10/M/ST3/00636/Projekt	Badania własności podstawowych sprzężonych systemów typu studnia kwantowa-kropki kwantowe emitujących w zakresie spektralnym 1.3-1.55 mikrometra	Politechnika Wroclawska/ LOSN

		polsko-niemiecki		
6	02/06/2015-01/06/2018	NCN "Harmonia 6" UMO-2014/14/N/ST3/00821/projekt polsko-niemiecki	Pojedynczy emiter fotonów na dł. fali 1.55 mikrometra wykorzystujący architecture kropki kwanowej w mikrownęce	Politechnika Wroclawska/ LOSN
7	29/01/2015-28/01/2018	NCN "Opus" P. Machnikowski UMP-2014/13/B/ST5/04603/Projekt krajowy	Dynamika i optyczna kontrola spinu w układach sprzężonych nanostruktur	Politechnika Wroclawska/ LOSN
8	22.09.2015-21.09.2018	NCN "Opus" Motyka, UMP-2014/15/B/ST7/04663/	Zbadanie struktury energetycznej oraz dynamiki nośników ładunku w półprzewodnikowych strukturach niskowymiarowych typu drugiego przeznaczonych do emisji lub detekcji promieniowania z zakresu 3-10 mikrometrów	Politechnika Wroclawska/ LOSN
9	2013/01/01-2015/12/31	FNP "Mistrz" Prof. A. Wójs	Magneto-optyka nanostruktur półprzewodnikowych z nośnikami o spinie 3/2 pod kątem zastosowań w przetwarzaniu informacji kwantowej	Politechnika Wroclawska/ LOSN
10	27/04/2012-27/04/2017	NCN "Maestro" Prof. J. Misiewicz UMO-2011/02/A/ST3/00152	Nowe epitaksjalne nanostruktury półprzewodnikowe: własności optyczne i aplikacje	Politechnika Wroclawska/ LOSN <sup>2)</sup>
11	2010/04/06-2012/04/05	MNiSW/NCN NN202179538	Badania magnetoptyczne własności dynamicznych elektronów cieczy kwantowych ze spinem	Politechnika Wroclawska/ LOSN <sup>2)</sup>
12	2010/09/27-2012/09/26	MNiSW/NCN NN202258339	Procesy rekombinacji promienistej i niepromienistej w związkach i strukturach półprzewodnikowych III-V z azotem	Politechnika Wroclawska/ LOSN <sup>2)</sup>
13	2010/04/06-2012/04/05	MNiSW/NCN NN202181238	Własności optyczne nanostruktur epitaksjalnych o silnej asymetrii kształtu	Politechnika Wroclawska/ LOSN <sup>6)</sup>
14	2010/04/08-2012/04/07	MNiSW/NCN NN515518338	Badania własności optycznych struktur tunelowych typu studnia-kropka kwantowa pod kątem zastosowań w laserach telekomunikacyjnych	Politechnika Wroclawska/ LOSN <sup>2)</sup>
15	01/05/2008-30/09/2013	Fundusz strukturalny UE POIG 01.01.02-00-008-00	Kwantowe struktury półprzewodnikowe do zastosowań w biologii i medycynie – rozwój i komercjalizacja nowej generacji urządzeń diagnostyki molekularnej opartych o nowe polskie przyrządy półprzewodnikowe	Politechnika Wroclawska/ LOSN
16	10/10/2009-30/06/2013	Fundusz Strukturalny UE POIG. 02.02.00-00-003/08	Narodowe Laboratorium Technologii Kwantowych	Politechnika Wroclawska/ LOSN

### 3.4 Lista referatów zaproszonych wygłoszonych na krajowych i międzynarodowych konferencjach naukowych

Lp.	Autor/autorzy referatu	Rok wygłoszenia	Tytuł wystąpienia	Nazwa konferencji, miejsce odbycia
1	M. Syperek	2018/02/14-16	Optical properties and carrier dynamics in InAs/InP(001) quantum dashes/dots	International Workshop on the Optical Properties of Nanostructures, Munster, Niemcy
2	M. Syperek	2017/05/5-7	Exciton dynamics in quasi-0D semiconductor nanostructures beyond the strong confinement regime	VI Plenerową Konferencję Studencką NANOIN, Szklarska Poręba, Polska
3	M. Syperek	2015/06/25-27	Ultrafast carrier relaxation processes in semiconductor nanostructures	VII Polska Konferencja Nanotechnologii, Poznań, Polska
4	M. Syperek	2013/02/13-15	Carrier relaxation process in low-indium content, self-assembled (In,Ga)As/GaAs quantum dots	International Workshop on the Optical Properties of Nanostructures, Bayreuth, Niemcy
5	M. Syperek	2013/07/9-12	Nanosecond and sub-nanosecond time-resolved spectroscopy of low-dimensional quantum structures	VI Polska Konferencja Nanotechnologii, Szczecin, Polska
6	M. Syperek	2012/11/27	Time-resolved photoluminescence spectroscopy: Introduction and applications	International Meeting on Spectroscopy of Semiconductors, Department of Electronic Engineering, National Taiwan University, Taiwan
7	M. Syperek	2011/03/05	Dynamika nośników ładunku, ekscytonów i spinu w nanostrukturach półprzewodnikowych z wykorzystaniem narzędzi ultraszybkiej spektroskopii optycznej	Konferencja Narodowego Laboratorium Technologii Kwantowych, Warszawa, Polska

### 3.5 Lista pozostałych referatów konferencyjnych

Lp.	Autor/autorzy referatu	Rok wygłoszenia	Tytuł wystąpienia	Nazwa konferencji, miejsce odbycia
1	M. Syperek, Ł. Dusanowski, J. Misiewicz, A. Somers, J. P. Reithmaier, S. Höfling, G. Sęk	2016/06/18-24	On the spin memory effect in InAs quantum dash emitting at 1.55 $\mu\text{m}$	45 <sup>th</sup> "Jaszowiec" International School and Conference on the Physics of Semiconductors, Szczyrk, Polska
2	M. Syperek, Ł. Dusanowski, J. Misiewicz, A. Somers, J. P. Reithmaier, S. Höfling, G. Sęk	2016/02/17-19	Exciton spin relaxation in InAs/InP(001) quantum dashes emitting at 1.55 $\mu\text{m}$	4 <sup>th</sup> International Workshop on the Optical Properties of Nanostructures, Wrocław, Polska
3	M. Syperek	Wrocław, 2013	Carrier relaxation processes in low-indium content, self-assembled (In,Ga)As/GaAs quantum dots	16 <sup>th</sup> Conference on Modulated Semiconductor Structures (MSS-16)

4	<b>M. Syperek</b> , P. Leszczyński, W. Rudno-Rudziński, G. Sęk, A. Andrzejewski, J. Misiewicz, E. M. Pavelescu, C. Gilfert, and J. P. Reithmaier	7-8.10.2010	Carrier dynamics in GaAs-based quantum dot– quantum well tunnel injection structures	International Workshop on the high speed semiconductor lasers
5	<b>M. Syperek</b>	14-16.02. 2011	Photoluminescence dynamics in coupled (In,Ga)As/GaAs quantum well-quantum dots system	POLISH-GERMAN WORKSHOP ON THE OPTICAL PROPERTIES OF NANOSTRUCTURES
6	<b>M. Syperek</b>	27.06.2011-01.07.2011	Ultraszybka dynamika nośników ładunku w półprzewodnikowych kwantowych strukturach sprzężonych typu studnia kwantowa-kropki kwantowe	II Polska Konferencja Optyczna, Międzyzdroje
7	<b>M. Syperek</b>	4-6.03.2011	Photoluminescence dynamics in the (In,Ga)As/GaAs coupled quantum well-quantum dot system	Conference "Quantum Technology 2011"
8	<b>M. Syperek</b> , W. Rudno-Rudziński, G. Sęk, K. Ryczko, J. Andrzejewski, J. Misiewicz, E. S. Semenova, A. Lemaitre, A. Ramdane	19-26.06. 2009	Time-resolved photoluminescence of a coupled quantum well - quantum dots system: inelastic electron-electron scattering as a main mechanism of tunneling process	XXXVIII International School and Conference on the Physics of Semiconductors, Jaszowiec
9	<b>M. Syperek</b> , W. Rudno-Rudziński, G. Sęk, K. Ryczko, J. Andrzejewski, J. Misiewicz, E. S. Semenova, A. Lemaitre, A. Ramdane	06. 2009	Dynamika ładunku i własności optyczne w sprzężonych strukturach z tunelowaniem typu studnia kwantowa-kropka kwantowa przeznaczonych na obszar aktywny laserów telekomunikacyjnych przeznaczonych na 1,3 mikrom	XI Seminarium "Powierzchnia i Struktury Cienkowarstwowe" Szklarska Poręba
10	<b>M. Syperek</b> , D. R. Yakovlev, A. Greilich, J. Misiewicz, M. Bayer, D. Reuter, and A. Wieck	27.08– 8.09, 2007	"Spin coherence of holes in GaAs/AlGaAs quantum wells"	Magnetic Fields for Science. Cargese, Korsyka, Francja

### 3.6 Wykaz krajowych i międzynarodowych organizacji i towarzystw z którymi współpracuje habilitant

2010 r.-2015 r. - członek zwyczajny Akademii Młodych Uczonych i Artystów;

Od 2015 r. – do obecnie – członek wspierający Akademię Młodych Uczonych i Artystów;

Od 2012 r. – do obecnie – członek Polskiego Towarzystwa Fizycznego.

Od 2007 r. – na prawach absolwenta Deutscher Akademischer Austausch Dienst (DAAD).

## 3.7 Działalność dydaktyczna

### 3.7.1 Rola promotora pomocniczego w przewodach doktorskich

Dr Łukasz Dusanowski

Tytuł rozprawy: *“Dynamika nośników, statystyka emisji fotonów oraz dekoherencja fononowa w pojedynczych kreskach kwantowych emitujących w zakresie bliskiej podczerwieni”*.

Przewód zakończony - praca zrealizowana na Politechnice Wrocławskiej, Wydział Podstawowych Problemów Techniki w Laboratorium Optycznej Spektroskopii Nanostruktur w okresie 03.12.2013-28.09.2016.

### 3.7.2 Opieka nad realizacją prac magisterskich i inżynierskich

Łącznie zrealizowano 12 prac magisterskich.

Imię i nazwisko	Semest	Temat pracy
mgr. inż. Joanna Kita	<i>Letni i zimowy 2016/2017</i>	Pomiar pikosekundowych impulsów optycznych w podczerwieni w metodzie z dwu-fotonową absorpcją w detektorze InGaAs
mgr inż. Ernest Rogowicz	<i>Letni i zimowy 2016/2017</i>	Kinetyka nośników ładunku w półprzewodnikowych studniach kwantowych emitujących w zakresie średniej podczerwieni
mgr inż. Kajetan Fijałkowski	<i>Letni i zimowy 2014/2015</i>	Dynamika nośników ładunku i spinu w strukturach sprzężonych (In,Ga)As/GaAs
mgr inż. Anna Kubiak	<i>Letni i zimowy 2014/2015</i>	Badanie własności optycznych i dynamiki nośników ładunku w warstwach epitaksjalnych InGaAsN przeznaczonych na ogniwa słoneczne
mgr inż. Albert Ratajczak	<i>Letni i zimowy 2013/2014</i>	Dynamika ekscytynu w zespole słupków kwantowych (In,Ga)As/GaAs
mgr. Michał Studniarek	<i>Letni i zimowy 2012/2013</i>	Multifunctional Molecular Spintronics
Alex Sohrab	<i>Zimowy 2012/2013</i>	Photoluminescence Dynamics of Non-polar AlGaIn/GaN Superlattices Grown on m-plane GaN
mgr inż. Łukasz Dusanowski	<i>Letni i zimowy 2011/2012</i>	Emisja multiekscytonowa z pojedynczych wydłużonych kropek kwantowych (In, Ga)As/GaAs
mgr inż. Michał Studniarek	<i>Letni i zimowy 2011/2012</i>	Dynamika fotoluminescencji kropek kwantowych InAlGaAs z barierą z AlGaAs na podłożu z GaAs
mgr inż. Ugo Chapet	<i>Letni 2010/2011</i>	Carrier dynamics in tunnel injection structures
mgr inż. Przemysław Leszczyński	<i>Letni i zimowy 2009/2010</i>	Spektroskopia fotoluminescencyjna oraz rozdzielona w czasie fotoluminescencja sprzężonych struktur z tunelowaniem typustudnia kwantowa-kropki kwantowe
mgr inż. Jacek Sajkowski	<i>Letni i zimowy 2009/2010</i>	Spektroskopia fotoluminescencyjna oraz rozdzielona w czasie fotoluminescencja kropek kwantowych na bazie InP

Łącznie zrealizowano 9 prac inżynierskich w tym dwie we współpracy z Uniwersytetem w Cambridge:

- a) inż. Dominik Hamara *„Optically Pumped Organic – Metallic Halide Perovskite Distributed Feedback Laser – Designing, Fabrication, Characterization, Analysis”* promotor Dr inż. Marcin Syperek, promotor pomocniczy Dr Felix Deschler (Optoelectronics Group of the University of Cambridge);

- b) inż. Ernest Rogowicz “*Pomiar wzmocnienia optycznego terahercowego kwantowego wzmacniacza kaskadowego*” Promotor Dr inż. Marcin Syperek, promotor pomocniczy Yuan Ren (Optoelectronics Group of the University of Cambridge);

Imię i nazwisko	Semestr studiów	Temat pracy
inż. Dąbrówka Biegańska	Zimowy 2017/18	Dyfuzja nośników ładunku w strukturach sprzężonych typu studnia kwantowa - kropki kwantowe
inż. Maciej Klimkiewicz	Letni 2016/17	Dynamika ekscytonów w supersieciach AlInAsSb/GaSb typu-II
inż. Paulina Dałek	Zimowy 2015/16	Statystyka emisji ze źródła pojedynczych fotonów
inż. Dominik Hamara	Zimowy 2014/15	Optically Pumped Organic-Metallic Halide Perovskite Distributed Feedback Laser
inż. Ernest Rogowicz	Zimowy 2014/15	Pomiary wzmocnienia optycznego terahercowego kwantowego wzmacniacza optycznego
inż. Paweł Katolik	Zimowy 2013/2014	Fotoluminescencja półprzewodnika warstwowego ReS <sub>2</sub> :Nb
inż. Aleksandra Mańka	Zimowy 2013/2014	Fotoluminescencja i rozdzielona w czasie fotoluminescencja układu wielokrotnych studni kwantowych ZnO/(Zn, Mg)O na Si(111).
inż. Kajetan Fijałkowski	Letni 2012/2013	Dynamika fotoluminescencji w studniach kwantowych ZnO/ZnMgO
inż. Michał Studniarek	Zimowy 2010/2011	Fotoluminescencja i fotoluminescencja rozdzielona w czasie kropek kwantowych

### 3.7.3 Prowadzone wykłady, ćwiczenia i zajęcia laboratoryjne

Habilitant przygotował i zrealizował, bądź też realizuje, tematykę 6 wykładów dla studentów studiów I i II stopnia na Politechnice Wrocławskiej w skrócie opisanych w tabeli poniżej.

Typ wykładu	Tytuł	Tematyka
Wykład monograficzny w j. polskim	<i>Nowe metody eksperymentalne w nanoinżynierii</i>	Wprowadzenie do fizyki układów półprzewodnikowych w skali nano oraz do metod eksperymentalnych stosowanych w skali nano ze szczególnym naciskiem na metody spektroskopowe. Elementy optyki kwantowej, generatory pojedynczych fotonów, interfejs światła i materii. Wnęki rezonansowe i oddziaływanie emitera z modem wętki.
Wykład dla studentów II stopnia w j. angielskim	<i>Light Matter Interaction</i>	Fizyka ciała stałego. Oddziaływanie światła z materią.
Wykład dla studentów II stopnia w j. angielskim	<i>Optics of Solid States and Semiconductor Structures</i>	Optyka ciała stałego i nanostruktur półprzewodnikowych.
Wykład częściowo monograficzny dla studentów II stopnia w j. polskim	<i>Podstawy spintroniki</i>	Wstęp do spintroniki, zagadnienie spinu w atomach i ciele stałym, inicjalizacja, przechowywanie i odczyt spinu za pomocą metod elektrycznych i optycznych. Koherentna i niekoherentna relaksacja spinu, mechanizmy relaksacji spinu w układach o różnej wymiarowości. Wstęp do urządzeń spintronicznych.
Wykład dla studentów II stopnia w j. Polskim	<i>Zaawansowane metody spektroskopii optycznej</i>	Metod pomiaru kinetyki wzbudzenia w materiałach oddziałujących ze światłem. Generatory impulsów laserowych. Techniki spektroskopii rozdzielczej w czasie: fotoluminescencja klasyczna i bramkowana,

(częściowo monograficzny)		absorpcja przejściowa, mieszanie czterech fal, rotacja Kerra/Faradaya.
Wykład dla studentów I stopnia w j. polskim	<i>Fizyka ogólna I</i>	Wstęp do fizyki, mechanika newtonowska. Fale mechaniczne, akustyka.
Wykład dla studentów I stopnia w j. polskim	<i>Fizyka ogólna II</i>	Elektrostatyka, prąd elektryczny, magnetyzm, indukcja i indukcyjność, prąd przemienny, fala elektromagnetyczna i optyka falowa, elementy szczególnej teorii względności, elementy mechaniki kwantowej oraz fizyki ciała stałego.

Obok wykładów habilitant prowadzi ćwiczenia rachunkowe dla studentów I stopnia w ramach tematyki wykładów z fizyki ogólnej oraz laboratoria podstawowe dla studentów I stopnia i zaawansowane dla studentów II stopnia różnych wydziałów Politechniki Wrocławskiej. W ramach realizacji studiów przez studentów fizyki II stopnia na Wydziale Podstawowych Problemów Techniki Politechniki Wrocławskiej realizowane są specjalistyczne projekty badawcze, których habilitant był opiekunem. Projekty te wykorzystują infrastrukturę Laboratorium Optycznej Spektroskopii Nanostruktur w tym układy spektroskopowe skonstruowane przez habilitanta i opisane w rozdziale 2 autoreferatu. Projekty te są komplementarne do prowadzonych przez habilitanta wykładów i umożliwiają zastosowanie zdobytej wiedzy w praktyce.

### 3.8 Lista staży w zagranicznych ośrodkach naukowych

Okres trwania	Kraj/ośrodek	Zakres działalności
2005/01-2008/08	Dortmund, Niemcy, Uniwersytet w Dortmundzie, Grupa fizyki eksperymentalnej II (Prof. Manfred Bayer, Prof. D. Y. Yakovlev)	Badania dynamiki elektronu i dziury w studniach kwantowych na bazie GaAs. Koherentna dynamika spinu electron i dziury w studniach na bazie CdTe oraz GaAs.
2011/05-2011/08	Dortmund, Niemcy, Uniwersytet w Dortmundzie, Grupa fizyki eksperymentalnej II (Prof. Manfred Bayer, Prof. D. Y. Yakovlev)	Badania dynamiki elektronu i dziury w kropkach kwantowych InP/(Ga,In)P
2012/11-2012/12	Taipei, Taiwan, Narodowy Uniwersytet Nauki i Technologii, (Prof. Ying-Sheng Huang)	Badania dynamiki struktury pasmowej i nośników ładunku w kropkach kwantowych typu-II ZnSe/ZnTe

### 3.9 Udział w zespołach eksperckich i konkursowych

Członek panelu ekspertów oceniających wnioski w ramach Miejskiego Programu Wsparcia Partnerstwa Szkolnictwa Wyższego i Nauki oraz Sektora Aktywności Gospodarczej “Mozart” koordynowanego przez Wrocławskie Centrum Akademickie.

Przewodniczący zespołu oraz członek panelu ekspertów koordynowanego przez Wrocławskie Centrum Akademickie w ramach Studenckiego Programu Stypendialnego im. Maxa Borna dla wybitnych doktorantów w dziedzinie Fizyki, Optoelektroniki i Informatyki.

Członek panelu ekspertów oceniających wnioski w ramach Programu “Visiting Professors” koordynowanego przez Wrocławskie Centrum Akademickie.

### 3.10 Funkcja recenzenta w międzynarodowych czasopismach naukowych

Zakres recenzowanych treści dotyczy artykułów naukowych dotyczących dynamiki procesów optycznych zachodzących w niskowymiarowych strukturach półprzewodnikowych oraz urządzeń opartych o te struktury. W szczególności zjawisk towarzyszących dynamice elektronów i dziur, kulombowsko związanych par elektron-dziura i kompleksów pochodnych oraz dynamice spinu. W okresie po doktoracie wykonywano recenzje dla takich czasopism jak **Scientific Reports** (2 recenzje), **Journal of Applied Physics** (3 recenzje), **European Physical Journal – Applied Physics** (2 recenzje), oraz **IET Optoelectronics** (1 recenzja).

### 3.11 Współpraca zagraniczna

Współpraca zagraniczna bezpośrednio związana jest z realizowanymi projektami badawczymi opisanymi w paragrafie 3.3. Lista ośrodków z którymi habilitant ma współpracę to m.in.:

- Wrocław University of Science and Technology, Faculty of Fundamental Problems of Technology, Department of Theoretical Physics;
- Technische Physik, University of Würzburg & Wilhelm-Conrad-Röntgen-Research Center for Complex Material Systems, Würzburg, Niemcy;
- University of Kassel, Institute of Nanostructure Technologies and Analytics, Kassel, Germany;
- University of St. Andrews, School of Physics and Astronomy, St. Andrews, Scotland;
- Experimentelle Physik 2, Technische Universität Dortmund, Germany;
- Ioffe Physical-Technical Institute, Russian Academy of Sciences, St. Petersburg, Russia;
- III V Lab, Marcoussis, France;
- Department of Photonics Engineering, Technical University of Denmark, Lyngby, Denmark;
- National Taiwan University of Science & Technology, Department of Electronic Engineering, Taipei, Taiwan;
- Polish Academy of Science, Institute of High Pressure Physics, Warsaw, Poland;
- Stanford University, Solid State & Photonics Laboratory, Stanford, USA;
- University of Stuttgart, Stuttgart, Germany;
- National Research Council Canada, Institute of Microstructure Science, Ottawa, Canada;

### 3.12 Nagrody, stypendia i wyróżnienia

Nagrody i stypendia	Rok
Stypendium FNP w ramach programu „Mistrz” Prof. Arkadiusza Wójcisa.	2013
Nagroda Naukowa Rektora PWr im. Dionizego Smoleńskiego za wybitne osiągnięcia naukowe	2013
Stypendium Ministra Nauki i Szkolnictwa Wyższego dla Wybitnego Młodego Naukowca	2012
Stypendium Młoda Kadra 2015 Plus, Politechnika Wrocławska	2012
Stypendium Młoda Kadra PWr edycja V, Politechnika Wrocławska	2011
Stypendium Młoda Kadra PWr edycja IV, Politechnika Wrocławska	2011



Nagroda Rektora za istotny wkład w rozwój Politechniki Wrocławskiej	<b>2011</b>
Stypendium Konferencyjne FNP i Towarzystwa Naukowego Warszawskiego	<b>2010</b>
Nagroda Rektora za istotny wkład w rozwój Politechniki Wrocławskiej	<b>2010</b>
Stypendium FNP w ramach programu START	<b>2009</b>
Wyróżnienie za najlepszą pracę doktorską, Politechniki Wrocławskiej	<b>2008</b>
Stypendium DAAD (Uniwersytet w Dortmundzie)	<b>2007</b>

*Maciej Sypuch*