

# Autoreferat

Grzegorz Sęk

# Autoreferat

---

Grzegorz Sęk

## Spis treści

1.	ŻYCIORYS ZAWODOWY .....	2
1.1	DANE OSOBOWE .....	2
1.2	DANE TELEADRESOWE.....	2
1.3	HISTORIA ZATRUDNIENIA .....	2
1.4	STOPNIE NAUKOWE I TYTUŁY ZAWODOWE .....	2
2.	AUTOREFERAT .....	3
2.1	OSIĄGNIĘCIA NAUKOWE .....	3
2.2	OSIĄGNIĘCIA W ZAKRESIE OPIEKI NAUKOWEJ I KSZTAŁCENIA KADRY .....	9
2.3	DZIAŁALNOŚĆ POPULARYZUJĄCA NAUKĘ .....	12

## 1. Życiorys zawodowy

### 1.1 Dane osobowe

**Imię i nazwisko:** Grzegorz Sęk

**Data i miejsce urodzenia:** 27 luty 1971, Rawicz

**Obywatelstwo:** polskie

**Stan rodzinny:** żonaty, dwoje dzieci

### 1.2 Dane teleadresowe

Katedra Fizyki Doświadczalnej

Wydział Podstawowych Problemów Techniki

Politechnika Wroclawska

Wybrzeże Wyspiańskiego 27, 50-370 Wrocław

Tel. 71 320 45 73

E-mail: [grzegorz.sek@pwr.edu.pl](mailto:grzegorz.sek@pwr.edu.pl)

### 1.3 Historia zatrudnienia

**11.2012 – obecnie:** profesor nadzwyczajny, Katedra Fizyki Doświadczalnej, Wydział Podstawowych Problemów Techniki, Politechnika Wroclawska

**04.2011 – 10.2012:** adiunkt ze stopniem dr hab., Instytut Fizyki, Politechnika Wroclawska

**10.2002 – 03.2011:** adiunkt, Instytut Fizyki, Politechnika Wroclawska

**07.2003 – 06.2004:** staż podoktorski, Katedra Fizyki Technicznej, Uniwersytet w Würzburgu, Niemcy

**10.1998 – 09.2001:** doktorant, Instytut Fizyki, Politechnika Wroclawska

**10.1995 – 09.2002:** asystent naukowo-dydaktyczny, Instytut Fizyki, Politechnika Wroclawska

### 1.4 Stopnie naukowe i tytuły zawodowe

**Magister inżynier, czerwiec 1995** – kierunek Fizyka stosowana, Wydział Podstawowych Problemów Techniki, Politechnika Wroclawska, praca pt. *Zastosowanie spektroskopii fotoodbiciowej do badania heterostruktur półprzewodnikowych*

**Doktor, październik 2001** – Nauki Fizyczne, Wydział Podstawowych Problemów Techniki, Politechnika Wroclawska, rozprawa pt. *Spektroskopia fotoodbiciowa sprzężonych studni i kropek kwantowych (praca wyróżniona Nagrodą Prezesa Rady Ministrów RP)*

**Doktor habilitowany, marzec 2011** – Nauki Fizyczne, Fizyka, Wydział Podstawowych Problemów Techniki, Politechnika Wroclawska, rozprawa pt. *Właściwości optyczne epitaksjalnych kwazi-zerowymiarowych struktur półprzewodnikowych*

## 2. Autoreferat

### 2.1 Osiągnięcia naukowe

#### Przed habilitacją

Pracę naukową rozpocząłem na czwartym roku studiów (w 1994 roku) w Instytucie Fizyki Politechniki Wrocławskiej w Laboratorium Optycznej Spektroskopii Nanostruktur (OSN) kierowanym przez prof. Jana Misiewicza. W początkowym okresie pracowałem nad wykorzystaniem spektroskopii fotoodbiciowej do badania przejść optycznych w półprzewodnikowych strukturach niskowymiarowych związków III-V na bazie arsenku galu (takich jak studnie kwantowe czy tranzystory polowe GaAs/AlGaAs). Badania prowadzone były we współpracy z prof. C. T. Foxonem z Nottingham University oraz prof. Markiem Tłaczałą z Wydziału Elektroniki Mikrosystemów i Fotoniki Politechniki Wrocławskiej. W roku 1995 obroniłem z tej tematyki pracę dyplomową, której promotorem był prof. Misiewicz.

W latach 1995-1998, będąc asystentem w Instytucie Fizyki PWr, kontynuowałem badania struktur niskowymiarowych technikami modulacyjnymi z głównym naciskiem na właściwości struktury pasmowej studni kwantowych InGaAs/GaAs oraz GaAs/AlGaAs współpracując z zespołem prof. Tłaczały oraz Instytutem Technologii Elektronowej w Warszawie (prof. Maciej Bugajski). Później zająłem się rozwojem spektroskopii fotoodbiciowej do badania półprzewodnikowych kropek kwantowych. Badania te prowadzone były na strukturach wykonywanych w laboratoriach technologicznych kierowanych przez prof. Dietera Bimberga z Technical University Berlin i zaowocowały jedną z dwóch pierwszych na świecie prac pokazujących możliwość detekcji przejść optycznych w tak zwanych samorosnących kropkach kwantowych przy wykorzystaniu fotoodbicia (*Solid State Commun.* 110, 657 (1999)). Postęp w rozwoju metod modulacyjnych w Instytucie Fizyki PWr podsumowany został w formie dwóch publikacji książkowych napisanych wraz z prof. Misiewiczem i dr Piotrem Sitarkiem: monografii pt. *Spektroskopia fotoodbiciowa struktur półprzewodnikowych* oraz krótkiego kompendium w języku angielskim *Introduction to the photoreflectance spectroscopy of semiconductor structures*.

W roku 1998 rozpocząłem w Instytucie Fizyki studia doktoranckie, a za temat pracy doktorskiej wybrałem właściwości optyczne sprzężonych studni i kropek kwantowych. Badania prowadziłem na strukturach otrzymywanych metodą MBE w Department of Applied Physics University of Würzburg kierowanym przez prof. Alfreda Forchela w ramach właśnie wtedy rozpoczętej współpracy dwustronnej pomiędzy tym zespołem, a zespołem OSN. W ramach tej tematyki zrealizowałem też grant promotorski pt.: *Spektroskopia fotoodbiciowa kropek kwantowych*. Efektem tych badań było siedem publikacji. Pracę doktorską realizowaną pod opieką prof. Misiewicza obroniłem w roku 2001. **Praca została wyróżniona Nagrodą Prezesa Rady Ministrów RP.**

W latach 2001-2003 kontynuowałem prace nad badaniem właściwości optycznych struktur niskowymiarowych na bazie nowych rodzajów materiałów półprzewodnikowych i przeznaczonych głównie do zastosowań laserowych w zakresie II i III okna telekomunikacyjnego (między innymi struktury InGaAsP/InP we współpracy z McMaster University w Hamilton w Kanadzie czy InGaAsN/GaAs, Uniwersytet w Würzburgu). Uzyskane wyniki dotyczące nowych wtedy materiałów tzw. rozcieńczonych azotków zaowocowały przystąpieniem Zespołu OSN do projektu GIFT (GaAs-based emitters for fibre-optical data and telecommunications) w ramach 5. Programu Ramowego UE. Rezultaty tych badań, które wносиły nową wiedzę przede wszystkim na temat struktury pasmowej takich heterostruktur półprzewodnikowych podsumowano w kilku publikacjach (np. *Appl. Phys. Lett.* 83, 1379 (2003); *Appl. Phys. Lett.* 83 2772 (2003); *Solid-State Electron.* 47, 489 (2003); *J. Appl. Phys.* 94 2752 (2003); *Solid State Commun.* 127 613 (2003)).

W roku 2003 wyjechałem na roczny staż podoktorski do Uniwersytetu w Würzburgu, aby pod kierunkiem prof. Alfreda Forchela zająć się tam badaniami nad elektrodynamiką kwantową w ciałach stałych i oddziaływaniem ekscytonów związanych w pojedynczej kropce kwantowej oraz fotonów „zamkniętych” w półprzewodnikowej wnęce optycznej typu kolumna Bragga. Moim zadaniem było wykonywanie pomiarów spektroskopii optycznej w reżimie pojedynczych kropek kwantowych i poszukiwanie efektów słabego oraz silnego sprzężenia ekscyton-foton w takim układzie. W kwietniu 2004 udało mi się po raz pierwszy na świecie zaobserwować tzw. rozszczepienie Rabięgo wynikające z oddziaływanie jednego ekscytonu w kropce kwantowej i jednego fotonu w trójwymiarowej mikrownęce optycznej, i tym samym zjawisko silnego sprzężenia w sztucznie wytworzonym układzie fizycznym w ciele stałym. Wynikiem kilkumiesięcznej pracy wraz z zespołem technologicznym z Uniwersytetu w Würzburgu (kierowanym wówczas przez prof. Johanna Petera Reithemaiera) oraz przy współpracy z naukowcami z innych instytucji (Vladimir Kulakovskii z Rosyjskiej Akademii Nauk w Chernogolovce, Leonid Keldysh z Instytutu Lebedieva w Moskwie oraz Tom Reinecke z Naval Research Laboratory w Waszyngtonie) była wspólna publikacja w *Nature* opisująca to odkrycie (*Nature* 432, 197 (2004)). Praca została zauważona i bardzo dobrze odebrana przez środowisko naukowe, a jej znaczenie jest wciąż doceniane – **została już zacytowana ponad 1000 razy**. Współpracę z ośrodkiem w Würzburgu kontynuuję do dziś. W roku 2005 odbyłem tam kolejny krótki staż dotyczący dalszych badań zjawisk elektrodynamiki kwantowej, a także dwutygodniowy staż w Institute of Industrial Sciences University of Tokyo. Celem tej ostatniej wizyty było uruchomienie pomiarów umożliwiających badanie silnego sprzężenia ekscyton-foton w laboratorium optycznym prof. Yasuhiko Arakawy i prof. Satoshi Iwamoto.

Po powrocie do Instytutu Fizyki PWr, aby dalej prowadzić badania pojedynczych kropek kwantowych i badać zjawiska elektrodynamiki kwantowej w ciele stałym rozpocząłem prace nad uruchomieniem układów eksperymentalnych do tego typu pomiarów. W tym celu skonstrowałem w Laboratorium Optycznej Spektroskopii Nanostruktur układ do pomiarów tzw. mikrofotoluminescencji (rozdzielczość przestrzenna ok. 1  $\mu\text{m}$ ), który w połączeniu ze strukturyzacją powierzchni lub niską gęstością powierzchniową kropek kwantowych pozwala na detekcję emisji z pojedynczych kropek. Ten pierwszy układ zoptymalizowany jest na zakres 0.8 – 1.6  $\mu\text{m}$ , aby umożliwić badania dla struktur projektowanych do zastosowań związanych ze światłowodową telekomunikacją i transmisją danych. Później powstały pod moim kierunkiem kolejne układy spektroskopowe pozwalające badać pojedyncze kropki kwantowe – jest ich obecnie kilka (które posiadają różne dodatkowe możliwości eksperymentalne). Do tej pory ukazało się już wiele prac dokumentujących nasze osiągnięcia w tym zakresie, gdzie w okresie przed habilitacją dotyczyły one między innymi np. emisji ekscytonowej i bieksytonowej z nieznanymi (lub bardzo słabo znanymi) wtedy pojedynczych kreskach lub słupków kwantowych, czy emisji laserowej z pojedynczego mikrorezonatora kolumnowego z emitorem w postaci kropek kwantowych (*Appl. Phys. Lett.* 92, 021901 (2008); *J. Appl. Phys.* 105, 053513 (2009); *J. Appl. Phys.* 105, 086104 (2009); *J. Appl. Phys.* 108, 033507 (2010); *J. Appl. Phys.* 107, 096106 (2010)). W ramach prac nad rozwojem spektroskopii optycznej z wysoką rozdzielczością przestrzenną uruchomiłem również układ do pomiarów mikro-fotoodciana pozwalający badać widma modulowanego współczynnika odbicia (typu absorpcyjnego) dla struktur niskowymiarowych z obszaru ok. 10  $\mu\text{m}$  (*Optica Applicata* 37, 439 (2007)).

Od roku 2005 jednym z moich głównych obiektów zainteresowań naukowych są własności optyczne epitaksjalnie otrzymanych kropek kwantowych, ze szczególnym uwzględnieniem kropek z nowych materiałów oraz obiektów kwazi-zerowymiarowych o nietypowej geometrii i w kontekście zastosowań fotonicznych w zakresie bliskiej podczerwieni. Oprócz technik o wysokiej rozdzielczości przestrzennej skupiłem się również na udoskonalaniu spektroskopii modulacyjnej celem jej optymalnego wykorzystania do badania struktur z kropkami kwantowymi, również przyrządowych, i

zrozumieniu mechanizmów modulacji w strukturach z kropkami kwantowymi (*J. Appl. Phys.* 100, 073502 (2006)). Tematyki tej dotyczył projekt badawczy MNiSzW (*Badania optyczne półprzewodnikowych kropek kwantowych przy użyciu metod modulacyjnych i technik wysokiej rozdzielczości przestrzennej*, 2005-2007) oraz projekt w ramach 6 Programu Ramowego Komisji Europejskiej ZODIAC (*Zero order dimension based industrial components applied to telecommunications*, 2005-2007). W obu pełniłem rolę głównego wykonawcy. Ten pierwszy dotyczył badania podstawowych właściwości mikroskopowych struktur z kropkami kwantowymi (np. *Appl. Phys. Lett.* 89, 031908 (2006); *Appl. Phys. Lett.* 89, 151902 (2006); *Appl. Phys. Lett.* 92, 021901 (2008); *J. Appl. Phys.* 100, 013503 (2006); *J. Appl. Phys.* 101, 073518 (2007); *J. Appl. Phys.* 100, 103529 (2006)), natomiast ten drugi skupiony był na wykorzystaniu struktur kwazi-zerowymiarowych w konkretnych aplikacjach optoelektronicznych: polaryzacyjnie niezależnych wzmacniaczy optycznych oraz laserów z tunelowym wstrzykiwaniem nośników ze studni do kropek kwantowych (np. *Appl. Phys. Lett.* 90, 081915 (2007); *Appl. Phys. Lett.* 90, 181933 (2007); *J. Appl. Phys.* 101, 063539 (2007); *Sci. and Tech.* 21 1402 (2006)). Oprócz współpracy z laboratorium technologicznym z Uniwersytetu w Würzburgu rozpocząłem również w tym zakresie współpracę z zespołem prof. Andrei Fiore z Politechniki w Lozannie (obecnie w Eindhoven University of Technology, Holandia), oraz laboratoriami LPN, CNRS i Alcatel-Thales III-V LAB w Marcoussis pod Paryżem. W laboratoriach EPFL odbyłem w roku 2006 krótki staż z zakresu badania dynamiki fotoluminescencji w strukturach z kropkami i kreskami emitującymi w zakresie 1.3 -1.55  $\mu\text{m}$ . Wymiernym efektem współpracy z tymi ośrodkami jest ponad dwadzieścia publikacji, których jestem współautorem i które dotyczą między innymi takich zagadnień jak: transfer energii w strukturach tunelowych studnia-kropki kwantowe, struktura energetyczna takich układów tunelowych w różnych systemach materiałowych, wpływ geometrii i rozkładu naprężeń na własności polaryzacyjne światła emitowanego w płaszczyźnie czy wykorzystanie tzw. kolumnowych kropek czy kresek kwantowych do otrzymania polaryzacyjnie niezależnych emiterów. Tematyka wykorzystania struktur kwazi-zerowymiarowych w laserach półprzewodnikowych kontynuowana była w ramach kolejnego projektu UE 7. Programu Ramowego DeLight (*Development of low-cost technologies for the fabrication of high-performance telecommunication lasers*, 2008-2012), w którym odpowiedzialny byłem za badania własności optycznych struktur kwantowych na podłożu z InP emitujących w zakresie 1.55  $\mu\text{m}$  (we współpracy z zespołem prof. Reithmaiera z Uniwersytetu w Kassel, Niemcy).

W tym okresie prowadziłem również badania własności tzw. warstwy zwilżającej (*ang. wetting layer - WL*), która jest naturalnie powstającym elementem struktury w metodzie wzrostu epitaksjalnego Stranski-Krastanov, a jej własności mają wpływ na własności samych kropek kwantowych (np. WL jest kanałem ucieczki nośników oraz ich transferu i redystrybucji pomiędzy kropkami; stany warstwy zwilżającej biorą udział w zarówno w wychwytywaniu nośników jak ich relaksacji do stanów w kropkach kwantowych). W układach nowych materiałów czy przy nietypowych warunkach wzrostu ani struktura elektronowa ani nawet efektywna grubość takiej warstwy zwilżającej nie były znane. Zastosowanie spektroskopii modulacyjnej pozwoliło na jednoznaczne określenie między innymi takich jej parametrów jak grubość w zależności od składu (naprężenia). Aspekt ten badaliśmy dla kilku różnych układów materiałowych zarówno na podłożu z GaAs jak i z InP (*J. Appl. Phys.* 101, 063539 (2007); *Physica Status Solidi (a)* 204, 496 (2007); *J. Appl. Phys.* 100, 103529 (2006); *Appl. Phys. Lett.* 86, 101904 (2005)).

Oprócz tego, zajmowałem się wieloma zagadnieniami niezwiązanymi ze strukturami zerowymiarowymi. Jednym z nich był rozwój spektroskopii optycznej, w tym modulacyjnej, w zakresie średniej i dalekiej podczerwieni i badania nad własnościami nowych rodzajów struktur i materiałów do zastosowań fotonicznych w tym obszarze, jak np. lasery półprzewodnikowe do konstrukcji czujników gazów. Byłem głównym wykonawcą w projekcie 7. Programu Ramowego

SensHy (*Photonic sensing of hydrocarbons based on innovative mid infrared lasers*, 2008-2011), w którym zajmowaliśmy się badaniami struktury elektronowej i mechanizmów rekombinacji promienistej i niepromienistej w strukturach studni kwantowych pierwszego i drugiego rodzaju na podłożu z GaSb, we współpracy z Uniwersytetem w Würzburgu (A. Forchel, S. Höfling) oraz Uniwersytetem w Montpellier (Y. Rouillard). Projekt zakończył się pełnym sukcesem, w którym nasz zespół miał swój bardzo wymierny udział, i skonstruowaniem jedynych wtedy na świecie przestrajalnych laserów półprzewodnikowych emitujących w obszarze ok. 3.5  $\mu\text{m}$  (które są obecnie oferowane do sprzedaży przez naszego partnera przemysłowego – nanoplus GmbH w Niemczech), oraz bazujących na nich czujników węglowodorów, które były wdrażane do produkcji przez firmy Siemens w Niemczech oraz GMI w Wielkiej Brytanii. Nasze wyniki w projekcie, które dotyczyły głównie własności optycznych oraz struktury pasmowej nowych układów niskowymiarowych na bazie półprzewodnikowych, wieloskładnikowych stopów stałych z (In,Ga,Al)(As,Sb) i zostały podsumowane w cyklu publikacji (*Appl. Phys. Lett.* 94, 251901 (2009); *J. Appl. Phys.* 106, 066104 (2009); *Appl. Phys. Lett.* 95, 251103 (2009); *Appl. Phys. Express* 2, 126505 (2009); *Jap. J. Appl. Phys.* 49, 031202 (2010); *Jap. J. Appl. Phys.* 50, 031202 (2011); *Optical Mat.* 33, 1817 (2011); *Optical Mat.* 34, 1107 (2012)). W pokrewnej tematyce uczestniczyłem również w pracach w ramach Projektu Zamawianego MNiSzW (*Zaawansowane technologie dla półprzewodnikowej optoelektroniki podczerwieni*), gdzie we współpracy z Instytutem Technologii Elektronowej w Warszawie (prof. Maciej Bugajski) badaliśmy struktury laserów kaskadowych GaAs/AlGaAs na zakres 10-15  $\mu\text{m}$  (*Optica Appl.* 39, 897 (2009)) oraz struktury materiałów i supersieci na bazie InGaAsSb na zakres 2-3  $\mu\text{m}$  (*Opto-Electron. Rev.* 19, 140 (2011)) we współpracy z Instytutem Technologii Materiałów Elektronicznych (dr Włodzimierz Strupiński).

#### Po habilitacji

Od uzyskania stopnia doktora habilitowanego w 2011 roku kieruję ok. 10-cio osobowym zespołem w Laboratorium Optycznej Spektroskopii Nanostruktur, Katedra Fizyki Doświadczalnej, Wydział Podstawowych Problemów Techniki, PWr o nazwie „Nanostruktury epitaksjalne dla fotoniki podczerwieni”, i zajmuję się kilkoma różnymi zagadnieniami badawczymi z zakresu fizyki nanostruktur, które można pogrupować w cztery główne tematy:

- I. Własności fizyczne nanostruktur epitaksjalnych pod kątem ich zastosowania w nanofotonice i bezpiecznej komunikacji kwantowej sieciach światłowodowych, w szczególności w źródłach pojedynczych i splątanych fotonów w zakresie podczerwieni telekomunikacyjnej.
- II. Własności optyczne i dynamiczne hybrydowych układów półprzewodnikowych łączących struktury o różnej wymiarowości; badania sprzężonych układów 0D-2D pod kątem ich wykorzystania w konstrukcjach laserowych o zwiększonych wydajnościach.
- III. Nowe materiały i struktury półprzewodnikowe dla źródeł promieniowania w optycznej detekcji gazów w zakresie średniej podczerwieni.
- IV. Zjawiska elektrodynamiki kwantowej w ciałach stałych; kropki i studnie kwantowe w mikrorezonatorach; sprzężenie ekscyton/elektron – foton; polarytony ekscytonowe i ich kondensacja.

Punkt I jest najobszerniejszy pod względem materiału badawczego, ale też jest to dziedzina najintensywniej przez nas uprawiana. Prace w ostatnich sześciu latach koncentrowały się na określeniu i zrozumieniu własności polaryzacyjnych emisji, efektach lokalizacji nośników/ekscytonów, strukturze pasmowej i ekscytonowej strukturze energetycznej, w tym strukturze subtelnej ekscytonów oraz emisji z różnych kompleksów ładunkowych w nanostrukturach epitaksjalnych nowego typu w zakresie bliskiej podczerwieni, głównie 1.3 – 1.55  $\mu\text{m}$ , ze szczególnym uwzględnieniem emisji

jednofotonowej. Do najważniejszych osiągnięć tego obszaru oraz najważniejszych wymiernych wyników tych prac zaliczam:

- **Wykazanie emisji jednofotonowej, w tym również w podwyższonych temperaturach do 80K**, oraz zbadanie kinetyki emisji z różnych kompleksów ładunkowych uwięzionych w kropkach kwantowych różnego typu emitujących w zakresie podczerwieni, **w tym w szczególności w kreskach kwantowych w zakresie trzeciego okna telekomunikacyjnego 1.55  $\mu\text{m}$**  (*Appl. Phys. Lett.* 103, 083104 (2013); *Phys. Rev. B* 87, 125305 (2013); *Appl. Phys. Lett.* 103, 253113 (2013); *Appl. Phys. Lett.* 105, 021909 (2014); *Appl. Phys. Lett.* 106, 233107 (2015); *Appl. Phys. Lett.* 108, 163108 (2016)).
- Uzyskanie redukcji tzw. rozszczepienia struktury subtelnej ekscytonu w kreskach kwantowych z InAs na InP za pomocą pola magnetycznego, co czyni te nanostruktury kandydatami na emitery splełanych polaryzacyjnie par fotonów w zakresie telekomunikacyjnym (*Appl. Phys. Lett.* 106, 053114 (2015)).
- Zbadanie własności polaryzacyjnych emisji z nanostruktur o dużej anizotropii kształtu, jak kreski kwantowe lub silnie wydłużone kropki kwantowe (*Phys. Rev. B* 85, 035314 (2012); *Semicon. Sci. Technol.* 27, 105022, (2012); *Acta Phys. Pol. A* 129, 48 (2016); *Physica B* 495, 70 (2016); *J. Appl. Phys.* 120, 074303 (2016); *Appl. Phys. Lett.* 109, 193108 (2016)).
- Zbadanie szczegółów struktury pasmowej oraz własności ekscytonowych i optycznych nowych typów nanostruktur epitaksjalnych emitujących w zakresie bliskiej podczerwieni (*Phys. Rev. B* 85, 035314 (2012); *J. Appl. Phys.* 111, 063522 (2012); *J. Appl. Phys.* 115, 213502 (2014); *Phys. Rev. B* 90, 045430 (2015); *Phys. Rev. B* 90, 125424 (2015); *Phys. Rev. B* 94, 115434 (2016))
- Rozwój bazy doświadczalnej i metod badawczych w Laboratorium OSN w zakresie podczerwieni: (i) wysoko-rozdzielczej spektroskopii pojedynczych kropek kwantowych; (ii) spektroskopii korelacyjnej pojedynczych fotonów; (iii) badań magneto-optycznych pojedynczych kropek kwantowych; (iv) spektroskopii wzbudzeniowej w reżimie pojedynczych kropek kwantowych.
- Cztery krajowe projektu naukowo-badawcze w tej tematyce; dwa zakończone, w których byłem kierownikiem, oraz dwa trwające, w których jestem wykonawcą.
- Realizowany obecnie **projekt badawczo-rozwojowy w ramach drugiego Polsko-Berlińskiego Konkursu Fotonicznego NCBR Półprzewodnikowe źródło pojedynczych fotonów do bezpiecznej światłowodowej komunikacji kwantowej w zakresie 1.3  $\mu\text{m}$  (FI-SEQUR, Fibre-coupled semiconductor single-photon source for secure quantum-communication in the 1.3  $\mu\text{m}$  range)**, którego celem jest skonstruowanie „przenośnego” źródła pojedynczych fotonów w oparciu o kropki kwantowe i sprzężenie światłowodowe, i pracującego w zakresie widmowym drugiego okna telekomunikacyjnego. Rolą przeze mnie kierowanego zespołu jest zbadanie własności ekscytonowych i jednofotonowych emiterów kwantowych, pod kątem ich optymalizacji dla wybranej aplikacji. Jestem liderem polskiej części konsorcjum.
- Nawiązanie lub rozwój współpracy naukowej z zespołami z innych ośrodków, zarówno doświadczalnymi (Uniw. Würzburg – prof. Sven Höfling, Uniw. Kassel – prof. J. P. Reithmaier, TU Berlin – prof. S. Reitzenstein, TU Eindhoven – prof. A. Fiore), jak i teoretycznymi (prof. Paweł Machnikowski z KFT WPPT PWr; dr hab. Michał Zieliński z UMK Toruń).
- Dwa zakończone w roku 2016 przewodu doktorskie, oba z wyróżnieniem (dr Paweł Mrowiński, dr Łukasz Dusanowski – obecnie stypendysta Fundacji Humboldta na stażu podoktorskim na Uniwersytecie w Würzburgu).

W ramach tematu nr II prowadzone są badania sprzężenia kwantowo-mechanicznego oraz własności dynamiki nośników w układach łączących w sobie struktury o różnej wymiarowości, np. kropki i studnie kwantowe, odseparowane niewielką barierą potencjału, która pozwala na zachodzenie tunelowania nośników pomiędzy obiema częściami składowymi układu. Zainteresowanie takimi

strukturami istnieje już od ponad dziesięciu lat, gdyż wykorzystane w obszarze aktywnym lasera półprzewodnikowego oferują one potencjalnie poprawę parametrów pracy przyrządu jak np. obniżenie prądu progowego, a co istotniejsze, zwiększenie szybkości modulacji takich laserów dzięki wykorzystaniu wydajnej kolekcji nośników w studni kwantowej i szybkiego procesu tunelowania ze studni do kropek kwantowych. Jednak do dziś nie udowodniono jednoznacznie poprawności tych hipotez i w szczególności, niemal nie badano takich struktur w układach materiałowych pozwalających na ich ewentualne wykorzystanie w optoelektronice telekomunikacyjnej. Dlatego też podjęliśmy ten temat, a naszym dotychczasowym wkładem do tej dziedziny jest zrozumienie pewnych elementów fizyki zachodzących zjawisk, określenie podstawowych parametrów struktury pasmowej oraz kinetyki zachodzących procesów, zarówno związanych ze złożoną relaksacją nośników w takim układzie tunelowym, ale też z procesami dyfuzji (*Phys. Rev. B* 85, 125311 (2012); *Appl. Phys. Lett.* 110, 221104 (2017)), przy czym koncentrujemy się na materiałach, które mogą pozwolić na konstrukcję takich układów w obszarze drugiego i trzeciego okna telekomunikacyjnego (*Semicon. Sci. Technol.* 26, 085004 (2011); *Semicon. Sci. Technol.* 27, 105015, (2012); *AIP Advances* 7, 015117 (2017)). Kieruję obecnie projektem międzynarodowym konkursu Harmonia z NCN dotyczącym tej tematyki, we współpracy z Uniwersytetem w Kassel (prof. J. P. Reithmaier) oraz Technion – Israel Institute of Technology (prof. G. Eisenstein).

W ramach trzeciego obszaru tematycznego zajmowałem się badaniem własności i poszukiwaniem nowych rozwiązań układów studni kwantowych przeznaczonych do emisji w zakresie średniej podczerwieni i do wykorzystania w obszarach aktywnych laserów na ten zakres widmowy, które oferowałyby poprawę efektywności czujników gazów wykorzystujących takie lasery. Wymiernymi i istotnymi efektami tej działalności są:

- Zaproponowanie nowych oraz rozwój i poprawa istniejących obszarów aktywnych międzypasmowych laserów kaskadowych przeznaczonych do zastosowań w optycznych czujnikach gazów w zakresie średniej podczerwieni (*Appl. Phys. Lett.* 100, 231908 (2012); *J. Appl. Phys.* 114, 223510 (2013); *Appl. Phys. Express* 8, 121201 (2015); *Appl. Phys. Lett.* 108, 101905 (2016); *J. Appl. Phys.* 117, 084312 (2015); *AIP Advances* 6, 115020 (2016); *AIP Advances* 7, 015015 (2017)).
- **Dwa projekty międzynarodowe Unii Europejskiej:**
  - zakończony - WideLase, 7PR, w którym byłem głównym wykonawcą, na temat szeroko przestrajalnych międzypasmowych laserów kaskadowych i czujników gazów z detekcją opartą o przestrajanie jednomodowej emisji takiego lasera. Nasze badania dotyczyły projektowania i badania obszaru aktywnego takich laserów (struktury pasmowej i własności emisyjnych) i zostały podsumowane w kilkunastu publikacjach (*J. Appl. Phys.* 114, 223519 (2013); *J. Appl. Phys.* 114, 223510 (2013); *J. Appl. Phys.* 117, 084312 (2015); *Nanoscale Res. Lett.* 10, 471 (2015); *Nanoscale Res. Lett.* 10, 402 (2015); *Appl. Phys. Express* 8, 121201 (2015));
  - trwający - iCspec, H2020, w którym jestem kierownikiem, i którego jednym z celów jest zaprojektowanie i skonstruowanie impulsowego międzypasmowego lasera kaskadowego z pasywną synchronizacją modów do konstrukcji analizatora gazów opartego o detekcję z wykorzystaniem grzebieni częstotliwości. Naszą rolą jest zaproponowanie nowych rozwiązań w obszarze aktywnym tego typu laserów, oraz zbadanie własności optycznych i dynamicznych zaprojektowanych przez nas struktur wytworzonych przez partnera technologicznego (Uniwersytet w Würzburgu). Dotychczas uzyskane wyniki opisane są w kilku publikacjach (*Appl. Phys. Lett.* 108, 101905 (2016); *Acta Phys. Pol. A* 108, 101905 (2016); *AIP Advances*, 6, 115020, (2016); *AIP Advances* 7, 015015 (2017); *Opt. Quant. Electron.* 49, 59 (2017))
- Rozwój współpracy międzynarodowej i krajowej w tematyce związanej z laserami w podczerwieni oraz optyczną detekcją gazów, w tym również z przedsiębiorstwami zajmującymi

zarówno badaniem jak i wytwarzaniem laserów i analizatorów optycznych: Siemens AG, Niemcy, Nanoplus GmbH, Niemcy, Mach8Lasers, Holandia, Norsk Elektro Optikk, Norwegia, Airoptic, Poznań;

- Organizacja cyklu międzynarodowych konferencji naukowych *Mirsens – International workshop on opportunities and challenges in mid-infrared laser-based gas sensing*, którą organizujemy od 2010 roku, i w której pierwotnie byłem sekretarzem, a w ostatniej, czwartej edycji jej przewodniczyłem (<http://mirsensconference.org/>)
- Zakończony jeden przewód doktorski (dr Filip Janiak – obecnie University of Sussex, Wielka Brytania).

Czwarty wymieniony przeze mnie obszar badawczy został nowo rozwinięty w okresie ostatnich pięciu lat, począwszy od skonstruowania stosownych układów pomiarowych (pomiar rozkładu emisji w przestrzeni rzeczywistej oraz w przestrzeni wektora falowego). Pozwala to na realizację zaawansowanych pomiarów spektroskopowych służących do bezpośredniego badania sprzężenia światło-materia w złożonych układach półprzewodnikowych (np. kropka kwantowa lub studnia kwantowa w mikrorezonatorze typu Bragga), wyznaczania krzywych dyspersji polarytonów ekscytonowych oraz badania ich kondensacji, badania własności spinowych i polaryzacyjnych oraz ewolucji tych układów fizycznych w czasie z rozdzielczością pikosekundową albo propagacji kondensatu polarytonowego w przestrzeni rzeczywistej. Zademonstrowaliśmy, między innymi, sterowanie względną kinetyką emisji ze stanów ekscytonowych i bieksytonowych w kropce kwantowej poprzez słabe sprzężenie z modem wnęki optycznej czyli przez efekt Purcella (*Acta Phys. Pol. A 129, 44 (2016)*), albo formowanie się polarytonów ekscytonowych w układzie materiałowym ze studniami kwantowymi InGaAs/GaAs o dużej zawartości indu (blisko 30%) w mikrownękach typu Bragga w podwyższonych temperaturach do co najmniej 160 K (*Acta Phys. Pol. A 124, 817 (2013)*). Ostatnio badania koncentrują się głównie na zjawiskach związanych z wpływem nieporządku na polarytony ekscytonowe oraz poszukiwaniu nowych układów fizycznych pozwalających na formowanie się polarytonów i ich kondensację w temperaturze pokojowej. Pomimo, że te prace zapoczątkowano stosunkowo niedawno, uzyskano już pierwsze istotne rezultaty naukowe, z których najważniejszymi są: (i) znalezienie optymalnych konstrukcji wnęki optycznej dla kryształów dwuwymiarowych dichalkogenków metali przejściowych dla przypadku warstwy MoSe<sub>2</sub> o grubości jednej warstwy atomowej (*2D Materials 4, 015006 (2017)*); oraz (ii) pierwsza obserwacja eksperymentalna tzw. wirtualnych gałęzi wzbudzeń (*ang. ghost branches*) w dyspersji polarytonów ekscytonowych przy impulsowym i nierezonansowym pobudzeniu układu na skutek kolektywnego rozpraszania kondensatu polarytonów ekscytonowych na naturalnych defektach potencjału (*Phys. Rev. Lett. 115, 186401 (2015)*).

## 2.2 Osiągnięcia w zakresie opieki naukowej i kształcenia kadry

Istotnym elementem mojej pracy jest opieka naukowa nad młodymi adeptami nauki, począwszy od wcześniejszych etapów studiów, czuwaniem na realizacją projektów studenckich i opieką nad Studenckim Kołem Naukowym Nanoinżynierii NANOIN (od 2008 roku), poprzez promowanie prac dyplomowych inżynierskich i magisterskich, po opiekę nad doktorantami i promotorstwo prac doktorskich, oraz kierowanie pracą dziesięcioosobowego zespołu (od 2011 roku), w którego skład wchodzi również osoby po doktoracie. Warto dodać, iż prace młodych naukowców pod moja opieką były wyróżniane oraz uzyskiwali oni granty dla początkujących naukowców, typu Preludium (NCN) czy Grant Diamentowy (MNiSW) - szczegóły poniżej. Byłem również do tej pory trzykrotnie powołany na recenzenta rozpraw doktorskich oraz trzykrotnie jako członek komisji w postępowaniach habilitacyjnych. Poniżej zamieszczam szczegółowy wykaz prac, recenzji w przewodach oraz postępowania.

## Prace inżynierskie realizowane pod moją opieką

### Przed habilitacją

- Katarzyna Mrozik, *Mikrofotoluminescencja półprzewodnikowych kropek i studni kwantowych*, 2005
- Maciej Geniusz, *Badania optyczne warstw GaN i heterostruktur AlGaN/GaN*, 2007
- Emil Uznański, *Pomiar fotoluminescencji i fotoodbicia studni kwantowych InGaSb/GaSb*, 2007
- Krzysztof Szczepański, *Optyczne właściwości struktur laserów telekomunikacyjnych z wstrzykiwaniem tunelowym za studni kwantowej do kropek kwantowych*, 2008
- Aleksander Maryński, *Temperaturowa zależność emisji z pojedynczych kresek kwantowych*, 2010

### Po habilitacji

- Mateusz Dyksik, *Otrzymywanie i mikrofotoluminescencja kropek kwantowych InAs o obniżonej gęstości powierzchniowej na podłożu z InP*, 2011
- Michał Waniczek, *Optical properties of quantum dots laser structures on InP substrate*, 2013
- Karol Kuchar, *Carrier Dynamics in Inhomogeneously Broadened InAs/InP Quantum-Dot Optical Amplifiers*, 2014
- Marta Małecka, *Charakteryzacja mikrowętek planarnych związków II – VI ze studniami kwantowymi jako emiterem*, 2014
- Andrzej Opala, *Numeryczne rozwiązanie równania Grossa-Pitajewskiego w kontekście kondensatu polarytonów ekscytonowych*, 2015
- Piotr Wroński, *Charakteryzacja optyczna sprzężonego układu studnia kwantowa - wnęka rezonansowa, wytworzonego na podłożu z InP*, 2015
- Paweł Holewa, *Kompleksy ekscytonowe w kropkach kwantowych InAs/InGaAs/GaAs emitujących przy 1.3  $\mu\text{m}$* , 2016
- Paweł Wyborski, *Spektroskopia wzbudzeniowa pojedynczych nanokryształów PbS*, 2016

## Prace magisterskie realizowane pod moją opieką

### Przed habilitacją

- Paweł Podemski, *Własności optyczne samorosnących kropek kwantowych InAs/GaAs o niskiej gęstości powierzchniowej*, 2006
- Katarzyna Wysocka, *Badanie fotoluminescencyjne i fotoodbiciowe kropek kwantowych InAs/GaAs z dodatkową warstwą InGaAs redukującą naprężenia*, 2006
- Anna Musiał, *Mikrofotoluminescencja pojedynczych kresek kwantowych*, 2009; praca nagrodzona przez Polskie Towarzystwo Fizyczne w konkursie na najlepszą pracę magisterską z Fizyki (Nagroda II stopnia)
- Filip Janiak, *Właściwości optyczne studni kwantowych na podłożu z GaSb do zastosowań fotonicznych w zakresie średniej podczerwieni*, 2010; praca nagrodzona przez Stowarzyszenie Elektryków Polskich, Polski Komitet Optoelektroniki w konkursie im. Profesora Adama Smolińskiego (Nagroda III stopnia)

### Po habilitacji

- Paweł Mrowiński, *Photocurrent Spectroscopy of Quantum Dot Micropillar Cavities*, 2012
- Aleksander Maryński, *Własności optyczne anizotropowych niskowymiarowych struktur półprzewodnikowych*, 2012
- Marta Małecka, *Badania optyczne studni kwantowych  $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}/\text{Al}_y\text{Ga}_{1-y}\text{As}$  pod kątem maksymalizacji energii wiązania ekscytonu*, 2016

- Andrzej Gawlik, *Charakteryzacja studni kwantowych InGaAs(N,Sb)/GaAs pod kątem zastosowania jako ośrodka czynnego w laserach polarytonowych*, 2014
- Michał Waniczek, *Fine structure of exciton in asymmetric quantum dots*, 2014
- Maciej Pieczarka, *Optyczne badania polarytonów ekscytonowych w zakresie telekomunikacyjnym*, 2014

#### **Granty dla młodych naukowców będących pod moją opieką**

- Maciej Pieczarka, Grant Preludium NCN, *Dynamika dyssypacyjnych kondensatów polarytonów ekscytonowych w mikrownękach quasi-jednowymiarowych*, przyznany w 2017
- Mateusz Dyksik, Grant Preludium NCN, *Właściwości obszarów aktywnych nanotermometrów wytworzonych na podłożu z GaSb badanych metodami spektroskopii optycznej*, luty 2017 – luty 2019
- Paweł Mrowiński, Grant Preludium NCN, *Kontrola anizotropii polaryzacyjnej emitera kwantowego dedykowanego na telekomunikacyjny zakres spektralny przez zmianę geometrii struktury dielektrycznej*, marzec 2016 – marzec 2018
- Maciej Pieczarka, Grant Diamentowy MNiSW, *Mechanizmy transferu energii w strukturach z silnie asymetrycznymi kropkami kwantowymi InGaAs/GaAs*, lipiec 2013 – wrzesień 2015

#### **Opieka nad doktorantami i promowane prace doktorskie**

##### Promotor w zakończonych przewodach doktorskich

- Filip Janiak, *Właściwości optyczne struktur typu drugiego na podłożu z GaSb emitujących w zakresie średniej podczerwieni*, lipiec 2014
- Łukasz Dusanowski, *Dynamika nośników, statystyka emisji fotonów oraz dekoherencja fononowa w pojedynczych kreskach kwantowych emitujących w zakresie bliskiej podczerwieni*, wrzesień 2016, **praca wyróżniona**
- Paweł Mrowiński, *Optyczne właściwości pojedynczych nanostruktur epitaksjalnych z InAs pod kątem zastosowań w nanofotonice*, grudzień 2016, **praca wyróżniona**

##### Promotor w otwartych przewodach doktorskich

- Maciej Pieczarka, *Badania kondensatów polarytonów ekscytonowych w półprzewodnikowych mikrownękach optycznych z wbudowanym nieporządkiem*
- Mateusz Dyksik, *Spektroskopia fourierowska struktur międzypasmowych laserów kaskadowych*
- Michał Kozub, *Investigation into properties of thin indium arsenide films with respect to the emission of terahertz radiation*

##### Opieka naukowa nad doktorantem pierwszego roku

- Marcin Kurka, *Badania kinetyki procesów optycznych w strukturach półprzewodnikowych przeznaczonych do zastosowań w zakresie średniej podczerwieni*

#### **Recenzje Rozpraw Doktorskich**

- Katarzyna Gołasa, *Optyczne własności dwusiarczku molibdenu (MoS<sub>2</sub>)*, Wydział Fizyki, Uniwersytet Warszawski, 2016
- Magdalena Durska, *Exciton polaritons in semiconductor microcavities: from polariton condensation in magnetic field to Bloch oscillations in modulated structures*, Departament Fizyki i Astronomii, Uniwersytet w Sheffield, Wielka Brytania, 2015

- Sartoon Fattah Poor, *Investigation of Single-Photon Emission from Quantum Dots in Semiconductor Waveguides*, Departament Fizyki Stosowanej, Uniwersytet Techniczny w Eindhoven, Holandia, 2014

#### **Członkostwo w komisjach habilitacyjnych**

- Wojciech Pacuski, *Zaprojektowanie, wytworzenie i zbadanie metodami optycznymi nowych układów mikrownęk i struktur kwantowych zawierających jony magnetyczne*, Wydział Fizyki, Uniwersytet Warszawski, powołanie do komisji w maju 2017
- Jacek Szczytko, *Własności optyczne plazmy w nanostrukturach półprzewodnikowych i metalicznych*, Wydział Fizyki, Uniwersytet Warszawski, 2015
- Michał Makowski, *Dyfrakcyjna projekcja dwuwymiarowych, barwnych rozkładów natężenia światła*, Wydział Fizyki, Politechnika Warszawska, 2014

### **2.3 Działalność popularyzująca naukę**

W uzupełnieniu do działalności naukowo-badawczej oraz dydaktycznej, angażuję się również na polu popularyzacji nauki zarówno w środowisku akademickim i w odniesieniu do studentów czy kandydatów na studentów, jak i młodzieży szkolnej, czy wręcz w przedsięwzięcia skierowane do szerszego odbiorcy – szczegółowa lista poniżej. Istotnym elementem tej aktywności jest też działalność na rzecz Koła Studenckiego NANOIN. Działalność ta ma na celu pogłębienie wiedzy i rozwój zainteresowań wśród studentów zainteresowanych najnowszymi badaniami w dziedzinach związanych z nanonaukami, poprzez, między innymi, wsparcie i pomoc studentom w organizacji konferencji studenckich oraz seminariów, w udostępnianiu laboratoriów do realizacji projektów studenckich i organizacji wizyt w laboratoriach krajowych i zagranicznych ośrodków, zarówno uczelnianych jak i w przedsiębiorstwach wykorzystujących wysokie technologie.

#### **Lista ważniejszych działań związanych z popularyzacją nauki:**

##### Przed habilitacją

- Opiekun i współorganizator wyjazdu naukowo-dydaktycznego studentów Wydziału PPT, PWr, do instytutów naukowych w Dreźnie (m.in. Fraunhofer Institute), maj 2005
- Opiekun i współorganizator wyjazdu naukowo-dydaktycznego studentów fizyki, chemii oraz elektroniki PWr, do różnych departamentów Instytutu Fizyki Uniwersytetu w Würzburgu, Niemcy, lipiec 2010

##### Po habilitacji

- Wykład na inaugurację roku akademickiego na Wydziale Podstawowych Problemów Techniki, PWr, październik 2011
- Tutorial pt. *W drodze do kondensacji polarytonów ekscytonowych w zakresie telekomunikacyjnym* dla studentów uczestniczących w II Plenerowej Konferencji Nanoinżynierii, Bielice, kwiecień 2012
- Wykład popularno-naukowy *Elektrony i fotony w pudełku* w trakcie Dolnośląskiego Festiwalu Nauki, wrzesień 2012
- Wykład *Kropki i kreski kwantowe* w ramach cyklu wykładów popularno-naukowych dla młodzieży szkolnej, Wrocław, kwiecień 2013
- Udział w audycji Radia Wrocław z cyklu „Wieczór z nauką”, maj 2013
- Wykład *O fizyce w skali nano słów kilka* dla uczniów Liceum Ogólnokształcącego nr 1 w Rawiczu oraz udział w uroczystym otwarciu Pracowni Fizycznej w tym liceum, październik 2013

- Prezentacja nt. nanoinżynierii dla kandydatów na studia w trakcie dni otwartych na Wydziale Podstawowych Problemów Techniki, PWr, marzec 2014
- Prezentacja *O fizyce w skali nano* dla uczniów XIV Liceum Ogólnokształcącego we Wrocławiu, maj 2014
- Prezentacje tematyczne o charakterze popularnym dotyczące różnych aspektów fizyki nanostruktur oraz spektroskopii optycznej dla studentów Fizyki Technicznej, WPPT, PWr oraz dla członków Koła Naukowego NANOIN, kilkakrotnie w latach 2011-2016
- Sprawowanie opieki merytorycznej nad organizacją cyklu dorocznych Plenerowych Konferencji Studenckich Nanoin, w maju roku 2017 odbyła się już szósta edycja
- Wykład specjalny dla uczestników „Studium Talent” nt. nanotechnologii, PWr, styczeń 2015 oraz styczeń 2017