

# AUTOREFERAT

## Modelowanie wybranych właściwości optycznych struktur półprzewodnikowych związków III-V

dr inż. Marta Gładysiewicz-Kudrawiec  
5 września 2016

### Spis treści

1. Dane personalne .....	2
2. Wykształcenie, stopnie naukowe oraz informacje o dotychczasowym zatrudnieniu, stażach naukowych, działalności dydaktycznej i organizacyjnej .....	2
3. Analiza dorobku naukowego .....	4
4. Wykaz wygłoszonych referatów na międzynarodowych konferencjach .....	4
5. Kierowanie i udział w projektach badawczych .....	5
6. Osiągnięcie naukowe stanowiące przedmiot habilitacji	
6.1 Wykaz opublikowanego cyklu artykułów stanowiących osiągnięcie naukowe .....	6
6.2 Omówienie publikacji na temat wzmocnienia materiałowego w studniach kwantowych .....	9
6.3 Omówienie publikacji na temat wyznaczania rozkładu pól elektrycznych w heterostukturach AlGaIn/GaN .....	12
6.4 Omówienie publikacji na temat wpływu niejednorodności struktur półprzewodnikowych na ich właściwości optyczne .....	15
7. Podsumowanie .....	17

## 1. Dane personalne

Imiona i nazwisko: Marta Aleksandra Gładysiewicz-Kudrawiec  
(w publikacjach Marta Gładysiewicz)  
Adres: Katedra Fizyki Doświadczalnej, Wydział Podstawowych  
Problemów Techniki, Politechnika Wroclawska  
ul. Wybrzeże S. Wyspiańskiego 27, 50-370 Wrocław,  
Tel.: +48 71 320 42 80, Fax: +48 71 328 36 90  
E-mail: [marta.gladysiewicz@pwr.edu.pl](mailto:marta.gladysiewicz@pwr.edu.pl)

Data urodzenia: 28 czerwca 1975  
Miejsce urodzenia: Wrocław, Polska  
Obywatelstwo: Polskie  
Stan cywilny: Zamężna; Dzieci: Jan, Małgorzata, Andrzej;

## 2. Wykształcenie, stopnie naukowe oraz informacje o dotychczasowym zatrudnieniu i stażach naukowych, działalności dydaktycznej i organizacyjnej

### **Stopnie naukowe:**

Doktora: Instytut Fizyki, Politechnika Wroclawska, 27 listopada 2003;  
Rozprawa doktorska: „*Rola anizotropii i mechanizmów oddziaływania w układach nadprzewodzących*” (obrona z wyróżnieniem);  
Magistra inż.: Wydział Podstawowych Problemów Techniki, Politechnika Wroclawska, maj 1999;  
Praca dyplomowa: „*Własności termodynamiczne układów nadprzewodzących BCS typu s dla modelowych postaci gęstości stanów*” (obrona z wyróżnieniem);

### **Zatrudnienie oraz zajmowane stanowiska:**

- XI 2015 – do dzisiaj: Adiunkt w Katedrze Fizyki Doświadczalnej, Wydział Podstawowych Problemów Techniki, Politechnika Wroclawska;
- X 2007 – X 2015: Adiunkt w Instytucie Fizyki Politechniki Wroclawskiej;
- I 2004 – IX 2007: Asystent w Instytucie Fizyki Politechniki Wroclawskiej;
- X 1999 – XII 2003: Studia doktoranckie w Instytucie Fizyki Politechniki Wroclawskiej;
- X 1994 – VI 1999: Studia magisterskie na Wydziale Podstawowych Problemów Techniki Politechniki Wroclawskiej; spec. Fizyka Ciała Stałego;

### **Krótkoterminowe staże oraz wizyty naukowe:**

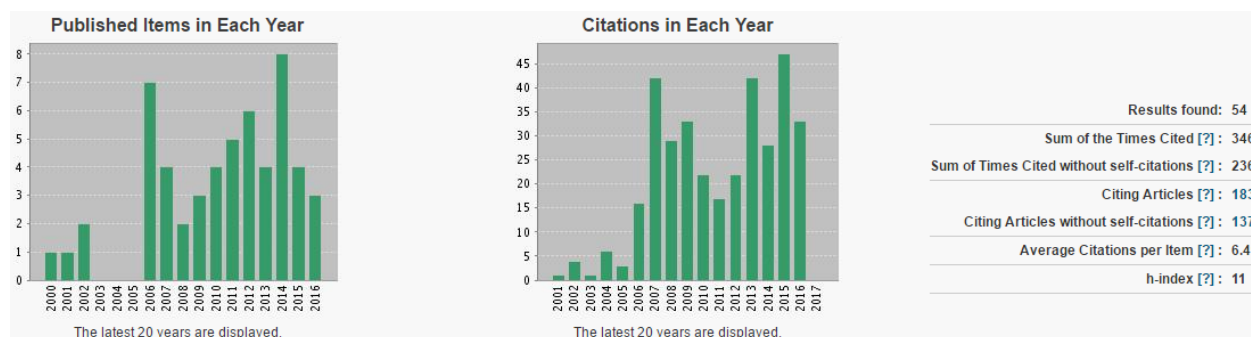
- VIII 2014 – Department of Physics and Computer Science, Wilfrid Laurier University, Waterloo, Kanada;
- VII-IX 2013 – Laurence Berkeley National Laboratory, USA;
- VII-IX 2012 – Laurence Berkeley National Laboratory, USA;
- IX-XII 2010 – Department of Physics and Computer Science, Wilfrid Laurier University, Waterloo, Kanada;

***Działalność dydaktyczna i organizacyjna:***

- Fizyka ogólna: wykłady, ćwiczenia i laboratoria;
- Kursy specjalistyczne: Delphi dla fizyków (wykład i laboratorium); Programowanie w Object Pascalu; Podstawy programowania obiektowego; Wprowadzenie do mechaniki kwantowej; Fizyka komputerowa dla inżynierów; Programowanie w Fortranie; Podstawy metod numerycznych; Programowanie w języku c - pierwszy poziom; Programowanie w języku c - drugi poziom; Projektowania materiałów i struktur (laboratorium);
- Promotorstwo prac licencjackich i magisterskich: 2 prace inżynierskie oraz 2 prace magisterskie;
- Propagowanie nauki w ramach Dolnośląskiego Festiwalu Nauki;
- Pomoc w organizacji i przeprowadzeniu Międzyszkolnego Konkursu Fizycznego we Wrocławiu;

### 3. Analiza dorobku naukowego

Na dzień 5 września 2016 roku zgodnie z bazą *ISI Web of Science* dorobek naukowy kandydatki obejmuje 54 publikacje z czego 50 powstało po doktoracie. Spośród 50 prac opublikowanych po doktoracie 17 prac są to prace konferencyjne, a 33 prac są to artykuły w takich czasopismach jak *Journal of Applied Physics* (11), *Applied Physics Letters* (9), *IEEE Journal of Quantum Electronics* (2), *Journal of Physics D* (2), *Physical Review B* (1), *Physical Review Applied* (1), *Journal of Physics: Condensed Matter* (1), *Applied Physics A* (1), *Thin Solid Films* (1), *Solid State Communications* (1), *Physica Status Solidi (a)* (1). Analiza dorobku za poszczególne lata przedstawiona jest poniżej.



Sumaryczny impact factor: ~85

Liczba cytowań (bez autocytowań): 236

Index Hirsha: 11

### 4. Wykaz wygłoszonych referatów na międzynarodowych konferencjach oraz seminariach naukowych

Po doktoracie wyniki badań prezentowałam na 17 międzynarodowych konferencjach w postaci plakatów (15) oraz referatów (9 w tym dwa referaty zaproszone). Ponadto wyniki swoich badań prezentowałam na odpowiednich seminariach naukowych. Tytuły i miejsca ważniejszych wystąpień ustnych przedstawione są poniżej.

- *Electronic band structure and material gain of III-V-Bi quantum wells grown on GaAs, InP and GaSb substrates*, 8<sup>th</sup> International Conference on Low Dimensional Structures and Devices, Mayan Riviera, Mexico, August 28 - September 2, 2016 (oral).
- *Material gain in dilute nitrides materials using 8-band and 10-band models*, Energy Materials Nanotechnology - Summer 2015, Cancun-Mexico, 15-19 June 2015 (invited).
- *Electronic band structure and material gain of Ga(In)BiAs/GaAs quantum wells grown on GaAs calculated with 14-band and 8-band kp model*, Workshop of bismuth-contacting semiconductors, Madison-Wisconsin, 19-22 July 2015 (oral).
- *Theoretical calculations of electronic band structure and material gain of III-V-Bi quantum wells grown on GaAs, InP, and GaSb substrates*, Compound Semiconductor Week, Santa Barbara – USA, June 28-July 2 2015 (oral).

- *Influence of AlN layer on electric field distribution in GaN(cap)/AlGaIn/GaN transistor heterostructures*, International Workshop on Nitrides 2014, Wrocław-Poland, 24-29 August 2014 (invited).
- *Distribution of built-in electric field in AlGaIn/GaN transistor heterostructures: The role of surface states*, 10<sup>th</sup> International Conference on Nitride Semiconductors, Washington-USA, 25-30 August 2013 (oral).
- *The influence of inhomogeneities on broadening of fundamental transition in polar and nonpolar InGaIn quantum wells dedicated for green emitters*, Spring Meeting of the European-Materials-Research-Society, Nicea-France, 09-13 Maj 2011 (oral).
- *Hydrostatic pressure tuning of emission wavelength and optical gain in GaInNAs/GaAs quantum wells*, V workshop on physics and technology of semiconductor lasers, Kraków-Poland, 17-20 November 2013 (oral).
- *Electronic band structure and optical gain of dilute nitrides quantum wells*, Seminar at the Department of Physics and Computer Science, Wilfrid Laurier University, Waterloo 19 August 2014 (oral).

## 5. Kierowanie i udział w projektach badawczych

- *Struktura pasmowa, wzmocnienie optyczne oraz inne parametry nowoczesnych laserów półprzewodnikowych*, grant SONATA BIS z NCN na lata 2014-2019 (1 455 700 PLN) – kierownik.
- *Inżynieria pasm w związkach Ge(Si)Sn i ich niskowymiarowych heterostrukturach przeznaczonych do zastosowań laserowych*, grant OPUS 5 z NCN na lata 2014-2016 (690 160 PLN) – kierownik.
- *Położenie poziomu Fermiego na powierzchni GaN oraz rozkład pól elektrycznych w heterostrukturach AlGaIn/GaN osadzanych na podłożach GaN o różnej orientacji krystalograficznej*, grant OPUS z NCN na lata 2012-2015 (599 200 PLN) – główny wykonawca.
- *Pomiary i obliczenia wzmocnienia optycznego w wybranych półprzewodnikowych strukturach laserowych*, grant własny MNiSzW (39 konkurs) na lata 2010-2012 (198 000 PLN) – kierownik.
- *Nowe materiały z grupy III-V-N przeznaczone na lasery, wzmacniacze oraz inne przyrządy półprzewodnikowe: Własności fizyczne- charakteryzacja optyczna*, grant MNiSzW na projekt międzynarodowy niewspółfinansowany COST na lata 2009-2012 (625 400 PLN) – główny wykonawca.
- *Wpływ stanów powierzchniowych oraz głębokich poziomów defektowych na położenie poziomu Fermiego w wybranych materiałach i strukturach półprzewodnikowych grupy III-V*, grant własny MNiSzW (35 konkurs) na lata 2008-2010 (198 000 PLN) – główny wykonawca.
- *Kwantowe nanostruktury półprzewodnikowe do zastosowań w biologii i medycynie (NANOBIOM)*, projekt kluczowy w ramach Programu Innowacyjna Gospodarka realizowany w latach 2007-2014 – wykonawca.

## 6. Osiągnięcie naukowe stanowiące przedmiot habilitacji

Po obronie doktoratu 27 listopada 2003 roku na temat teorii nadprzewodnictwa (praca zatytułowana *Własności termodynamiczne układów nadprzewodzących typu BCS dla modelowych postaci gęstości stanów* wykonana pod opieką prof. Ryszarda Gonczarka) przez dwa lata kontynuowałam tematykę z doktoratu i w ramach tej tematyki opublikowałam dwie prace oraz jedną monografię zatytułowaną *Scenariusz Van Hove'a w nadprzewodnictwie wysokotemperaturowym*, wydaną przez Oficynę Wydawniczą Politechniki Wrocławskiej w 2004. Równolegle zaczęłam zajmować się obliczeniami teoretycznymi w strukturach półprzewodnikowych. Moje prace w tym zakresie koncentrowały się wokół zagadnień, które były badane eksperymentalnie w laboratorium OSN kierowanym przez prof. Jana Misiewicza. Tak jest do tej pory. Moje badania koncentrują wokół problemów teoretycznych, które są bardzo bliskie takim przyrządom półprzewodnikowym jak lasery lub tranzystory, a ostatnio ogniwa słoneczne. Dotyczą one układów materiałowych, które badane są w laboratorium Optycznej Spektroskopii i Nanostruktur i dlatego mogą być bezpośrednio konfrontowane z wynikami eksperymentalnymi. Tak jest w przypadku analizy rozkładu pól elektrycznych w heterostrukturach AlGaIn/GaN lub wpływu niejednorodności struktury na właściwości optyczne. W przypadku obliczeń wzmocnienia optycznego takie pomiary zostały uruchomione w ramach grantu MNiSzW zatytułowanego *Pomiary i obliczenia wzmocnienia optycznego w wybranych półprzewodnikowych strukturach laserowych*, którego byłam kierownikiem, a obecnie takie pomiary oraz inne badania eksperymentalne rozwijane w ramach grantu Sonata Bis (*Struktura pasmowa, wzmocnienie optyczne oraz inne parametry nowoczesnych laserów półprzewodnikowych*), którego jestem kierownikiem. W tym wypadku również liczę na konfrontację wyników teoretycznych z badaniami eksperymentalnymi. Taka możliwość będzie w przypadku studni kwantowych InGaIn/GaN do których mamy dostęp dzięki współpracy z grupą prof. Czesława Skierbiszewskiego z Instytutu Wysokich Ciśnień Polskiej Akademii Nauk.

Osiągnięciem naukowym stanowiącym przedmiot habilitacji jest cykl 15-stu publikacji na temat analizy wybranych właściwości dla struktur półprzewodnikowych grupy III-V. W ramach tej tematyki po doktoracie opublikowałam ponad 46 prac (w tym 11 prac w *Journal of Applied Physics* oraz 9 prac w *Applied Physics Letters*). W ramach habilitacji ograniczyłam się do cyklu 15-stu wybranych prac w których jestem pierwszym autorem i w których mój wkład jest dominujący, a wkład pozostałych autorów ma charakter pomocniczy i nie będzie wykorzystany do ich własnego awansu naukowego. Skupiłam się na trzech zagadnieniach z tej tematyki tj. obliczeniach wzmocnienia materiałowego w studniach kwantowych (6 prac), rozkładzie pól elektrycznych w heterostrukturach AlGaIn/GaN (5 prace) oraz wpływie niejednorodności struktury na właściwości optyczne (4 prace).

### 6.1 Wykaz opublikowanego cyklu artykułów stanowiących osiągnięcie naukowe

#### Wzmocnienie materiałowe w studniach kwantowych

[H1] M. Gładysiewicz, R. Kudrawiec, J. M. Miloszewski, P. Weetman, J. Misiewicz, and M. S. Wartak, *Band structure and the material gain of GaInNAs/GaAs quantum wells modeled within 10-band and 8-band kp model*, J. Appl. Phys. 113, 063514 (2013). IF=2.28

Mój wkład do publikacji [H1] polegał na zaproponowaniu modelu, wykonaniu obliczeń teoretycznych oraz napisaniu manuskryptu. Mój udział procentowy oceniam na 70%.

[H2] **M. Gładysiewicz**, R. Kudrawiec, and M. S. Wartak, *Theoretical studies of optical gain tuning by hydrostatic pressure in GaInNAs/GaAs quantum wells*, J. Appl. Phys. 115, 033515 (2014). IF=2.28

[H3] **M. Gładysiewicz**, R. Kudrawiec, and M. S. Wartak, *Material Gain in  $Ga_{0.66}In_{0.34}N_yAs_{1-y}$ ,  $GaN_yAs_{0.69-y}Sb_{0.31}$ , and  $GaN_yPo_{0.46}Sb_{0.54-y}$  Quantum Wells Grown on GaAs Substrates: Comparative Theoretical Studies*, IEEE Journal of Quantum Electronics 50, 996 (2014). IF=1.89

[H4] **M. Gładysiewicz**, R. Kudrawiec, and M. Wartak, *Electronic Band Structure and Material Gain of Dilute Nitride Quantum Wells Grown on InP Substrate*, IEEE Journal of Quantum Electronics 51 (2015). IF=1.89

[H5] **M. Gładysiewicz**, R. Kudrawiec, and M. S. Wartak, *8-band and 14-band  $kp$  modeling of electronic band structure and material gain in Ga(In)AsBi quantum wells grown on GaAs and InP substrates*, J. Appl. Phys. 118, 055702 (2015). IF=2.28

[H6] **M. Gładysiewicz**, R. Kudrawiec, and M. S. Wartak, *Electronic band structure and material gain of III-V-Bi quantum wells grown on GaSb substrate and dedicated for mid infrared spectral range*, J. Appl. Phys. 119, 075701 (2016). IF=2.28

Mój wkład do publikacji [H2-H6] polegał na zaproponowaniu układu materiałowego do badań, wykonaniu obliczeń teoretycznych oraz napisaniu manuskryptu. Mój udział procentowy oceniam na 80% w każdej z tych prac.

#### Rozkład pól elektrycznych w heterostrukturach AlGaIn/GaN

[H7] **M. Gładysiewicz**, R. Kudrawiec, J. Misiewicz, G. Cywinski, M. Siekacz, P. Wolny, and C. Skierbiszewski, *The surface boundary conditions in GaN/AlGaIn/GaN transistor heterostructures*, Appl. Phys. Lett. 98 231902 (2011). IF=3.57

[H8] **M. Gładysiewicz**, L. Janicki, J. Misiewicz, M. Sobanska, K. Klosek, Z.R. Zytikiewicz, and R. Kudrawiec, *Engineering of electric field distribution in GaN(cap)/AlGaIn/GaN heterostructures: Theoretical and experimental studies*, J. Phys. D (2016). IF=2.72

[H9] **M. Gładysiewicz**, R. Kudrawiec, J. Misiewicz, K. Klosek, M. Sobanska, J. Borysiuk, and Z. R. Zytikiewicz, *Influence of AlN layer on electric field distribution in GaN/AlGaIn/GaN transistor heterostructures*, J. Appl. Phys. 114, 163527 (2013). IF=2.28

[H10] **M. Gładysiewicz**, L. Janicki, M. Siekacz, G. Cywinski, C. Skierbiszewski, and R. Kudrawiec, *Theoretical and experimental studies of electric field distribution in N-polar GaN/AlGaIn/GaN heterostructures*, Appl. Phys. Lett. 107, 262107 (2015). IF=3.57

Mój wkład do publikacji [H7-H11] polegał na interpretacji wyników eksperymentalnych, wykonaniu obliczeń teoretycznych oraz napisaniu manuskryptu. Mój udział procentowy oceniam na 60% w każdej z tych prac.

[H11] **M. Gładysiewicz** and R. Kudrawiec, *Quantum Confinement in Thin GaN Cap Layers Deposited on AlGaIn/GaN Heterostructures: The Issue of Polar Surface Quantum Well*, Jap. J. Appl. Phys. 52, 08JL05 (2013). IF=1.13

Mój wkład do publikacji [H12] polegał na zaproponowaniu modelu, wykonaniu obliczeń teoretycznych oraz napisaniu manuskryptu. Mój udział procentowy oceniam na 90%.

#### Wpływ niejednorodności struktury na właściwości optyczne

[H12] **M. Gładysiewicz**, R. Kudrawiec, J. Misiewicz, G. Cywiński, M. Siekacz, C. Skierbiszewski, *Broadening of intersubband and interband transitions in InGaIn/AlInN multi-quantum wells*, J. Phys. D: Appl. Phys. 43 195101 (2010). IF=2.72

Mój wkład do publikacji [H13] polegał na interpretacji wyników eksperymentalnych, wykonaniu obliczeń teoretycznych oraz napisaniu manuskryptu. Mój udział procentowy oceniam na 60%.

[H13] **M. Gładysiewicz** and R. Kudrawiec, *Random approach to determine the broadening of intersubband and interband transitions in (In)GaIn/Al(In)N quantum wells*, Journal of Physics: Condensed Matter 22 485801 (2010). IF=2.35

Mój wkład do publikacji [H14] polegał na zaproponowaniu modelu, wykonaniu obliczeń teoretycznych oraz napisaniu manuskryptu. Mój udział procentowy oceniam na 90%.

[H14] **M. Gładysiewicz** and R. Kudrawiec, *Theoretical studies of the influence of structural inhomogeneities on the radiative recombination time in polar InGaN quantum wells*, Phys. Status Solidi (a) 209, 752 (2012). IF=1.61

Mój wkład do publikacji [H15] polegał na zaproponowaniu modelu, wykonaniu obliczeń teoretycznych oraz napisaniu manuskryptu. Mój udział procentowy oceniam na 90%.

[H15] **M. Gładysiewicz**, R. Kudrawiec, M. Syperek, J. Misiewicz, M. Siekacz, G. Cywinski, A. Khachapuridze, T. Suski, C. Skierbiszewski, *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*, Applied Physics A: Materials Science and Processing 115, 1015 (2014). [IF=1.70].

Mój wkład do publikacji [H15] polegał na zaproponowaniu modelu do interpretacji wyników eksperymentalnych, wykonaniu obliczeń teoretycznych oraz napisaniu manuskryptu. Mój udział procentowy oceniam na 50%.

Oświadczenia współautorów, określające indywidualny wkład każdego z nich w powstanie wyżej wymienionych publikacji znajdują się są w załączniku „Oświadczenia współautorów”.



## 6.2 Omówienie publikacji na temat wzmocnienia materiałowego w studniach kwantowych

Studnie kwantowe są obszarem czynnym w nowoczesnych laserach półprzewodnikowych. Znajomość wzmocnienia materiałowego (optycznego) jest podstawową cechą która mówi nam o tym czy dana studnia kwantowa nadaje się na obszar czynny w danej konstrukcji laserowej czy też nie. Chodzi tutaj zarówno o wartość tego wzmocnienia jak i jego zależność spektralną. Dlatego obliczenia wzmocnienia materiałowego stanowią bardzo ważny element w projektowaniu nowoczesnych struktur laserowych. Tego typu obliczenia przeprowadziłam dla studni kwantowych wykonanych na bazie nowych związków półprzewodnikowych takich jak półprzewodniki grupy III-V rozrzedzone azotem (ang. dilute nitrides) oraz półprzewodniki grupy III-V rozrzedzone bizmutem (ang. dilute bismides). Wybór tej grupy materiałowej wynikał z nietypowej struktury pasowej dla tego typu związków, która była wyzwaniem dla obliczeń teoretycznych, oraz braku publikacji na temat wzmocnienia optycznego w studniach kwantowych wykonanych na bazie tego typu materiałów z wyłączeniem studni kwantowych GaInNAs/GaAs.<sup>1</sup> W ramach prac wykonanych dla tych związków został zaproponowany i przeanalizowany odpowiedni model [H1, H2, H5] oraz rozwiązany problem materiałowy polegający na doborze odpowiednich składów studni dla struktur laserowych osadzanych na podłożu GaAs [H3, H5], InP [H4, H5] oraz GaSb [H6]. Najważniejsze elementy prac [H1-H6], a w tym istotne elementy zaproponowanych modeli oraz zagadnienia materiałowe omówiono poniżej.

Azot w półprzewodnikach grupy III-V rozrzedzanych azotem pełni szczególną rolę z tego względu, że obniża przerwę energetyczną przy jednoczesnej redukcji stałej sieciowej kryształu. Jest to najważniejsza cecha tego typu związków dlatego, że jak dotąd nie były znane materiały półprzewodnikowe z grupy III-V w których można było uzyskać redukcję przerwy energetycznej przy jednoczesnym zmniejszeniu stałej sieciowej. Tego typu właściwość związku półprzewodnikowego jest niezmiernie ważna w przyrządach półprzewodnikowych dlatego, że stała sieciowa podłoża narzuca duże ograniczenie jeżeli chodzi o skład związku a tym samym jego przerwę energetyczną, naprężenia oraz nieciągłość pasm na złączach półprzewodnikowych. Niewielka ilość azotu dzięki swym nietypowym właściwościom w matrycy III-V pozwala ominąć wiele problemów związanych ze zbyt dużą wartością przerwy energetycznej bądź też ze zbyt dużymi naprężeniami. Wprowadzenie kilku procent azotu do związków III-V osadzanych na podłożach GaAs oraz InP umożliwia uzyskanie materiału półprzewodnikowego pokrywającego bardzo szeroki zakres spektralny tak jak przedstawiono to w pracach [H3, H4].

Kluczowym problemem w policzeniu wzmocnienia materiałowego dla studni kwantowych na bazie związków III-V rozrzedzanych azotem jest prawidłowe wyznaczenie dyspersji energetycznej dla poziomów energetycznych w studni kwantowej. Jak już wspomniano cechą charakterystyczną tych związków jest nietypowa struktura pasmowa, a dokładnie nieparaboliczna dyspersja pasma przewodnictwa.<sup>2</sup> Do opisu tej dyspersji można wykorzystać model nieprzecinających się pasm (ang. band anticrossing model)<sup>3</sup>, który zakłada, że atomy azotu tworzą poziom rezonansowy w paśmie przewodnictwa matrycy III-V. Na skutek oddziaływania poziomu rezonansowego z pasmem przewodnictwa mamy do czynienia z dwoma pasmami w paśmie przewodnictwa o mocno nieparabolicznym charakterze. Do opisu oddziaływań między tymi pasmami potrzebna jest

---

<sup>1</sup> M. Kondow, K. Uomi, A. Niwa, T. Kikatan, S. Watahiki, and Y. Yazawa, Jpn. J. Appl. Phys., Part 1 35, 1273 (1996), oraz referencje w pracy [H1].

<sup>2</sup> M. Henini, *Dilute Nitride Semiconductors* (Elsevier Ltd, Oxford, 2005).

<sup>3</sup> W. Shan, W. Walukiewicz, J.W. Ager, III, E.E. Haller, J.F. Geisz, D.J. Friedman, J.M. Olson, and S.R. Kurtz, Phys. Rev. Lett. 82, 1221 (1999).

znajomość parametrów, które można wyznaczyć eksperymentalnie. W przypadku zwykłych półprzewodników III-V do opisu dyspersji energetycznej w pobliżu środka strefy Brillouina można zastosować model *kp* i aby znaleźć dyspersje pasma przewodnictwa oraz pasm walencyjnych z uwzględnieniem oddziaływań między tymi pasmami można zastosować 8-mio pasmowy model *kp*. W przypadku półprzewodników III-V rozrzedzonych azotem naturalnym rozwinięciem modelu 8-mio pasmowego jest model 10-cio pasmowy, który uwzględnia oddziaływanie z poziomem azotowym. Tego typu model został opisany oraz porównany z modelem 8-mio pasmowy w pracy [H1] gdzie szczegółowo przeanalizowano studnię kwantową GaInNAs/GaAs, tj. układ materiałowy, który jak dotąd był bardzo intensywnie badany eksperymentalnie. W ramach tej pracy wykazano różnice pomiędzy modelami oraz szczegółowo je przedyskutowano. W pracy [H2] wykazano, że do wytłumaczenia wyników eksperymentalnych, tj. spadku wzmocnienia optycznego dla studni kwantowej GaInNAs/GaAs wraz ze wzrostem ciśnienia hydrostatycznego<sup>4</sup>, konieczne jest zastosowanie modelu 10-cio pasmowego, ponieważ efekt ten związany jest przede wszystkim ze zmianami w paśmie przewodnictwa, które bardzo mocno zależą od ciśnienia hydrostatycznego i w modelu 8-mio pasmowym nie są właściwie opisane.

Słabą stroną modelu 10-cio pasmowego jest znajomość parametrów opisujących oddziaływanie pomiędzy poziomem azotowym, a pasmem przewodnictwa matrycy w związkach czteroskładnikowych. Problem ten dla materiału GaInNAs był dyskutowany w pracy [H1]. W przypadku takich materiałów jak GaNAsSb lub GaNPSb problem ten jest dużo większy i dlatego w tym wypadku wskazane jest wykorzystanie modelu 8-mio pasmowego, który bazuje na wyznaczeniu przerwy energetycznej dla tego typu materiałów na podstawie parametryzacji zaproponowanej w pracach<sup>5</sup> oraz<sup>6</sup>. Tego typu podejście zastosowano w pracach [H3, H4] do obliczenia wzmocnienia optycznego dla studni kwantowych III-V-N osadzanych na podłożu GaAs [H3] oraz InP [H4]. W przypadku studni kwantowych III-V osadzanych na podłożu GaAs wykazano, że studnie kwantowe GaNAsSb/GaAs oraz GaNPAs/GaAs wykazują się dostatecznie dużym wzmocnieniem materiałowym, a ponadto przy tej samej zawartości azotu można uzyskać emisję przy dłuższych falach niż dla studni kwantowych GaInNAs/GaAs i jest to bardzo obiecujący obszar aktywny do laserów emitujących światło w oknie telekomunikacyjnym 1.55 $\mu$ m [H3]. Dla studni kwantowych osadzanych na podłożu InP przeanalizowano trzy obszary aktywne tj. GaInNAs, GaNAsSb oraz GaNPSb z różnymi barierami dopasowanymi sieciowo do InP i wskazano rozwiązania materiałowe z dodatnim wzmocnieniem materiałowym. W tym wypadku obserwowano, że proponowane rozwiązania materiałowe są w stanie pokryć zakres spektralny ~2.0-3.5 $\mu$ m [H3].

W przypadku półprzewodników grupy III-V rozrzedzonych bizmutem mamy do czynienia z podobną sytuacją jak w półprzewodnikach III-V rozrzedzonych azotem jeżeli chodzi o opis struktury pasmowej tj. można tutaj zastosować model niekrzyżujących się pasm z tą różnicą, że poziom rezonansowy pojawia się w paśmie walencyjnym, a nie w paśmie przewodnictwa tak jak ma to miejsce w półprzewodnikach III-V rozrzedzonych azotem. Ze względu na fakt, że bizmut opisany jest trzema poziomami podwójnie zdegenerowanymi, do opisu dyspersji pasm w pobliżu środka strefy Brillouina dla półprzewodników III-V rozrzedzonych bizmutem można zastosować 14-sto pasmowy model *kp* w miejsce 8-mio pasmowego modelu *kp*, który powszechnie stosuje się do

---

<sup>4</sup> A. Bercha, F. Dybala, K. Komorowska, P. Adamiec, R. Bohdan, W. Trzeciakowski, J.A. Gupta, P.J. Barrios, G. Pakulski, A. Delage, and Z.R. Wasilewski, Proceeding SPIE 5722, 565 (2005).

<sup>5</sup> R. Kudrawiec, J. Appl. Phys. 101, 023522 (2007).

<sup>6</sup> R. Kudrawiec, J. Appl. Phys. 101, 116101 (2007).

opisu struktury pasmowej dla materiałów bez bizmutu. Ponadto jak wykazano w pracy<sup>7</sup> dodanie bizmutu do GaAs również zmienia położenie pasma przewodnictwa. Model uwzględniający oddziaływanie poziomów bizmutu z pasmami walencyjnymi oraz zmianę położenia pasma przewodnictwa na skutek dodania bizmutu do matrycy III-V został zaproponowany i opisany w pracy [H5], a następnie wykorzystany do policzenia wzmocnienia materiałowego dla studni kwantowych GaInAsBi osadzanych na podłożu GaAs oraz InP. W ramach tej pracy wykazano, że studnie kwantowe GaInAsBi/GaAs posiadają dobre wzmocnienie materiałowe, które można stroić spektralnie w zakresie od  $\sim 1.3\mu\text{m}$  do  $\sim 1.5\mu\text{m}$  zmieniając zawartość bizmutu od 3% do 5%. Dla studni kwantowych GaInAsBi osadzanych na podłożu InP zwiększanie zawartości bizmutu od 0 do 5% przy zachowaniu takich samych naprężeń w studni (tj.  $\varepsilon=2\%$ ) przesunęła spektralnie wzmocnienie materiałowe od  $\sim 2\mu\text{m}$  do  $\sim 4\mu\text{m}$  [H5].

W przypadku półprzewodników grupy III-V rozrzedzanych azotem lub bizmutem znanym problemem jest pogarszanie się jakości optycznej materiału wraz ze wzrostem zawartości azotu lub bizmutu. Zagadnienie to dyskutowane jest w odpowiednich pracach [H1, H3-H5]. Jednak w przypadku materiału GaSb rozrzedzanego bizmutem spodziewamy się, że ten efekt będzie dużo słabszy dlatego, że atomy antymonu i bizmutu są do siebie bardzo podobne, a co za tym idzie związek GaSbBi będzie wykazywał cechy podobieństwa wspólne z innymi związkami mieszanymi grupy III-V<sup>8</sup> i w związku z tym będzie można stosować model 8-mio pasmowy do opisu struktury pasmowej wokół punktu  $\Gamma$  strefy Bruillina. Dla laserów na bazie GaSb znanym problemem jest płytka studnia potencjału w paśmie walencyjnym. Dodając arsen do studni kwantowej GaInSb/GaSb emisja ze studni przesunęła się w stronę dłuższych fal na skutek redukcji przerwy energetycznej związku GaInAsSb oraz redukcji naprężeń w studni. Jednak przy przekroczeniu pewnej zawartości arsenu studnia kwantowa GaInAsSb/GaSb staje się II-giego typu co jest bardzo niekorzystne jeżeli chodzi o zastosowanie w laserach. W związku z tym wskazanym rozwiązaniem jest poszukiwanie składnika który pozwoli zwiększyć potencjał wiążący w paśmie walencyjnym. Jak wykazano w pracy [H6] takim elementem jest bizmut. Do policzenia struktury pasmowej oraz wzmocnienia materiałowego dla studni kwantowych III-V-Bi osadzanych na podłożu GaSb zastosowano 8-mio pasmowy model *kp*. Zmiany w strukturze pasmowej wywołane rozmieszczeniem atomów bizmutu dla związków trójskładnikowych zostały wzięte za pracę<sup>8</sup>. Dla związków cztero- i pięcio-składnikowych III-V-Bi zaproponowano odpowiednią interpolację [H6] i na tej podstawie policzono strukturę pasmową oraz wzmocnienie materiałowe dla studni kwantowych GaSbBi/GaSb, GaInSbBi/GaSb oraz GaInAsSbBi/GaSb. Dodatkowo dla studni kwantowych GaInAsSbBi rozważono różne bariery dopasowane sieciowo do GaSb. Na podstawie tych obliczeń wykazano, że dodanie bizmutu do studni kwantowych na bazie GaSb jest bardzo obiecującym rozwiązaniem mającym na celu przesunięcie emisji w stronę średniej podczerwieni przy jednoczesnym zachowaniu I-szego typu charakteru studni kwantowej [H6].

Podsumowując przytoczone prace na temat obliczeń struktury pasmowej oraz wzmocnienia materiałowego dla studni kwantowych wykonanych na bazie półprzewodników grupy III-V rozrzedzanych azotem oraz bizmutem można stwierdzić, że stanowią one cykl publikacji, które są systematyczne i dużo wnoszą do literatury przedmiotu zarówno pod względem rozwoju modelu do obliczeń struktury pasmowej oraz wzmocnienia materiałowego w tego typu materiałach jak i pod względem poszukiwań nowych studni kwantowych na obszary czynne w laserach półprzewodnikowych pokrywających różne zakresy spektralne. Jest to tematyka, którą zajęłam się

---

<sup>7</sup> R. Kudrawiec, J. Kopaczek, M. P. Polak, P. Scharoch, M. Gladysiewicz, J. Misiewicz, R. D. Richards, F. Bastiman, and J. P. R David, J. Appl. Phys. 116, 233508 (2014).

<sup>8</sup> M. Polak, P. Scharoch, and R. Kudrawiec, Semicond. Sci. Technol. 30, 094001 (2015).

we współpracy z dr Markiem Wartakiem podczas stażu naukowego jaki odbyłam w Department of Physics and Computer Science, Wilfrid Laurier University. Tematykę tą cały czas intensywnie kontynuuję, a przedmiotem badań są studnie kwantowe na bazie GeSn oraz studnie kwantowe InGaN/GaN. Obecnie dysponuje autorskim oprogramowaniem napisanym w środowisku Pascal do liczenia struktury pasmowej oraz wzmocnienia optycznego w studniach kwantowych grupy III-V krystalizujących w układzie kubicznym oraz autorskim oprogramowaniem napisanym w środowisku c++ do liczenia struktury pasmowej oraz wzmocnienia optycznego dla polarnych studni kwantowych InGaN/GaN krystalizujących w układzie heksagonalnym, a wraz z dyplomantem rozwijamy oprogramowanie do liczenia struktury pasmowej oraz wzmocnienia optycznego w studniach kwantowych GeSn/Ge. Wyniki uzyskane do tej pory dla tego systemu materiałowego zostały przyjęte do publikacji w Scientific Reports.

### **6.3 Omówienie publikacji na temat wyznaczania rozkładu pól elektrycznych w heterostrukturach AlGaIn/GaN**

Heterostruktury AlGaIn/GaN stanowią obszar czynny w nowoczesnych tranzystorach wysokiej mocy, które mogą pracować w podwyższonych temperaturach. Obecnie na całym świecie oraz w Polsce trwają bardzo intensywne prace nad optymalizacją heterostruktur AlGaIn/GaN, a w laboratorium Optycznej Spektroskopii Nanostruktur (OSN) [www.osn.if.pwr.edu.pl](http://www.osn.if.pwr.edu.pl) na Politechnice Wrocławskiej od lat prowadzone są pomiary wbudowanych pól elektrycznych w takich heterostrukturach przy pomocy spektroskopii fotoodbiciowej oraz spektroskopii bezkontaktowego elektroodbicia. Metody te pozwalają wyznaczyć wartości wbudowanych pól elektrycznych w poszczególnych warstwach jednak nie dają one informacji o rozkładzie pola elektrycznego w całej heterostrukturze. Celem prac jakie podjęłam była interpretacja wyników eksperymentalnych oraz teoretyczna analiza wpływu warunków brzegowych (tj. położenia poziomu Fermiego na powierzchni półprzewodnika), resztkowego domieszkowania warstw (Al)GaIn oraz grubości tych warstw na rozkład pól elektrycznych oraz koncentracje dwu wymiarowego gazu elektronowego w heterostrukturach AlGaIn/GaN. W ramach tych prac powstało 11 publikacji z czego 5 z nich włączyłam do osiągnięcia naukowego stanowiącego przedmiot habilitacji.

W pracy [H7] badano heterostruktury GaN(cap)/AlGaIn/GaN(buffer) o różnej grubości warstwy AlGaIn i zaobserwowano, że pole elektryczne bardzo mocno zależy od tej grubości. Do wytłumaczenia tego zjawiska wykonałam obliczenia rozkładu pól elektrycznych rozwiązując w sposób samouzgodniony równanie Schrödingera oraz równanie Poissona dla różnego położenia poziomu Fermiego na powierzchni GaN. Porównując obliczenia teoretyczne z wynikami eksperymentalnymi byłam w stanie określić położenie poziomu Fermiego dla którego obliczenia teoretyczne są w stanie odtworzyć wyniki eksperymentalne. W tym wypadku zaobserwowałam, że niezależnie od grubości warstwy AlGaIn położenie poziomu Fermiego na powierzchni GaN jest takie samo w granicach dokładności metody i dlatego można je traktować jako warunek brzegowy w obliczeniach rozkładu pól elektrycznych w heterostrukturach AlGaIn/GaN co nie było takie oczywiste w kontekście wcześniejszych doniesień literaturowych. Dla badanych heterostruktur otrzymałam, że poziom Fermiego na powierzchni GaN lokuje się 0.55 eV poniżej dna pasm przewodnictwa co jest wynikiem różnym od położenia poziomu Fermiego, które było wcześniej przyjmowane przez innych autorów, którzy nie mając dostępu do badań eksperymentalnych zakładali, że leży on w połowie przerwy energetycznej GaN tj. 1.7 eV poniżej dna pasm przewodnictwa. Warto tutaj podkreślić, że położenie poziomu Fermiego na powierzchni GaN wyznaczone w pracy [H7] jest zgodne z gęstością stanów powierzchniowych uzyskanych z

obliczeń z zasad pierwszych<sup>9</sup> oraz późniejszymi badaniami położenia poziomu Fermiego na powierzchni GaN przy pomocy spektroskopii bezkontaktowego elektroodbiccia,<sup>10</sup> a także z późniejszymi badaniami rozkładu pól elektrycznych w heterostrukturach GaN(cap)/AlGaN/GaN(buffor) o różnej grubości warstwy GaN(cap) [H8] oraz heterostrukturach GaN(cap)/AlGaN/GaN(buffor) z cienką warstwą AlN [H9]. W pracy [H8] oprócz określenia warunku brzegowego dla rozkładu pól elektrycznych w heterostrukturze GaN(cap)/AlGaN/GaN(buffor) (tj. wyznaczenia położenia poziomu Fermiego na powierzchni GaN) wykazano, że rozkład pól elektrycznych w tego typu heterostrukturach jest wynikiem skoków polaryzacji na interfejsach oraz rozkładu swobodnych nośników, które to gromadzą się na tych interfejsach. Zmiana grubości poszczególnych warstw prowadzi do zmiany dystrybucji nośników, a co za tym idzie zmiany rozkładu pól elektrycznych w danej heterostrukturze [H8].

W celu poprawy ruchliwości dwu-wymiarowego gazu elektronowego w strukturach AlGaN/GaN bardzo często wkłada się cienką warstwę AlN, która ma za zadanie ograniczyć rozpraszanie elektronów na niejednorodnościach potencjału związanych z fluktuacją składu AlGaN. W literaturze można znaleźć wiele prac, które porównują heterostruktury z cienką warstwą AlN z heterostrukturami bez tej warstwy. Jednak wpływ warstwy AlN na rozkład pól elektrycznych w heterostrukturze AlGaN/GaN był na ogół pomijany podczas gdy obliczenia teoretyczne wyraźnie pokazują, że włożenie cienie warstwy AlN do heterostruktury AlGaN/GaN w sposób zasadniczy zmienia rozkład pól elektrycznych. Tego typu efekt został eksperymentalnie zaobserwowany w pracy [H9] oraz szczegółowo przeanalizowany teoretycznie w tej pracy. Wykonując obliczenia dla różnych grubości warstwy AlN wykazano, że obserwowane zmiany wielkości wbudowanego pola elektrycznego w warstwie AlGaN związane są właśnie z obecnością warstwy AlN.

Przez ostatnie lata coraz większym zainteresowaniem cieszą się tranzystory GaN/AlGaN/GaN(buffor) osadzone na stronie azotowej (tj. wzdłuż kierunku (000-1)).<sup>11</sup> W tego typu heterostrukturach dwu wymiarowy gaz elektronowy pojawia się na złączu GaN/AlGaN, a nie na złączu AlGaN/GaN tak jak ma to miejsce w heterostrukturach osadzanych na stronie galowej (tj. wzdłuż kierunku (0001)). Zaletą tego podejścia jest możliwość całkowitego opróżnienia kanału przewodzenia z nośników oraz łatwość odcięcia się od drugiego kanału przewodzenia, które ma miejsce w buforze lub podłożu. O ile koncentracja dwu-wymiarowego gazu w heterostrukturach AlGaN/GaN osadzanych na stronie galowej była wyliczana to w przypadku heterostruktur osadzanych na stronie azotowej wiarygodne obliczenia nie były publikowane głównie ze względu na brak znajomości położenia poziomu Fermiego na stronie azotowej GaN. Zgodnie z obliczeniami gęstości stanów powierzchniowych dla takiej powierzchni<sup>12</sup> można spodziewać się, że poziom Fermiego będzie lokować się 2.2 eV poniżej dna pasma przewodnictwa. Jednak badania eksperymentalne nie potwierdzają tych przewidywań, a ostatnie badania struktur GaN/GaN:Si przy pomocy spektroskopii bezkontaktowego elektroodbiccia pokazują, że poziom Fermiego na stronie azotowej powierzchni GaN lokuje się 0.3 eV poniżej dna pasma przewodnictwa.<sup>13</sup> Tego typu stan

---

<sup>9</sup> D. Segev, Ch.G. Van de Walle, J. Cryst. Growth 300, 199 (2007).

<sup>10</sup> R. Kudrawiec, M. Gładysiewicz, L. Janicki, J. Misiewicz, G. Cywinski, C. Cheze, P. Wolny, P. Prystawko, and C. Skierbiszewski, Appl. Phys. Lett. 100, 181603 (2012).

<sup>11</sup> M. H. Wong, S. Keller, N. S. Dasgupta, D. J. Denninghoff, S. Kolluri, D.F. Brown, J. Lu, N.A. Fichtenbaum, E. Ahmadi, U. Singiseti, A. Chini, S. Rajan, S. P DenBaars, J.S. Speck and U.K. Mishra, Semicond. Sci. Technol. 28, 074009 (2013)

<sup>12</sup> D. Segev and Ch.G. Van de Walle, Europhys. Lett. 76, 305 (2006).

<sup>13</sup> R. Kudrawiec, L. Janicki, M. Gładysiewicz, J. Misiewicz, G. Cywinski, M. Boćkowski, G. Muzioł, C. Chèze, M. Sawicka and C. Skierbiszewski, Appl. Phys. Lett. 103, 052107 (2013).

wiedzy skłonił mnie do szczegółowej analizy rozkładu pól elektrycznych oraz koncentracji dwu wymiarowego gazu w heterostrukturach GaN(channel)/AlGaN/GaN(buffer) o różnej szerokości warstw GaN(channel) oraz AlGaN osadzanych na stronie azotowej GaN. Wyniki tej analizy przedstawiono w pracy [H10]. W ramach wykonanych obliczeń wyznaczono obszar grubości warstw GaN(channel) oraz AlGaN przy których mamy do czynienia z formowaniem się dwu wymiarowego gazu elektronowego na złączu GaN(channel)/AlGaN oraz zbadano jak zależy koncentracja tego gazu od położenia poziomu Fermiego na powierzchni GaN. Uzyskane wyniki pozwoliły stwierdzić, że tego typu konstrukcja tranzystorowa jest bardzo obiecująca w czujnikach gazu z chemiczną bramką ponieważ koncentracja dwu wymiarowego gazu elektronowego bardzo mocno zależy od położenia poziomu Fermiego na powierzchni takiej heterostruktury.

Dodatkowym zagadnieniem jakie pojawiło się przy analizie rozkładu pól elektrycznych w heterostrukturach AlGaN/GaN jest zagadnienie powierzchniowej studni potencjału, która pojawia się w sytuacji kiedy warstwa „capu” z GaN jest odpowiednio cienka. Warstwa GaN o grubości 2-3 nm jest standardowym „cap-em” w heterostrukturach AlGaN/GaN mającym na celu zabezpieczenie powierzchni heterostruktury oraz uzyskanie lepszego kontaktu elektrycznego do tej heterostruktury. Efekt kwantowania poziomów energetycznych w cienkiej warstwie GaN osadzonej na heterostrukturze AlGaN/GaN raportowany był po raz pierwszy w pracy.<sup>14</sup> Kwantowanie poziomów energetycznych w warstwie GaN(cap) obserwowane było również w pracach [H7, H8]. Jednak rozwiązanie takiego zagadnienia od strony teoretycznej nie było raportowane w literaturze. Tego typu problem został szczegółowo opisany i rozwiązany teoretycznie w pracy [H11]. Jest to zagadnienie studni potencjału z wbudowanym polem elektrycznym oraz różnymi barierami potencjału. Z jednej strony jest to warstwa AlGaN, a z drugiej powietrze (próżnia). Warto tutaj dodać, że zagadnienie to nie jest symetryczne dla kierunku (0001) oraz (000-1). Dodatkowo przy tak cienkiej warstwie wskazane jest rozważenie niejednorodności grubości. Wyniki zaprezentowane w pracy [H11] ilustrują rolę tej niejednorodności oraz porównują powierzchniowe studnie kwantowe GaN wytworzone wzdłuż kierunku (0001) oraz (000-1) w warstwie AlGaN.

Badania wbudowanych pól elektrycznych w heterostrukturach AlGaN/GaN przy pomocy bezkontaktowego elektroodbicia są cały czas intensywnie prowadzone w laboratorium OSN na Politechnice Wrocławskiej, a ja cały czas uczestniczę w interpretacji wyników oraz obliczaniu rozkładu pól elektrycznych oraz koncentracji dwuwymiarowego gazu w tych heterostrukturach. Wszystkie programy do analizy heerostruktur AlGaN/GaN zostały napisane przeze mnie w środowisku Pascal i są cały czas przeze mnie rozwijane i udoskonalane. Obecnie prowadzimy intensywnie badania heterostruktur GaN/AlGaN/GaN pasywowanych SiN i osadzonych na stronie azotowej GaN. Celem tych prac jest określenie położenia poziomu Fermiego na złączu SiN/GaN oraz wyznaczenie rozkładu pól elektrycznych w takich heterostrukturach.

---

<sup>14</sup> M. Motyka, M. Syperek, R. Kudrawiec, J. Misiewicz, M. Rudziński, P.R. Hageman, P.K. Larsen, Appl. Phys. Lett. 89, 231912 (2006).

#### 6.4 Omówienie publikacji na temat wpływu niejednorodności struktur półprzewodnikowych na ich właściwości optyczne

Niejednorodność składu oraz niejednorodność szerokości studni kwantowych może mieć kluczowe znaczenie przy interpretacji wyników pomiarów optycznych dla studni kwantowych. Tego typu zagadnienie jest do pominięcia w przypadku jednorodnych studni kwantowych jakimi mogą być studnie kwantowe GaAs/AlGaAs lub InGaAs/GaAs krystalizujące w strukturze blendy cynkowej i wzrastane wzdłuż kierunku (001). W przypadku studni kwantowych wykonanych na bazie GaN i wzrastanych wzdłuż kierunków polarnych mamy do czynienia z bardzo wąskimi studniami z tego względu, że chcemy zapewnić odpowiednio duże przekrycie funkcji falowych elektronu i dziury. Dla porównania typowa studnia kwantowa InGaAs/GaAs ma 8nm szerokości (~30 monowarstw) podczas gdy typowa studnia kwantowa InGaN/GaN przeznaczona na emiter światła ma szerokość <3nm (<14 monowarstw) co od razu sugeruje, że fluktuacja szerokości studni rzędu jednej monowarstwy może mieć istotne znaczenie. Biorąc pod uwagę fakt, że studnie InGaN/GaN wzrastane są wzdłuż kierunku polarnego w naturalny sposób pojawia się pytanie jaka jest rola efektów polaryzacyjnych przy poszerzeniu przejść optycznych. Tego typu zagadnienie było tematem przewodnim w pracach [H12-H15].

W pracy [H12] do wytłumaczenia dużego poszerzenia przejść między-pasmowych oraz wewnątrz-pasmowych w wąskich studniach kwantowych (szerokość < 2nm) przeznaczonych na modulatory światła zaproponowano podejście analityczne. W podejściu tym policzono zależność energii przejść optycznych (między-pasmowych oraz wewnątrz-pasmowych) od szerokości studni, a następnie zaproponowano, że niejednorodne poszerzenie przejść optycznych związane jest z fluktuacją szerokości studni i może być określone mnożąc wielkość tej fluktuacji przez pochodną energii przejścia optycznego policzoną po szerokości studni. Znając wartości poszerzeń przejść optycznych można wyznaczyć skalę fluktuacji szerokości studni która w tym wypadku wynosiła 2 monowarstwy. Tego typu podejście jest proste ale w przypadku fluktuacji szerokości studni oraz j fluktuacji składu studni może być kłopotliwe w użyciu. Dlatego do analizy przypadków w których możemy mieć do czynienia z niejednorodnościami składu oraz szerokości zarówno dla studni oraz bariery zaproponowałam model tzw. losowej studni kwantowej [H13].

Model losowej studni kwantowej opiera się na założeniu, że lokalnie studnia kwantowa może mieć inną szerokość oraz inny skład ale skala tej fluktuacji jest większa niż skala kwantowania w danym układzie materiałowym. Dla GaN można przyjąć, że jest to powyżej 10nm co oznacza, że odpowiedź optyczna z próbki jest odpowiedzią z tysięcy jednorodnych obszarów o rozmiarach >10nm. Do zasymulowania takiej odpowiedzi w sposób losowy wygenerowane są tysiące studni kwantowych o różnych szerokościach oraz różnych składach. Wartością oczekiwaną jest nominalna szerokość studni oraz skład studni, a odchyleniem standardowym jest niejednorodność szerokości oraz niejednorodność składu studni (wartości niefizyczne są odrzucane). Dla tak wygenerowanych studni kwantowych liczone są energie przejść optycznych oraz ich prawdopodobieństwa, a następnie tworzony jest histogram który polega na podzieleniu przedziału energetycznego na równe części i zliczeniu prawdopodobieństwa przejścia optycznego w każdej części przedziału energetycznego. Jak wykazano w pracy [H13] zaproponowany model doskonale sprawdza się w wytłumaczeniu poszerzenia przejść optycznych obserwowanych w eksperymentach absorpcyjnych takich jak bezkontaktowe elektroodbicie lub modulowana transmisja.

Model losowej studni kwantowej pracuje również bardzo dobrze przy wytłumaczeniu poszerzenia widm fotoluminescencji dla studni kwantowych InGaN/GaN.<sup>15</sup> Z kolei w przypadku czasowo-rozdzielczych pomiarów fotoluminescencji wykonywanych dla tego typu studni bardzo często obserwuje się spektralną dyspersję czasów zaniku fotoluminescencji oraz niewykładniczy zanik fotoluminescencji. Tego typu cechy widm czasowo-rozdzielczych przypisuje się efektowi lokalizacji nośników. Z kolei efekt lokalizacji nośników w samoistny sposób zawarty jest w modelu losowej studni kwantowej i w związku z tym należy się spodziewać, że stosując model losowej studni kwantowej do symulacji widm czasowo-rozdzielczej fotoluminescencji będziemy w stanie zaobserwować spektralną dyspersję czasów zaniku fotoluminescencji oraz niewykładniczy zanik fotoluminescencji. Tego typu symulacje czasowo-rozdzielczych widm fotoluminescencji przeprowadzono dla studni kwantowych InGaN/GaN o różnej skali niejednorodności i opisano w pracy [H14]. W symulacjach tych pominięto efekt rekombinacji niepromienistej, która ma miejsce w rzeczywistych układach, oraz zjawisko efektywnego hoppingu ekscytonów do stanów o niższej energii. Jednak mimo tych uproszczeń zaobserwowano, że fluktuacja szerokości oraz składu dla polarnej studni kwantowej InGaN/GaN prowadzi do spektralnej dyspersji czasów zaniku fotoluminescencji oraz niewykładniczych zaników intensywności fotoluminescencji. W pracy tej dodatkowo wykazano, że wbudowane pole elektryczne w studniach kwantowych InGaN/GaN jest czynnikiem, który odpowiada za te efekty.

Jednorodność studni kwantowej InGaN/GaN jest kluczowa przy wytwarzaniu części aktywnej lasera mającego emitować światło zielone. Problem ten został szczegółowo przeanalizowany w pracy [H15]. Aby uzyskać emisję przy długości fali ~500 nm ze studni polarnej InGaN/GaN zawartość indu musi być odpowiednio wysoka (~25%) co pociąga za sobą duże naprężenia (dużą polaryzację piezoelektryczną), a tym samym duże wbudowane pole elektryczne. Jak pokazano w pracy [H15] oraz pracy <sup>16</sup> pole elektryczne powoduje dodatkowe poszerzenie przejść optycznych i w związku z tym taka studnia kwantowa nie jest optymalnym ośrodkiem czynnym dla lasera. Ekranowanie wbudowanych pól elektrycznych poprzez pompowanie optyczne w istotny sposób zawęży poszerzenie emisji co można prześledzić stosując model losowej studni kwantowej [H15] ale jednocześnie przesunę emisję w stronę krótszych fal. Dlatego pomiędzy spontaniczną a wymuszoną emisją obserwowane jest przesunięcie energetyczne. Jak wykazano w pracy [H15] przesunięcie to jest skorelowane z niejednorodnością studni kwantowej i znajduje tam swoje wytłumaczenie.

Problem wpływu niejednorodności studni na jej właściwości optyczne jest cały czas kontynuowany w moich badaniach, a zaproponowany model losowej studni kwantowej wydaje się być bardzo uniwersalny w różnych układach materiałowych i może być dalej rozwijany. Obecnie pracuję nad uwzględnieniem rekombinacji niepromienistej zadając w sposób losowy centra rekombinacji niepromienistej w danym obszarze próbki oraz pracuję nad uwzględnieniem hoppingu ekscytonów (nośników) pomiędzy lokalnymi studniami kwantowymi zadanymi w sposób losowy. Model losowej studni kwantowej zaimplementowałam w środowisku c++ co umożliwi łatwe generowanie wyników przedstawionych w pracach [H13-H15].

---

<sup>15</sup> M. Gladysiewicz, R. Kudrawiec, J. Misiewicz, M. Siekacz, G. Cywinski, and C. Skierbiszewski, Phys. Status Solidi C 8, 2282 (2011).

<sup>16</sup> M. Gladysiewicz and R. Kudrawiec, Phys. Status Solidi C 9, 830 (2012).



## 7. Podsumowanie

Moje osiągnięcia naukowe wybrane do uzyskania habilitacji w dziedzinie fizyki można podsumować w trzech punktach:

- i) Rozwój modelu oraz wyznaczenia parametrów materiałowych dla obliczeń struktury pasmowej oraz wzmocnienia materiałowego dla studni kwantowych zawierających półprzewodniki rozrzedzane azotem oraz bizmutem [H1-H6].
- ii) Określenie warunków brzegowych dla obliczeń rozkładu pól elektrycznych w polarnych heterostrukturach tranzystorowych AlGa<sub>N</sub>/Ga<sub>N</sub> oraz interpretacja wyników pomiarów pól elektrycznych metodą spektroskopii bezkontaktowego elektroodbitcia dla heterostruktur AlGa<sub>N</sub>/Ga<sub>N</sub> [H7-H11].
- iii) Zaproponowanie oraz rozwój modelu „losowej” studni kwantowej do wytłumaczenia optycznych właściwości (poszerzenia przejść optycznych oraz czasów zaniku fotoluminescencji) obserwowanych dla niejednorodnych studni kwantowych InGa<sub>N</sub>/Ga<sub>N</sub> [H12-H15].