



Politechnika Wroclawska

Wydział Podstawowych Problemów Techniki
Katedra Fizyki Doświadczalnej

Autoreferat habilitacyjny

Eunika Zielony

Numer ORCID: 0000-0003-1676-3638

ResearcherID: GCY-0456-2022

Wrocław 2026

Spis treści

1. Dane osobowe	3
2. Informacje o posiadanych dyplomach i stopniach naukowych.....	3
3. Informacje o dotychczasowym zatrudnieniu w jednostkach naukowych	3
4. Bibliometryczne podsumowanie dorobku naukowego.....	3
5. Omówienie osiągnięć, o których mowa w art. 219 ust. 1 pkt 2 ustawy z dnia 20 lipca 2018 r. Prawo o szkolnictwie wyższym i nauce (Dz. U. z 2021 r. poz. 478 z późn. zm.)	5
5.1 Tytuł osiągnięcia naukowego.....	5
5.2 Wykaz publikacji wchodzących w skład osiągnięcia naukowego	5
5.3 Wprowadzenie. Motywacja i tło naukowe badań	6
5.4 Opis osiągnięcia naukowego	10
5.4.1 Właściwości optyczne i elektryczne oraz defekty w heterostrukturach planarnych na bazie ZnO i ZnMgO domieszkowanych na typ p	10
5.4.2 Badania defektów oraz odkształceń sieci w heterostrukturach kolumnowych i planarnych na bazie ZnMgO/Si oraz ZnCdO/Si	15
5.4.3 Dynamika sieci krystalicznej i właściwości optyczne nanodrutów typu rdzeń-powłoka na bazie GaN.....	29
5.5 Podsumowanie.....	36
6. Informacja o wykazywaniu się istotną aktywnością naukową albo artystyczną realizowaną w więcej niż jednej uczelni, instytucji naukowej lub instytucji kultury, w szczególności zagranicznej	39
7. Osiągnięcia dydaktyczne, organizacyjne oraz popularyzujące naukę.....	45
7.1 Działalność dydaktyczna	45
7.2 Opieka naukowa nad doktorantami i studentami.....	46
7.3 Działalność w zakresie popularyzacji nauki i techniki	47
7.4 Działalność organizacyjna.....	47
8. Pozostałe informacje oraz istotne osiągnięcia	48
8.1 Opis działalności naukowej przed uzyskaniem stopnia doktora	48
8.2 Udział i forma uczestnictwa w konferencjach naukowych i seminariach	50
8.3 Udział w projektach badawczych.....	51
8.4 Staże naukowe.....	53
8.5 Działalność recenzencka	53
8.6 Otrzymane nagrody i wyróżnienia	53
8.7 Współpraca z otoczeniem gospodarczym	54
8.8 Informacje o zgłoszeniach patentowych.....	54
9. Bibliografia	54

1. Dane osobowe

Eunika Zielony (z d. Wojtyna)
Katedra Fizyki Doświadczalnej
Wydział Podstawowych Problemów Techniki
Politechnika Wrocławska
ul. Wybrzeże Wyspiańskiego 27, 50-370 Wrocław, Polska
tel.: +48 71 320 26 42
adres e-mail: eunika.zielony@pwr.edu.pl

2. Informacje o posiadanych dyplomach i stopniach naukowych

- 20.11.2012** Stopień naukowy: **doktor nauk fizycznych**
Wydział Podstawowych Problemów Techniki, Politechnika Wrocławska
Tytuł rozprawy: „Właściwości elektrooptyczne struktur półprzewodnikowych na bazie ZnTe z kropkami kwantowymi CdTe”
Promotor rozprawy: dr hab. Ewa Popko, prof. PWR
(praca została obroniona z wyróżnieniem)
- 08.07.2008** Tytuł zawodowy: **magister inżynier**
Wydział Podstawowych Problemów Techniki, Politechnika Wrocławska
kierunek: Fizyka techniczna, specjalność: Fotonika
Tytuł pracy magisterskiej: „Procesy relaksacyjne w strukturach prostujących ZnTe – metal.”
Promotor pracy: dr hab. Ewa Popko

3. Informacje o dotychczasowym zatrudnieniu w jednostkach naukowych

- 01.10.2016 – obecnie** Politechnika Wrocławska, Wydział Podstawowych Problemów Techniki, Katedra Fizyki Doświadczalnej
Stanowisko: adiunkt badawczo-dydaktyczny
- 01.10.2012 – 30.09.2016** Politechnika Wrocławska, Wydział Podstawowych Problemów Techniki, Instytut Fizyki
Stanowisko: asystent badawczo-dydaktyczny

4. Bibliometryczne podsumowanie dorobku naukowego

Dane bibliometryczne według bazy danych **Web of Science**. Stan na dzień 19.01.2026r.

Mój dorobek naukowy po uzyskaniu stopnia doktora (tj. od 2013 do 2026 r.) obejmuje łącznie **50 publikacji**, w tym **48 artykułów** w czasopiśmie o zasięgu międzynarodowym oraz **2 artykuły** w krajowym *Przeglądzie Elektrotechnicznym*. Z ogólnej liczby 50 prac **40** stanowią publikacje niezwiązane z tematem habilitacji, natomiast **10 artykułów** tworzy osiągnięcie naukowe przedstawione w niniejszym autoreferacie (patrz paragraf 5.2). Zestawienie wszystkich opublikowanych prac wraz z ich liczbą w danym czasopiśmie, przypisanym współczynnikiem wpływu (Impact Factor, IF) i/lub aktualną punktacją ministerialną (MNiSW) prezentuje Tabela 1.

Tabela 1. Podsumowanie publikacji w czasopismach posiadających wartość współczynnika wpływu (Impact Factor, dane z bazy *Web of Science*, 19.01.2026) i/lub aktualną punktację ministerialną (wykaz z 05.01.2024).

Czasopismo	Liczba publikacji	Impact Factor	Punktacja MNiSW
Small	1	12.1	200
Advanced Optical Materials	1	7.2	140
Applied Surface Science	4	6.9	140
Solar Energy	2	6.6	140
Solar Energy Materials and Solar Cells	3	6.3	140
Journal of Alloys and Compounds	8	6.3	100
Materials Research Bulletin	1	5.7	100
Sensors and Actuators A-Physical	2	4.9	100
Materials Science and Engineering B	2	4.6	100
Materials Science in Semiconductor Processing	1	4.6	70
Journal of Materials Science	1	3.9	100
Crystal Growth & Design	1	3.4	100
Optics Letters	1	3.3	140
Journal of Physics D-Applied Physics	1	3.2	70
Energies	1	3.2	140
Materials	1	3.2	140
Beilstein Journal of Nanotechnology	2	2.7	100
Journal of Applied Physics	5	2.5	100
Journal of Electronic Materials	1	2.5	40
Crystals	1	2.4	70
Thin Solid Films	1	2.0	70
Materials Science-Poland	2	1.6	70
Bulletin of the Polish Academy of Sciences – Technical Sciences	1	1.1	100
Sensor Letters	1	0.558	brak
Optica Applicata	1	0.5	40
Physica Status Solidi C	1	brak	40
Physics, Chemistry and Applications of Nanostructures: Reviews and Short Notes	1	brak	brak
Przegląd elektrotechniczny	2	brak	70
SUMA	50	209.058	5000

Sumaryczny IF wszystkich artykułów naukowych opublikowanych po doktoracie wg bazy Web of Science i listy Journal Citation Reports (JCR): **209.058**.

Sumaryczny IF czasopism, w których opublikowano prace wchodzące w skład osiągnięcia habilitacyjnego wg bazy Web of Science i listy JCR: **63.9**.

Całkowita liczba cytowań wszystkich artykułów naukowych opublikowanych po doktoracie wg bazy Web of Science: **725**, w tym bez autocytowań: **656**.

Indeks Hirscha wg bazy Web of Science: **15**, wg bazy Scopus: **15**, wg Google Scholar: **17**.

W niniejszym autoreferacie przyjęłam następujący cykl oznaczeń cytowanej literatury:

- prace stanowiące zbiór publikacji wchodzących w skład osiągnięcia habilitacyjnego oznaczyłam literą **H**, np. [H1];

- prace niezwiązane z tematem habilitacji, opublikowane po uzyskaniu stopnia doktora oznaczyłam literą **N**, np. [N1];
- prace niezwiązane z tematem habilitacji, opublikowane przed uzyskaniem stopnia doktora oznaczyłam literą **D**, np. [D1];
- cytowane w tekście autoreferatu prace innych autorów oznaczyłam cyframi, zachowując odpowiednią kolejność, np. [1], [2], [3-4], itd.

5. Omówienie osiągnięć, o których mowa w art. 219 ust. 1 pkt. 2 ustawy z dnia 20 lipca 2018 r. Prawo o szkolnictwie wyższym i nauce (Dz. U. z 2021 r. poz. 478 z późn. zm.)

5.1 Tytuł osiągnięcia naukowego

Osiągnięciem naukowym będącym podstawą ubiegania się o stopień naukowy doktora habilitowanego jest jednotematyczny cykl publikacji złożony z dziesięciu prac o wspólnym tytule:

„Badania wpływu defektów i odkształceń sieci na własności heterostruktur planarnych i kolumnowych na bazie półprzewodników szerokoprzerwowych ZnO i GaN”

5.2 Wykaz publikacji wchodzących w skład osiągnięcia naukowego

Cykl dziesięciu publikacji stanowiących rozprawę habilitacyjną wraz z informacją o współczynniku wpływu (impact factor, IF) z roku publikacji oraz aktualnej punktacji ministerialnej.

[H1] M.A. Pietrzyk, **E. Zielony**, M. Stachowicz, A. Reszka, E. Placzek-Popko, A. Wierzbicka, E. Przeddziecka, A. Droba, A. Kozanecki, „Electro-optical characterization of ZnO/ZnMgO structure grown on p-type Si (111) by PA-MBE method”, [Journal of Alloys and Compounds](#) 587 (2014) 724-728.

IF = 2.999, Punktacja MNiSW: 100.

[H2] **E. Zielony**, E. Przeddziecka, E. Placzek-Popko, W. Lisowski, M. Stachowicz, K.M. Paradowska, R. Jakiela, A. Kozanecki, „Deep levels in the MBE ZnO:As/n-GaN diodes - photoluminescence, electrical properties and deep level transient spectroscopy”, [Journal of Alloys and Compounds](#) 742 (2018) 296-303.

IF = 4.175, Punktacja MNiSW: 100.

[H3] M.A. Pietrzyk, A. Wierzbicka, **E. Zielony**, A. Pieniazek, R. Szymon, E. Placzek-Popko, „Fundamental studies of ZnO nanowires with ZnCdO/ZnO multiple quantum wells grown for tunable light emitters”, [Sensors and Actuators A: Physical](#) 315 (2020) 112305.

IF = 3.407, Punktacja MNiSW: 100.

[H4] **E. Zielony**, A. Wierzbicka, R. Szymon, M.A. Pietrzyk, E. Placzek-Popko, „Investigation of micro-strain in ZnO/(Cd,Zn)O multiple quantum well nanowires grown on Si by MBE”, [Applied Surface Science](#) 538 (2021) 148061.

IF = 7.392, Punktacja MNiSW: 140.

[H5] R. Szymon, **E. Zielony**, A. Lysak, M.A. Pietrzyk, „Influence of the type of interlayer on current transport mechanisms and defects in n-ZnO/ZnCdO/p-Si and n-ZnCdO/ZnO/p-Si heterojunctions grown by molecular beam epitaxy”, [Journal of Alloys and Compounds](#) 951 (2023) 169859.

IF = 5.8, Punktacja MNiSW: 100.

[H6] **E. Zielony**, M.A. Pietrzyk, „Diode characteristics of ZnO/ZnMgO nanowire p-n junctions grown on Si by molecular beam epitaxy”, [Materials Science and Engineering B: Advanced Functional Solid-State Materials](#) 268 (2021) 115148.

IF = 3.407, Punktacja MNiSW: 100.

[H7] **E. Zielony**, G. Szalewska, M.A. Pietrzyk, „Probing n-ZnMgO/p-Si nanowire junctions: Insights into composition, strain, and defects via Raman spectroscopy and electrical measurements”, [Journal of Alloys and Compounds](#) 1010 (2025) 177851.

IF = 6.3, Punktacja MNiSW: 100.

[H8] **E. Zielony**, R. Szymon, A. Wierzbicka, A. Reszka, M. Sobanska, W. Pervez, Z.R. Zytkeiwicz, „Strain and lattice vibration mechanisms in GaN-Al_xGa_{1-x}N nanowire structures on Si substrate”, [Applied Surface Science](#) 588 (2022) 152901.

IF = 6.7, Punktacja MNiSW: 140.

[H9] R. Szymon, **E. Zielony**, M. Sobanska, T. Stachurski, A. Reszka, A. Wierzbicka, S. Gieraltowska, Z.R. Zytkeiwicz, „Enhancing GaN nanowires performance through partial coverage with oxide shells”, [Small](#), 2024, 2401139.

IF = 12.1, Punktacja MNiSW: 200.

[H10] R. Szymon, M. Sobanska, Z.R. Zytkeiwicz, S. Gieraltowska, **E. Zielony**, „Spectral reflectance of core-shell GaN-(Al/Hf)O_x nanowires within adapted effective medium approximation”, [Optics Letters](#) 49 (2024) 7082-7085.

IF = 3.3, Punktacja MNiSW: 140.

5.3 Wprowadzenie. Motywacja i tło naukowe badań

Dynamiczny rozwój mikroelektroniki, optoelektroniki i nanotechnologii przyczynił się do poszukiwania nowych, bardziej wydajnych materiałów wykorzystywanych do budowy precyzyjnych urządzeń wkraczających we wszystkie niemal dziedziny życia. Rozwój ten wiąże się z rosnącym zapotrzebowaniem konsumentów na urządzenia (opto)elektroniczne o coraz bardziej zaawansowanych funkcjach. Stąd też konieczność prowadzenia badań podstawowych nowych materiałów, prace nad optymalizacją technologii związków półprzewodnikowych oraz dalsza miniaturyzacja ich struktur. Naukowcy poświęcają dużo wysiłku studiowaniu materiałów, które w przyszłości mogą zastąpić współczesne przyrządy półprzewodnikowe oparte na krzemie. Do takich materiałów należą m.in. tlenek cynku (ZnO) i azotek galu (GaN) oraz struktury półprzewodnikowe bazujące na tych związkach, które stanowią główny przedmiot moich zainteresowań naukowych.

Tlenek cynku jest półprzewodnikiem z grupy II-VI układu okresowego pierwiastków, z kolei azotek galu należy do związków grupy III-V. Oba materiały posiadają podobne struktury pasmowe,

parametry sieciowe oraz właściwości optyczne [1-3]. Krystalizują naturalnie w strukturze wurcytu, choć inne struktury krystaliczne, takie jak blenda cynkowa czy kubiczna (sól kuchenna), również mogą występować w obu przypadkach [4, 5]. Zarówno ZnO, jak i GaN posiadają szeroką, prostą przerwę wzbronioną o wartości około 3.4 eV w temperaturze pokojowej [6], co sprawia, że oba materiały znajdują zastosowanie w emiterach i detektorach światła ultrafioletowego i niebieskiego [7, 8]. Istotnym parametrem, który odróżnia GaN od ZnO jest energia wiązania ekscytonu, która dla GaN wynosi ~ 25 meV, natomiast w przypadku ZnO jest ponad dwa razy większa, osiągając wartość ~ 60 meV [9]. Wyższa energia wiązania ekscytonu w ZnO zapewnia mu większą wydajność luminescencji w temperaturze pokojowej, co sprawia, że ZnO może konkurować z GaN, który zdominował rynek optoelektroniczny, zwłaszcza w produkcji diod LED we wspomnianym zakresie widmowym.

Struktury półprzewodnikowe na bazie GaN i ZnO są wytwarzane różnymi technikami, wśród których znajdują się m.in. epitaksja z wiązek molekularnych (MBE), epitaksja z fazy gazowej z użyciem związków metaloorganicznych (MOVPE), epitaksja z fazy gazowej wodorków (HVPE, stosowana w przypadku GaN), a także metoda zol-żel z użyciem wirówki laboratoryjnej, osadzania warstw atomowych (ALD) lub metoda hydrotermalna (stosowane w przypadku ZnO). Warto podkreślić, że technologia wzrostu GaN jest bardzo dobrze rozwinięta, co pozwala na wytwarzanie wysokiej jakości warstw i heterostruktur. Niemniej jednak, procesy otrzymywania azotków pozostają kosztowne, a produkcja wielkoformatowych podłoży nadal napotyka trudności [10]. W przeciwieństwie do tego, ZnO charakteryzuje niski koszt wytwarzania, a dzięki technikom takim jak metoda hydrotermalna istnieje możliwość skalowania procesu technologicznego do poziomu przemysłowego [11]. Dodatkowo ZnO jest materiałem nietoksycznym, co poszerza zakres jego zastosowań, m.in. w czujnikach substancji chemicznych i biologicznych [12] oraz w ogniwach fotowoltaicznych [13]. Zważywszy na szerokie możliwości aplikacyjne GaN i ZnO, wciąż istnieje potrzeba prowadzenia badań podstawowych tych materiałów w różnych formach, takich jak cienkie warstwy, proszki czy różnorodne nanostruktury. Każda odmiana technologii wymaga systematycznych pomiarów wytworzonych próbek w celu optymalizacji procesu wzrostu, co ma na celu uzyskanie wydajnych struktur lub złączy o pożądanych parametrach i właściwościach strukturalnych, optycznych oraz elektrycznych. Badania podstawowe właściwości fizycznych, a w szczególności defektów i odkształceń sieci w wybranych strukturach planarnych i kolumnowych na bazie ZnO oraz GaN, stanowią główny temat niniejszego autoreferatu habilitacyjnego.



Ważnym problemem do rozwiązania, utrudniającym wcielenie w życie szeregu zastosowań ZnO, pozostaje jego efektywne domieszkowanie na typ p [14, 15]. Dla porównania, w przypadku GaN przewodnictwo dziurowe uzyskano dzięki domieszkowaniu magnezem, co umożliwiło opracowanie homołączki p-n oraz rozwój diod LED i laserów niebieskich/UV [16]. ZnO z natury jest półprzewodnikiem typu n i łatwo wprowadzić do niego niesamoistne domieszki donorowe. Poza tym ma on skłonność do samokompensacji, prowadzącej do tego, że niezwykle trudno jest uzyskać w tym materiale przewodnictwo dziurowe [15]. Wciąż poszukuje się nowych idei czy metod aby rozwiązać ten problem. Fakt ten stanowi poważną barierę m.in. dla wytwarzania homołączki p-ZnO/n-ZnO. W związku z tym otrzymywane są heterozłącza (p-n lub p-i-n) na bazie tlenku cynku o przewodnictwie elektronowym, w których materiałem stosowanym jako podłoże jest zazwyczaj Si lub GaN domieszkowany na typ p. Takie rozwiązanie ma swoje wady i zalety. Z jednej strony uzyskanie wysokiej jakości diod n-ZnO/p-Si miałoby olbrzymie znaczenie dla rozwoju mikroelektroniki, która oparta jest na technologii krzemowej. Z drugiej zaś strony, wadą

heterozłączy n-ZnO/p-Si jest bardzo duże niedopasowanie sieciowe pomiędzy tymi półprzewodnikami (rzędu $\sim 15\%$ [17]). To powoduje, że powstają naprężenia na ich międzypowierzchni, co z kolei przyczynia się do powstawania defektów.

Pomimo trudności związanych z uzyskaniem przewodnictwa p-typu w ZnO, można je osiągnąć głównie poprzez domieszkowanie pierwiastkami z grupy V, takimi jak azot (N), fosfor (P), arsen (As) czy antymon (Sb) [15, 18]. Chociaż liczne badania wykazały możliwość uzyskania przewodnictwa dziurowego w ZnO, nadal występują problemy z jego stabilnością. Aby jednak uzyskać zadowalające przewodnictwo typu p, konieczne jest dokładne zrozumienie powstawania akceptorów oraz ich związku z defektami krystalicznymi w ZnO. Niewiele jest prac eksperymentalnych przedstawiających wyniki badań koncentracji domieszek akceptorowych oraz pułapek akceptorowych w ZnO typu p. Stało się to motywacją do podjęcia przeze mnie badań nad strukturami złączowymi zawierającymi ZnO i ZnMgO domieszkowane na typ p, które rozpoczęłam krótko po doktoracie. Uzyskane wyniki badań właściwości elektrycznych i optycznych heterozłączy p-Si/ZnO:N/ZnMgO:N/i-ZnO/ZnMgO/ZnO oraz p-ZnO:As/n-GaN zostały podsumowane w pracach [H1] i [H2].



Rozwój nanotechnologii oraz możliwości wytwarzania kropek kwantowych, nanokolumn, nanodrutów, nanowstęg czy studni kwantowych na bazie ZnO i GaN otworzyły nowe perspektywy zastosowań tych związków, jak również sprawiły, że struktury te są nadal interesujące dla podstawowych badań materiałowych i związanych z nimi zjawisk fizycznych. Szczególną uwagę zwracają quasi-jednowymiarowe nanostruktury, które cechują się wysoką jakością niezależnie od podłoża, na którym są otrzymywane. Pozwala to na zwiększenie możliwości w architekturze przyrządów wytwarzanych w procesie heteroepitaksji, ponieważ ograniczenia związane z niedopasowaniem parametrów sieci krystalicznej warstwy czynnej do podłoża stają się pomijalne [19]. Ponadto, wysoki stosunek powierzchni-do-objętości w strukturach kolumnowych oraz niewielka powierzchnia styku z podłożem pozwalają zredukować naprężenia w układzie, co znacząco zmniejsza koncentrację defektów w strukturze. To z kolei jest kluczowe dla funkcjonalności i wydajności nano-urządzeń wykorzystujących nanodrutę (nanokolumnę) [20].

Heterozłącza na bazie nanodrutów często realizuje się w układzie rdzeń-powłoka (ang. core-shell), ponieważ taka konfiguracja zapewnia wyższą wydajność luminescencji, większą ruchliwość elektronów oraz lepszą stabilność chemiczną. Wynika to z faktu, że obszar aktywny pokryty warstwą powłoki jest chroniony przed stanami powierzchniowymi [21]. Powłoki pasywują stany powierzchniowe i przez to zwiększają wydajność luminescencji [22]. Dzięki temu nanodrutę typu rdzeń-powłoka stanowią korzystniejsze rozwiązanie w porównaniu z nanodrutami bez powłoki. Architektura „core-shell” umożliwia dodatkowo sterowanie właściwościami strukturalnymi i optycznymi nanodrutów, w tym naprężeniami oraz szerokością przerwy energetycznej [23]. W zależności od planowanych zastosowań, nanodrutę rdzeń-powłoka wykorzystują zaawansowane podejścia, takie jak inżynieria przerwy energetycznej czy inżynieria naprężeń. W tym drugim przypadku sieć krystaliczna nanodrutę ulega odkształceniom wynikającym z naprężeń wygenerowanych po osadzeniu powłoki. Powoduje to powstanie zróżnicowanych potencjałów deformacyjnych w obszarach rdzenia i powłoki, co wpływa na strukturę elektronową nanodrutów oraz ich właściwości strukturalne i optyczne. Z tego względu przed praktycznym wykorzystaniem tych układów niezbędne są szczegółowe badania tych własności. Dlatego też badania defektów oraz odkształceń w strukturach kolumnowych na bazie ZnO oraz w nanodrutach rdzeń-powłoka na bazie GaN stały się jednym z tematów moich badań po uzyskaniu stopnia doktora (prace [H3]-[H10]).



Dokonując przeglądu literatury naukowej oraz ostatnich osiągnięć w tematyce tlenków szeroko-przerwowych, można zauważyć, że wciąż prowadzone są badania różnych struktur opartych na związkach takich jak ZnO, CdO, MgO, CuO, etc. To wskazuje na niewyczerpane możliwości aplikacyjne tlenków, które zależą od konkretnej kombinacji materiałów oraz zaprojektowanej struktury.

Łączenie ze sobą ww. związków i tworzenie trójskładnikowych stopów, takich jak ZnCdO czy ZnMgO, wywołało ponowne zainteresowanie tlenkiem cynku. Okazuje się bowiem, że po dodaniu kadmu do ZnO uzyskuje się stop o mniejszej przerwie wzbronionej niż ZnO, do ok. 2.3 eV [24], z kolei dodanie Mg zwiększa ją do ~7 eV [25]. Dzięki temu możliwe jest przestrajanie energii emitowanego promieniowania w zakresie od światła zielonego po głęboki ultrafiolet. Zatem możliwości tworzenia stopów ZnO z Mg lub Cd doprowadziły do rozwoju badań w kierunku inżynierii przerwy energetycznej tego związku. Należy jednak podkreślić, że synteza trójskładnikowych stopów ZnCdO i ZnMgO jest wyzwaniem technologicznym, gdyż w obu przypadkach dochodzi do mieszania się faz krystalicznych tlenków (ang. mixed phase regions) [24, 25]. Badania wykazały, że przejście fazowe z heksagonalnej struktury wurcytu do kubicznej struktury soli kuchennej obserwuje się przy zawartości ok. 30-40% Mg w $Zn_{1-x}Mg_xO$ oraz przy ok. 60-70% Cd w $Zn_{1-x}Cd_xO$ [24, 25]. To dowodzi, że istnieją trudności z uzyskaniem stabilnych i jednorodnych stopów ZnCdO i ZnMgO w pełnym zakresie składu. Ciekawym rozwiązaniem jest możliwość tworzenia studni kwantowych ZnO/ZnCdO/ZnO lub ZnMgO/ZnO/ZnMgO, za pomocą których można również modyfikować zakres spektralny emitowanego światła (kontrolując skład i szerokość studni/bariery), jednocześnie zwiększając wydajność luminescencji dzięki efektom kwantowym wynikającym z ograniczenia przestrzennego nośników [26, 27]. Heterozłącza planarne oraz kolumnowe zawierające ZnCdO i ZnMgO, wytworzone na podłożach krzemowych, a w szczególności ich właściwości elektrooptyczne, naprężenia i odkształcenia sieci oraz defekty stały się również obiektem moich zainteresowań, podsumowanych w pracach [H3]-[H7].

Wybór ZnO i GaN jako głównych obiektów moich badań wynikał, między innymi, z ich komplementarnego znaczenia. GaN, dzięki zaawansowanej technologii wzrostu i dojrzałej bazie aplikacyjnej, stanowił dla mnie punkt odniesienia – materiał o dobrze poznanych właściwościach, pozwalający weryfikować stosowane metody badawcze. Z kolei ZnO – materiał wymagający dalszych badań podstawowych, ale o ogromnym potencjale aplikacyjnym – zarówno ze względu na jego unikalne właściwości optyczne, jak i możliwość taniego wytwarzania oraz łatwego kształtowania w różnorodne nanostruktury. Analiza defektów, odkształceń sieci oraz właściwości elektrooptycznych w strukturach planarnych i nanodrutowych obu materiałów stanowiła naturalną konsekwencję wynikającą z tego koncepcji badawczej.



Niniejszy autoreferat habilitacyjny łączy badania podstawowe, ukierunkowane na analizę właściwości fizycznych, defektów oraz naprężeń w strukturach planarnych oraz w nanostrukturach kolumnowych tlenkowych i azotkowych, z badaniami stosowanymi nad potencjałem aplikacyjnym złączy półprzewodnikowych. Moje badania rozpoczęłam od najprostszych struktur planarnych, zawierających cienkie warstwy ZnO i ZnMgO osadzone na podłożach Si oraz GaN (prace [H1] i [H2]). Skupiłam się w nich przede wszystkim na analizie właściwości elektrooptycznych oraz defektów – zarówno rodzimych, jak i związanych z domieszkami akceptorowymi. Charakterystykę defektów przeprowadziłam wykorzystując metody elektryczne, w tym pomiary fotopojemności oraz technikę niestacjonarnej spektroskopii głębokich poziomów pułapkowych (DLTS). W dalszym etapie podjęłam badania bardziej złożonych układów, a mianowicie nanodrutów na

bazie ZnO oraz GaN otrzymanych na podłożach krzemowych. W pracach [H3-H10] skoncentrowałam się przede wszystkim na analizie odkształceń sieci w nanodrutach zawierających wielowarstwy (supersieci) oraz powłoki (układy „core-shell”). Badania defektów w tych nanostrukturach prowadziłam również, choć w większym stopniu przy użyciu metod optycznych, takich jak spektroskopia Ramana czy fotoluminescencja. Potencjał aplikacyjny zarówno złączy planarnych, jak i kolumnowych, wykorzystujących wspomniane związki, zweryfikowałam przy użyciu metod elektrycznych, obejmujących pomiary charakterystyk prądowo-napięciowych i pojemnościowo-napięciowych, a także analizę pojemności elektrycznej i fotopojemności w funkcji temperatury.

Szczegółowe **cele moich badań**, prowadzonych w ramach prac [H1-H10], stanowiących osiągnięcie naukowe w niniejszym autoreferacie, obejmowały:

- ❖ Identyfikację defektów o charakterze akceptorowym związanych z azotem i arsenem oraz innych defektów rodzimych występujących z heterozłączach planarnych na bazie tlenku cynku wytworzonych na podłożach Si oraz GaN.
- ❖ Badania defektów oraz określenie ich pochodzenia w heterostrukturach nanodrutowych ZnMgO/Si ze studniami kwantowymi ZnMgO/ZnO/ZnMgO o różnych szerokościach.
- ❖ Wyznaczenie kluczowych parametrów elektrycznych heterozłączy planarnych (n-ZnO/ZnCdO/p-Si) oraz kolumnowych (n-ZnO/ZnMgO/p-Si) i ocenę ich potencjału aplikacyjnego.
- ❖ Identyfikację mechanizmów powstawania odkształceń sieci w nanodrutach ZnO zawierających studnie kwantowe ZnO/Zn(Cd,Mg)O oraz nanodrutach rdzeń-powłoka GaN-AlGaIn i GaN-AlO_x/HfO_x.
- ❖ Kompleksową analizę właściwości optycznych, w szczególności emisyjnych (wydajności i stabilności luminescencji), nanodrutów rdzeń-powłoka GaN-AlO_x/HfO_x.

5.4 Opis osiągnięcia naukowego

Opis osiągnięcia naukowego obejmuje kluczowe rezultaty badań zawartych w cyklu publikacji [H1]-[H10]. W pierwszej części omówione zostały prace [H1] i [H2], dotyczące heterostruktur planarnych na bazie ZnO i ZnMgO domieszkowanych na typ p. Kolejna część przedstawia pięć publikacji ([H3]-[H7]) poświęconych heterostrukturom tlenkowym, planarnym i kolumnowym, na bazie trójskładnikowych związków zawierających kadm i magnez: ZnCdO i ZnMgO. Ostatnia część odnosi się do wyników wchodzących w skład trzech publikacji ([H8]-[H10]), obejmujących szczegółowe badania nanodrutów typu rdzeń-powłoka na bazie azotku galu.

5.4.1 Właściwości optyczne i elektryczne oraz defekty w heterostrukturach planarnych na bazie ZnO i ZnMgO domieszkowanych na typ p

Prace nad heterostrukturami na bazie tlenku cynku zapoczątkowały moje badania prowadzone po uzyskaniu stopnia doktora. Dotyczyły układów planarnych z warstwami ZnO i ZnMgO, domieszkowanych arsenem (As) oraz azotem (N) w celu uzyskania przewodnictwa dziurowego. Wyniki pomiarów tych struktur zostały opublikowane w dwóch artykułach [H1] i [H2]. Pierwsza z nich ([H1]) dotyczy badań właściwości optycznych i elektrycznych heterostruktury p-Si/ZnO:N/ZnMgO:N/i-ZnO/ZnMgO/ZnO, zaprojektowanej jako dioda p-i-n. Jak zostało wspomniane w paragrafie 5.3, zarówno energia przerwy wzbronionej, jak i struktura krystaliczna

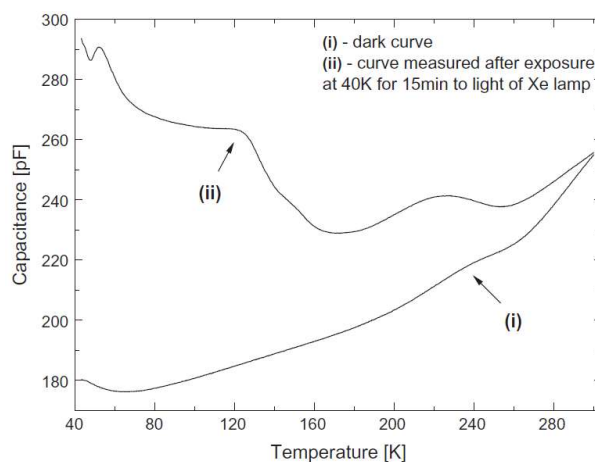
stopów ZnMgO mogą być kontrolowane poprzez zawartość Mg oraz odpowiednie sterowanie warunkami wzrostu, np. temperaturą procesu. W przypadku badanej próbki zawartość Mg została określona na podstawie danych z pomiarów dyfrakcji rentgenowskiej (XRD) oraz widm fotoluminescencji (PL) i wynosiła około 15%. Taka zawartość magnezu w stopie wskazuje, że badana struktura powinna wykrytalizować w fazie heksagonalnej, co następnie potwierdziły pomiary XRD. Oprócz metod XRD i PL zastosowano również skaningową mikroskopię elektronową (SEM) – w celu analizy morfologii powierzchni próbki, oraz katodoluminescencję (CL) do zbadania jej właściwości emisyjnych. Za wytworzenie próbki oraz charakterystykę jej właściwości strukturalnych i optycznych odpowiadała grupa z Instytutu Fizyki Polskiej Akademii Nauk (IF PAN) w Warszawie. Z kolei ja przeprowadziłam badania elektryczne złącza p-i-n, wykorzystując metodę termicznie stymulowanej pojemności (ang. thermally stimulated capacitance, TSCap) oraz pomiary charakterystyk prądowo-napięciowych (I-V) i pojemnościowo-napięciowych (C-V).

Widma PL badanej heterostruktury ujawniły pasmo emisji w pobliżu przerwy wzbronionej ZnO (ang. near band edge, NBE): linię przypisaną ekscytonom związanym na neutralnym donorze (D^0X) oraz szerokie pasmo emisji na swobodnych ekscytonach (ang. free excitons, FX). Pasma przy 3.313 eV przypisano ekscytonowi związanemu na neutralnym akceptorze (A^0X). Stwierdzono, że jego obecność może wskazywać na kompleks akceptorowy związany z azotem i defektami sieci ZnO. Pozostałe dwa pasma zinterpretowano jako rekombinację donor-akceptor (ang. donor-acceptor pair, DAP) oraz jej replikę fononową (1LO DAP). Pomiary CL analizowanej heterostruktury potwierdziły obecność emisji NBE w zakresie UV. Ujawniły dodatkowo szerokie pasmo związane z emisją na głębokich poziomach defektowych. W literaturze nazywana jest „emisją defektową” z przypisywanym jej pasmem DLE (ang. deep level emission) [28, 29], które występuje w widzialnym zakresie spektralnym (tutaj zakres od ok. 1.7 do 2.9 eV).

Ostatnim etapem pracy [H1] była przeprowadzona przeze mnie analiza właściwości elektrycznych wytworzonego heterozłącza p-Si/ZnO:N/ZnMgO:N/i-ZnO/ZnMgO/ZnO. Charakterystyki I-V potwierdziły właściwości prostujące badanej diody. Na podstawie tych pomiarów wyznaczyłam potencjał wbudowany (V_{bi}) oraz współczynnik idealności (n) diody. Wywnioskowałam, że wysoka wartość współczynnika idealności wskazuje na transport prądu wynikający z mechanizmów generacji-rekombinacji nośników ładunku, tunelowania bądź prądów z udziałem defektów w złączu lub na międzypowierzchniach. W niskich temperaturach charakterystyki I-V ulegały przesunięciu w stronę dodatnich napięć polaryzacji. Zjawisko to przypisałam obecności „wolnych” poziomów pułpkowych lub stanów powierzchniowych heterozłącza. Podkreśliłam również, że obserwowany efekt może wynikać z obecności metastabilnych defektów. Z krzywych C-V obliczyłam potencjał wbudowany złącza i zbadalam jego zależność w funkcji temperatury. Dodatkowo, na podstawie pomiarów C-V wyznaczyłam profile głębokościowe koncentracji nośników w złączu, które pokazały, że ich rozkład jest niemal jednorodny w obrębie obszaru zubożonego takiego złącza.

Istotnym rezultatem tych badań było zaobserwowanie przeze mnie efektu trwałej fotopojemności (ang. persistent photocapitance, PPCap), czyli zjawiska gwałtownego wzrostu pojemności złącza pod wpływem oświetlenia, który utrzymuje się przez długi czas po jego wyłączeniu. Rys. 1 prezentuje wyniki pomiarów TSCap oraz związany z nimi efekt PPCap. Efekt ten był badany w wielu związkach półprzewodnikowych zawierających metastabilne defekty (np. w Ref. [30]) i zwykle występuje w niskich temperaturach. Autorzy Ref. [31] wykazali na podstawie obliczeń z zasad pierwszych, że za trwałe fotoefekty w ZnO odpowiadają defekty rodzime (a nie domieszki), w szczególności wakanse tlenowe. W oparciu o tę koncepcję wyjaśniłam efekt trwałej

fotopojemności pokazany na Rys. 1 dla heterozłącza p-Si/ZnO:N/ZnMgO:N/i-ZnO/ZnMgO/ZnO.



Rys. 1. Temperaturowe zależności pojemności złącza p-Si/ZnO:N/ZnMgO:N/i-ZnO/ZnMgO/ZnO. Obie krzywe zostały zarejestrowane przy polaryzacji diody napięciem zaporowym o amplitudzie -1 V, podczas ogrzewania próbki od 40 K do temperatury pokojowej, po wcześniejszym schłodzeniu jej przy polaryzacji napięciem dodatnim równym 0.5 V. Krzywa (i) odnosi się do pomiaru w ciemności, natomiast krzywa (ii) oznacza pomiar również w ciemności, ale po wcześniejszym oświetleniu próbki światłem lampy Xe przez 15 minut w temperaturze 40 K. Rysunek z pracy [H1].

Dolna oraz górna krzywa na Rys. 1 przedstawiają zależność pojemności złącza od temperatury, uzyskaną podczas powolnego ogrzewania próbki w ciemności (i) oraz po jej oświetleniu białym światłem lampy Xe w 40 K (ii). Po oświetleniu pojemność wzrosła o ok. 100 pF i utrzymywała się do ~280 K, co wskazuje na efekt trwałej fotopojemności. Powyżej tej temperatury obie krzywe się pokrywają, gdyż energia termiczna umożliwia elektronom opuszczenie pułapek. Zwiększenie pojemności wynika z emisji elektronów z poziomów pułapkowych do pasma przewodnictwa, natomiast skoki pojemności na krzywej (ii) odzwierciedlają procesy wychwytu i emisji elektronów przez metastabilne defekty. Wykonane przeze mnie pomiary termicznie stymulowanej pojemności wykazały efekt trwałej fotopojemności, który jednoznacznie wskazał na obecność metastabilnych defektów w badanej próbce. Wynik ten znalazł też potwierdzenie w charakterystykach I-V.

Podsumowując, wyniki pomiarów elektrycznych zaświadczyły o zadowalających właściwościach prostujących badanego złącza p-i-n. Najważniejszym osiągnięciem naukowym przedstawionym w pracy [H1] była identyfikacja defektów o charakterze akceptorowym, związanych z azotem oraz defektami rodzimymi ZnO, potwierdzona metodami PL i CL, a także wykazanie ich metastabilnej natury na podstawie obserwowanego efektu trwałej fotopojemności. Istotnym rezultatem było również zrozumienie wpływu tych defektów na charakterystyki elektryczne badanej diody p-i-n. W publikacji tej opracowałam koncepcję badawczą, przeprowadziłam badania metodami elektrycznymi oraz wyznaczyłam profile koncentracji. Dokonałam analizy uzyskanych wyników i przygotowałam wykresy do pracy. Uczestniczyłam w przygotowaniu manuskryptu – zredagowałam część dotyczącą rezultatów moich pomiarów oraz brałam udział w opracowaniu odpowiedzi na uwagi recenzentów odnoszących się do wyników moich badań. Jestem drugim autorem publikacji [H1], a wyniki moich badań stanowią ok. połowę jej zawartości.

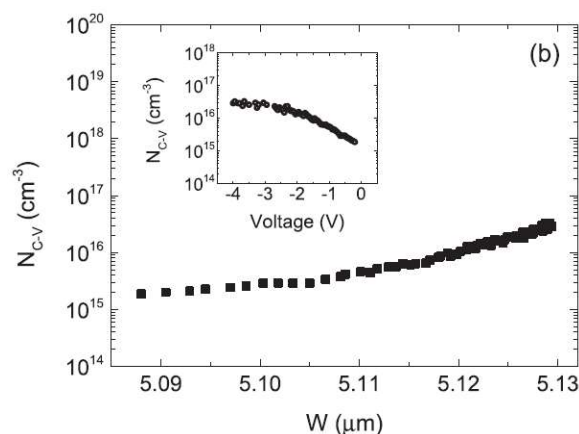
Publikacja [H2] dotyczy analizy właściwości warstw ZnO domieszkowanych arsenem na typ p. Badałam w niej defekty w złączu ZnO:As/n-GaN wykorzystując różne metody

eksperymentalne. W okresie prowadzenia moich badań dostępnych było niewiele publikacji poświęconych właściwościom elektrycznym ZnO typu p oraz defektom akceptorowym w tym materiale, w przeciwieństwie do licznych artykułów na temat badań defektów donorowych w ZnO typu n. Uważa się, że defekty punktowe, takie jak wakans cynkowy, atom tlenu w pozycji międzywęzłowej oraz tlen w pozycji antypołożeniowej, tworzą poziomy akceptorowe w ZnO [32, 33]. Niemniej jednak, uzyskanie przewodnictwa dziurowego w ZnO wciąż pozostaje wyzwaniem ze względu na zjawisko samokompensacji oraz dominację poziomów donorowych [15, 34]. Od momentu pojawienia się pierwszych wyników dotyczących domieszkowania akceptorowego, w literaturze toczyła się szeroka dyskusja, która zaowocowała powstaniem licznych modeli teoretycznych opisujących mechanizmy wprowadzania domieszek akceptorowych do ZnO. Na podstawie obliczeń z zasad pierwszych zasugerowano, że w przypadku ZnO:As defekt $As_{Zn}-2V_{Zn}$, w którym atom arsenu zajmuje miejsce cynku i tworzy kompleks z dwoma wakansami cynku, prowadzi do powstania płytkiego poziomu akceptorowego w przerwie wzbronionej ZnO i stanowi źródło przewodnictwa typu p w tym materiale [35, 36]. Podano, że obliczona energia jonizacji tego kompleksu wynosi ~ 0.15 eV [35] i była zgodna z wynikami badań eksperymentalnych prowadzonych na próbkach ZnO typu p, w których uzyskano wartości w zakresie od 0.12 do 0.18 eV [34, 37]. W pracy [H2] badałam zarówno defekty, jak i mechanizmy transportu nośników w złączu ZnO:As/n-GaN, za pomocą metod elektrycznych, takich jak pomiar charakterystyk I-V i C-V oraz sygnału DLTS. Do analizy głębokich poziomów i właściwości emisyjnych badanej struktury zastosowano również technikę fotoluminescencji. Jednorodność domieszkowania warstwy ZnO arsenem zweryfikowano za pomocą spektrometrii masowej jonów wtórnych (SIMS), natomiast właściwości elektronowe arsenu w warstwie ZnO:As określono na podstawie rentgenowskiej spektroskopii fotoelektronów (XPS). Proces krystalizacji próbki oraz pomiary PL, SIMS i XPS przeprowadzono w IF PAN w Warszawie. Ja natomiast skupiałam się na analizie istotnych z punktu widzenia zastosowań właściwości elektrycznych wspomnianego złącza.

Badania profili głębokościowych metodą SIMS potwierdziły skuteczność domieszkowania arsenem – wykazano, że koncentracja atomów As była stała od powierzchni aż do międzypowierzchni ZnO/GaN. Widma XPS ujawniły obecność linii, które przypisano wiązaniami As-O, tj. arsenowi ulokowanemu w miejscu tlenu (As_O) oraz kompleksowi akceptorowemu $As_{Zn}-2V_{Zn}$. Analiza wykazała, że względne udziały tych stanów wynosiły odpowiednio 18.1% dla As_O i 81.9% dla $As_{Zn}-2V_{Zn}$, co potwierdziło dominację głębokich kompleksów akceptorowych $As_{Zn}-2V_{Zn}$ w badanej warstwie ZnO:As.

Widmo PL analizowanej próbki było zdominowane przez piki, które przypisano zarówno luminescencji z warstwy ZnO:As jak i z podłoża GaN. Pasma emisji z ZnO:As zawierało składowe odpowiadające rekombinacji D^0X , jej replice fononowej $D^0X - LO$, emisji FX oraz przejściom donor-akceptor. Szerokie pasmo przy 3.190 eV w 10 K powiązano z wakansem cynkowym (V_{Zn}), natomiast pik przy 3.306 eV, widoczny poniżej 150 K, przypisano rekombinacji swobodnych elektronów z neutralnymi akceptorami (ang. free-electron-to-neutral-acceptor, FA). Jego pochodzenie potwierdzono na podstawie nietypowej zależności energii tego piku od temperatury, wskazującej, że jest to akceptor najprawdopodobniej związany z arsenem. Porównanie z teoretycznym przebiegiem odpowiadającym replice fononowej przejścia FX , oznaczonym symbolem $FX - LO_{Theory}$, wykluczyło alternatywną interpretację. Znając energię przejścia FA w danej temperaturze oraz wartość przerwy wzbronionej ZnO w 0 K, wyznaczono energię wiązania akceptora, otrzymując wartość ~ 0.13 eV, zgodną z teoretycznymi przewidywaniami dla kompleksu $As_{Zn}-2V_{Zn}$ (patrz wyżej).

Druga część pracy [H2] dotyczy rezultatów pomiarów elektrycznych, które przeprowadziłam. Wykonane wcześniej pomiary charakterystyk I-V (praca [N5]), potwierdziły właściwości prostujące złącza. W publikacji [H2] skupiłam się na analizie współczynnika idealności złącza (n) w celu zbadania mechanizmów transportu nośników. Na podstawie otrzymanej zależności temperaturowej n potwierdziłam, że wraz ze spadkiem temperatury prąd diody zmienia się z generacyjno-rekombinacyjnego na tunelowy. Charakterystyka prądowo-napięciowa w skali logI-logV w temperaturze pokojowej wykazała cztery obszary z różnymi mechanizmami transportu nośników. W szczególności w regionie II zaobserwowałam zależność $I \sim e^{B \cdot V}$, typową dla mechanizmu multi-tunelowego wychwytu i emisji nośników ładunku (MTCE, ang. multitunneling capture-emission process). Charakterystyczną cechą prądów MTCE jest temperaturowa zależność prądu nasycenia (I_0), który rośnie wykładniczo wraz z temperaturą. W badanym przypadku prąd I_0 był aktywowany termicznie. Otrzymałam, że obliczona energia aktywacji pułapki ($E_a \approx 0.12$ eV) odpowiedzialnej za ten mechanizm, jest zbliżona do energii wiązania akceptora, którą wyznaczono z pomiarów PL i przypisano ją kompleksowi akceptorowemu $As_{Zn}-2V_{Zn}$. Kolejnym potwierdzeniem obecności stanów pułapkowych w badanym złączu była analiza obszarów III i IV krzywej logI-logV, w których spełnione było prawo potęgowe: $I \sim KV^m$, charakterystyczne dla prądu ograniczonego ładunkiem przestrzennym (SCLC, ang. *space charge limited current*). Model tego prądu zakłada, że w przypadku braku pułapek w obszarze ładunku przestrzennego $m = 2$, natomiast w ich obecności $m > 2$ [38]. Uzyskane wyniki pozwoliły mi stwierdzić, że w obszarach III i IV mechanizm transportu nośników jest zdominowany przez prąd SCLC. Zidentyfikowanie dwóch współistniejących mechanizmów przewodzenia diody – MTCE i SCLC, obu związanych ze stanami pułapkowymi – potwierdziło obecność defektów w złączu ZnO:As/n-GaN.

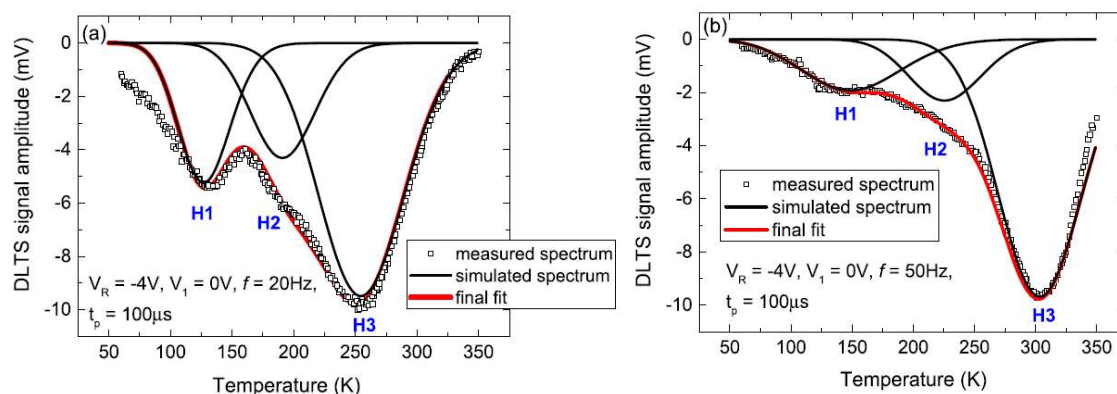


Rys. 2. Profil koncentracji zjonizowanych domieszek w złączu ZnO:As/n-GaN w temperaturze pokojowej. Rysunek z pracy [H2].

Pomiary charakterystyk C-V umożliwiły mi wyznaczenie koncentracji zjonizowanych domieszek akceptorowych (N_{C-V}) w złączu oraz określenie ich rozkładu w zależności od szerokości obszaru zubożonego oraz napięcia polaryzacji (patrz Rys. 2). Na tej podstawie wywnioskowałam, iż obszar ładunku przestrzennego w badanym złączu rozciąga się głównie po stronie warstwy ZnO:As.

Ostatnia część tej pracy poświęcona była pomiarom sygnału DLTS heterozłącza ZnO:As/n-GaN. Ujawniły one obecność trzech pików związanych z pułapkami dziurowymi: niskotemperaturowego pikę H1 oraz dwóch wysokotemperaturowych H2 i H3 (por. Rys. 3). Analizując parametry wyznaczone dla tych pułapek oraz porównując je z danymi literaturowymi,

przypisałam ich pochodzenie do następujących defektów: H1 – płytki poziom akceptorowy, który prawdopodobnie pochodzi od kompleksu $As_{Zn}-2V_{Zn}$ (energia aktywacji tej pułapki jest zbliżona do energii wiązania akceptora wyznaczonej z pomiarów PL oraz do energii aktywacji poziomu pułapkowego uzyskanej z pomiarów I-V); H2 – to najprawdopodobniej wakans cynkowy (V_{Zn}), na co według literatury wskazuje energia jonizacji tego defektu; pułapka H3 również może być związana z V_{Zn} .



Rys. 3. Zmierzone i dopasowane widma DLTS heterozłącza ZnO:As/n-GaN: (a) dla częstotliwości repetycji 20 Hz oraz (b) 50 Hz. Czarne kwadraty przedstawiają dane eksperymentalne, czarne linie ciągłe oznaczają poszczególne składowe z dopasowania widm funkcją Gaussa, natomiast czerwone linie ciągłe przedstawiają wynikowe, zasymulowane widma. Rysunek z pracy [H2].

Podsumowując, najważniejszym osiągnięciem naukowym pracy [H2] było zidentyfikowanie głębokich poziomów defektowych w warstwie ZnO:As oraz określenie ich pochodzenia. Obecność kompleksów akceptorowych $As_{Zn}-2V_{Zn}$, potwierdzona pomiarami PL, I-V oraz DLTS, stanowiła dowód uzyskania przewodnictwa dziurowego w ZnO:As. Istotnym z punktu widzenia zastosowań wynikiem było wyznaczenie kluczowych parametrów złącza p-n ZnO:As/GaN, takich jak potencjał wbudowany, współczynnik idealności oraz koncentracja domieszki akceptorowej. Uzupełnieniem badań elektrycznych, które przeprowadziłam, były analizy spektroskopowe (PL, SIMS, XPS), wykonane w IF PAN, w których interpretacji i opisie również brałam udział. Byłam współautorką koncepcji badań i publikacji oraz wiodącą autorką (autorką korespondencyjną), odpowiedzialną za przygotowanie manuskryptu, jego rewizję po recenzji oraz opracowanie wersji finalnej.

Warto podkreślić, że wyniki badań nad tlenkiem cynku domieszkowanym azotem i arsenem stanowią istotny wkład w rozwój prac nad uzyskaniem stabilnego przewodnictwa dziurowego w tym materiale. Pogłębione zrozumienie zjawisk fizycznych zachodzących w heterozłączach p-ZnO/n-Si oraz p-ZnO/n-GaN, a także wyznaczenie ich kluczowych parametrów elektrycznych, ma istotne znaczenie z perspektywy przyszłych zastosowań w optoelektronice. Co więcej, wyniki te wpisują się w szerszy kontekst prac nad możliwością wytworzenia w pełni tlenkowych homozłączy p-ZnO/n-ZnO.

5.4.2 Badania defektów oraz odkształceń sieci w heterostrukturach kolumnowych i planarnych na bazie ZnMgO/Si oraz ZnCdO/Si

Cykl publikacji [H3]-[H7] w dużej mierze koncentruje się na badaniach defektów oraz odkształceń sieci krystalicznej w heterostrukturach ZnMgO/Si oraz ZnCdO/Si, wykrytych w postaci nanodrutów (ang. nanowires, NWs) z pojedynczymi lub

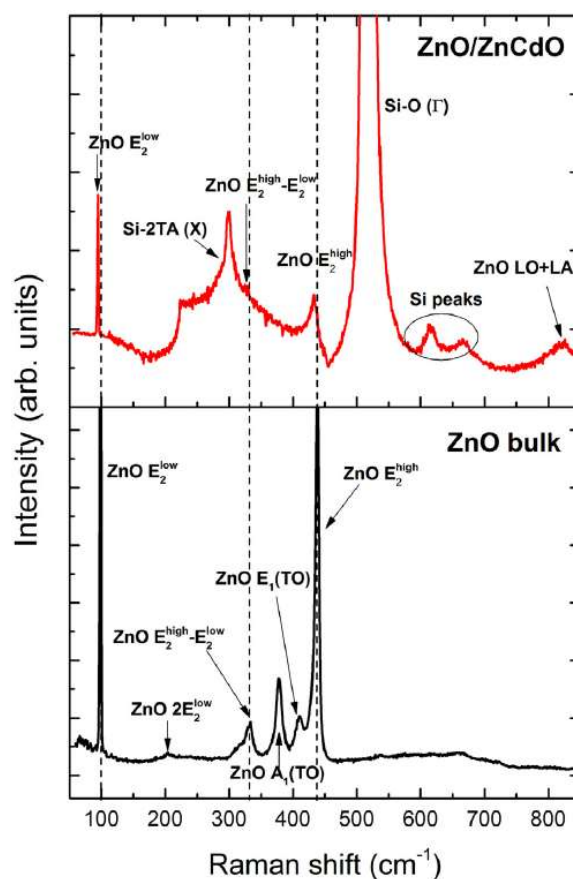
wielokrotnymi studniami kwantowymi (ang. multiple quantum wells, MQWs), określanymi także jako supersieci (ang. superlattices, SLs). Spośród tych prac jedynie [H5] dotyczy układów planarnych na bazie ZnCdO.

Powodem wytworzenia układów tlenkowych w postaci nanodrutów było zminimalizowanie naprężeń strukturalnych wynikających z dużych różnic w stałych sieciowych między materiałem tlenkowym, a krzemowym podłożem ([H3], [H4]). Krzem wybrano ze względu na jego stosunkowo niski koszt w porównaniu z innymi półprzewodnikami (np. SiC czy GaN), powszechnie stosowanymi jako podłoża dla epitaksji ZnO, a także ze względu na dostępność dużych powierzchniowo płytek i potencjał integracji z bardziej złożonymi układami technologii krzemowych. Ponadto, wykorzystanie nanodrutów w heterostrukturach prowadzi do zwiększenia intensywności emisji światła dzięki zjawisku kwantowego ograniczenia przestrzennego nośników (ang. quantum confinement). Kluczowe znaczenie dla zastosowań ma osadzanie wielokrotnych studni kwantowych ZnCdO/ZnO lub ZnMgO/ZnO w nanodrutach. Jak wspomniałam we wstępie, wprowadzenie Cd umożliwia przesunięcie emisji w kierunku światła zielonego, natomiast obecność Mg – w stronę głębokiego ultrafioletu. Pierwsza publikacja z tego cyklu ([H3]) dotyczy heterostruktur ZnCdO/Si wytworzonych na bazie nanodrutów ZnO z 30-okresowymi studniami kwantowymi i barierami ZnCdO/ZnO o grubości ok. 2 nm. Była to jedna z pierwszych prac na temat tego typu nanostruktur otrzymanych na podłożach Si. Wcześniejsze artykuły innych autorów opisywały nanostruktury kolumnowe z MQWs ZnCdO/ZnO, otrzymane na podłożach Al₂O₃ [39] lub GaN [40]. W niniejszej pracy zastosowano szereg metod pomiarowych, takich jak SEM, PL, XRD oraz spektroskopia Ramana, do scharakteryzowania właściwości optycznych i strukturalnych wspomnianych próbek. Pomiar ramanowski wykonałam samodzielnie, natomiast pozostałe badania oraz proces krystalizacji próbek zostały przeprowadzone w IF PAN w Warszawie.

Pomiary SEM potwierdziły, iż badane struktury ZnCdO/ZnO wykryły w postaci nanokolumn. Widma PL wykazały obecność kilku pasm emisyjnych, wśród których – oprócz przejść optycznych przypisanych D^0X , FX oraz emisji defektowej – zidentyfikowano pasmo pochodzące od MQWs, a także odpowiadającą mu replikę fononową $1LO$. W podstawowych skanach XRD wykonanych w trybie θ - 2θ zidentyfikowano sygnały pochodzące od podłoża Si, ZnO oraz od supersieci ZnCdO/ZnO. Pomiar XRD potwierdził wurcytową fazę struktur ZnCdO/ZnO. Nie zarejestrowano fazy kubicznej. W celu bardziej szczegółowej analizy skanów wykonano pomiary map przestrzeni odwrotnej (ang. reciprocal space map, RSM) dla odbicia symetrycznego 00.2 oraz asymetrycznego 11.4 , pochodzących od SLs ZnCdO/ZnO. Zaobserwowano wyraźne poszerzenie wokół refleksów Bragga pochodzących od krzemu oraz od SLs. Stwierdzono, że owe poszerzenie sygnałów XRD na mapach może być wynikiem mikro-naprężeń (odkształceń sieci krystalicznej) wygenerowanych w strukturze nanodrutów. Podobny efekt został zaobserwowany przez innych autorów w przypadku dyfraktogramów rentgenowskich nanodrutów GaN wytworzonych na podłożu Si (por. Ref. [41]). Autorzy tej pracy sugerowali, że mikro-naprężenia mogą być spowodowane koalescencją nanodrutów, co w naszym przypadku okazało się być również prawdopodobne i znalazło potwierdzenie w obrazie SEM.

Ostatnia część pracy [H3] dotyczy pomiarów widm Ramana wspomnianych heterostruktur. Rys. 4 przedstawia nierezonansowe widma Ramana dla próbki referencyjnej ZnO oraz próbki nanodrutów z SLs ZnCdO/ZnO, uzyskane przy wzbudzeniu laserem Ar⁺ o długości fali 514.5 nm. W przypadku próbki referencyjnej ujawniło ono mody fononowe charakterystyczne dla struktury wurcytovej tlenku cynku, mianowicie: E_2^{low} , $2E_2^{low}$, $E_2^{high} - E_2^{low}$, $A_1(TO)$, $E_1(TO)$ oraz E_2^{high} . Z kolei widmo Ramana próbki nanodrutów z supersieciami wykazało cztery linie

fononowe pochodzące od ZnO, oznaczone jako: E_2^{low} , $E_2^{high} - E_2^{low}$, E_2^{high} oraz $LO + LA$, a także piki charakterystyczne dla krzemu: $Si - 2TA(X)$, $Si - O(\Gamma)$ oraz dwa zlokalizowane w okolicach $\sim 620 \text{ cm}^{-1}$ i $\sim 670 \text{ cm}^{-1}$. Porównując widma Ramana próbki z NWs oraz referencyjnej ZnO, zaobserwowałam przesunięcie modów fononowych ZnO w próbce z NWs ku niższym częstościom (por. Rys. 4). Zasugerowałam, że obserwowane przesunięcie (ang. red-shift) może wynikać z obecności mikro-naprężeń rozciągających w nanodrutach, a ich źródłem może być obecność kadmu w SLs lub koalescencja nanodrutów.



Rys. 4. Nierezonansowe widma Ramana dla próbki referencyjnej ZnO oraz próbki nanodrutów z supersieciami ZnCdO/ZnO, uzyskane przy wzbudzeniu laserem Ar^+ o długości fali 514.5 nm. Rysunek z pracy [H3].

Podsumowując, najistotniejszym osiągnięciem pracy [H3] była identyfikacja mikro-naprężeń w nanodrutach na podstawie analizy wyników XRD oraz spektroskopii Ramana, co stało się punktem wyjścia do pogłębionych badań opisanych w kolejnym artykule [H4]. W pracy [H3] samodzielnie wykonałam pomiary widm rozpraszania Ramana, opracowałam i przeanalizowałam wyniki. Brałam również aktywny udział w przygotowywaniu manuskryptu oraz odpowiedzi na uwagi recenzentów.

Publikacja [H4] stanowi kontynuację badań nad mikro-naprężeniami w heterostrukturach ZnCdO/Si, wytworzonych na bazie nanodrutów ZnO zawierających 30-krotne studnie kwantowe ZnCdO/ZnO oraz ZnO/CdO o grubości warstw bariery i studni $\sim 2\text{-}3 \text{ nm}$. W celu szczegółowej analizy mikro-naprężeń w omawianych strukturach nanodrutowych zastosowano dwie techniki badawcze – dyfrakcję rentgenowską oraz spektroskopię Ramana. Samodzielnie wykonałam część

pomiarów ramanowskich wspomnianych próbek, natomiast pomiary XRD oraz proces krystalizacji próbek zostały przeprowadzone w IF PAN w Warszawie.

Pierwsza część artykułu dotyczy badań XRD. Wykonano pomiary map przestrzeni odwrotnej (RSM) dla odbicia symetrycznego 0002 dla obu typów struktur. Na tej podstawie wyznaczono wartości parametru sieciowego c dla warstwy buforowej ZnO oraz supersieci ZnO/ZnCdO i ZnO/CdO. Zaobserwowano poszerzenie sygnałów XRD pochodzących od bufora ZnO oraz supersieci, wynikające ze zróżnicowania rozmiarów i kształtów NWs (tzw. efekty rozmiarowe, ang. size effects) lub z obecności mikro-naprężeń w ich strukturze.

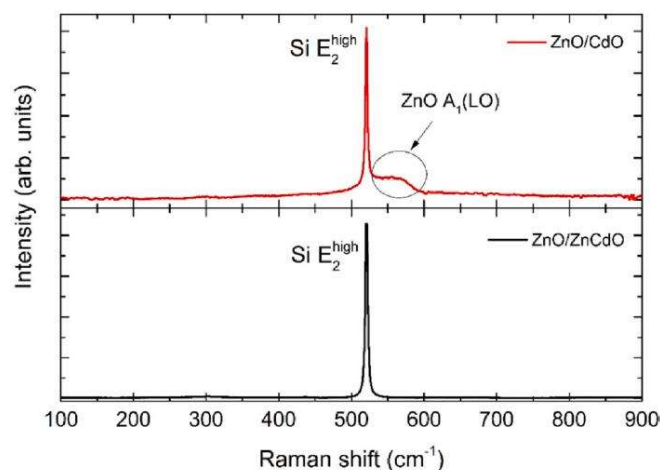
Obecność mikro-naprężeń w nanodrutach może wydawać się sprzeczna z powszechnie przyjętą wiedzą na temat jednowymiarowych nanostruktur, które dzięki dużemu stosunkowi powierzchni-do-objętości oraz niewielkiej powierzchni styku z podłożem powinny być niemal całkowicie wolne od naprężeń. Wyniki pomiarów XRD wykazały, że w obu typach próbek struktury nanodrutów są w pełni zrelaksowane względem podłoża krzemowego, tj. w skali makroskopowej, choć niekoniecznie w skali mikroskopowej. Mikro-naprężenia w nanodrutach mogą występować lokalnie i prawdopodobnie wynikają z ich koalescencji (o czym wspomniano też w pracy [H3]), fluktuacji składu chemicznego lub obecności defektów w nanodrutach [41, 42]. Z tego względu ich wpływ nie może zostać pominięty. Aby zidentyfikować mikro-naprężenia w nanodrutach, przeanalizowano odkształcenia sieci krystalicznej w badanych strukturach. W tym celu wykonano pomiary map RSM dla odbicia asymetrycznego $11\bar{2}4$, pochodzącego od SLs ZnCdO/ZnO i ZnO/CdO. Na podstawie tych danych wyznaczono wartości parametru sieciowego a_L (w płaszczyźnie równoległej do powierzchni podłoża), następnie obliczono dwuosiowe odkształcenia (ϵ_{xx}) w nanodrutach wzdłuż osi a (kierunku x). Uzyskane dodatnie wartości ϵ_{xx} wskazały na obecność naprężeń rozciągających. Wynik ten był zgodny z intuicją opartą na relacji stałych sieciowych: $a_L > a_{relax}$ (a_{relax} – parametr odpowiadający zrelaksowanej stałej sieciowej warstwy SLs).

Spektroskopia Ramana jest wyjątkowo czuła na wszelkie zaburzenia sieci krystalicznej, dlatego zastosowałam ją w celu rozszerzenia analizy odkształceń ϵ_{xx} przeprowadzonej metodą XRD. Zastosowanie tej techniki pozwoliło uzyskać dodatkowe informacje na temat jakości krystalicznej i składu chemicznego próbek. **Warto podkreślić, iż publikacja [H4] była pierwszą, w której przedstawiliśmy szczegółową analizę naprężeń w nanodrutach**, opartą na pomiarach ramanowskich oraz analizie odkształceń sieci krystalicznej w strukturach kolumnowych zawierających MQWs ZnO/CdO i ZnO/ZnCdO, wytworzonych na podłożu Si metodą MBE.

Wyniki pomiarów nierezonansowych widm Ramana próbek prezentuje Rys. 5. Ich analiza wykazała, że w przypadku NWs z supersiecią ZnO/CdO obserwuje się wyraźne poszerzenie linii ZnO $A_1(LO)$ (por. Rys. 6). Natomiast w widmie Ramana próbki z supersiecią ZnO/ZnCdO mod $A_1(LO)$ nie był widoczny – przypuszczalnie jego obecność była przesłonięta przez dominującą linię pochodzącą od podłoża Si. Poszerzenie linii $A_1(LO)$ wykazały widma Ramana innych analizowanych nanodrutów z supersiecią ZnO/CdO, różniących się grubością studni kwantowych CdO oraz barier ZnO.

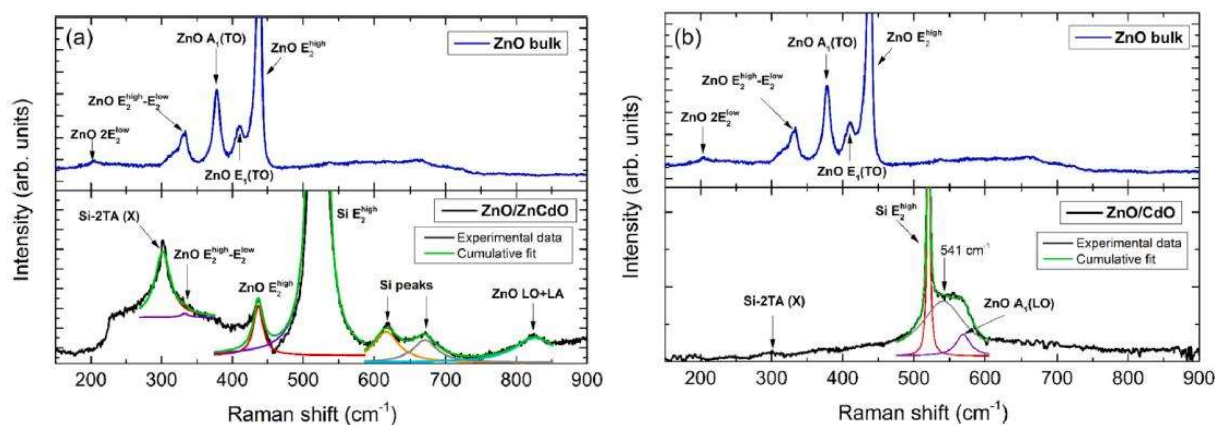
Poszerzenie linii $A_1(LO)$ powiązałam z obecnością mikro-naprężeń w nanodrutach. Uwzględniając jednak silną tendencję kadmu do dyfuzji w ZnO, przyjęłam także możliwość migracji Cd z warstwy CdO do otaczającej bariery ZnO. W wyniku tego procesu na granicy ZnO/CdO supersieci mogła powstać cienka warstwa stopu ZnCdO, co mogło doprowadzić do fluktuacji zawartości Cd w strukturze i w efekcie do poszerzenia linii $A_1(LO)$ w widmach Ramana. W jednej z prac innych autorów wykazano, że dyfuzja Cd przyczynia się do przesunięcia maksimum

emisji ku czerwieni w widmach luminescencyjnych supersieci ZnO/ZnCdO [39]. Wyjaśniłam również, że szerokie linie w widmach Ramana nanodrutów występują bardzo często, a ich pojawienie się tłumaczy się statystycznym rozrzutem rozmiarów i kształtów nanodrutów lub obecnością defektów w tych strukturach.



Rys. 5. Nierezonansowe widma Ramana próbek nanodrutów z supersieciami ZnCdO/ZnO i CnO/CdO, uzyskane przy wzbudzeniu laserem Ar^+ o długości fali 514.5 nm. Rysunek z pracy [H4].

Oprócz analizy czynników wpływających na poszerzenie linii ramanowskiej $ZnO A_1(LO)$, zbadalam również położenie poszczególnych modów fononowych w nierezonansowych widmach Ramana omawianych próbek. Rys. 6 przedstawia widma Ramana wraz z dopasowaniami funkcją Lorentza. Wyznaczone częstości zidentyfikowanych modów ramanowskich pochodzących od ZnO porównalam z danymi literaturowymi.



Rys. 6. Nierezonansowe widma Ramana (a) dla próbki referencyjnej ZnO oraz próbki NWs z supersieciami ZnO/ZnCdO, (b) dla próbki referencyjnej ZnO oraz heterostruktury z NWs i supersieciami ZnO/CdO. Widma dopasowano funkcją Lorentza. Rysunek z pracy [H4].

W zakresie częstości 150-900 cm^{-1} wykryłam następujące mody fononowe: (i) w próbce referencyjnej ZnO – $2E_2^{low}$, $E_2^{high} - E_2^{low}$, $A_1(TO)$, $E_1(TO)$ oraz E_2^{high} ; (ii) w NWs z supersiecią ZnO/ZnCdO – trzy mody fononowe pochodzące od ZnO, tj. $E_2^{high} - E_2^{low}$, E_2^{high} oraz $LO + LA$, a także cztery mody pochodzące od podłoża Si, mianowicie $2TA(X)$, $Si - O(\Gamma)$ (oznaczany również jako E_2^{high}) oraz dwa piki Si przy około 620 cm^{-1} i 670 cm^{-1} ; (iii) w NWs z supersiecią

ZnO/CdO – dwa mody pochodzące od podłoża Si, tj. $2TA(X)$ i E_2^{high} , natomiast w obrębie poszerzonego modu $A_1(LO)$, po stronie niskoczęstotliwościowej, wyodrębniłam dodatkowy pik związany z obszarem bogatym w kadm. Porównując widma Ramana próbek z nanodrutami z widmem próbki referencyjnej ZnO, zauważyłam wyraźny ‘red-shift’ modów E_2^{high} i $A_1(LO)$ pochodzących od ZnO w próbkach nanodrutów. Na tej podstawie obliczyłam odkształcenia sieci w nanodrutach (składową ϵ_{xx}), bazując na modelu dwuosiowych odkształceń w strukturze heksagonalnej. Otrzymane wartości odkształceń bardzo dobrze pokrywały się z wynikami uzyskanymi z pomiarów XRD. Potwierdziłam w ten sposób obecność mikro-naprężeń rozciągających w obu typach struktur. Na podstawie uzyskanych rezultatów wywnioskowałam, że potencjalnymi źródłami tych mikro-naprężeń mogą być: obecność kadmu w stopie ZnCdO w strukturach z SLs ZnO/ZnCdO (ze względu na większy promień jonowy Cd w porównaniu do Zn); dyfuzja kadmu do barier ZnO podczas wzrostu supersieci ZnO/CdO; koalescencja nanodrutów; a także statystyczny rozrzut ich rozmiarów i kształtów ([H4]). Zaznaczyłam również, że przy analizie przesunięć częstości modów fononowych w nanostrukturach należy uwzględnić kwantowy efekt rozmiarowy (quantum confinement), który wpływa zarówno na ograniczenie ruchu nośników ładunku, jak i na częstości fononów optycznych. Efekt ten był rozważany w przypadku wielu struktur w skali nano (np. w Ref. [43]). Niemniej jednak, odgrywa on istotną rolę jedynie w nanostrukturach o wymiarach rzędu kilku nanometrów lub w nanodrutach o średnicy od kilku do kilkunastu nanometrów [43]. Ponieważ badane nanodrutki charakteryzowały się większą średnicą (40-45 nm), oceniłam, że wpływ kwantowego efektu rozmiarowego w ich przypadku można pominąć.

Rezonansowe pomiary ramanowskie (przy wzbudzeniu próbek laserem He-Cd o długości fali 325 nm) wykonałam w celu uzyskania sygnału pochodzącego od ZnO i zminimalizowania sygnału od podłoża Si. Wykazują one obecność trzech multifononowych modów optycznych LO: 1LO, 2LO i 3LO. Pik 1LO odpowiada modowi $A_1(LO)$ a pozostałe to mody wyższych rzędów. Wyniki te świadczą o tym, że badane próbki wykryły w heksagonalnej strukturze wurcytu. Dodatkowo, analiza położenia poszczególnych linii potwierdziła również przesunięcie w kierunku niższych częstości w przypadku próbek z nanodrutami.

Podsumowując, do najważniejszych osiągnięć pracy [H4] zaliczam: (1) wykazanie obecności naprężeń w strukturach kolumnowych; (2) identyfikacja rozciągających mikro-naprężeń w nanodrutach z supersieciami ZnO/ZnCdO i ZnO/CdO potwierdzona dwiema niezależnymi metodami: XRD i spektroskopią Ramana; (3) uzyskanie zgodności wyników obu metod, które wykazały bardzo zbliżone wartości odkształceń dwuosiowych; (4) określenie źródeł mikro-naprężeń i wynikających z nich odkształceń sieci, obejmujących obecność kadmu w studniach kwantowych oraz jego dyfuzję do barier ZnO, fluktuacje składu w stopie ZnCdO, koalescencję nanodrutów oraz niejednorodność ich rozmiarów i kształtów. Wyniki w publikacji [H4] są nowatorskie w kontekście heterostruktur supersieciowych ZnO/ZnCdO i ZnO/CdO wzrastających w formie nanodrutów na podłożach Si(111). W pracy [H4] dobrałam metodologię i byłam wykonawcą części badań doświadczalnych (pomiar widm Ramana). Kierowałam częścią prac zespołu z IF PAN (zainicjowałam wykonanie określonych pomiarów XRD i współuczestniczyłam w ich analizie). Przygotowałam pierwowzór manuskryptu oraz odpowiedzi na uwagi recenzentów. Odpowiadałam za finalną wersję manuskryptu.

Aby uzyskać pełniejszy obraz procesów zachodzących w nanodrutach zawierających subtelne supersieci ZnO/Cd(Zn)O, zdecydowaliśmy się zbadać alternatywną konfigurację planarnych struktur referencyjnych. Struktury te, wytworzone na bazie tych samych związków

półprzewodnikowych, stanowiły punkt wyjścia do dalszych badań nad heterozłączami ZnCdO/Si, których wyniki opublikowano w [H5].

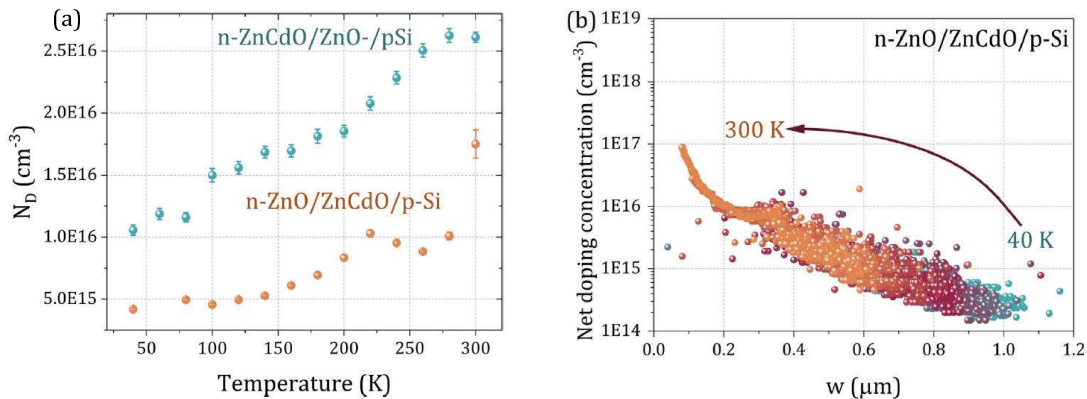
Publikacja [H5] dotyczy badań właściwości elektrycznych oraz defektów w planarnych heterostrukturach na bazie ZnCdO: n-ZnO/ZnCdO/p-Si i n-ZnCdO/ZnO/p-Si, wytworzonych metodą MBE. Głównym celem tej pracy było zidentyfikowanie defektów związanych z obecnością kadmu oraz określenie ich energii aktywacji. Istotnym elementem analizy był także wpływ rodzaju warstwy przejściowej na parametry elektryczne złączy. W ramach pracy wykonano pomiary charakterystyk I-V, C-V oraz badania sygnału DLTS, które przeprowadził pod moim kierunkiem mój dyplomant Radosław Szymon, w ramach swojej pracy magisterskiej, której byłam promotorem. Proces krystalizacji próbek przeprowadzono w IF PAN w Warszawie. Warto podkreślić, że nasza publikacja była pierwszą w literaturze naukowej, która przedstawiła wyniki pomiarów elektrycznych heterozłączy typu n-ZnCdO/p-Si. W tamtym czasie jedyną pracą dotyczącą podobnych struktur była publikacja innych autorów, poświęcona analizie struktury pasmowej heterozłączy ZnO/Zn_{1-x}Cd_xO, wytworzonych na podłożu szafiryowym metodą ablacji laserowej [44].

Heterozłącza n-ZnO/ZnCdO/p-Si i n-ZnCdO/ZnO/p-Si zostały zaprojektowane tak, że ich całkowita nominalna grubość była jednakowa i wynosiła ~630 nm, a zawartość kadmu w warstwie ZnCdO mieściła się w zakresie 4-5%. W pierwszej części publikacji przedstawiono wyniki pomiarów charakterystyk I-V, na podstawie których wyznaczono parametry obu diod, takie jak: potencjał wbudowany (V_{bi}), współczynnik idealności (n) złącza, współczynnik prostowania (RR), rezystancja szeregową (R_{ser}) i rezystancja dynamiczna (R_{dif}), a także ich zależności od temperatury. Porównując parametry elektryczne obu heterozłączy w temperaturze pokojowej, zauważyliśmy, że większość z nich wykazuje zbliżone wartości, z wyjątkiem potencjału wbudowanego, który dla struktury n-ZnCdO/ZnO/p-Si wynosił 0.51 V, natomiast dla heterozłącza n-ZnO/ZnCdO/p-Si 1.09 V. Tym samym potwierdziliśmy wpływ rodzaju zastosowanej warstwy przejściowej na parametry elektryczne heterozłączy. Wyższa wartość V_{bi} w przypadku złącza z warstwą przejściową ZnCdO była zgodna z danymi literaturowymi, m.in. dla diody Schottky'ego z warstwą pośrednią ZnCdO [45]. Dodatkowo, na podstawie analizy wykresów C-V oszacowaliśmy szerokość warstwy zubożonej w temperaturze pokojowej: dla struktury n-ZnCdO/ZnO/p-Si wyniosła ona 300 nm, a dla n-ZnO/ZnCdO/p-Si – 150 nm. Stwierdziliśmy zatem, że w obu przypadkach obszar zubożony sięgał maksymalnie granicy warstwy przejściowej złącza – odpowiednio ZnO lub ZnCdO. Na tej podstawie przyjęliśmy, że wartość potencjału wbudowanego w heterozłączu n-ZnCdO/ZnO/p-Si odpowiada wysokości bariery na styku ZnO/Si, natomiast w strukturze n-ZnO/ZnCdO/p-Si – na granicy ZnCdO/Si.

Analiza temperaturowych zależności wyznaczonych parametrów elektrycznych złączy pozwoliła nam sformułować kilka istotnych wniosków: (1) niskie wartości współczynnika RR w próbkach mogą wynikać z warunków wzrostu, jakości warstw, obecności defektów, rodzaju kontaktu metalicznego, wysokiej rezystancji szeregowej oraz prądu upływu. Jednocześnie wzrost RR w określonych temperaturach wskazuje na zmianę mechanizmów transportu nośników, które zostały poddane dalszej analizie; (2) zmiany mechanizmów transportu nośników tłumaczą również nieregularności w temperaturowej zależności V_{bi} , który zgodnie z teorią powinien maleć liniowo wraz ze wzrostem temperatury, tymczasem w naszych badaniach zaobserwowano odchylenia od tego trendu; (3) spadek R_{ser} i R_{dif} jest uzasadniony, gdyż oba te współczynniki naturalnie maleją wraz ze wzrostem temperatury i wynikającym z tego wzrostem natężenia prądu. Analiza

mechanizmów transportu nośników potwierdziła zależne od temperatury zmiany sposobu przewodzenia. W przypadku analizowanych diod zidentyfikowaliśmy trzy główne procesy transportu nośników: prąd tunelowy, prądy MTCE oraz prądy SCLC. Każdy z nich uaktywniał się w określonych temperaturach i przy odpowiednich napięciach polaryzacji.

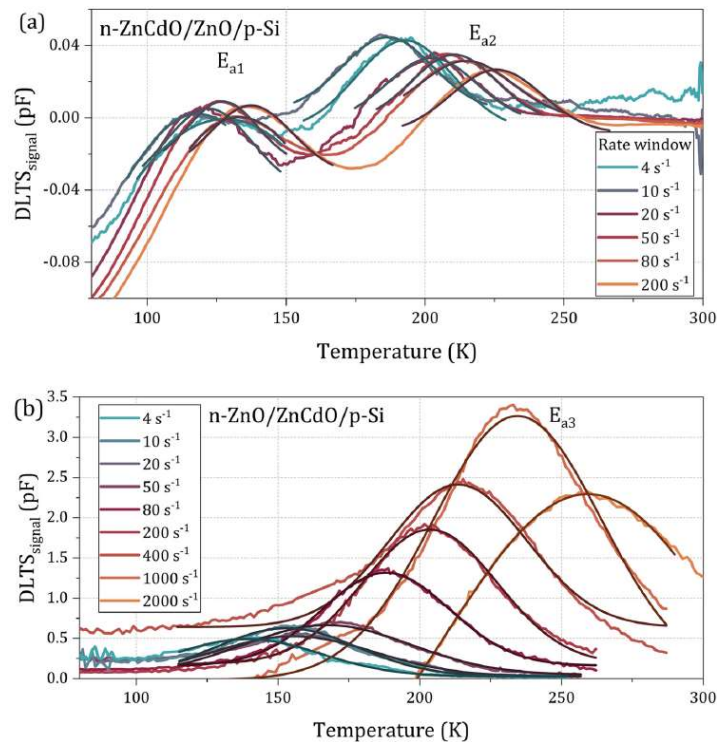
Druga część pracy [H5] poświęcona jest analizie charakterystyk C-V, na podstawie których wyznaczono koncentrację zjonizowanych domieszek donorowych (N_D) w badanych heterostrukturach. Opracowano także profile rozkładu tej koncentracji w funkcji szerokości obszaru zubożonego, co umożliwiło nam dokładniejszą ocenę wpływu rodzaju warstwy przejściowej na właściwości elektryczne wspomnianych złączy. Analiza temperaturowej zależności koncentracji donorów oraz ich profili w badanych złączach pozwoliła na wysunięcie kilku wniosków: (1) niższe N_D w strukturze n-ZnO/ZnCdO/p-Si może wynikać z obecności atomów kadmu w warstwie przejściowej ZnCdO, a wzrost N_D wraz z temperaturą – z termicznej aktywacji nośników i jonizacji pułapek związanych z kadmem (por. Rys. 7a); (2) obszar zubożony rozciąga się głównie po stronie typu n heterozłączy; (3) wzrost N_D w wyższych temperaturach i zwężenie obszaru zubożonego (por. Rys. 7b) powiązaliśmy z aktywacją nośników oraz zbliżaniem się do granicy p-Si/n-warstwy przejściowa.



Rys. 7. (a) Zależność temperaturowa koncentracji donorów dla złączy n-ZnO/ZnCdO/p-Si i n-ZnCdO/ZnO/p-Si oraz (b) przykładowy profil koncentracji donorów dla jednej z badanych diod. Rysunek z pracy [H5].

Ostatnim etapem badań były pomiary DLTS wspomnianych heterozłączy, które miały na celu identyfikację defektów, określenie ich parametrów oraz ustalenie ich możliwego pochodzenia. Wyniki tych badań, przedstawione na Rys. 8, wykazały obecność dwóch pików (E_{a1} i E_{a2}) pochodzących od defektów w złączu n-ZnCdO/ZnO/p-Si, natomiast w przypadku diody n-ZnO/ZnCdO/p-Si zaobserwowaliśmy jedno szerokie maksimum oznaczone jako E_{a3} . Co istotne, zauważyliśmy, że liczba pików w sygnałach DLTS analizowanych złączy odpowiada liczbie skoków wartości współczynnika prostowania (RR) w funkcji temperatury dla danej próbki (por. Fig. 3 w pracy [H5] i Rys. 8), a także liczbie obszarów wykładniczych na wykresach $\log I$ - $\log V$, związanych z prądami MTCE przypisywanymi obecności pułapek (por. Fig. 5 w pracy [H5] i Rys. 8). Na podstawie zmierzonych sygnałów DLTS dla analizowanych heterozłączy oraz wykresów Arrheniusa, wyznaczono wartości energii aktywacji oraz przekrojów czynnych na pułapowanie dla defektów oznaczonych symbolami E_{a1} , E_{a2} i E_{a3} . Identyfikacji defektów występujących w heterozłączach n-ZnCdO/ZnO/p-Si oraz n-ZnO/ZnCdO/p-Si dokonaliśmy w oparciu o dane literaturowe dotyczące defektów charakterystycznych dla struktur na bazie ZnO, ZnCdO oraz ZnMgO: (1) defekt o energii aktywacji zbliżonej do E_{a3} , obecny w złączu n-ZnO/ZnCdO/p-Si,

przypisaliśmy kompleksowi $\text{Cd}_{\text{Zn}}\text{-Zn}_i\text{-V}_\text{O}$. Kompleks ten był wcześniej rozważany w pracach teoretycznych, wykorzystujących teorię funkcjonałów gęstości (ang. density functional theory, DFT) dla ZnO domieszkowanego kadmem [46]. Nasze wyniki potwierdziły, że obecność kadmu w warstwie ZnCdO sprzyja obniżeniu energii jonizacji i w efekcie prowadzi do powstawania kompleksów defektów; (2) pułapka E_{a2} , wykryta w heterozłączeniu n-ZnCdO/ZnO/p-Si, może być związana z elektronową pułapką E_2 , powszechnie występującą w kryształach i warstwach na bazie ZnO i często przypisywaną defektowi Zn_i ; (3) poziom energetyczny E_{a1} , zaobserwowany także w heterozłączeniu n-ZnCdO/ZnO/p-Si, przypisaliśmy pułapce elektronowej E_3 , związanej z defektami donoro-podobnymi, takimi jak: V_O lub kompleks $\text{V}_\text{O}\text{-V}_{\text{Zn}}$.



Rys. 8. Sygnały DLTS z dopasowaniem funkcją Gaussa dla złączy (a) n-ZnCdO/ZnO/p-Si oraz (b) n-ZnO/ZnCdO/p-Si, zmierzone dla różnych szybkości okna pomiarowego. Rysunek z pracy [H5].

Badania nad planarnymi heterozłączami ZnCdO/Si są kontynuowane – kolejna publikacja [N7], której jestem współautorką, poświęcona tematyce pokrewnej do pracy [H5], została niedawno opublikowana w *Applied Surface Science* (27 grudnia 2025). Układy ZnCdO wciąż stanowią wyzwanie technologiczne ze względu na różnice w fazach krystalicznych, dyfuzję kadmu, fluktuacje składu chemicznego, etc. Heterozłącza opisane w [H5] charakteryzowały się stosunkowo słabymi właściwościami prostującymi. Jedną z przyczyn mogą być wspomniane efekty, potwierdzone w badaniach ramanowskich supersieci ZnO/Cd(Zn)O w strukturach kolumnowych. Do najważniejszych osiągnięć pracy [H5] zaliczam: (1) wyjaśnienie wpływu rodzaju warstwy przejściowej (ZnO lub ZnCdO) na właściwości elektryczne badanych heterozłączy oraz (2) identyfikację defektów w diodach typu n-ZnCdO/ZnO/p-Si i n-ZnO/ZnCdO/p-Si. Warto również podkreślić, że badania te stanowiły pierwsze eksperymentalne potwierdzenie istnienia defektu związanego z obecnością kadmu w ZnCdO, najprawdopodobniej odpowiadającego kompleksowi $\text{Cd}_{\text{Zn}}\text{-Zn}_i\text{-V}_\text{O}$. W pracy tej jestem współautorką koncepcji badań, dobrałam metodologię, kierowałam badaniami doświadczalnymi prowadzonymi na PWr (pomiaru elektryczne charakterystyk I-V i C-V oraz widm DLTS). Brałam czynny udział w analizie wyników

przedstawionych w tej pracy, jak również w pisaniu całego manuskryptu oraz przygotowywaniu odpowiedzi na uwagi recenzentów. Jestem autorem korespondencyjnym pracy i odpowiadałam za jej finalną wersję.

Równoległe z badaniami heterostruktur kolumnowych ZnCdO/Si zajmowałam się układami nanodrutów ZnMgO/Si z pojedynczymi studniami kwantowymi, które wytworzono w IF PAN w Warszawie. Rezultaty tych prac zostały opublikowane w artykułach [H6] i [H7], przy czym pierwsze wyniki dotyczące tych nanostruktur znalazły się już w publikacji [N6], której jestem współautorką.

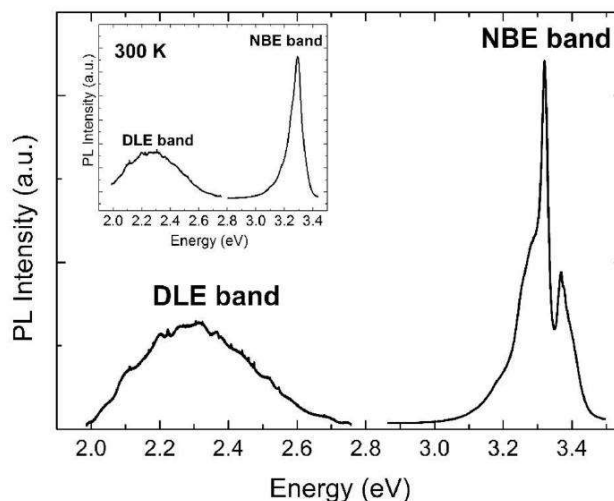
W pracy [H6] zbadaliśmy właściwości emisyjne i elektryczne heterozłącza n-ZnMgO/p-Si z dwiema studniami kwantowymi ZnMgO/ZnO umieszczonymi w nanodrutach wytworzonych metodą MBE. Typowe obrazy SEM i TEM oraz wyniki pomiarów XRD wspomnianych nanostruktur przedstawiono we wcześniejszych publikacjach M.A. Pietrzyka i in. [27, 47]. W [H6] skupiliśmy się na analizie udziału defektów w widmach emisyjnych (PL) nanodrutów. Część pomiarów PL wykonano w IF PAN w Warszawie, a część zrealizowałam samodzielnie na PWr. Metoda DLTS posłużyła do identyfikacji defektów oraz wyznaczenia ich parametrów. Jakość złącza oceniłam na podstawie pomiarów charakterystyk I-V i C-V.

Powszechnie wiadomo, że emisja optyczna struktur tlenkowych, w tym ZnO, obejmuje luminescencję z głębokich poziomów defektowych obecnych w przerwie wzbronionej [28, 29] o czym wspominaliśmy w pracy [H1]. Pochodzenie tzw. „emisji defektowej” (DLE) w ZnO nie było wówczas do końca wyjaśnione. Przyjmuje się, że owe linie emisyjne związane są z defektami sieci krystalicznej, takimi jak wakans tlenowy (V_O), wakans cynkowy (V_{Zn}), tlen i cynk w pozycjach międzywęzłowych (O_i , Zn_i) oraz antypołożeniowych (O_{Zn} , Zn_O) [29]. Przykładowo, niebieska luminescencja bywa przypisywana przejściu elektronów z poziomu Zn_i do pasma walencyjnego [48], a zielona – rekombinacji promienistej z udziałem V_O [48] lub defektów powierzchniowych [49]. Doniesienia na ten temat nie są spójne, ponieważ rodzaj i liczba defektów zależą od zastosowanej technologii i warunków wzrostu. Literatura wskazuje, że defekty w strukturach ZnO wpływają zarówno na pozycję emisji przykrawędziowej, jak i na kształt widma luminescencji [13]. Choć w wielu pracach opisano silną emisję w zakresie UV oraz słabą emisję defektową w nanostrukturach ZnO, zdarza się również, że dominują emisje defektowe, a ta w UV jest znacznie słabsza. Mając to na uwadze, w pracy [H6] zajęliśmy się wyjaśnieniem pochodzenia emisji DLE w badanych strukturach, gdyż defekty znacząco wpływają na właściwości elektrooptyczne oraz na wydajność i stabilność opartych na nich urządzeń optoelektronicznych.

Rys. 9 prezentuje zmierzone przeze mnie widmo PL analizowanych nanodrutów w temperaturach pokojowej i 10 K. Ukazuje ono dwa szerokie pasma luminescencji: w zakresie UV (pasmo NBE) oraz w obszarze widzialnym (pasmo DLE). Pasma DLE wynika z emisji na defektach punktowych w ZnO. Każdy defekt wnosi wkład do tego pasma, tworząc szerokie spektrum, którego maksimum zależy od typu i liczby defektów. W naszym przypadku w 10 K maksimum DLE znajduje się przy ok. 2.3 eV (tj. ~540 nm, światło zielone) i przesuwają się ku niższym energiom w temperaturze pokojowej (por. wstawka na Rys. 9). Jak wspomniałam wcześniej, zielona emisja jest charakterystyczna dla struktur ZnO i zwykle wiąże się z V_O . Aby jednak precyzyjniej zidentyfikować źródło tych defektów, wykorzystałam metodę DLTS (patrz opis niżej).

Analizując widmo PL zwróciłam również uwagę na stosunek intensywności emisji NBE do DLE. Liczne publikacje podkreślają, że ten stosunek świadczy o jakości strukturalnej i optycznej badanej próbki oraz wydajności emisji [29]. W naszym przypadku intensywność emisji NBE

przewyższała emisję DLE, co, zgodnie z literaturą, świadczy o dobrej jakości krystalicznej i właściwościach optycznych tych nanodrutów.



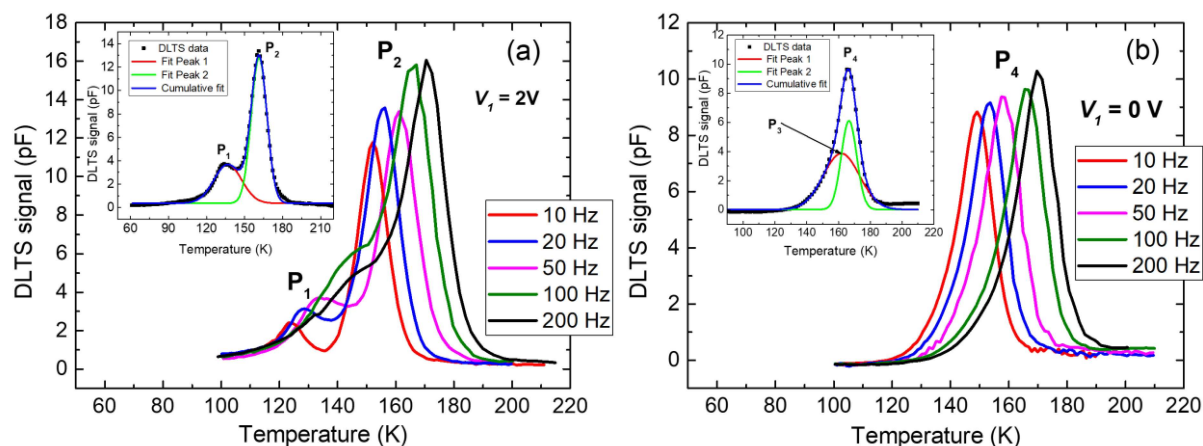
Rys. 9. Typowe widmo PL badanych NWs ze studniami kwantowymi ZnO/ZnMgO, zmierzone w 10 K przy pobudzeniu laserem He-Cd o długości fali 325 nm. Wstawka przedstawia widmo PL tej samej próbki zmierzone w 300 K. Rysunek z pracy [H6].

Aby ocenić jakość optyczną nanodrutów, przeanalizowano widmo PL w zakresie UV. Temperaturowe pomiary wykazały linie emisyjne pochodzące od studni kwantowych oraz emisję *FX*. Obecność pasma *FX* potwierdziła dobre właściwości optyczne nanodrutów. Ponadto emisja *FX* i przejścia optyczne związane z QWs świadczą o wysokiej jakości strukturalnej badanych nanodrutów i wyraźnych granicach między studniami ZnO a barierami ZnMgO. Te wyniki potwierdziły także rezultaty wcześniejszych pomiarów SEM, TEM, XRD i CL (patrz Ref. [27, 47]). W widmach PL w zakresie UV widoczne były także repliki fononowe (1LO, 2LO i 3LO) ze studni kwantowej o szerokości 8 nm oraz emisja z bariery ZnMgO.

Druga część pracy [H6] dotyczy badań właściwości elektrycznych złącza p-n przygotowanego na bazie wspomnianych NWs: charakterystyk I-V, C-V oraz sygnału DLTS próbki. Część tych badań zrealizował mój dyplomant Frank Oriold, w ramach swojej pracy magisterskiej, której byłam promotorką. Na podstawie analizy charakterystyk I-V i C-V mogłam wyciągnąć następujące wnioski: (1) transport nośników ładunku w złączu jest zdominowany przez prądy generacyjno-rekombinacyjne (por. temperaturową zależność współczynnika idealności złącza – Fig. 4b w pracy [H6]), co wskazało na obecność centrów rekombinacyjnych (stanów pułpkowych) w przerwie wzbronionej złącza; (2) obszar zubożony rozciąga się niemal w całości po stronie typu n; (3) rozkład N_D jest w przybliżeniu stały w całej szerokości obszaru zubożonego, co wskazywało na brak lokalnej kumulacji ładunku.

Rys. 10 przedstawia sygnały DLTS badanego heterozłącza n-ZnMgO/p-Si. Niezależnie od zastosowanego impulsu napięciowego V_1 , każde pojedyncze widmo DLTS składa się z dwóch pików, które wyodrębniłam poprzez dopasowanie funkcją Gaussa. Na podstawie wykresów Arrheniusa dla poziomów pułpkowych oznaczonych symbolami P₁, P₂, P₃ i P₄ obliczyłam energie aktywacji (E_a) oraz przekroje czynne na pułpkowanie (σ_n). Analizę pochodzenia defektów w badanym heterozłączu przeprowadziłam bazując na dostępnych danych literaturowych dla ZnO i ZnMgO, co pozwoliło wyciągnąć następujące wnioski: (1) pułpki P₂ i P₄ mają podobne E_a (około 0.3 eV) oraz σ_n ($\sim 10^{-15}$ cm²), co pozwoliło przypisać je temu samemu defektowi – wakansowi

tlenowemu V_O lub kompleksowi V_O-V_{Zn} – powiązwanym z pułapką elektronową $E3$, występującą zarówno w ZnO, jak i ZnMgO; (2) pułapka P_3 może być związana z wakansem tlenowym w innym stanie ładunkowym, tj. V_O^+ ; (3) pułapkę P_1 przypisałam poziomowi elektronowemu $E2$, za który najprawdopodobniej odpowiada Zn_i .



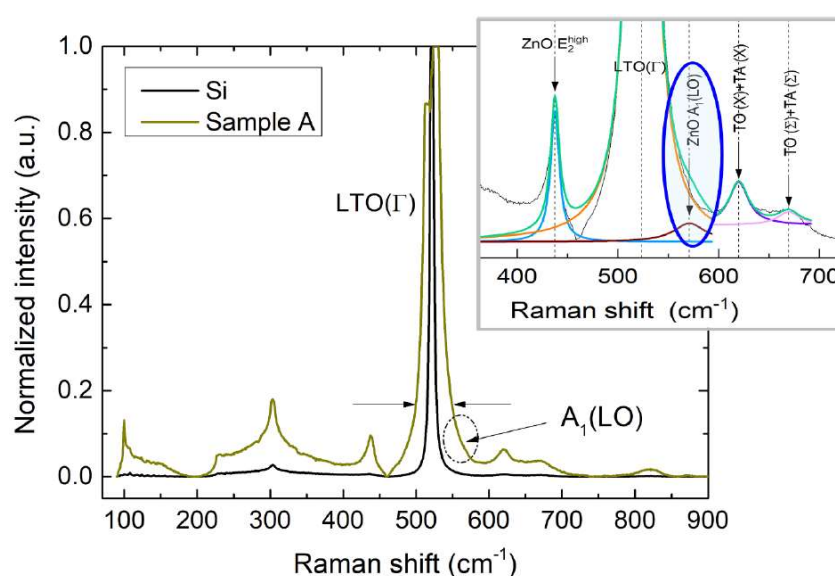
Rys. 10. Sygnały DLTS dla heterozłącza n-ZnMgO/p-Si z NWs, zmierzone przy stałym napięciu polaryzacji (-2 V) dla różnych impulsów napięciowych (V_1) oraz częstotliwości repetycji. Rysunek z pracy [H6].

Za najważniejsze osiągnięcie naukowe tej pracy uważam identyfikację defektów w heterostrukturach kolumnowych ZnMgO/Si zawierających studnie kwantowe. Wykazałam, że defekty te są odpowiedzialne za pasmo emisyjne DLE, obserwowane w widmach luminescencji badanych próbek. Jestem autorem wiodącym i korespondencyjnym pracy oraz autorką koncepcji badawczej. Dobrałam metodologię i jestem wykonawcą większości zamieszczonych w pracy badań doświadczalnych, tj.: części pomiarów widm fotoluminescencji, a także części pomiarów elektrycznych charakterystyk I-V i C-V oraz widm DLTS. Byłam odpowiedzialna za analizę wszystkich rezultatów, a także za przygotowanie pierwotnej i finalnej wersji manuskryptu oraz odpowiedzi na uwagi recenzentów.

Publikacja [H7] stanowi bezpośrednią kontynuację powyższych badań, rozwijając tematykę wpływu parametrów strukturalnych na właściwości heterostruktur kolumnowych ZnMgO/Si. Skupiłam się w niej na analizie wyników pomiarów ramanowskich, ze szczególnym uwzględnieniem mikro-naprężeń w omawianych nanodrutach zawierających dwie studnie kwantowe o różnych szerokościach. Dodatkowo rozszerzyłam badania sygnału DLTS, zaprezentowane w pracy [H6], o wyniki dla próbki ze studniami kwantowymi o mniejszej szerokości. Pomiar ramanowski zrealizowała moja dyplomantka Gloria Szalewska, w ramach swojej pracy inżynierskiej, której byłam promotorką.

Do analizy widm Ramana wybrałam trzy struktury różniące się szerokościami studni. Widma tych próbek porównałam z widmami próbek referencyjnych: kryształu ZnO oraz podłoża Si, co pozwoliło wyodrębnić w widmach nanodrutów tryby charakterystyczne dla ZnO. Następnie skupiłam się na analizie położenia i szerokości tych trybów fononowych, uwzględniając obecność trybów pochodzących od ZnO i Si oraz obecność atomów Mg w sieci ZnO, która może powodować przesunięcia częstotliwości i/lub poszerzenia pasm. Wyjaśniłam, iż zmiany te mogą wynikać z odkształceń sieci wywołanych mikro-naprężeniami w nanodrutach, zmian symetrii, zaburzeń w uporządkowaniu atomów oraz – w stopach – z fluktuacji składu. Wspomniałam, że na kształt i położenie linii ramanowskich wpływają również defekty sieci krystalicznej, jej temperatura

oraz – w strukturach niskowymiarowych – kwantowy efekt ograniczenia przestrzennego dla fononów. Analiza położenia i szerokości modów fononowych ZnO w widmach Ramana trzech heterostruktur ZnMgO/Si o różnych szerokościach studni kwantowych w NWs pozwoliła wyciągnąć istotne wnioski: (1) widma Ramana próbek nie wykazały znaczących różnic: wyraźnie widoczne mody E_2^{low} i E_2^{high} potwierdziły heksagonalną strukturę i wysoką jakość nanodrutów; (2) dwuosiove odkształcenia w NWs obliczone na podstawie przesunięcia modu ZnO E_2^{high} w stronę niższych częstości wynikają z różnic parametrów sieciowych a materiałów studni (ZnO) i bariery (ZnMgO) i związanych z tym mikro-naprężeń; (3) analiza widm Stokesa i anty-Stokesa wykazała, że lokalne nagrzewanie próbek wywołane oświetleniem laserowym jest zbyt małe aby wytłumaczyć obserwowane przesunięcie modu ZnO E_2^{high} ; (4) wykluczyłam również efekt kwantowego ograniczenia przestrzennego dla fononów oraz rozrzut rozmiarów nanodrutów jako możliwe przyczyny tego przesunięcia.



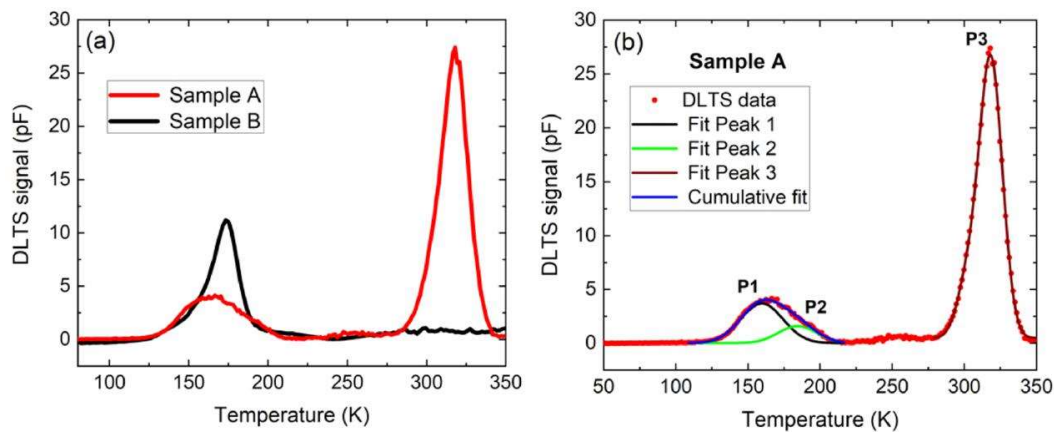
Rys. 11. Porównanie widm Ramana próbki referencyjnej Si oraz jednej z badanych heterostruktur nanodrutowych ZnMgO/Si (próbka A). Strzałki wskazują na poszerzenie dominującego piksu Si $LTO(\Gamma)$. Widma Ramana obu próbek zostały znormalizowane w celu uwidocznienia poszerzenia piksu Si $LTO(\Gamma)$, spowodowanego dodatkowym wkładem od modu $A_1(LO)$. Wstawka przedstawia dopasowanie funkcją Lorentza widma Ramana próbki A, eksponujące obecność modu $A_1(LO)$. Rysunek z pracy [H7].

Ostatnim aspektem analizy widm ramanowskich była ocena wpływu niedoskonałości strukturalnych, takich jak defekty sieciowe, które mogą modyfikować widmo. W badanych NWs nie zaobserwowano nowych modów pochodzących od defektów. Wskazałam jednak, że defekty w strukturach ZnO często ujawniają się przez pojawienie się modów $A_1(LO)$ i $E_1(LO)$. Ze względu na geometrię układu ramanowskiego, mod $E_1(LO)$ został wykluczony, natomiast obecność modu $A_1(LO)$ potwierdziłam poprzez analizę znaczącego poszerzenia sygnału w okolicy modu krzemowego z podłoża (por. Rys. 11). Dopasowanie funkcją Lorentza widma Ramana wokół modu $LTO(\Gamma)$ potwierdziło udział modu $A_1(LO)$. Literatura wskazuje, iż mod ten związany jest z defektami, takimi jak wakans tlenowy czy międzywęzłowe atomy cynku [50]. Pochodzenie defektów w badanych próbkach zidentyfikowałam za pomocą pomiarów elektrycznych.

Druga część pracy [H7] prezentuje wyniki pomiarów elektrycznych. Badane złącza charakteryzowały się dobrymi właściwościami prostującymi, co wykazały pomiary I-V. Analiza

zależności pojemności heterostruktur od temperatury $C(T)$ przy różnych napięciach polaryzacji wykazała jej wzrost wraz z temperaturą, wynikający z termicznej aktywacji nośników oraz jonizacji domieszek lub pułapek w obrębie złącza. Co ciekawe, dla napięcia -2 V wyróżniłam cztery obszary o różnych nachyleniach, których występowanie powiązałam z obecnością głębokich poziomów pułapkowych lub stanów powierzchniowych złącza. Pomiar $C(T)$ przy różnych napięciach polaryzacji wykazały, że im większe napięcie zaporowe, tym wyraźniej widoczne są poszczególne regiony na krzywych $C(T)$. Zjawisko to powiązałam z tym, że wypełnianie głębokich poziomów nośnikami zależy od wartości przyłożonego napięcia, co jednocześnie wskazuje, iż poziomy te znajdują się głębiej w obszarze złącza.

Technika DLTS ujawniła sygnały pochodzące od defektów w próbce A (ze studniami i barierami o mniejszej szerokości). Próbka B została wcześniej przebadana, a wyniki tych analiz opublikowałam w pracy [H6]. W niniejszej pracy porównałam sygnały DLTS obu złączy, koncentrując się na identyfikacji defektów w dotąd nieanalizowanej strukturze (próbce A). Rys. 12a przedstawia porównanie widm DLTS, a Rys. 12b ukazuje analizę sygnału DLTS próbki A.



Rys. 12. (a) Porównanie przebiegów DLTS próbek A i B wykonanych przy napięciu polaryzacji -4 V, czasie zapełniania $100 \mu\text{s}$, częstotliwości repetycji 200 Hz oraz amplitudzie impulsu napięciowego 0 V. (b) Sygnał DLTS próbki A dopasowany funkcją Gaussa. Rysunek z pracy [H7].

Dla próbki A widoczne jest wyraźne maksimum w pobliżu temperatury pokojowej (pułapka P3), którego nie obserwuje się w próbce B (por. Rys. 12a i Rys. 10). Ponadto, w próbce A zaobserwowano poszerzony pik niskotemperaturowy (~ 170 K), analogiczny do tego występującego w próbce B. Analiza wykazała, że składa się on z dwóch maksimów (P1 i P2 na Rys. 12b), podobnie jak w próbce B. Na podstawie pomiarów DLTS dla różnych częstotliwości repetycji i wykresu Arrheniusa wyznaczyłam parametry defektów dla próbki A. Wyniki analizy otrzymanych energii aktywacji oraz przekrojów czynnych na pułapkowanie wskazały, że: (1) pik P1 odpowiada pułapce elektronowej $E2$ (tj. Zn_i), obserwowanej także w próbce B i innych strukturach ZnO (por. Tab. 1 w pracy [H6] z Tab. 2 w pracy [H7]); (2) poziom P2 odpowiada pułapce $E3$, która została również zidentyfikowana w przypadku próbki B i przypisana wakansowi tlenowemu (V_O) lub kompleksowi V_O-V_{Zn} ; (3) pułapka P3 może pochodzić od Zn_i lub V_O i nie została wykryta w próbce B.

Podsumowując, najważniejszymi osiągnięciami pracy [H7] są: (1) identyfikacja modu $A_1(LO)$ w widmach Ramana, związanego z wakansami tlenowymi (V_O) i/lub międzywęzłowymi atomami cynku (Zn_i); (2) potwierdzenie obecności defektów typu Zn_i , V_O oraz kompleksu V_O-V_{Zn} metodą DLTS; (3) wykazanie, że rodzaj defektów nie zależy od szerokości studni kwantowych ani warstw

barierowych w złączach kolumnowych n-ZnMgO/p-Si; (4) stwierdzenie, że zastosowanie cieńszych studni i barier może prowadzić do większej gęstości defektów oraz zwiększonych naprężeń w nanodrutach. Jestem autorem wiodącym i korespondencyjnym pracy [H7]. Autorka koncepcji badawczej. Dobrałam metodologię i kierowałam wszystkimi pracami prowadzonymi na PWr (pomiar widm Ramana). Samodzielnie wykonałam pomiary elektryczne obejmujące charakterystyki I-V, C(T) i DLTS. Analizowałam i opracowałam wszystkie wyniki badań ujęte w tej pracy. Odpowiadałam za pierwotną i finalną wersję manuskryptu, jak również przygotowałam odpowiedzi na uwagi recenzentów.

Warto podkreślić, że heterostrukтуры kolumnowe ZnMgO/Si z dwiema studniami kwantowymi ZnO/ZnMgO charakteryzowały się znacznie lepszymi właściwościami strukturalnymi i optycznymi niż heterostrukтуры kolumnowe zawierające supersieci (wielokrotne studnie kwantowe) ZnO/Cd(Zn)O. Powodem może być konieczność prowadzenia wzrostu supersieci ZnO/Cd(Zn)O w niskiej temperaturze ($\sim 170^\circ\text{C}$), wynikająca z potrzeby ograniczenia desorpcji kadmu. Niska temperatura wzrostu prowadzi do pogorszenia jakości krystalograficznej materiału i w konsekwencji obniża właściwości optyczne uzyskanych heterostruktur. Wyniki naszych badań, udokumentowane w pracach [H3-H4] i [H6-H7], wniosły istotny wkład w poszerzenie wiedzy na temat mikro-naprężeń w nanodrutach oraz ich wpływu na właściwości optyczne, elektryczne i defekty w nanostrukturach na bazie ZnO, ZnCdO i ZnMgO wytwarzanych metodą MBE. Pomiary elektryczne potwierdziły, że zarówno planarne struktury złączowe zawierające kadm, jak i kolumnowe z magnezem, funkcjonują jako sprawne diody, co ma istotne znaczenie dla ich potencjalnych zastosowań optoelektronicznych.

5.4.3 Dynamika sieci krystalicznej i właściwości optyczne nanodrutów typu rdzeń-powłoka na bazie GaN

W okresie ostatnich kilku lat prowadziłam również badania nanodrutów typu rdzeń-powłoka GaN-AlGa_xN oraz GaN-AlO_x/HfO_x, które wytworzono w IF PAN w Warszawie. Wyniki pomiarów tych nanostruktur zostały opublikowane w trzech artykułach [H8]-[H10]. Skupiono się w nich przede wszystkim na badaniach podstawowych, które obejmowały szczegółową analizę mechanizmów drgań sieci krystalicznej, efektów powierzchniowych oraz właściwości optycznych nanodrutów. Oba typy nanodrutów zostały wytworzone na podłożach krzemowych metodą MBE. Podczas tych badań kluczowe okazały się narzędzia i metody rozwinięte we wcześniejszych pracach nad nanodrutami tlenkowymi. Szczególnie istotne były wnioski dotyczące obecności mikro-odkształceń w nanodrutach oraz ich źródeł ([H3] i [H4]).

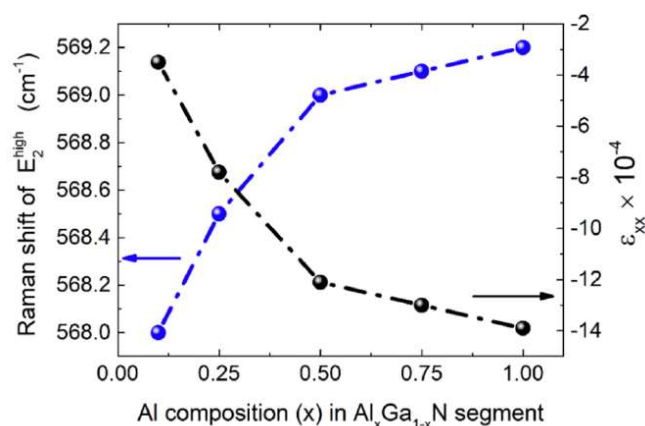
Właściwości fizyczne nanodrutów można kształtować poprzez odpowiedni dobór materiału oraz wykorzystanie efektów rozmiarowych, powierzchniowych i wynikających z naprężeń. Wykazano, że wzrost heterostruktur na bocznej powierzchni nanodrutu generuje znaczne naprężenia, które wpływają na mody fononowe, czas życia nośników ładunku, szerokość przerwy wzbronionej, a także umożliwiają precyzyjne sterowanie właściwościami optycznymi nanodrutów [51]. Dlatego konieczne jest kontrolowanie i zrozumienie właściwości fizycznych nanodrutów wytwarzanych w ten sposób, co stało się główną motywacją do podjęcia badań nad tego rodzaju nanostrukturami.

Pierwsza publikacja z tego cyklu ([H8]) dotyczy nanodrutów rdzeń-powłoka GaN-Al_xGa_{1-x}N, wytworzonych na podłożu Si(111). Rdzeń tych nanodrutów wykonano z azotku galu, natomiast na nim wyhodowano segmenty Al_xGa_{1-x}N o nominalnej zawartości glinu $x = 0.1, 0.25, 0.5, 0.75$ oraz 1 (przebadano łącznie pięć próbek). Warto zaznaczyć, że powłoka otaczająca nanodrut różniła się

składem od górnego segmentu $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}$, co jest konsekwencją mechanizmu wbudowywania Ga i Al do NW podczas jego krystalizacji techniką MBE. Zawartość Al w segmencie $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}$ została zweryfikowana za pomocą badań dyfrakcji rentgenowskiej z dyspersją energii (EDX). W celu scharakteryzowania właściwości strukturalnych nanodrutów zastosowano trzy metody eksperymentalne – SEM, XRD oraz spektroskopię Ramana. Pomiar SEM i XRD zostały przeprowadzone w IF PAN w Warszawie. Odpowiadałam za realizację pomiarów ramanowskich próbek, które wykonaliśmy razem z moim dyplomantem R. Szymonem, w ramach jego pracy inżynierskiej, której byłam promotorem. Obrazy SEM pokazały, że nanodruły GaN-AlGa_N mają heksagonalny kształt, a ich średnica wynosiła średnio ~70 nm, natomiast typowa długość przekraczała 1 μm. Ponadto nanodruły wykazały tendencję do koalescencji. Zaś zdjęcie SEM wykonane w trybie transmisyjnym (SEM-TE) ujawniło wyraźną strukturę rdzenia i powłoki nanodrutów.

W celu zbadania wpływu powłok oraz uchwycenia subtelnych zmian wynikających z ich obecności, wykonano pomiary rozpraszania Ramana nanodrutów, które porównano z próbkami referencyjnymi krzemu oraz NWs GaN bez powłok. Widma ujawniły obecność sześciu modów fononowych pochodzących od podłoża krzemowego, a w przypadku NWs GaN, jak i nanodrutów GaN-AlGa_N, zaobserwowano dwa mody charakterystyczne dla azotku galu: GaN E_2^{high} oraz GaN $A_1(LO)$. Próbką z nanodrutami GaN-AlN wykazała natomiast dwa mody E_2^{high} pochodzące zarówno od GaN, jak i AlN. Analiza położenia modów E_2^{high} związanych z GaN i AlN wykazała przesunięcie modu GaN E_2^{high} w kierunku wyższych częstości, natomiast modu AlN E_2^{high} – w kierunku niższych częstości. Zaproponowałam, że zjawisko to może wynikać z kwantowego efektu ograniczenia przestrzennego dla fononów, nagrzewania próbek przez wiązkę lasera, obecności mikro-naprężeń w nanodrutach, a także z oddziaływania fonon-plazmon, przy czym obserwowane przesunięcie może być rezultatem jednoczesnego współistnienia kilku z wymienionych mechanizmów. Pozwoliło to sformułować następujące wnioski: (1) efekt ograniczenia przestrzennego dla fononów został wykluczony jako przyczyna przesunięć pasm ramanowskich ze względu na duże średnice badanych nanodrutów (~70 nm); (2) analiza widm Stokesa i anty-Stokesa wykazała, że wpływ temperatury jest zbyt mały, aby tłumaczyć obserwowane zmiany częstości modów GaN E_2^{high} i AlN E_2^{high} ; (3) głównym mechanizmem odpowiedzialnym za przesunięcia modów są odkształcenia sieci krystalicznej nanodrutów wynikające z obecności mikro-naprężeń w ich strukturze. Obliczone wartości odkształceń dwuosiowych (ϵ_{xx}) wskazały na obecność naprężeń ściskających w rdzeniu GaN wszystkich badanych nanodrutów oraz naprężeń rozciągających w segmencie AlN i powłokach nanodrutów GaN-AlN; (4) źródłem ściskania rdzenia i rozciągania w powłokach jest niedopasowanie stałych sieciowych GaN względem AlGa_N i AlN; (5) koalescencja nanodrutów (widoczna w obrazach SEM) może dodatkowo wpływać na powstawanie mikro-naprężeń.

Istotnym rezultatem, który otrzymaliśmy w badaniach naprężeń było wykazanie, że zwiększanie zawartości Al w górnym segmencie $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}$ nanodrutów powoduje wzrost przesunięcia modów GaN E_2^{high} w kierunku wyższych częstości i większe odkształcenia ściskające w rdzeniu GaN (por. Rys. 13). Wytłumaczyliśmy, że jest to spowodowane rosnącym niedopasowaniem sieciowym pomiędzy rdzeniem GaN a powłokami AlGa_N wraz ze wzrostem zawartości glinu. Wskazaliśmy także, że efekt kompresji w rdzeniu GaN, wywołany przez górny segment $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}$, dominuje nad lokalnym rozciąganiem w pobliżu styku rdzeń-powłoka.



Rys. 13. Zależność zawartości Al w górnym segmencie $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}$ nanodrutów od częstości modu GaN E_2^{high} oraz odkształceń dwuosiowych ϵ_{xx} w rdzeniu GaN . Rysunek z pracy [H8].

Ostatnim analizowanym czynnikiem było oddziaływanie fonon-plazmon, uznane za przyczynę przesunięcia modu $A_1(LO)$ względem jego pozycji w kryształach GaN . Biorąc pod uwagę częstości modu $A_1(LO)$ dla poszczególnych próbek oraz bazując na modelu sprzężenia fonon-plazmon, wyznaczyliśmy koncentrację elektronów swobodnych w nanodrutach.

Aby potwierdzić wyniki pomiarów ramanowskich i obecność mikro-naprężeń w nanodrutach wykonano także pomiary XRD. Skany $2\theta/\omega$ wykazały przesunięcie sygnałów XRD w kierunku wyższych kątów Bragga wraz ze wzrostem zawartości Al w powłokach $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}$. W pracy podkreślono, że w nanodrutach typu rdzeń-powłoka odkształcenia dwuosiowe w płaszczyźnie nanodrutów (ϵ_{xx}) są zazwyczaj znacznie mniejsze niż jednoosiowe wzdłuż ich kierunku wzrostu (ϵ_{zz}). Z kolei na podstawie analizy przesunięć modów ramanowskich, założyliśmy odkształcenia dwuosiowe. Aby sprawdzić, czy założenie było poprawne, obliczono obie składowe odkształceń w rdzeniu nanodrutów: ϵ_{xx} – z parametrów sieciowych a uzyskanych z map RSM dla refleksów asymetrycznych (wartości ϵ_{xx} uzyskane z pomiarów XRD i rozpraszania ramanowskiego wykazały bardzo dobrą zgodność), oraz ϵ_{zz} – z parametrów c uzyskanych z map XRD dla refleksów symetrycznych. Otrzymano, że wartości składowych odkształceń ϵ_{xx} i ϵ_{zz} są tego samego rzędu, co potwierdziło słuszność założenia o występowaniu naprężeń dwuosiowych w rdzeniu GaN .

Do najważniejszych osiągnięć pracy [H8] zaliczam: (1) zbadanie i szczegółowe wyjaśnienie mechanizmów odpowiedzialnych za przesunięcia modów fononowych, w tym: kwantowego efektu ograniczenia przestrzennego dla fononów, wpływu temperatury, mikro-naprężeń w nanodrutach rdzeń-powłoka oraz oddziaływania fonon-plazmon; (2) wykazanie możliwości zastosowania spektroskopii Ramana do badań mechanizmów drgań sieci krystalicznej, jakości krystalicznej, naprężeń oraz koncentracji swobodnych nośników w nanodrutach GaN-AlGaN ; (3) identyfikację źródeł odkształceń sieci nanodrutów GaN-AlGaN o różnej zawartości Al w powłokach. Jestem autorem wiodącym i korespondencyjnym prac oraz autorką koncepcji badawczej. Dobrałam metodologię i kierowałam wszystkimi pracami prowadzonymi na PWr (pomiary widm Ramana). Analizowałam wszystkie wyniki badań ujęte w tej pracy. Przygotowałam pierwowzór manuskryptu oraz odpowiedzi na uwagi recenzentów. Odpowiadałam za finalną wersję manuskryptu.

Warto podkreślić, że praca [H8] należy do nielicznych prac, w których w tak kompleksowy sposób przeanalizowano tak wiele mechanizmów wpływających na dynamikę sieci krystalicznej nanodrutów. Większość prac z zakresu rozpraszania Ramana w strukturach kolumnowych skupia

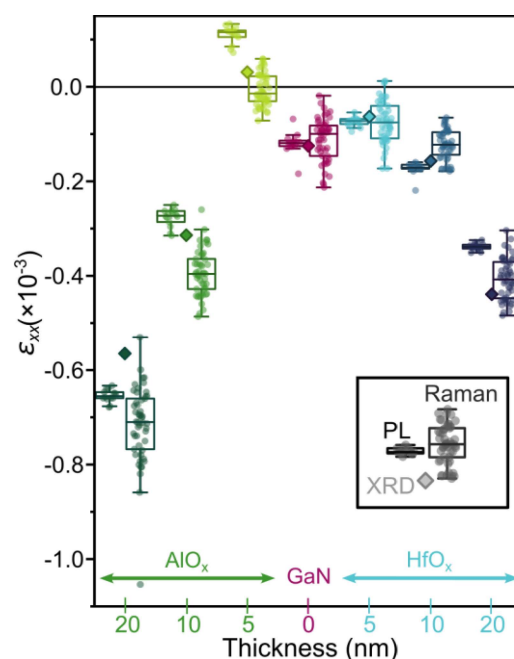
się głównie na analizie ich składu chemicznego. Dlatego zaprezentowane przez nas wyniki i ich analiza stanowią istotny wgląd w poznanie właściwości strukturalnych nanodrutów.

Publikacja [H9] dotyczy również nanodrutów typu rdzeń-powłoka, jednak w tym przypadku zastosowano amorficzne powłoki tlenkowe otrzymane techniką osadzania warstw atomowych (ALD), w odróżnieniu od powłok krystalicznych opisanych w pracy [H8]. Głównym zagadnieniem była analiza wpływu warunków zewnętrznych na wydajność emisji z nanodrutów. W literaturze wielokrotnie podkreślano, że nanodrutry GaN wytwarzane metodą MBE na podłożach Si mają duży potencjał w zastosowaniach optoelektronicznych, co wynika z ich wyjątkowej jakości strukturalnej, wysokiej wydajności luminescencji, redukcji naprężeń w odniesieniu do podłoża oraz wysokiej stabilności termicznej. Jednak ich zalety mogą być osłabiane przez wpływ czynników zewnętrznych. Powłoki ograniczają ten efekt, zabezpieczając nanodrutry przed oddziaływaniem otoczenia. W literaturze szeroko omawiane są nanodrutry z powłokami krystalicznymi (np. GaN-AlGa_N), natomiast układy z powłokami amorficznymi badane są znacznie rzadziej. Tymczasem są one szczególnie interesujące ze względu na niski koszt wytwarzania, a co istotne – sprzyjają wzmocnieniu luminescencji – nie absorbują światła, co umożliwi fotonom swobodne docieranie do rdzenia i wzbudzenie w nim nośników.

W pracy [H9] analizowaliśmy dwa rodzaje nanodrutów: GaN-AlO_x oraz GaN-HfO_x – struktury różniły się nominalną grubością powłoki: 5, 10 i 20 nm. Badania obejmowały techniki SEM, XRD, spektroskopię Ramana, CL oraz PL, a dla porównania uwzględniono również próbkę referencyjną – nanodrutry GaN bez powłoki. Szczególną uwagę poświęciliśmy nanodrutom z częściowym pokryciem, powstającym w wyniku wyspowego wzrostu powłoki o nominalnej grubości 5 nm. Pomiar SEM, XRD i CL wykonano w IF PAN w Warszawie, natomiast eksperymenty ramanowskie i PL przeprowadził mgr inż. R. Szymon w ramach swojej pracy doktorskiej, której jestem opiekunem.

Obrazy SEM wszystkich analizowanych próbek potwierdziły skuteczne naniesienie powłoki. W przypadku NWs z powłokami o nominalnej grubości 5 nm ujawniły obecność wysp tlenkowych zamiast ciągłej warstwy. Badania rozpoczęliśmy od analizy naprężeń w nanodrutach. Podczas tej analizy odwoaliśmy się do wniosków sformułowanych w mojej wcześniejszej pracy poświęconej azotkowemu struktrom kolumnowym GaN-AlGa_N ([H8]), gdzie pokazaliśmy, że choć naprężenia wynikające z niedopasowania sieci krystalicznej GaN i Si są zaniedbywalne ze względu na niewielki obszar kontaktu nanodrutu z podłożem, istotne są mikro-naprężenia na granicy GaN/powłoka. W pracy [H9] podkreśliliśmy, że w przypadku powłok amorficznych naprężenia nie mogą być określane na podstawie różnic stałych sieci GaN i materiału powłoki, zwłaszcza dla częściowego pokrycia, którego wpływ jest bardziej złożony. Obecność powłok amorficznych potraktowaliśmy więc jako zaburzenie wprowadzające dodatkowe źródło naprężeń do systemu. W analizie przyjęliśmy model odkształceń dwuosiowych, które badaliśmy w warunkach normalnych z wykorzystaniem trzech komplementarnych technik: XRD, PL oraz spektroskopii Ramana. Zaobserwowaliśmy, że wraz ze wzrostem grubości powłoki piki sygnału XRD przesuwają się ku większym kątom Bragga, linie NBE ku wyższym energiom, a mody GaN E_2^{high} ku wyższym częstościom. Na podstawie przesunięć pasm NBE i modów E_2^{high} obliczono odkształcenia dwuosiowe ϵ_{xx} w płaszczyźnie nanodrutów. W celu wyznaczenia ϵ_{xx} z pomiarów XRD zmierzono mapy RSM refleksów asymetrycznych, co pozwoliło określić parametry sieciowe a_{NWs} nanodrutów, traktując je jako zmianę w stałej sieci a dla GaN. Rys. 14 przedstawia zależność odkształceń ϵ_{xx} , wyznaczonych z pomiarów XRD, PL i ramanowskich, od grubości powłok AlO_x

oraz HfO_x . Wyniki wskazują: (1) bardzo dobrą zgodność wartości odkształceń uzyskanych trzema niezależnymi metodami; (2) obecność odkształceń ściskających w NWs GaN bez powłok oraz w próbkach z powłokami o grubości 10 i 20 nm; (3) wzrost odkształceń ściskających w rdzeniu wraz ze zwiększaniem grubości powłoki; (4) dla najcieńszych powłok również obserwuje się odkształcenia ściskające, jednak o mniejszej wartości niż w przypadku grubych powłok, a dla pokrycia AlO_x zmieniają znak, wskazując na niewielkie odkształcenia rozciągające i częściową relaksację sieci krystalicznej. W pracy omówiliśmy możliwe źródła naprężeń dla wszystkich badanych nanodrutów.

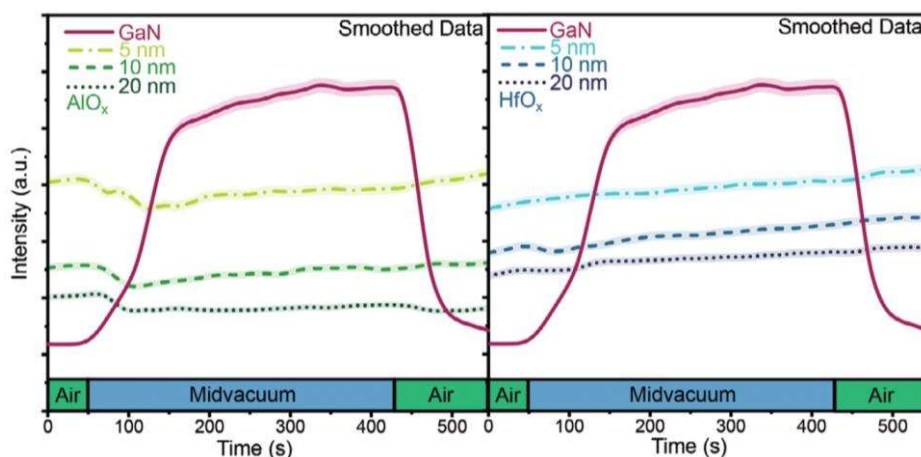


Rys. 14. Zależność odkształceń ϵ_{xx} wyznaczonych z pomiarów XRD, PL i ramanowskich, od grubości powłok AlO_x oraz HfO_x . Dane z XRD przedstawiono w formie punktów o kształcie rombu, natomiast wyniki z PL i Ramana – w postaci wykresów pudełkowych. Rysunek z pracy [H9].

Warto podkreślić, że analiza zmian w widmach PL i Ramana spowodowanych subtelnymi różnicami w budowie obiektów nanometrowych (w tym przypadku niewielkimi różnicami w grubości powłok) była utrudniona ze względu na niejednorodność próbek, niestabilność układu pomiarowego czy przesunięcia pików porównywalne z rozdzielczością spektralną zastosowanej aparatury (dlatego pomiary PL i widm Ramana powtarzano wielokrotnie, przy czym w obu przypadkach naświetlano laserem różne punkty powierzchni próbki). Analiza tak dużej liczby widm ujawniła pewien rozrzut wartości uzyskanych odkształceń (zob. Rys. 14), co skłoniło do zastosowania metod wnioskowania statystycznego (por. „Experimental Section” oraz materiały uzupełniające w pracy [H9]). Podejście to zwiększyło wiarygodność wyników i pozwoliło ocenić istotność statystyczną zaobserwowanych różnic, potwierdzając obecność naprężeń w badanych próbkach oraz ich zależność od grubości powłoki.

W pracy tej zbadaliśmy także właściwości emisyjne nanodrutów metodami fotoluminescencji i katodoluminescencji. Obie techniki ujawniły charakterystyczne dla GaN przejścia optyczne oraz pasmo emisji defektowej, dobrze opisane w literaturze. Szczególnie interesującym wynikiem było wzmocnienie emisji dla nanodrutów z najcieńszymi powłokami (5 nm), potwierdzone w obu technikach. Znaczne różnice w intensywności luminescencji między próbkami z powłokami 5 nm a NWs GaN dobrze ilustrują mapy CL dla przejść DBE (ang. donor-bound exciton, ekscyton

związany na donorze) oraz IDB (ang. inversion-domain boundary, granica domeny inwersyjnej), zmierzone w 5 K. Analizowano także zależności szerokości połówkowej pasma DBE oraz intensywności pasm NBE (emisji przykrawędziowej) i DBE od grubości powłok. Najwyższą intensywność luminescencji uzyskano dla próbek z najcieńszymi (5 nm), częściowymi powłokami, a najniższą – dla nanodrutów niepokrytych, co potwierdziły także pomiary CL w 5 K i PL w 300 K. Pokazaliśmy ponadto, że grubsze powłoki prowadzą do zwiększenia szerokości połówkowej pasma DBE, wskazując na gorszą jakość strukturalną związaną z defektami lub rosnącym gradientem naprężeń.



Rys. 15. Zmiany sygnału PL w funkcji czasu dla nanodrutów GaN oraz GaN-AlO_x i GaN-HfO_x. Pomiary prowadzono w kriostacie próżniowym, naprzemiennie wypełnianym powietrzem i odpompowywanym do ciśnienia $\sim 10^{-4}$ mbar. Rysunek z pracy [H9].

Ostatnia część pracy [H9] poświęcona była badaniom wydajności i stabilności luminescencji nanodrutów GaN-AlO_x oraz GaN-HfO_x w warunkach otoczenia, w temperaturze pokojowej. Rejestrowano zmiany sygnału PL w czasie, gdy próbka znajdowała się w kriostacie próżniowym – kolejno wypełnionym powietrzem oraz odpompowanym do ciśnienia ok. 10^{-4} mbar. Na podstawie tych pomiarów analizowaliśmy intensywność luminescencji oraz położenie energetyczne pasma NBE. Dla niepokrytych NWs GaN zaobserwowaliśmy spadek sygnału PL po zapowietrzeniu kriostatu i jego wzrost w warunkach próżni. Po ponownym zapowietrzeniu sygnał wracał do wartości początkowych, co wskazywało na odwracalność procesu (por. Rys. 15). Zjawisko to przypisaliśmy fotoadsorpcji cząsteczek powietrza, którą szczegółowo opisaliśmy w artykule. Odmiennie zachowanie zarejestrowaliśmy w przypadku nanodrutów GaN-AlO_x oraz GaN-HfO_x – nie zaobserwowaliśmy znaczących zmian intensywności luminescencji, a sygnał był stabilny i najwyższy dla najcieńszych powłok (o grubości 5 nm), niezależnie od rodzaju tlenku (por. Rys. 15). Stabilność sygnału PL w nanodrutach z pokryciami potwierdziła, że powłoki skutecznie tłumią procesy fotoaktywowane poprzez pasywację stanów powierzchniowych. Pozwala to na ekranowanie pola elektrycznego w rdzeniu przez akumulację nośników, zapobieganie tunelowaniu nośników do stanów powierzchniowych oraz ograniczenie wygięcia pasm (ang. flat-band effect), co skutkuje wzmocnieniem luminescencji. Efekt ten utrzymuje się również przy częściowym pokryciu NWs, sugerując wzrost analogiczny do procesu typu Stranskiego-Krastanowa, w którym pod wyspami tworzy się monowarstwa tlenku. Hipoteza ta wymaga jednak weryfikacji metodami TEM, co planujemy w przyszłych badaniach.

Najważniejszymi osiągnięciami tej pracy są: (1) wyjaśnienie przyczyny wygaszania luminescencji w czystych nanodrutach GaN w warunkach otoczenia – fotoadsorpcja cząsteczek powietrza; (2)

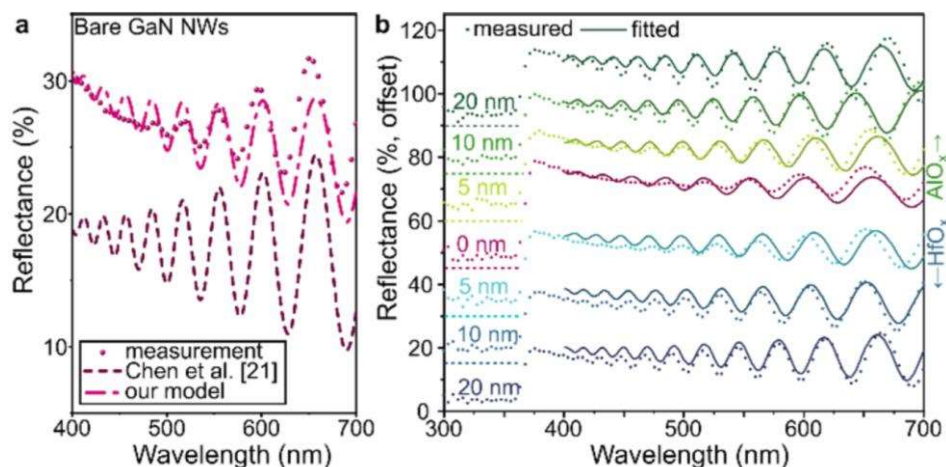
opisanie mechanizmów oddziaływań między rdzeniem GaN a powłokami tlenkowymi $\text{AlO}_x(\text{HfO}_x)$ nanodrutów; (3) identyfikacja źródeł naprężeń w badanych typach nanodrutów; (4) wykazanie odkształceń ściskających w badanych nanodrutach oraz ich zależności od grubości powłok, potwierdzone analizą statystyczną; (5) uzyskanie spójnych wartościach odkształceń wyznaczonych trzema niezależnymi metodami (XRD, PL i Raman); (6) wykazanie, że częściowe pokrycie nanodrutów redukuje naprężenia w rdzeniu; (7) udowodnienie znaczącej poprawy luminescencji w nanodrutach z częściowym pokryciem (PL, CL); (8) wyjaśnienie, że spadek intensywności sygnału PL w przypadku nanodrutów z grubymi powłokami może wynikać z rosnącego gradientu naprężeń, powstawania defektów oraz rozpraszaniem światła; (9) wskazanie potencjału aplikacyjnego częściowo pokrytych nanodrutów jako wydajnych i trwałych nanostruktur do zastosowań w optoelektronice. W ramach pracy [H9] kierowałam częścią badań doświadczalnych prowadzonych na PWr (pomiarów widm Ramana i fotoluminescencji). Brałam czynny udział w analizie wyników przedstawionych w tej pracy, w pisaniu pierwowzoru całego manuskryptu oraz przygotowywaniu odpowiedzi na uwagi recenzentów, a także odpowiadałam za jego finalną wersję. Pełniłam ponadto rolę opiekuna naukowego projektu „Perły Nauki”, w ramach którego realizowano badania, sprawując nadzór nad wykonywanymi zadaniami oraz koordynując współpracę między instytucjami.

Publikacja [H10] zamyka cykl prac prezentowanych w ramach osiągnięcia naukowego i jednocześnie stanowi kontynuację badań nanodrutów GaN z powłokami AlO_x i HfO_x o różnej grubości (5, 10 i 20 nm). W pracy tej skupiliśmy się na analizie widm odbicia próbek. Pomiarów zostały wykonane pod moim kierunkiem przez doktoranta Radosława Szymona. Zdjęcia badanych struktur, przedstawione w artykule, pokazują, że powłoki otaczające NWs zmieniają barwę odbitego światła, co stało się punktem wyjścia do dalszej analizy. Celem badań była szczegółowa analiza zjawiska odbicia światła w nanodrutach GaN- AlO_x i GaN- HfO_x oraz powiązanie obserwowanych efektów optycznych z parametrami strukturalnymi próbek, takimi jak współczynnik wypełnienia (ang. fill factor – określa stosunek powierzchni zajętej przez nanodrut do całkowitej powierzchni próbki).

Wszystkie próbki wykazywały wyraźny wzrost odbicia w okolicach 380 nm i 1120 nm, odpowiadający krawędziom absorpcji GaN oraz Si. Dodatkowo widoczne oscylacje wynikały z interferencji odbitego światła między górną a dolną powierzchnią próbek. Do opisu widm odbicia zastosowano przybliżenie efektywnego ośrodka (ang. effective medium approximation, EMA), w której zespół nanodrutów został potraktowany jako jednorodna warstwa o efektywnym współczynniku załamania n_{eff} , spełniającym równanie Bruggemana [52]. Na podstawie położenia ekstremów w widmach odbicia próbek, wyznaczono zależności spektralne n_{eff} , które wykazały wzrost tego parametru wraz z grubością powłok. Ponadto nanodrut z powłoką HfO_x wykazywały wyższe wartości n_{eff} niż te z powłoką AlO_x (z powodu większego współczynnika załamania HfO_x). Następnie model EMA wykorzystano do oszacowania współczynnika wypełnienia nanodrutów (f_{NWS}) na podstawie wyznaczonego n_{eff} oraz równania Bruggemana (zob. Supplement 1). Otrzymane wartości f_{NWS} były zbliżone do tych określonych z obrazów SEM.

Widma odbicia próbek NWs zostały zamodelowane na podstawie otrzymanych wartości n_{eff} i f_{NWS} oraz równania Fresnela, opisującego wielokrotne odbicia światła w cienkiej warstwie. Model ten wcześniej z powodzeniem stosowano do nanodrutów GaN bez powłok [53]. Jednak, jak pokazuje Rys. 16a, model ten zaniżał wartości odbicia i nie odtwarzał wzrostu odbicia przy długościach fali zbliżających się do 400 nm. Aby poprawić dopasowanie zmierzonych widm odbicia

próbek, zaproponowaliśmy rozszerzenie modelu, zakładając, że interferencja światła zachodzi wyłącznie w objętości nanodrutów, natomiast w przestrzeniach między nimi światło ulega odbiciu. W związku z tym w obliczeniach współczynnika odbicia uwzględniliśmy współczynnik wypełnienia f_{NWS} oraz dodatkowe człony opisujące bezpośrednie odbicie światła od podłoża Si. Wprowadzenie tej poprawki pozwoliło uzyskać bardzo dobrą zgodność w dopasowaniu eksperymentalnych widm odbicia badanych nanodrutów (por. Rys. 16b). Szczegóły dotyczące przyczyn zastosowania tej korekty opisano w treści publikacji [H10].



Rys. 16. (a) Porównanie poprawionego modelu z wcześniejszym. (b) Zmierzone widma odbicia (punkty) próbek z nanodrutami GaN-AlO_x i GaN-HfO_x dopasowane opracowanym modelem (linie). Rysunek z pracy [H10].

Podsumowując, najważniejszym osiągnięciem tej pracy jest wykazanie, że rodzaj i grubość powłoki w nanodrutach GaN-AlO_x i GaN-HfO_x mają istotny wpływ na ich właściwości optyczne, w tym współczynnik odbicia i efekty interferencyjne. W publikacji opracowano i dostosowano teoretyczny model EMA do analizy tych struktur, łącząc wyniki eksperymentalne z obliczeniami. Warto również podkreślić, że według naszej najlepszej wiedzy, praca [H10] jest pierwszą publikacją, w której metodę EMA zastosowano do nanodrutów rdzeń-powłoka. Wcześniejsze analizy koncentrowały się na zespołach nanodrutów GaN o różnych parametrach strukturalnych, takich jak współczynnik wypełnienia nanodrutów czy ich wysokość. W pracy [H10] kierowałam częścią badań doświadczalnych prowadzonych na PWr (pomiar widm odbicia), brałam czynny udział w analizie zawartych w niej wyników, jak również w pisaniu całego manuskryptu oraz przygotowywaniu odpowiedzi na uwagi recenzentów. Pełniłam także funkcję opiekuna naukowego projektu „Perły Nauki”, w ramach którego realizowano wspomniane badania.

5.5 Podsumowanie

Po uzyskaniu stopnia doktora skoncentrowałam się na badaniach heterostruktur opartych na półprzewodnikach szerokoprzerwowych, takich jak GaN i ZnO, ze szczególnym uwzględnieniem nanodrutów. Prowadziłam kompleksową analizę ich właściwości strukturalnych, optycznych i elektrycznych, wykorzystując m.in. spektroskopię Ramana, fotoluminescencję oraz metody elektryczne, w tym technikę DLTS.

Jak podkreśliłam na początku autoreferatu, zarówno ZnO, jak i GaN posiadają podobne struktury krystaliczne oraz prostą przerwę wzbronioną o zbliżonej szerokości. Czyni to je materiałami konkurującymi, a jednocześnie komplementarnymi w zastosowaniach

optoelektronicznych, szczególnie w zakresie ultrafioletu. To właśnie wspólna idea – analiza defektów i naprężeń w heterostrukturach opartych na wspomnianych półprzewodnikach, wytworzonych głównie na podłożach krzemowych – stanowi nieć przewodnią i łączy prace [H1-H10]. Pierwsze dwie publikacje poświęcone były układom planarnym, tj. heterozłączom p-n ZnO-GaN oraz ZnO/ZnMgO-Si, w których warstwy tlenkowe domieszkowano azotem lub arsenem na typ p. Prace te koncentrowały się na badaniach właściwości elektrooptycznych oraz defektów o charakterze akceptorowym, odpowiedzialnych za przewodnictwo dziurowe w ZnO. Zdobyte doświadczenia z układami planarnymi stanowiły fundament dla dalszych badań nad tlenkowymi nanostrukturami jednowymiarowymi, których architektura pozwalała nie tylko na znaczące ograniczenie naprężeń względem podłoża, lecz także na istotne zwiększenie wydajności luminescencji w zakresie UV. Równoległe do prac nad nanodrutami tlenkowymi prowadziłam również badania nad nanodrutami azotkowymi typu rdzeń-powłoka, koncentrując się w nich przede wszystkim na analizie naprężeń oraz szczegółowej charakterystyce właściwości optycznych.

Spośród wszystkich osiągnięć naukowych, podsumowujących prace [H1]-[H10], wyodrębniam dwa główne, które szczególnie podkreślają mój udział i uważam je za kluczowe:

1. Wykazanie obecności mikro-naprężeń w nanodrutach z półprzewodników szerokoprzerwowych

Udowodniłam, że, wbrew powszechnemu przekonaniu, nanodrutu nie są całkowicie wolne od naprężeń. Moje badania dowiodły, że założenie to nie jest prawdziwe w skali mikroskopowej. Pokazałam, że choć nanodrutu GaN-AlGaN i Zn(Cd,Mg)O wytworzone na podłożach krzemowych są w pełni zrelaksowane sieciowo w skali makroskopowej, to wewnątrz struktur wciąż występują mikro-naprężenia, które powodują odkształcenia ich sieci krystalicznej. Zidentyfikowałam kilka ich źródeł, w tym koalescencję nanodrutów, wbudowywanie obcych atomów w sieć krystaliczną oraz statystyczne zróżnicowanie rozmiarów i kształtów nanodrutów. Wyniki te mają istotne znaczenie dla projektowania wydajnych diod opartych na nanodrutach GaN i Zn(Cd,Mg)O. Mechanizmy wywołujące mikro-naprężenia, wraz z oddziaływaniami wynikającymi z kwantowego efektu rozmiarowego, wpływu temperatury, czy oddziaływania fonon-plazmon opisałam i opublikowałam w liczących się w tej dziedzinie periodykach jak *Applied Surface Science* (2021, 2022) czy *Journal of Alloys and Compounds* (2025). Uzyskane przeze mnie rezultaty stały się także podstawą do dalszych badań nad nanodrutami rdzeń-powłoka GaN-AlO_x/HfO_x, w przypadku których wykazaliśmy związek pomiędzy niemonotonicznymi zmianami w rozkładzie odkształceń sieci, a efektywnym wzmocnieniem luminescencji. Dodatkowo, zaobserwowane w nanodrutach GaN wygaszanie luminescencji w warunkach otoczenia wyjaśniłam procesem fotoadsorpcji cząsteczek powietrza, co zostało podsumowane publikacją w czasopiśmie *Small* (2024).

2. Identyfikacja defektów w heterostrukturach na bazie ZnO oraz określenie ich pochodzenia

Dzięki badaniom elektrycznym (I-V, C-V, DLTS), które prowadziłam samodzielnie i wraz ze studentami i doktorantami, z którymi współpracuję, zidentyfikowałam defekty w tlenkowych heterostrukturach kolumnowych i planarnych otrzymanych na podłożach Si. Warto podkreślić, że wyniki przedstawione w publikacjach *Journal of Alloys and Compounds* (2014, 2018) dostarczyły nowych informacji o defektach w ZnO domieszkowanym na typ p. Prace te wniosły istotny wkład w rozwój badań nad uzyskaniem trwałego przewodnictwa dziurowego w tym materiale i doskonale wpisują się w szerszy kontekst badań nad defektami w heterostrukturach z półprzewodników szerokoprzerwowych. Analiza właściwości elektrycznych heterostruktur kolumnowych ZnMgO/Si

oraz planarnych ZnCdO/Si potwierdziła ich sprawne działanie jako diod, co stanowi ważny krok w kierunku ich praktycznych zastosowań w optoelektronice. Pomiary charakterystyk I-V oraz C-V dostarczyły szeregu kluczowych informacji o parametrach elektrycznych złączy, mechanizmach przewodzenia oraz lokalizacji warstwy aktywnej badanych diod (*Materials Science and Engineering B* 2021; *Journal of Alloys and Compounds* 2023, 2025).

Badania defektów mają fundamentalne znaczenie, ponieważ ich koncentracja i rodzaj zależą od technologii wytwarzania, architektury układu (planarny/kolumnowy) oraz warunków wzrostu. Defekty wprowadzają dodatkowe poziomy energetyczne w przerwie wzbronionej półprzewodnika i przez to wpływają zarówno na właściwości optyczne, jak i elektryczne oraz strukturalne badanych materiałów. Tworzą one centra pułapkowe i rekombinacyjne odpowiedzialne za przejścia optyczne, co pokazałam w przypadku widm PL zarówno struktur tlenkowych jak i azotkowych. Mogą również decydować o mechanizmie przewodzenia w złączach półprzewodnikowych. Defekty wbudowują się w sieć krystaliczną, w miejsce atomu, międzywęzłowo lub tworząc oddziałujące ze sobą kompleksy, co zaburza jej periodyczność, prowadzi do powstawania lokalnych naprężeń i deformacji sieci krystalicznej modyfikując strukturę pasmową. W konsekwencji, defekty mają wpływ na wydajność i stabilność urządzeń optoelektronicznych konstruowanych na bazie materiałów półprzewodnikowych, dlatego ich badania podstawowe są jednymi z priorytetowych.

Podsumowując, znaczenie prac [H1]-[H10] nie ogranicza się jedynie do analizy omawianych w nich układów materiałowych. Wyniki, przedstawione w ramach opisanego osiągnięcia habilitacyjnego, przyczyniły się do głębszego zrozumienia zjawisk fizycznych w nanostrukturach szerokoprzerwowych i stanowią istotny punkt wyjścia do optymalizacji technologii ich wytwarzania. Osiągnięcia te wymagały przeprowadzenia zaawansowanych badań materiałowych i dostarczają nowej wiedzy istotnej zarówno z perspektywy nauk fizycznych, jak i inżynierii materiałowej. Zdecydowana większość uzyskanych rezultatów ma charakter nowatorski w skali globalnej i oprócz publikacji była prezentowana na licznych seminariach, konferencjach krajowych i międzynarodowych (por. par. 8.2). Uzyskane cytowania publikacji [H1]-[H10] (łącznie: 71 bez autocytowań wg bazy Web of Science) potwierdzają, że prace te spotkały się z zainteresowaniem naukowców z innych ośrodków.

Chciałabym podkreślić, że badania nad nanostrukturami azotkowymi typu rdzeń-powłoka oraz heterostrukturami na bazie ZnO, przedstawione w niniejszym autoreferacie, miały charakter pilotażowy i stały się podstawą do prowadzenia bardziej systematycznych prac o charakterze aplikacyjnym. Kontynuowane są badania nad nanodrutami GaN z powłokami tlenkowymi w kontekście ich zastosowań fotokatalitycznych. W tym obszarze doktorant, mgr inż. Radosław Szymon, uzyskał finansowanie projektu Preludium NCN (Narodowe Centrum Nauki) „GNOMES – Nanodrut GaN z powłokami tlenkowymi: modyfikacja i udoskonalenie poprzez inżynierię powierzchni”, w którym pełnię funkcję opiekuna naukowego. Równolegle, w grudniu 2025 roku złożyłam wniosek projektowy w konkursie Opus NCN pt. „SURPASS: Zjawiska powierzchniowe i powłoki atomowe na nanodrutach azotkowych grupy III”, w którym występuję jako kierownik projektu. W ramach projektu GNOMES badany będzie wpływ wygrzewania po osadzeniu powłok na właściwości strukturalne i optyczne nanodrutów GaN. Projekt SURPASS dotyczy badań efektów powierzchniowych w nanodrutach GaN pokrywanych różnymi tlenkami (TiO₂, ZrO₂ i innymi), z myślą o ich zastosowaniach fotokatalitycznych. Rozwijane są również badania struktur na bazie ZnO, prowadzone w kierunku zastosowań w detektorach światła UV/VIS. Tematem tym zajmuje się doktorant, mgr inż. Igor Perlikowski, nad którym sprawuję opiekę naukową. Wyniki prowadzonych prac okazały się bardzo obiecujące i stały się podstawą do złożenia zgłoszenia

patentowego „*Ultraszybki fotodetektor na bazie stopu $Zn_{1-x}Cd_xO$ domieszkowanego Eu na zakres 380-1120 nm niewymagający zewnętrznego zasilania, oparty na efekcie piro-fototronicznym*”, autorstwa I. Perlikowskiego, [E. Zielony](#) i E. Przeździeckiej (P452298, lipiec 2025). Ponadto badania te uzyskały finansowanie kolejnego projektu Preludium NCN „*Światło, Ciepło, Akcja! Samozasilana ultraszybka fotodetekcja w szerokim zakresie spektralnym oparta na efekcie piro-fototronicznym w stopach $Zn(Cd,Mg)O:Eu$* ”, w którym również pełnię rolę opiekuna naukowego, a kierownikiem projektu jest mgr inż. I. Perlikowski.

6. Informacja o wykazywaniu się istotną aktywnością naukową albo artystyczną realizowaną w więcej niż jednej uczelni, instytucji naukowej lub instytucji kultury, w szczególności zagranicznej

W latach 2013–2026 prowadziłam intensywną działalność badawczą we współpracy z licznymi ośrodkami naukowymi w Polsce i za granicą. Moje prace obejmowały badania i analizę właściwości szerokiego spektrum nowoczesnych materiałów półprzewodnikowych, a realizowane projekty – krajowe i międzynarodowe (patrz paragraf 8.3) – miały charakter podstawowy i aplikacyjny.

1) Współpraca krajowa

- [Instytut Fizyki Polskiej Akademii Nauk w Warszawie \(IF PAN\)](#)

Bezpośrednio po zatrudnieniu na stanowisku asystenta badawczo-dydaktycznego (październik 2012 r.) złożyłam wniosek projektowy w programie Iuventus Plus (MNiSW, patrz paragraf 8.3). Projekt pt. „*Charakteryzacja elektro-optyczna defektów w strukturach półprzewodnikowych na bazie CdTe, przeznaczonych na przyrządy fotowoltaiczne*”, uzyskał finansowanie w kwietniu 2013 r., a ja pełniłam w nim funkcję kierownika. Badania prowadzone były we współpracy z prof. dr. hab. Grzegorzem Karczewskim i dr. Sergijem Chusnutdinowem z Laboratorium Fizyki i Wzrostu Kryształów Niskowymiarowych, którzy opracowali technologię wzrostu MBE komórek słonecznych CdTe/ZnTe. Celem projektu była identyfikacja defektów w ww. strukturach fotowoltaicznych oraz określenie ich wpływu na właściwości i sprawność ogniw. Najważniejsze rezultaty zostały podsumowane w dwóch artykułach [N1 i N2].

W 2013 roku rozpoczęłam stałą współpracę z Zespołem Wzrostu MBE Nanomateriałów Tlenkowych, kierowanym wówczas przez prof. dr. hab. Adriana Kozaneckiego. Współpracę tę wraz z moim zespołem badawczym rozwijam do dziś. Prowadzę systematyczne badania struktur tlenkowych na bazie ZnO, CdO oraz MgO mających zastosowanie w fotodetektorach i emiterach światła UV/VIS. Współpracuję przy tym z dr. hab. Mieczysławem Pietrzykiem i dr. hab. Ewą Przeździecką. Moje pierwsze prace dotyczyły heterozłączy, w których warstwy ZnO i ZnMgO domieszkowano pierwiastkami z grupy V (N, As, Sb) w celu uzyskania przewodnictwa dziurowego. Uczestniczyłam również w badaniach dynamiki sieci krystalicznej w strukturach ZnO:Sb/*a*-Al₂O₃ na podstawie pomiarów rozpraszania Ramana [N3, N4]. Ponadto, prowadziłam również własne badania właściwości elektrycznych tlenkowych struktur złączowych, które zaprezentowano w pracach [N5-N7].

Ważną grupę materiałów tlenkowych, których badania są kontynuowane we współpracy z dr. hab. E. Przeździecką, stanowią struktury na bazie CdO, MgO i ZnCdO domieszkowane europem, istotne dla fotodetektorów promieniowania UV-VIS. Analizujemy zarówno układy zawierające cienkie warstwy tych materiałów, jak i supersieci o grubościach kilku nanometrów. Prace te są równolegle realizowane w ramach doktoratu mgr. inż. Igora Perlikowskiego, którego jestem opiekunem naukowym. Pan I. Perlikowski uzyskał także finansowanie swoich badań

w konkursie Preludium (NCN), w którym również pełnię funkcję opiekuna naukowego (por. paragraf 8.3). Wyniki dotychczasowych badań zostały opublikowane w pracach [N8-N11], których jestem współautorką.

Kolejnym obszarem mojej współpracy z IF PAN były diody n-ZnO/p-GaN wytwarzane techniką ALD przez grupę prof. dr. hab. Marka Godlewskiego. Wspólnie z dr. hab. Tomaszem Krajewskim prowadziłam pomiary admitancyjne tych struktur, co pozwoliło na identyfikację defektów i określenie ich parametrów. Rezultaty opublikowano w pracy [N12]. Współpracę z grupą prof. Godlewskiego kontynuowałam w ramach dwóch równoległe prowadzonych projektów: Opus 7 i Polska-Tajwan, finansowanych przez NCN i NCBR (Narodowe Centrum Badań i Rozwoju), w których pełniłam rolę wykonawcy (patrz paragraf 8.3). Tematyka badań dotyczyła ogniw n-ZnO/p-Si, w tym z nanocząstkami metali, w których analizowano efekty plazmonowe i rolę defektów. Prace te zaowocowały łącznie 13 publikacjami [N13-N25], w których byłam odpowiedzialna za pomiary i analizę charakterystyk prądowo-napięciowych ogniw, otrzymanych przy użyciu symulatora słońca. Ponadto w ramach tych projektów powstały dwa doktoraty, w tym praca mgr inż. Katarzyny Gwóźdź, w której byłam promotorem pomocniczym (patrz paragraf 7.2).

Od 2018 r. współpracuję z Zespołem Wzrostu MBE Nanostruktur Azotkowych kierowanym przez dr hab. Martę Sobańską i prof. dr. hab. Zbigniewa Żytkiewicza. Początkowo uczestniczyłam w charakterystyce nanodrutów GaN w ramach doktoratu dr inż. Pauliny Kamyczek (pomiary ramanowskie i DLTS), co zaowocowało czterema publikacjami [N26-N29], których jestem współautorką. Moje własne badania koncentrują się na nowej klasie struktur typu „rdzeń-powłoka” GaN-Al_xGa_{1-x}N oraz GaN-(Al/Hf)O_x, które opisałam szczegółowo w paragrafie 5.4.3. Prace te są kontynuowane w doktoracie mgr. inż. Radosława Szymona, realizowanym w ramach projektów „Perły nauki” (MNiSW) oraz Preludium (NCN), w których pełnię funkcję opiekuna naukowego (por. paragraf 8.3).

Współpracując z dr Moniką Ożgą (IF PAN), prowadziłam także badania cienkich warstw CuO. Materiały te znajdują zastosowanie w fotowoltaice, biosensorach czy superkondensatorach. Tlenek miedzi występuje w trzech strukturach krystalicznych: CuO, Cu₂O, Cu₄O₃, które różnią się właściwościami fizycznymi i elektrycznymi. Celem moich badań było określenie typu struktury krystalicznej próbek na podstawie analizy widm Ramana. Wyniki opublikowano w pracy [N30], której jestem współautorką.

Podsumowując, w ramach wieloletniej współpracy z różnymi zespołami IF PAN w Warszawie powstało 30 wspólnych publikacji, nie licząc 10 włączonych do opisywanego osiągnięcia naukowego. Ponadto odbyłam dwa staże badawcze – dwudniowy w 2014 r. oraz dwutygodniowy w 2015 r. – podczas których m.in. konsultowałam wyniki badań heterostruktur CdTe/ZnTe/GaAs oraz uczestniczyłam w procesach ALD otrzymywania złączy ZnO/Si.

- [Sieć Badawcza Łukasiewicz, Instytut Mikroelektroniki i Fotoniki \(IMiF\), Warszawa](#)

Współpraca z dr hab. Agatą Jasik nad supersieciami InAs/GaSb oraz AlSb/GaSb. Struktury te są stosowane w fotodetektorach podczerwieni. Celem badań, które prowadziłam, była identyfikacja składu chemicznego oraz charakterystyka właściwości strukturalnych próbek z wykorzystaniem spektroskopii Ramana. Pomiary prowadziłam wspólnie z moim studentem Tomaszem Gzyłem. Na podstawie analizy zarejestrowanych widm przypisano pochodzenie poszczególnym modom fononowym, co pozwoliło potwierdzić skład badanych struktur oraz obliczyć występujące w nich naprężenia. Otrzymane wyniki stanowią materiał do publikacji naukowej i zaowocowały pracą inżynierską p. T. Gzyła, której byłam promotorką (patrz paragraf 7.1).

- [Instytut Niskich Temperatur i Badań Strukturalnych PAN \(INTiBS\), Wrocław](#)

Współpraca z dr. hab. Mariuszem Stefańskim nad strukturami na bazie perowskitu CsPbBr₃. Materiały te znajdują zastosowanie w ogniwach trzeciej generacji. Ich badania realizowaliśmy wspólnie w ramach projektu SONATA 17 (NCN, por. paragraf 8.3), w którym byłam wykonawcą. W projekcie byłam odpowiedzialna za pomiary charakterystyk prądowo-napięciowych z wykorzystaniem symulatora słońca, a także za badania spektralnych widm fotoprądu i wydajności kwantowej dla ogniw krzemowych pokrytych warstwami różnych perowskitów, m.in. CsPbBr₃ oraz CsPbBr₃:Yb³⁺. Celem moich badań była ocena wpływu zastosowanych perowskitów na sprawność ogniw krzemowych. Uzyskane wyniki zostały przedstawione w artykule [N31], którego jestem współautorką, a obecnie planowane jest przygotowanie kolejnej publikacji.

- [Instytut Metalurgii i Inżynierii Materiałowej PAN, Kraków](#)

Współpraca z dr. inż. Zbigniewem Starowiczem nad fotoogniwami krzemowymi z nanocząstkami srebra. Efektem tej współpracy była jedna publikacja [N32], której jestem współautorką. Mój wkład do tej publikacji polegał na wykonaniu pomiarów zewnętrznej sprawności kwantowej ogniw oraz analizie otrzymanych wyników pod kątem występowania efektów plazmonowych.

- [Politechnika Wrocławska – współpraca międzywydziałowa](#)

a) Wydział Elektroniki, Fotoniki i Mikrosystemów:

- ✓ Współpraca z dr. hab. Łukaszem Gelczukiem nad złączami Schottky'ego na bazie węglika krzemu (SiC). Węglik krzemu stanowi jeden z kluczowych materiałów dla nowoczesnej elektroniki mocy i wysokiej częstotliwości. Materiał ten występuje w wielu politypach (m.in. 3C-SiC, 4H-SiC, 6H-SiC), które różnią się układem atomów w sieci krystalicznej, a tym samym właściwościami fizycznymi – takimi jak stała dielektryczna, ruchliwość nośników czy napięcie przebicia. W prowadzonych badaniach skoncentrowałam się na analizie złączy Schottky'ego na bazie SiC, ze szczególnym uwzględnieniem identyfikacji politypu i związanego z nim systemu defektów. Wykorzystałam w tym celu spektroskopię Ramana oraz spektroskopię impedancyjną. Wyniki moich badań zostały uwzględnione w pracy [N33], której jestem współautorką.
- ✓ Współpraca z prof. Markiem Tłaczałą i dr. inż. Beatą Ścianą nad strukturami na bazie GaAsN/GaAs. Związki półprzewodnikowe z układu GaAsN należą do materiałów grupy III-V rozrzedzonych azotem. W prowadzonych badaniach skoncentrowałam się na analizie wpływu zwiększonej zawartości azotu na strukturę krystaliczną oraz właściwości elektryczne tych materiałów. Wykorzystałam w tym celu spektroskopię Ramana oraz pomiary charakterystyk prądowo-napięciowych. W rezultacie tej współpracy powstał artykuł naukowy [N34], którego jestem współautorką.

b) Wydział Podstawowych Problemów Techniki:

- ✓ Współpraca z prof. dr. hab. Robertem Kudrawcem nad złączami Schottky'ego na bazie GaN wykonanymi na podłożach GaN zorientowanych w płaszczyźnie m , wyprodukowanych przez warszawską firmę AMMONO. Na takich podłożach wzrastane były cienkie warstwy GaN techniką epitaksji z fazy gazowej z użyciem związków metaloorganicznych (MOVPE). W literaturze można znaleźć wiele doniesień na temat tego, że tak przygotowane złącza powinny być wolne od defektów rozciągłych, takich jak dyslokacje. Aby to sprawdzić przeprowadzono szereg pomiarów sygnału DLTS oraz pomiarów charakterystyk prądowo-napięciowych i pojemnościowo-napięciowych w celu zbadania defektów, określenia ich typu oraz parametrów elektrycznych. Wspomniane badania prowadziłam we współpracy z moimi

studentami, p. Pauliną Łysik i p. Radosławem Szymonem. Efektem tej współpracy była praca inżynierska pani P. Łysik, której byłam promotorem (patrz paragraf 7.1), oraz dwie prezentacje – ustna i plakatowa – przedstawione przez studenta R. Szymona podczas konferencji FOKA na PWr w 2019r. W obu prezentacjach występowałam jako współautorka.

- ✓ Współpraca z dr hab. Agnieszką Ciżman nad szklami boro-krzemowymi niklowo-sodowymi. Materiały te, ze względu na swoje właściwości ferroelektryczne i multiferroiczne, znajdują zastosowanie m.in. w przełącznikach optycznych oraz nośnikach zapisu magnetycznego. W ramach badań analizowałam ich widma Ramana oraz topografię powierzchni z wykorzystaniem mikroskopu AFM, w celu opisu morfologii i właściwości strukturalnych próbek. Pomiarów realizowałam wspólnie z moim studentem Igorem Perlikowskim. Efektem tej współpracy jest publikacja [N35], której jestem współautorką.

2) Współpraca zagraniczna

- [Francja – GeePs \(CNRS, CentraleSupélec, Paris-Saclay\)](#)

Współpraca z prof. Denisem Mencaraglia oraz dr. Jamesem Conolly z francuskiego zespołu naukowego GeePs (CNRS, Paryż) nad strukturami planarnymi GaAs/Si oraz zawierającymi mikrokryształy GaAs na podłożach Si. Badania wspomnianych próbek prowadziliśmy w ramach projektu sieci COST oraz mojego własnego projektu badawczego *Polonium* na wymianę bilateralną naukowców z Polski i Francji (patrz paragraf 8.3). Celem wspomnianych projektów było przeprowadzenie badań podstawowych próbek z wykorzystaniem spektroskopii Ramana oraz fotoluminescencji, umożliwiających wyznaczenie koncentracji domieszek w strukturach planarnych GaAs/Si oraz mikrokryształach GaAs domieszkowanych na typ n i p. Parametr ten był kluczowy dla udoskonalenia technologii wytwarzania tandemowych ogniw GaAs/Si, zawierających subogniwo utworzone z rozseparowanych mikrokryształów GaAs pokrywających podłoże Si. Choć współpraca w projekcie *Polonium* została przerwana z powodu pandemii COVID-19, zrealizowana część projektu pozwoliła na opracowanie procedur pomiarowych, a uzyskane wyniki okazały się przydatne dla technologów zajmujących się wytwarzaniem wspomnianych struktur. Ponadto, dzięki tej współpracy odbyłam dwa jednotygodniowe staże badawcze – w 2018 i 2021 roku – podczas których uczestniczyłam w badaniach mikro-fotoluminescencji struktur GaAs/Si oraz CdTe/ZnTe/GaAs (patrz Załącznik nr 4a).

- [Turcja – Uniwersytet Çukurova](#)

Współpraca z prof. Hamide Kavak nad związkami na bazie $\text{Cu}_2\text{ZnSnS}_4$ (CZTS), czyli tzw. kesterytami. Kesteryty należą do materiałów znajdujących zastosowanie w wysokowydajnych tandemowych ogniwach słonecznych. Badania tych związków prowadziłam wspólnie z moim studentem Igorem Perlikowskim. Celem prac była ocena jakości procesu technologicznego związanego z wytwarzaniem CZTS poprzez analizę właściwości elektrycznych próbek, identyfikację ich składu chemicznego i obecnych faz, a także charakterystykę topografii powierzchni. W badaniach wykorzystano mikroskopię AFM, spektroskopię Ramana oraz pomiary charakterystyk prądowo-napięciowych. Otrzymane rezultaty zaowocowały publikacją [N36], której jestem współautorką, oraz pracą inżynierską I. Perlikowskiego, której byłam promotorką.

- [Rosja – Rosyjska Akademia Nauk](#)

Współpraca z prof. Nikolaiem Galkinem nad heterostrukturami Si/ Ca_xSi /Si. Materiały te znajdują zastosowanie w fotodiodach IR oraz przetwornikach termoelektrycznych, a w połączeniu z technologią krzemową mogą posłużyć do tworzenia źródeł energii wykorzystujących ciepło odpadowe w układach automatyki. Ze względu na fakt, że Ca_xSi krystalizuje w kilku różnych

formach, konieczne były badania struktury i składu cienkich warstw, które wykonałam przy użyciu spektroskopii Ramana. Efektem tej współpracy były dwie publikacje [N37, N38], których jestem współautorką.

- [Tajwan – Chang-Gung University](#)

Współpraca z grupą prof. Liann-Be Changa z CGU w Taoyuan (Department of Electronic Engineering and Green Technology Research) w ramach projektu Polska-Tajwan finansowanego przez NCBR (por. par. 8.3). W ramach projektu badane były struktury złączowe na bazie ZnO z nanocząstkami metali wytworzonymi na podłożu Si. Byłam odpowiedzialna za pomiary charakterystyk prądowo-napięciowych z wykorzystaniem symulatora słońca oraz analizę parametrów fotowoltaicznych próbek. Efektem tej współpracy były cztery publikacje naukowe [N18-N20, N24] oraz tygodniowy staż badawczy w 2016 r., podczas którego wspólnie z zespołem z CGU osadzaliśmy na badanych strukturach złączowych nanocząstki Au i Ag metodą wirowania obrotowego (ang. spin-coating).

Podsumowując, w okresie po doktoracie współpracowałam z dziewięcioma instytucjami naukowymi w Polsce i za granicą, realizując:

- ❖ 3 projekty we współpracy międzynarodowej (*Polonium*, projekt sieci COST, Polska-Tajwan);
- ❖ 6 projektów krajowych (Iuventus Plus, OPUS 7, Sonata 17, Perły Nauki, Preludium);
- ❖ staże badawcze;
- ❖ ponad 30 publikacji powstałych dzięki tej współpracy;
- ❖ opiekę nad studentami i doktorantami wykonującymi prace w kooperacji międzyinstytucjonalnej.

[N1] **E. Zielony**, K. Olender, E. Popko, T. Wosinski, A. Racino, Z. Gumienny, G. Karczewski, S. Chusnutdinow, *Electrical and photovoltaic properties of CdTe/ZnTe n-i-p junctions grown by molecular beam epitaxy*, *J. Appl. Phys.* 115 (2014) 244501.

[N2] **E. Zielony**, M. Morawski, A. Racino, E. Placzek-Popko, Z. Gumienny, S. Chusnutdinow, G. Karczewski, *Aktywność defektów w pomiarach elektrycznych i optycznych złączy fotowoltaicznych na bazie CdTe*, *Przegląd Elektrotechniczny*, ISSN 0033-2097, 2016, R. 92, nr 9, s. 43-46.

[N3] K.M. Paradowska, E. Przeździecka, E. Placzek-Popko, **E. Zielony**, M. Stachowicz, A. Kozanecki, *Effect of annealing on photoluminescence and Raman scattering of Sb-doped ZnO epitaxial layers grown on α -Al₂O₃*, *J. Alloys Compd.* 774 (2019) 1160-1167.

[N4] E. Przeździecka, K.M. Paradowska, W. Lisowski, A. Wierzbicka, R. Jakiela, **E. Zielony**, Z. Gumienny, E. Placzek-Popko, A. Kozanecki, *ZnO:Sb MBE layers with different Sb content-optical, electronic and structural analysis*, *J. Alloys Compd.* 797 (2019) 1163-1172.

[N5] E. Przeździecka, K. Gościński, M. Stachowicz, D. Dobosz, **E. Zielony**, J.M. Sajkowski, M.A. Pietrzyk, E. Popko, A. Kozanecki, *Spectrum selective UV detectors from an p-ZnO:As/n-GaN diodes grown by Molecular Beam Epitaxy*, *Sensor Actuat. A – Phys.* 195 (2013) 27-31.

[N6] M.A. Pietrzyk, E. Placzek-Popko, K.M. Paradowska, **E. Zielony** M. Stachowicz, A. Reszka, A. Kozanecki, *Optoelectronic properties of ZnO/ZnMgO multiple quantum wells in ZnMgO nanocolumns grown on Si(111)*, *J. Alloys Compd.* 717 (2017) 41-47.

[N7] R. Szymon, **E. Zielony**, M.A. Pietrzyk, *Advancing defect analysis in ZnO/ZnCdO thin films with deep level transient spectroscopy*, *Appl. Surf. Sci.* 724 (2026) 165751.

[N8] I. Perlikowski, **E. Zielony**, A. Lysak, R. Jakiela, E. Przeździecka, *Manifestation of Eu dopants in Raman spectra and doping concentration profiles of {ZnCdO/ZnO} superlattices*, *Cryst. Growth Des.* 24 (2024) 6691-6700.

[N9] A. Wierzbicka, E. Przeździecka, I. Perlikowski, **E. Zielony**, A. Adhikari, A. Lysak, *New insights into crystallographic relation and lattice dynamics effects in {CdO/MgO} superlattices grown by plasma-assisted molecular beam epitaxy*, *Mater. Res. Bull.* 190 (2025) 113535.

- [N10] E. Przeździecka, I. Perlikowski, D. Jarosz, S. Chusnutdinow, A. Wierzbicka, A. Adhikari, M. Stachowicz, R. Jakiela, **E. Zielony**, P. Wojnar, A. Kozanecki, *MBE obtained n-CdO:Eu/p-Si heterojunctions - electron beam induced profiling, electrical and structural properties*, *J. Phys. D: Appl. Phys.* 58 (2025) 475105.
- [N11] I. Perlikowski, **E. Zielony**, A. Adhikari, R. Jakiela, S. Chusnutdinow, E. Popko, E. Przeździecka, *Eu-assisted enhancement of photoresponse in MBE-grown CdO/Si photodetectors*, *Mater. Sci. Eng. B* 325 (2026) 119113.
- [N12] T.A. Krajewski, P. Stallinga, **E. Zielony**, K. Goscinski, P. Kruszewski, L. Wachnicki, T. Aschenbrenner, D. Hommel, E. Guzewicz, M. Godlewski, *Trap levels in the atomic layer deposition-ZnO/GaN heterojunction - Thermal admittance spectroscopy studies*, *J. Appl. Phys.* 113 (2013) 194504.
- [N13] R. Pietruszka, B.S. Witkowski, G. Luka, Ł. Wachnicki, S. Gieraltowska, K. Kopalko, **E. Zielony**, P. Biegański, E. Popko, M. Godlewski, *Photovoltaic properties of ZnO nanorods/p-type Si heterojunction structures*, *Beilstein J. Nanotechnol.* 5 (2014) 173-179.
- [N14] G. Luka, B.S. Witkowski, Ł. Wachnicki, K. Gościński, R. Jakiela, E. Guzewicz, M. Godlewski, **E. Zielony**, P. Biegański, E. Popko, W. Lisowski, J.W. Sobczak, A. Jablonski, *Atomic layer deposition of Zn_{1-x}Mg_xO:Al transparent conducting films*, *J. Mater. Sci.* 49 (2014) 1512-1518.
- [N15] R. Pietruszka, G. Luka, B.S. Witkowski, K. Kopalko, **E. Zielony**, P. Biegański, E. Popko, M. Godlewski, *Electrical and photovoltaic properties of ZnO/Si heterostructures with ZnO films grown by atomic layer deposition*, *Thin Solid Films* 563 (2014) 28-31.
- [N16] R. Pietruszka, G. Luka, K. Kopalko, **E. Zielony**, P. Biegański, E. Popko, M. Godlewski, *Photovoltaic and photoelectrical response of n-ZnO/p-Si heterostructures with ZnO films grown by an atomic layer deposition method*, *Mater. Sci. Semicond. Process.* 25 (2014) 190-196.
- [N17] R. Pietruszka, B.S. Witkowski, S. Gieraltowska, P. Caban, Ł. Wachnicki, **E. Zielony**, K.R. Gwóźdź, P. Biegański, E. Popko, M. Godlewski, *New efficient solar cell structures based on zinc oxide nanorods*, *Sol. Energy Mater. Sol. Cells* 143 (2015) 99-104.
- [N18] E. Popko, K.R. Gwóźdź, Z. Gumienny, **E. Zielony**, R. Pietruszka, B.S. Witkowski, Ł. Wachnicki, S. Gieraltowska, M. Godlewski, W. Jacak, Liann-Be Chang, *Si/ZnO nanorods/Ag/AZO structures as promising photovoltaic plasmonic cells*, *J. Appl. Phys.* 117 (2015) 193101.
- [N19] K.R. Gwóźdź, E. Popko, Z. Gumienny, **E. Zielony**, R. Pietruszka, B.S. Witkowski, Ł. Wachnicki, S. Gieraltowska, M. Godlewski, Liann-Be Chang, *Si/ZnO nanorods with Ag nanoparticles/AZO heterostructures in PV applications*, *Bull. Pol. Acad. Sci. Tech. Sci.* 64 (2016) 529-533.
- [N20] W. Jacak, E. Popko, A. Henrykowski, **E. Zielony**, K.R. Gwóźdź, G. Luka, R. Pietruszka, B.S. Witkowski, Ł. Wachnicki, M. Godlewski, Liann-Be Chang, Ming-Jer Jeng, *On the size dependence and spatial range for the plasmon effect in photovoltaic efficiency enhancement*, *Sol. Energy Mater. Sol. Cells* 147 (2016) 1-16.
- [N21] R. Pietruszka, R. Schifano, T.A. Krajewski, B.S. Witkowski, K. Kopalko, Ł. Wachnicki, **E. Zielony**, K.R. Gwóźdź, P. Biegański, E. Popko, M. Godlewski, *Improved efficiency of n-ZnO/p-Si based photovoltaic cells by band offset engineering*, *Sol. Energy Mater. Sol. Cells* 147 (2016) 164-170.
- [N22] R. Pietruszka, B.S. Witkowski, **E. Zielony**, K.R. Gwóźdź, E. Popko, M. Godlewski, *ZnO/Si heterojunction solar cell fabricated by atomic layer deposition and hydrothermal methods*, *Sol. Energy* 155 (2017) 1282-1288.
- [N23] K.R. Gwóźdź, E. Popko, M. Mikosza, **E. Zielony**, R. Pietruszka, K. Kopalko, M. Godlewski, *Investigation of defects origin in p-type Si for solar applications*, *J. Electron. Mater.* 46 (2017) 4562-4566.
- [N24] K.R. Gwóźdź, E. Popko, **E. Zielony**, K.M. Paradowska, R. Pietruszka, B.S. Witkowski, K. Kopalko, M. Godlewski, Liann-Be Chang, *Deep traps in the ZnO nanorods/Si solar cells*, *J. Alloys Compd.* 708 (2017) 247-254.
- [N25] K.R. Gwóźdź, E. Popko, **E. Zielony**, Z. Gumienny, R. Pietruszka, B.S. Witkowski, K. Kopalko, M. Godlewski, *Parametry konwersji fotowoltaicznej dla fotoogniw plazmowych na bazie ZnO z nanocząstkami srebra i złota*, *Przegląd Elektrotechniczny*, ISSN 0033-2097, 2016, R. 92, nr 9, s. 36-38. doi:10.15199/48.2016.09.09
- [N26] P. Kamyczek, E. Popko, **E. Zielony**, Z.R. Zytkeiwicz, *Deep levels in GaN studied by deep level transient spectroscopy and Laplace transform deep-level spectroscopy*, *Mater. Sci.-Pol.* 31 (2013) 572-576.
- [N27] P. Kamyczek, Z.R. Zytkeiwicz, E. Popko, **E. Zielony**, M. Sobańska, K. Klosek, A. Reszka, *The growth and micro-Raman characterization of GaN nanowires*, *Sensor Lett.* 11 (2013) 1555-1559.

- [N28] P. Kamyczek, E. Płaczek-Popko, Z.R. Zytkeiwicz, Z. Gumienny, **E. Zielony**, M. Sobańska, K. Klosek, A. Reszka, *Structural and optical characterization of GaN nanowires*, *J. Appl. Phys.* 113 (2013) 204303.
- [N29] P. Kamyczek, E. Popko, Z.R. Zytkeiwicz, **E. Zielony**, Z. Gumienny, *Deep traps in n-type GaN epilayers grown by plasma assisted molecular beam epitaxy*, *J. Appl. Phys.* 115 (2014) 023102.
- [N30] M. Ozga, **E. Zielony**, A. Wierzbicka, A. Wolska, M. Klepka, M. Godlewski, B.J. Kowalski, B.S. Witkowski, *Effect of repeating hydrothermal growth processes and rapid thermal annealing on CuO thin film properties*, *Beilstein J. Nanotechnol.* 15 (2024) 743-754.
- [N31] M. Stefanski, B. Bondzior, T. Gzyl, **E. Zielony**, M. Betke, A. Sieradzki, M. Ptak, *All-inorganic micrometric CsPbBr₃:Yb³⁺ powder as a multifunctional material for photovoltaics and optical thermometry: structural and optical characterization*, *Adv. Opt. Mater.* 11 (2023) 2301672.
- [N32] Z. Starowicz, A. Kędra, K. Berent, K. Gawlińska, K. Gwóźdź, **E. Zielony**, G. Kulesza-Matlak, R.P. Socha, K. Drabczyk, E. Płaczek-Popko, M. Lipiński, *Influence of Ag nanoparticles microstructure on their optical and plasmonic properties for photovoltaic applications*, *Sol. Energy* 158 (2017) 610-616.
- [N33] E. Popko, **E. Zielony**, Ł. Gelczuk, M. Dąbrowska-Szata, *SiC Schottky barrier diodes studied by admittance spectroscopy*, *Int. J. Eng. Innov. Technol.*, 2015, vol. 4, nr 12, s. 18-22. ISSN: 2277-3754.
- [N34] P. Kamyczek, P. Biegański, E. Popko, **E. Zielony**, Ł. Gelczuk, B. Ściana, D. Pucicki, D. Radziejewicz, M. Tłaczała, K. Kopalko, M. Dąbrowska-Szata, *Electro-optical properties of diluted GaAsN on GaAs grown by APMOPE*, *Mater. Sci.-Pol.* 31 (2013) 595-600.
- [N35] A. Cizman, K. Idczak, M. Krupiński, M. Girsova, A. Zarzycki, E. Rysiakiewicz-Pasek, **E. Zielony**, P. Staniorowski, P. Wrzesińska, I. Perlikowski, E. Jach, L. Ermakova, T. Antropova, *Comprehensive studies of activity of Ni in inorganic sodium borosilicate glasses doped with nickel oxide*, *Appl. Surf. Sci.* 558 (2021) 149891.
- [N36] I. Perlikowski, **E. Zielony**, T. Özdał, H. Kavak, *Structural properties and electrical characteristics of p-n junctions based on kesterite Cu₂ZnSnS₄ layers for thin-film solar cells*, *Energies* 14 (2021) 5182, s. 1-12.
- [N37] N.G. Galkin, D.A. Bezbabnyi, K.N. Galkin, S.A. Dotsenko, **E. Zielony**, R. Kudrawiec, J. Misiewicz, *Formation and optical properties of semiconducting thick Ca silicide films and Si/Ca_xSi/Si heterostructures on Si(111) substrate*, *Phys. Status Solidi C* 10 (2013) 1819-1823.
- [N38] N.G. Galkin, D.A. Bezbabnyi, K.N. Galkin, S.A. Dotsenko, **E. Zielony**, R. Kudrawiec, J. Misiewicz, *Formation and optical properties of thick Ca₂Si and Ca₃Si₄ on Si substrates*, *Phys. Chem. Appl. Nanostruct.: Rev. Short Notes*, 2013, 113-116.

7. Osiągnięcia dydaktyczne, organizacyjne oraz popularyzujące naukę

7.1 Działalność dydaktyczna

a) Prowadzone zajęcia dydaktyczne

W latach 2013–2026, tj. w okresie po doktoracie, prowadziłam różnorodne zajęcia dydaktyczne zarówno w j. polskim jak i angielskim, dla studentów różnych wydziałów Politechniki Wrocławskiej. Wśród nich znajdują się:

→ zajęcia laboratoryjne: Laboratorium fizyki ogólnej; Physics; Przyrządy i układy półprzewodnikowe; Urządzenia półprzewodnikowe 2; Projekt NLTK; Detekcja promieniowania elektromagnetycznego; Laboratory of Condensed Matter Physics; Fizyka 3.3;

→ ćwiczenia z fizyki ogólnej;

→ wykłady: „Urządzenia półprzewodnikowe 1”;; „Fizyczne podstawy współczesnej informatyki” (autorski wykład); „Fizyka 3.3”;

→ od 2024 roku prowadzę zajęcia laboratoryjne z fizyki ogólnej dla Akademickiego Liceum Ogólnokształcącego Politechniki Wrocławskiej.

b) Prowadzenie prac dyplomowych

- W latach 2013-2026 wypromowałam łącznie **8 prac magisterskich**:

- 2014/2015 Marcin Morawski (1 praca)
- 2016/2017 Frank Oriold (1 praca)
- 2020/2021 Ilona Kaleta (1 praca)
- 2021/2022 Radosław Szymon, Igor Perlikowski (2 prace)
- 2022/2023 Gloria Szalewska, Jagoda Osiadacz (2 prace)
- 2023/2024 Zofia Jaworowska (1 praca)
 - W latach 2013-2026 wypromowałam łącznie **13 prac inżynierskich**:
- 2014/2015 Anna Racino (1 praca)
- 2016/2017 Magdalena Cieślak, Adriana Łozińska (2 prace)
- 2018/2019 Paulina Łysik (1 praca)
- 2019/2020 Ilona Kaleta, Magdalena Zatorska (2 prace)
- 2020/2021 Radosław Szymon, Igor Perlikowski (2 prace)
- 2021/2022 Gloria Szalewska, Adrian Gruszecki (2 prace)
- 2022/2023 Tomasz Gzyl (1 praca)
- 2024/2025 Remigiusz Felske, Agata Iszczak (2 prace)

c) Przygotowanie programów nauczania, praca w komisjach dydaktycznych / programowych

- Od roku 2020 jestem członkiem komisji programowej kierunku Inżynieria Kwantowa na WPPT PW_r.
- W latach 2022-2023 brałam czynny udział w pracach nad programem II-go stopnia fizyki, którego koordynatorem był Dziekan WPPT prof. dr hab. Paweł Machnikowski. Byłam odpowiedzialna za opracowanie programu nauczania dla specjalizacji „Fotowoltaika”.
- Od roku 2013 jestem członkiem komisji egzaminów dyplomowych na WPPT PW_r, na studiach I-go i II-go stopnia (inżynierskich i magisterskich).

7.2 Opieka naukowa nad doktorantami i studentami

1) Promotor pomocniczy doktorantki mgr inż. Katarzyny Gwóźdź. Pracę doktorską (pt. „*Optymalizacja ogniw fotowoltaicznych ZnO-Si*”) obroniła w 2020 roku, promotor: prof. dr hab. Ewa Popko.

2) Opiekun naukowy 2 doktorantów Szkoły Doktorskiej PW_r - mgr. inż. Radosława Szymona i mgr. inż. Igora Perlikowskiego. Promotor: prof. dr hab. Ewa Popko.

3) Tutor w programie „*Wybitnie uzdolnieni na Politechnice Wrocławskiej*”: w ramach tego programu prowadziłam dwóch studentów - Radosława Szymona i Igora Perlikowskiego.

Program „*Wybitnie uzdolnieni na Politechnice Wrocławskiej*” (zwany potocznie „*Tutor*”) skierowany jest do najbardziej uzdolnionych absolwentów szkół średnich, którzy w roku zdawania matury podejmują studia na naszej uczelni. Program ten daje studentowi możliwość współpracy z wybranym przez siebie opiekunem naukowym, którego zadaniem jest wprowadzenie studenta w świat nauki i badań, począwszy od pierwszego roku studiów.

Współpraca z p. Radosławem Szymonem zaowocowała **trzema artykułami naukowymi** opublikowanymi w czasopiśmie o zasięgu międzynarodowym oraz **rozdziałami w trzech monografiach naukowych**, których student jest współautorem. Pan R. Szymon był również wielokrotnym beneficjentem Nagród Rektora PW_r oraz Dziekana WPPT za wybitne osiągnięcia naukowe, stypendiów z funduszu własnego PW_r, nagród za najlepsze wystąpienia na konferencjach studenckich, a także w r. 2021 i 2022 otrzymał prestiżowe stypendium Ministra Nauki i Szkolnictwa Wyższego. W roku akademickim 2020/2021 p. Radosław Szymon został najlepszym absolwentem

PWr studiów I stopnia, a w kolejnym r. 2021/2022 został najlepszym absolwentem PWr studiów II stopnia. Byłam promotorem jego pracy inżynierskiej i magisterskiej, które obronił kolejno w lutym 2021 r. i lipcu 2022 r. W lipcu 2022 praca magisterska pana R. Szymona została wyróżniona nagrodą naukową im. Arkadiusza Piekary, przyznaną przez Polskie Towarzystwo Fizyczne za najlepszą w Polsce pracę magisterską w dyscyplinie nauki fizyczne (źródło: <https://www.ptf.net.pl/node/95>).

Współpraca z p. Igozem Perlikowskim zaowocowała z kolei **dwoma artykułami naukowymi**, opublikowanymi w czasopismach o zasięgu międzynarodowym oraz **jednym artykułem konferencyjnym**, których student jest współautorem. W roku 2021 przyznano mu Nagrodę Rektora PWr, z kolei w 2022 r. otrzymał nagrodę Dziekana WPPT za wybitne osiągnięcia naukowe, stypendium z funduszu własnego PWr oraz nagrodę za najlepsze wystąpienie na jednej z konferencji studenckich, w których uczestniczył. W roku 2022 p. Perlikowski również otrzymał prestiżowe stypendium MNiSW.

4) Sprawowanie opieki naukowej w ramach staży studenckich

W latach 2013–2026 byłam opiekunem naukowym łącznie 8 studentów, którzy odbywali staże / praktyki studenckie na WPPT PWr.

7.3 Działalność w zakresie popularyzacji nauki i techniki

Od 2013 roku prowadzę dodatkowe zajęcia laboratoryjne z fizyki ogólnej dla młodzieży z okręgu dolnośląskiego w ramach Fundacji Rozwoju Politechniki Wrocławskiej i współpracy uczelni ze szkołami podstawowymi i średnimi. Celem tej akcji promocyjnej jest popularyzacja fizyki, promocja Wydziału PPT oraz zachęcenie uczniów szkół podstawowych oraz średnich do studiowania fizyki.

W roku 2014 wygłosiłam wykład popularno-naukowy pt.: „*Między fizyką a zabawą*”, który był urozmaicony pokazami fizycznymi, zrealizowany z okazji Dnia Otwartego Akademickiego Liceum Ogólnokształcącego Politechniki Wrocławskiej.

Od 2024 roku jestem koordynatorem zajęć laboratoryjnych z fizyki w VII Liceum Ogólnokształcącym im. Krzysztofa Kamila Baczyńskiego we Wrocławiu w ramach projektu „*Współpraca Politechniki Wrocławskiej ze szkołami średnimi z Wrocławia*”.

7.4 Działalność organizacyjna

a) Udział w pracach organizacyjnych na rzecz Uczelni (PWr)

W 2014 roku brałam udział w redagowaniu karty przedmiotu na „Zajęcia Techniczne” dla Akademickiego Liceum Ogólnokształcącego (ALO) Politechniki Wrocławskiej, w tym: uczestniczyłam przy opracowywaniu tematów zajęć dydaktycznych oraz planu zakupów sprzętu laboratoryjnego dla gimnazjalistów i licealistów ALO.

b) Udział w pracach organizacyjnych na rzecz Wydziału Podstawowych Problemów Techniki PWr

- Od września 2021 roku jestem członkiem Wydziałowej Komisji Oceniającej Pracowników WPPT, która została powołana przez Rektora PWr prof. dr. hab. Arkadiusza Wójśa.
- Od grudnia 2020 roku pełnię rolę wydziałowego koordynatora ds. współpracy z Centrum Zrównoważonego Rozwoju i Ochrony Klimatu (CZRiOK), które działa na PWr.
- Od roku 2015 jestem koordynatorem studentów kierunku Inżynieria Kwantowa na WPPT PWr.

- Od roku 2013 biorę czynny udział w promocji kierunków studiów na WPPT. Co roku, gdy są organizowane Dni Otwarte PWr, prezentuję kierunek Inżynieria Kwantowa oraz zaplecze laboratoryjne Narodowego Laboratorium Technologii Kwantowych (NLTK) na spotkaniach z potencjalnymi kandydatami na studia na tym kierunku.

c) Udział w studenckiej wymianie międzynarodowej, w szczególności w programach Unii Europejskiej

W roku akademickim 2016/2017 sprawowałam opiekę naukową nad studentem z Niemiec (Technische Universität München), który podjął studia II-go stopnia na Wydziale Mechanicznym PWr w ramach programu Erasmus+. W 2017 r. obronił pracę magisterską pt.: „*Characterization of defects in ZnO-based diodes grown by PA-MBE by means of electrical and optical techniques*”, której byłam promotorem.

d) Udział w komitetach organizacyjnych konferencji naukowych

We wrześniu 2021 r. byłam przewodniczącą sesji plakatowej „*Oxides*” na konferencji 49th International School & Conference on the Physics of Semiconductors "Jaszowiec 2021".

e) Aktywność w organizacjach pracowniczych na terenie Uczelni

Od 2024 r. jestem członkiem Rady Wydziału WPPT

f) Pełnię funkcję wicekierownika zespołu badawczego „Laboratorium Właściwości Elektrycznych Półprzewodników” (ang. Laboratory for Electrical Properties of Semiconductors, LEPS) na WPPT PWr. <https://leps.pwr.edu.pl/Home.html>.

8. Pozostałe informacje oraz istotne osiągnięcia

8.1 Opis działalności naukowej przed uzyskaniem stopnia doktora

Pracę badawczą na Wydziale Podstawowych Problemów Techniki Politechniki Wrocławskiej rozpoczęłam w październiku 2007 roku, realizując pracę magisterską pod opieką dr hab. Ewy Popko, prof. PWr. W ramach pracy dyplomowej zajmowałam się badaniem procesów relaksacyjnych w złączach Schottky’ego na bazie ZnTe z kropkami kwantowymi z CdTe, wykorzystując metody elektryczne (pomiarы charakterystyk prądowo-napięciowych i pojemnościowo-napięciowych, spektroskopia impedancyjna). W trakcie realizacji pracy zapoznałam się z zasadą działania złączy półprzewodnikowych, a w szczególności z fizyką niskowymiarowych struktur półprzewodnikowych, jakimi były kropki kwantowe. Oprócz tego brałam czynny udział w pomiarach elektrycznych złączy Schottky’ego na bazie CdMnTe. Wyniki moich badań zostały zaprezentowane na konferencji XXXVII International School & Conference on the Physics of Semiconductors "Jaszowiec" oraz opublikowane w Acta Physica Polonica A [D1, D2]. Pracę magisterską obroniłam w lipcu 2008 roku, a we wrześniu rozpoczęłam studia doktoranckie.

W ramach doktoratu kontynuowałam badania nad kropkami kwantowymi CdTe/ZnTe, wykorzystując zarówno techniki elektryczne (np. spektroskopia admitancyjna, DLTS), jak i optyczne (fotoluminescencja). Rozprawa pt. „*Właściwości elektro-optyczne półprzewodnikowych struktur na bazie ZnTe z kropkami kwantowymi CdTe*”, której promotorką była dr hab. Ewa Popko, obejmowała m.in. pełną charakterystykę właściwości elektro-optycznych układu CdTe/ZnTe, identyfikację defektów związanych z kropkami oraz analizę naprężeń w strukturze. Badania

realizowane były w ramach projektu N N202 0911 33, „*Aktywność elektryczna półprzewodnikowych nanokropek kwantowych*”, finansowanego przez MNiSW w latach 2007-2010, w którym byłam głównym wykonawcą. Najważniejszymi osiągnięciami w mojej rozprawie doktorskiej były: (1) przedstawienie po raz pierwszy pełnej charakterystyki elektro-optycznej struktury kropek kwantowych CdTe/ZnTe połączone z analizą ilościową i jakościową badanych efektów; (2) opisanie aktywności elektrycznej kropek kwantowych CdTe/ZnTe, jak również identyfikacja defektów w tych strukturach, połączona z analizą ich parametrów; (3) zbadanie naprężeń w układzie kropek kwantowych CdTe/ZnTe. Wyniki moich badań zostały opublikowane w siedmiu artykułach naukowych z tzw. listy filadelfijskiej [D3-D9]. W lipcu 2012 r. złożyłam rozprawę doktorską, następnie w październiku tego samego roku zostałam zatrudniona w Instytucie Fizyki PWr na stanowisku asystenta badawczo-dydaktycznego. W listopadzie 2012 r. obroniłam dysertację, uzyskując wyróżnienie Rady Naukowej Instytutu Fizyki PWr.

Podczas studiów doktoranckich uczestniczyłam także w badaniach innych materiałów, takich jak GaN, CdMnTe, CeO₂, czy InAs/GaAs, czego efektem były kolejne publikacje naukowe, których jestem współautorką [D10-D15]. W pracach tych skupiłam się głównie na analizie własności optycznych (widm emisji), strukturalnych (widm Ramana) oraz na charakterystyce defektów w wymienionych związkach. Będąc doktorantką odbyłam miesięczny staż na Politechnice w Dreźnie oraz dwumiesięczny staż w IF PAN w Warszawie, co zaowocowało długofalową współpracą i realizacją wspólnych projektów finansowanych przez MNiSW i NCN, w których byłam kierownikiem lub wykonawcą (patrz paragraf 8.3).

Do dorobku, związanego z moją rozprawą doktorską, ale zaliczanego do zbioru prac uzyskanych po doktoracie, należą dwie autorskie prace [N39, N40] dotyczące systemu kropek kwantowych CdTe/ZnTe. Wyniki pomiarów, prezentowane w tych artykułach naukowych, uzyskałam w trakcie realizacji doktoratu, aczkolwiek część z nich opublikowałam po doktoracie, w roku 2013 i 2020.

[D1] E. Popko, J. Trzmiel, Z. Gumienny, **E. Wojtyna**, J. Szatkowski, *Impedance spectroscopy of Au-CdTe:Ga Schottky contacts*, *Acta Phys. Pol. A* 114 (2008) 1279-1283.

[D2] J. Trzmiel, E. Popko, K. Weron, J. Szatkowski, **E. Wojtyna**, *Non-exponential photoionization of the DX centers in gallium doped CdTe and Cd_{0.99}Mn_{0.01}Te*, *Acta Phys. Pol. A* 114 (2008) 1417-1420.

[D3] **E. Zielony**, E. Placzek-Popko, A. Henrykowski, Z. Gumienny, P. Kamyczek, J. Jacak, P. Nowakowski, G. Karczewski, *Laser irradiation effects on the CdTe/ZnTe quantum dot structure studied by Raman and AFM spectroscopy*, *J. Appl. Phys.* 112 (2012) 063520.

[D4] **E. Zielony**, E. Placzek-Popko, P. Nowakowski, Z. Gumienny, A. Suchocki and G. Karczewski, *Electro-optical characterization of Ti/Au-ZnTe Schottky diodes with CdTe quantum dots*, *Mat. Chem. Phys.* 134 (2012) 821-828.

[D5] **E. Zielony**, E. Placzek-Popko, P. Dyba, Z. Gumienny, L. Dobaczewski and G. Karczewski, *Deep level transient spectroscopy of hole traps related to CdTe self-assembled quantum dots embedded in ZnTe matrix*, *J. Nanosci. Nanotechnol.* 11 (2011) 6830-6836.

[D6] E. Placzek-Popko, J. Szatkowski, **E. Zielony**, Z. Gumienny, L. Dobaczewski, G. Karczewski, *Capacitance-voltage studies of Ti/p-ZnTe Schottky barrier structures containing CdTe quantum dots*, *Acta Phys. Pol. A* 119 (2011) 621-623.

[D7] **E. Zielony**, E. Placzek-Popko, A. Roznicka, Z. Gumienny, J. Szatkowski, P. Dyba, W. Pacuski, C. Kruse, D. Hommel, M. Guzewicz, *Deep levels induced by CdTe/ZnTe quantum dots*, *Acta Phys. Pol. A* 119 (2011) 630-632.

[D8] **E. Zielony**, E. Placzek-Popko, P. Dyba, Z. Gumienny, L. Dobaczewski, G. Karczewski, *Deep level transient spectroscopy of hole traps related to CdTe self-assembled quantum dots embedded in ZnTe matrix*, *AIP Conference Proceedings*, ISSN 0094-243X, vol. 1399, p. 373-374, published 2011. DOI: 10.1063/1.3666409

[D9] **E. Zielony**, E. Placzek-Popko, Z. Gumienny, J. Trzmiel, G. Karczewski and M. Guzewicz, *Hole Traps in ZnTe with CdTe Quantum Dots*, *Acta Phys. Pol. A* 116 (2009) 885-887.

- [D10] E. Placzek-Popko, **E. Zielony**, J. Trzmiel, J. Szatkowski, Z. Gumienny, T. Wojtowicz, G. Karczewski, P. Kruszewski, L. Dobaczewski, *Capacitance spectroscopy of CdTe self-assembled quantum dots embedded in ZnTe matrix*, *Physica B* 404 (2009) 5173-5176.
- [D11] T. Wiktorczyk; P. Biegański; **E. Zielony**, *Preparation and optical characterization of e-beam deposited cerium oxide films*, *Opt. Mater.* 34 (2012) 2101-2107.
- [D12] P. Dyba, E. Placzek-Popko, **E. Zielony**, Z. Gumienny, S. Grzanka, R. Czarnecki, T. Suski, *Deep levels in GaN pn junctions studied by Deep Level Transient Spectroscopy and Laplace Transform Deep-Level Spectroscopy*, *Acta Phys. Pol. A* 119 (2011) 669-671.
- [D13] E. Placzek-Popko, J. Trzmiel, **E. Zielony**, S. Grzanka, R. Czarnecki, T. Suski, *Deep level transient spectroscopy signatures of majority traps in GaN p-n diodes grown by metal-organic vapor-phase epitaxy technique on GaN substrates*, *Physica B* 404 (2009) 4889-4891.
- [D14] P. Dyba, E. Placzek-Popko, **E. Zielony**, Z. Gumienny and J. Szatkowski, *Electrical characterization of defects in Schottky Al-CdTe:Ga diodes*, *Acta Phys. Pol. A* 116 (2009) 944-946.
- [D15] J. Trzmiel, E. Placzek-Popko, **E. Zielony** and Z. Gumienny, *On the frequency domain relaxation processes in gallium doped CdTe and $Cd_{0.99}Mn_{0.01}Te$* , *Acta Phys. Pol. A* 116 (2009) 956-958.
- [N39] **E. Zielony**, E. Popko, P. Kamyczek, A. Henrykowski, G. Karczewski, *Raman spectroscopy of CdTe/ZnTe quantum dot structures*, *Opt. Appl.* 43 (2013) 181-185.
- [N40] **E. Zielony**, E. Placzek-Popko, Grzegorz Karczewski, *Dielectric response of ZnTe-Ti/Al Schottky junctions with CdTe quantum dots studied by impedance spectroscopy*, *Crystals* 10 (2020) 1-15.

8.2 Udział i forma uczestnictwa w konferencjach naukowych i seminariach

W latach 2013–2026, tj. w okresie po doktoracie, wzięłam udział w **17** konferencjach międzynarodowych i **3** konferencjach krajowych. Łącznie na wszystkich konferencjach wygłosiłam **11** referatów (w tym **3** zaproszone) i zaprezentowałam osobiście **11** posterów (patrz lista poniżej).

Wygłoszone referaty na konferencjach:

- 1) „CdTe/ZnTe n-i-p junctions - candidates for solar cells” – [Międzynarodowe Targi Innowacji Energetycznych](#) (InEnergy), organizowane przez REECO Poland, Wrocław, 04.03 - 06.03 2014.
- 2) „Aktywność defektów w pomiarach elektrycznych i optycznych złączy fotowoltaicznych na bazie CdTe” – [Krajowa Konferencja Elektroniki](#), Darłówek Wschodnie, 06.06 - 10.06 2016 (**referat zaproszony**).
- 3) „Manifestation of defects in the photoluminescence spectra of p-ZnTe/CdMgZnTe/Cd_{1-x}Mg_xTe/n-CdTe solar cells” – [International Conference on Semiconductor Nanostructures for Optoelectronics and Biosensors](#) (IC SeNOB), Rzeszów, 22.05 - 25.05 2016.
- 4) „Deep levels in the MBE ZnO:As/n-GaN diodes - photoluminescence, electrical properties and deep level transient spectroscopy” – [The European Materials Research Society Conference](#) (E-MRS Fall Meeting), Warszawa, 17.09 - 20.09 2018.
- 5) „Fundamental studies of II-VI compounds for various optoelectronic applications” – [MultiscaleSolar 7th Management Committee and Workgroup Meeting](#) w ramach europejskiego projektu sieci COST (European Cooperation in Science & Technology), Wrocław, 14.02 - 16.02 2018.
- 6) „OZE: fotowoltaika, ogniwa słoneczne - wizja współczesnej energetyki prosumenckiej” – [Dni klimatu Politechniki Wrocławskiej](#), organizowane przez Centrum Zrównoważonego Rozwoju i Ochrony Klimatu Politechniki Wrocławskiej, Wrocław, 14.06 - 15.06 2021.
- 7) „Strukturalne i elektrooptyczne właściwości wybranych nanostruktur tlenków szeroko-przerwowych dla zastosowań w optoelektronice i fotowoltaice” – [Krajowa Konferencja Elektroniki](#), Darłówek Wschodnie, 05.06 - 09.06 2022 (**referat zaproszony**).
- 8) „Photovoltaics and solar cells: investigations and role in renewable energy sources” – [5th Polish Scientific Networks – Climate change: science & society](#), Wrocław, 28.09 - 30.09 2022 (**referat zaproszony**).

- 9) „*Strain and lattice vibration mechanisms in GaN-Al_xGa_{1-x}N core-shell nanowire structures grown on Si substrate*” – The European Materials Research Society Conference (E-MRS Fall Meeting), Warszawa, 18.09 - 21.09 2023.
- 10) „*Probing n-ZnMgO/p-Si nanowire junctions: composition, strain, and defects revealed by Raman spectroscopy and electrical measurements*” – The European Materials Research Society Conference (E-MRS Fall Meeting), Warszawa, 16.09 - 19.09 2024.
- 11) „*Interaction between GaN nanowires and oxide shells for enhanced light emission*” – 10th Workshop on the Physics and Technology of Semiconductor Lasers, Sopot, 13.10 – 18.10 2024.

Wygłoszone referaty na seminariach:

- 1) 27.03.2014 – „*Charakteryzacja właściwości elektro-optycznych ogniw fotowoltaicznych na bazie CdTe*”, seminarium Fizyczne Podstawy Przetwarzania Informacji, **Politechnika Wrocławska**
- 2) 08.04.2014 – „*Charakteryzacja właściwości elektro-optycznych ogniw fotowoltaicznych na bazie CdTe*”, seminarium Zaawansowanych Metod Badania Półprzewodników, **Politechnika Wrocławska**
- 3) 17.03.2016 – „*CdTe-based junctions - candidates for solar cells*”, Department of Electronic Engineering and Green Technology Research Center, **Chang-Gung University, Taoyuan, Tajwan**
- 4) 19.04.2018 – „*Micro-Raman measurements of GaAs microcrystal-samples*”, Group of Electrical and Electronic Engineering of Paris (GeePs), UMR 8507 CNRS / CentraleSupélec – **Universités UPMC and UPSud, Paryż, Francja**
- 5) 18.04.2023 – „*Investigation of structural and electro-optical properties of planar and nanowire heterostructures based on wide-band-gap semiconductors for application in optoelectronics*”, seminarium Zaawansowanych Metod Badania Półprzewodników, **Politechnika Wrocławska**
- 6) 28.02.2025 – „*Interaction between GaN nanowires and oxide shells for enhanced light emission*”, Seminarium fizyki ciała stałego, Wydział Fizyki, **Uniwersytet Warszawski**.

8.3 Udział w projektach badawczych

W latach 2013–2026, tj. w okresie po doktoracie, brałam udział w realizacji **9** projektów badawczych. Wśród nich w **2** byłam kierownikiem, w **4** wykonawcą, natomiast w **3** pełnię rolę opiekuna naukowego. Lista wszystkich projektów, w których uczestniczyłam znajduje się poniżej.

1) Projekt badawczy Iuventus Plus

Nr projektu: IP2012 64872

Tytuł projektu: „*Charakteryzacja elektro-optyczna defektów w strukturach półprzewodnikowych na bazie CdTe, przeznaczonych na przyrządy fotowoltaiczne*”

Okres realizacji: 2013 - 2016; Jednostka finansująca: MNiSW

Funkcja w projekcie: **kierownik**

2) Projekt badawczy Opus 7

Nr projektu: 2013/11/B /ST7/01385

Tytuł projektu: „*Własności elektro-optyczne defektów w warstwach ZnO otrzymanych metodą LT ALD*”

Okres realizacji: 2014 - 2016; Jednostka finansująca: NCN

Funkcja w projekcie: **wykonawca**

3) Projekt badawczy Polska-Tajwan (Polish-Taiwanese/Taiwanese-Polish Joint Research Call)

Nr projektu: DKO/PLTW1/3/2013

Tytuł projektu: „*Plasmonics for Photovoltaics: Enhancement of Solar Cell Efficiency*”

Okres realizacji: 2014 - 2016; Jednostka finansująca: NCBR

Funkcja w projekcie: **wykonawca**

4) Projekt sieci COST (European Cooperation in Science and Technology) realizowany w ramach programu ramowego Horyzont 2020. Brałam udział w akcji MP1406 MultiscaleSolar pod kierunkiem dr. Jamesa Connolly'ego (por. <https://www.cost.eu/actions/MP1406/>), w ramach której prowadziłam badania heterostruktur CdTe/ZnTe/GaAs oraz GaAs/Si dla zastosowań w fotoogniwach, wykorzystując technikę mikro-fotoluminescencji.

Okres realizacji: 2015 - 2019; Jednostka finansująca: Unia Europejska

Funkcja w projekcie: **wykonawca**

5) Projekt badawczy POLONIUM na wymianę bilateralną naukowców z Polski i Francji

Nr projektu: PPN/BFR/2019/1/00020

Tytuł projektu: „*Badanie strukturalnych, optycznych i elektrycznych właściwości kryształów GaAs wyhodowanych na Si dla zastosowań w wielozłączonych bateriach słonecznych*”

Okres realizacji: 2020 - 2021; Jednostka finansująca: NAWA

Funkcja w projekcie: **kierownik**

6) Projekt badawczy Sonata 17

Nr projektu: 2021/43/D/ST5/01865

Tytuł projektu: „*Synteza mikrometrycznych perowskitów halogenkowych domieszkowanych jonami lantanowców/metalu oraz analiza ich właściwości strukturalnych i spektroskopowych do potencjalnego zastosowania w fotowoltaice*”

Okres realizacji: 2022 - 2025; Jednostka finansująca: NCN

Funkcja w projekcie: **wykonawca**

7) Projekt badawczy Perły Nauki

Nr projektu: PN/01/0123/2022

Tytuł projektu: „*Badania właściwości optoelektronicznych nanostruktur GaN/AlGaN do zastosowań w emiterach światła*”

Okres realizacji: 2023 - 2026; Jednostka finansująca: MNiSW

Funkcja w projekcie: **opiekun naukowy**

8) Projekt badawczy Preludium

Nr projektu: 2025/57/N/ST7/02099

Tytuł projektu: „*Światło, Ciepło, Akcja! Samozasilana ultraszybka fotodetekcja w szerokim zakresie spektralnym oparta na efekcie piro-fototronicznym w stopach Zn(Cd,Mg)O:Eu*”

Okres realizacji: 2025 - 2028; Jednostka finansująca: NCN

Funkcja w projekcie: **opiekun naukowy**

9) Projekt badawczy Preludium

Nr projektu: 2025/57/N/ST11/03230

Tytuł projektu: „*GNOMES – Nanodrut GaN z Powłokami tlenkowymi: Modyfikacja i Udoskonalenie poprzez Inżynierię powierzchni*”

Okres realizacji: 2025 - 2028; Jednostka finansująca: NCN

Funkcja w projekcie: **opiekun naukowy**

8.4 Staże naukowe

W latach 2013–2026 odbyłam kilka krótkoterminowych staży naukowych w kraju i za granicą, podczas których nawiązałam współpracę z grupami badawczymi pracującymi w danym ośrodku; zapoznałam się z technologiami wzrostu struktur półprzewodnikowych na bazie ZnO, Cd(Mg)Te/ZnTe oraz GaAs, uczestniczyłam w procesach ich wytwarzania, a także przeprowadziłam wstępne badania elektryczne (pomiarы ich rezystancji oraz charakterystyk prądowo-napięciowych) i optyczne (mikro-fotoluminescencja) wytworzonych struktur. Do ośrodków badawczo-naukowych, w których odbyłam ww. staże należą:

- Instytut Fizyki Polskiej Akademii Nauk w Warszawie (01.11-02.11.2014, 26.09-09.10.2015), łącznie ponad 2 tygodnie;
- Chang-Gung University, Taoyuan, Tajwan (15.03-24.03.2016), łącznie 10 dni;
- CNRS/CentraleSupélec – Universités UPMC and UPSud, Paryż, Francja (19.04-25.04.2018, 07.11-12.11.2021), łącznie ~2 tygodnie.

Szczegółowe informacje dotyczące ww. staży zostały zamieszczone w Załączniku 4a.

8.5 Działalność recenzencka

W latach 2013–2026, tj. w okresie po doktoracie sporządziłam łącznie 25 recenzji artykułów naukowych dla czasopism o zasięgu międzynarodowym. Wykaz recenzowanych prac wraz z ich liczbą znajduje się w poniżej tabeli.

Advanced Science (Wiley)	1 praca (2025)
Materials Today Communications (Elsevier)	1 praca (2025)
Micro and Nanostructures (Elsevier)	1 praca (2025)
Applied Physics Letters (AIP)	3 prace (2025)
Physica B (Elsevier)	1 praca (2025)
Materials Letters (Elsevier)	1 praca (2025)
Journal of the European Optical Society-Rapid Publications	1 praca (2025)
Nanomaterials (MDPI)	2 prace (2023 i 2024)
Journal of Physics and Chemistry of Solids (Elsevier)	1 praca (2023)
Materials (MDPI)	2 prace (2023)
Technologies (MDPI)	1 praca (2023)
Electronics Materials (MDPI)	1 praca (2022)
Coatings (MDPI)	2 prace (2022)
Crystals (MDPI)	1 praca (2022)
Solid State Electronics (Elsevier)	1 praca (2021)
Acta Physica Polonica A	1 praca (2021)
Optica Applicata	2 prace (2019 i 2025)
Superlattices and Microstructures (Elsevier)	1 praca (2019)
Thin Solid Films (Elsevier)	1 praca (2014)

8.6 Otrzymane nagrody i wyróżnienia

- 1) Listopad 2025 r. – Nagroda Rektora Politechniki Wrocławskiej za wyróżniający wkład w działalność Uczelni
- 2) Sierpień 2025 r. – Nagroda w ramach szóstej edycji politechnicznego programu PRIMUS, którego założeniem jest aktywizowanie społeczności akademickiej poprzez premiowanie najwyższej

punktowanych publikacji w całej uczelni, a także publikacji przyczyniających się do wzrostu punktacji ewaluowanych w uczelni dyscyplin naukowych

- 3) Listopad 2024 r. – Nagroda Rektora Politechniki Wrocławskiej za wyróżniający wkład w działalność Uczelni
- 4) Listopad 2023 r. – Nagroda Rektora Politechniki Wrocławskiej za wyróżniający wkład w działalność Uczelni
- 5) Lipiec 2023 r. – Nagroda w ramach czwartej edycji politechnicznego programu PRIMUS
- 6) Listopad 2022 r. – Nagroda Rektora Politechniki Wrocławskiej za wyróżniający wkład w działalność Uczelni
- 7) Sierpień 2022 r. – Nagroda w ramach trzeciej edycji politechnicznego programu PRIMUS
- 8) Kwiecień 2022 r. – Nagroda w ramach trzeciej edycji politechnicznego programu SECUNDUS, przyznawana młodym naukowcom, którzy w 2022 roku nie ukończyli 40 lat i nie posiadali habilitacji, a mogli pochwalić się największą sumą wartości punktowych w publikacjach
- 9) Grudzień 2018 r. - Nagroda Rektora Politechniki Wrocławskiej za działalność na rzecz Uczelni
- 10) Listopad 2016 r. - Nagroda Rektora Politechniki Wrocławskiej za działalność na rzecz Uczelni
- 11) Czerwiec 2016 r. - Wyróżnienie podczas XV Krajowej Konferencji Elektroniki, w konkursie „Młodzi Pracownicy Nauki”, za najlepszy referat w sesji specjalnej: Fotowoltaika organiczna i nieorganiczna, Darłówko Wschodnie, Polska.

8.7 Współpraca z otoczeniem gospodarczym

Od czerwca 2025 roku rozpoczęłam współpracę z polską firmą Roltec Sp. z o.o. (<https://roltec.pl/>). W ramach tej współpracy w październiku 2025 r. złożyliśmy wspólny wniosek projektowy (pre-proposal) w ramach programu CET Partnership (The Clean Energy Transition Partnership) Joint Call 2025, pt.: „*Optymalizacja procesów sterowana sztuczną inteligencją dla wysokowydajnych cienkowarstwowych modułów słonecznych ACIGSE*”, finansowanego przez UE oraz NCBR. Pełnię funkcję kierownika projektu ze strony Politechniki Wrocławskiej (szczegóły w Załączniku 4a).

8.8 Informacje o zgłoszeniach patentowych

W lipcu 2025 roku zostało złożone zgłoszenie patentowe nr P452298 pt.: „*Ultraszybki fotodetektor na bazie stopu $Zn_{1-x}Cd_xO$ domieszkowanego Eu na zakres 380-1120 nm niemymagający zenmetrznego zasilania, oparty na efekcie piro-fototronicznym*”, autorstwa mgr. inż. Igora Perlikowskiego (Politechnika Wroclawska), dr inż. Euniki Zielony (Politechnika Wroclawska) oraz dr hab. Ewy Przeździeckiej (Instytut Fizyki Polskiej Akademii Nauk w Warszawie). Udział twórczy w zgłoszonym wynalazku wynosi łącznie 70% dla twórców z Politechniki Wroclawskiej – w tym 40% dla mgr. inż. I. Perlikowskiego oraz 30% dla dr inż. E. Zielony. Pozostałe 30% udziału przypada dr hab. E. Przeździeckiej.

9. Bibliografia

- [1] S. Fujita, *Wide-bandgap semiconductor materials: For their full bloom*, Jpn. J. Appl. Phys. 54 (2015) 030101.
- [2] R.M. Pasquarelli, D.S. Ginley, R. O'Hayre, *Solution processing of transparent conductors: from flask to film*, Chem. Soc. Rev. 40 (2011) 5406-5441.

- [3] Y.-N. Xu, W.Y. Ching, *Electronic, optical, and structural properties of some wurtzite crystals*, Phys. Rev. B 48 (1993) 4335.
- [4] T. Wonglakhon and D. Zahn, *Interaction potentials for modelling GaN precipitation and solid state polymorphism*, J. Phys.: Condens. Matter 32 (2020) 205401.
- [5] C.B. Ong, L.Y. Ng, A.W. Mohammad, *A review of ZnO nanoparticles as solar photocatalysts: Synthesis, mechanisms and applications*, Renew. Sustain. Energy. Rev. 81 (2018) 536-551.
- [6] Y.I. Alivov, J.E. Van Nostrand, D.C. Look, M.V. Chukichev, B.M. Ataev, *Observation of 430 nm electroluminescence from ZnO/GaN heterojunction light-emitting diodes*, Appl. Phys. Lett. 83 (2003) 2943.
- [7] S. Vyas and Johnson Matthey, *A short review on properties and applications of zinc oxide based thin films and devices: ZnO as a promising material for applications in electronics, optoelectronics, biomedical and sensors*, Technol. Rev. 64 (2020) 202-218.
- [8] T.D. Moustakas and R. Paiella, *Optoelectronic device physics and technology of nitride semiconductors from the UV to the terahertz*, Rep. Prog. Phys. 80 (2017) 106501.
- [9] N. Gopalakrishnan, B.C. Shin, H.S. Lim, G.Y. Kim, Y.S. Yu, *Comparison of ZnO:GaN films on Si(111) and Si(100) substrates by pulsed laser deposition*, Physica B 376 (2006) 756-759.
- [10] A. Hassan, Y. Savaria, M. Sawan, *GaN integration technology, an ideal candidate for high-temperature applications: A review*, IEEE Access, vol. 6, pp. 78790-78802, 2018.
- [11] D. Ehrentraut, K. Maeda, M. Kano, K. Fujii, T. Fukuda, *Next-generation hydrothermal ZnO crystals*, J. Cryst. Growth 320 (2011) 18-22.
- [12] N.P. Shetti, S.D. Bukkitgar, K.R. Reddy, C.V. Reddy, T.M. Aminabhavi, *ZnO-based nanostructured electrodes for electrochemical sensors and biosensors in biomedical applications*, Biosens. Bioelectron. 141 (2019) 111417.
- [13] R. Pietruszka, B.S. Witkowski, E. Zielony, K. Gwozdz, E. Placzek-Popko, M. Godlewski, *ZnO/Si heterojunction solar cell fabricated by atomic layer deposition and hydrothermal methods*, Sol. Energy 48 (2017) 1282-1288.
- [14] M.A. Borysiewicz, *ZnO as a functional material, a review*, Crystals 9 (2019) 505.
- [15] E. Przędziecka, A. Wierzbicka, K. Kopalko, R. Jakiela, A. Droba, T. Krajewski, D. Dobosz, J. Sajkowski, M. Pietrzyk, M. Stachowicz, A. Kozanecki, *Characteristics of ZnO:As/GaN heterojunction diodes obtained by PA-MBE*, J. Phys. D: Appl. Phys. 46 (2013) 035101.
- [16] A.S. Senarath, S. Islam, A. Sengupta, M.W. McCurdy, T. Anderson, A. Jacobs, R. Kaplar, D.R. Ball, E.X. Zhang, S.T. Pantelides, R.A. Reed, M.A. Ebrish, D.M. Fleetwood, J.D. Caldwell, and R.D. Schrimpf, *Single-event burnout in homojunction GaN vertical PiN diodes with hybrid edge termination design*, Appl. Phys. Lett. 124 (2024) 132101.
- [17] L. Wang, Y. Pu, Y.F. Chen, C.L. Mo, W.Q. Fang, C.B. Xiong, J.N. Dai, F.Y. Jiang, *MOCVD growth of ZnO films on Si(111) substrate using a thin AlN buffer layer*, J. Cryst. Growth 284 (2005) 459-463.
- [18] E. Przędziecka, K. Goscinski, M. Stachowicz, D. Dobosz, E. Zielony, J.M. Sajkowski, M.A. Pietrzyk, E. Placzek-Popko, A. Kozanecki, *Spectrum selective UV detectors from an p-ZnO: as/n-GaN diodes grown by Molecular Beam Epitaxy*, Sens. Actuators A-Phys. 195 (2013) 27-31.
- [19] P. Tyagi, C. Ramesh, B.S. Yadav, S.S. Kushvaha, M. Senthil Kumar, *Laser molecular beam epitaxy of vertically self-assembled GaN nanorods on Ta foil: role of growth temperature and laser repetition rate*, Cryst. Eng. Comm. 21 (2019) 5448-5454.
- [20] Y. Zhang, J. Wu, M. Aagesen, H. Liu, *III-V nanowires and nanowire optoelectronic devices*, J. Phys. D: Appl. Phys. 48 (2015) 463001.
- [21] S.H. Ha and J. Zhu, *Temperature effect on shallow impurity states in a wurtzite GaN/Al_xGa_{1-x}N core-shell nanowire*, Phys. E 122 (2020) 114179.
- [22] C. Chen, H. He, Y. Lu, K. Wu, Z. Ye, *Surface passivation effect on the photoluminescence of ZnO nanorods*, ACS Appl. Mater. Interfaces 5 (2013) 6354-6359.
- [23] L. Balaghi, G. Bussone, R. Grifone, R. Hübner, J. Grenzer, M. Ghorbani-Asl, A.V. Krasheninnikov, H. Schneider, M. Helm, E. Dimakis, *Widely tunable GaAs bandgap via strain engineering in core/shell nanowires with large lattice mismatch*, Nat. Commun. 10 (2019) 2793.
- [24] C.Y. Ho, C.P. Liu, Y.C. Chen, Z.Q. Huang, F.C. Chuang, K.M. Yu, *Effects of oxygen stoichiometry on the phase stability of sputter-deposited Cd_xZn_{1-x}O alloys*, Phys. Rev. Materials 3 (2019) 074605.

- [25] S. Choopun, R.D. Vispute, W. Yang, R.P. Sharma, T. Venkatesan, H. Shen, *Realization of band gap above 5.0 eV in metastable cubic-phase Mg_xZn_{1-x}O alloy films*, Appl. Phys. Lett. 80 (2002) 1529.
- [26] K.J. Lee, B. Tuređi, L. Sinatra, A.A. Zhumekenov, P. Maity, I. Dursun, R. Naphade, N. Merdad, A. Alsalloum, S. Oh, N. Wehbe, M.N. Hedhili, C.H. Kang, R.C. Subedi, N. Cho, J.S. Kim, B.S. Ooi, O.F. Mohammed, O.M. Bakr, *Perovskite-Based Artificial Multiple Quantum Wells*, Nano Lett. 19 (2019) 3535.
- [27] M.A. Pietrzyk, M. Stachowicz, A. Wierzbicka, P. Dłuzewski, D. Jarosz, E. Przeddziecka, A. Kozanecki, *Growth conditions and structural properties of ZnMgO nanocolumns on Si(111)*, J. Cryst. Growth 408 (2014) 102-106.
- [28] P. Biswas, S.-D. Baek, S.H. Lee, J.-H. Park, S.J. Lee, T.I. Lee, J.-M. Myoung, *Low temperature solution process-based defect-induced orange-red light emitting diode*, Sci. Rep. 5 (2015) 17961.
- [29] A.B. Djurišić, A.M.C. Ng, X.Y. Chen, *ZnO nanostructures for optoelectronics: Material properties and device applications*, Prog. Quantum Electron. 34 (2010) 191-259.
- [30] E. Płaczek-Popko, K. Sieranski, J. Trzmiel, J. Szatkowski, A. Nowak, *Metastabilities in the electrical characteristics of Au-CdMnTe Schottky contacts*, Phys. Status Solidi (c) 3 (2006) 1176.
- [31] S. Lany and A. Zunger, *Metal-dimer atomic reconstruction leading to deep donor states of the anion vacancy in II-VI and chalcopyrite semiconductors*, Phys. Rev. Lett. 93 (2004) 156404.
- [32] Y.K. Frodason, K.M. Johansen, T.S. Bjørheim, B.G. Svensson, A. Alkauskas, *Zn vacancy as a polaronic hole trap in ZnO*, Phys. Rev. B 95 (2017) 094105.
- [33] J.L. Lyons, J.B. Varley, D. Steiauf, A. Janotti, C.G. Van de Walle, *First-principles characterization of native-defect-related optical transitions in ZnO*, J. Appl. Phys. 122 (2017) 035704.
- [34] E. Przeddziecka, M. Stachowicz, W. Lisowski, E. Guziewicz, J.W. Sobczak, R. Jakiela, A. Jablonski, D. Jarosz, A. Kozanecki, *The chemical states of as 3d in highly doped ZnO grown by Molecular Beam Epitaxy and annealed in different atmospheres*, Thin Solid Films 605 (2016) 283-288.
- [35] S. Limpijumnong, S.B. Zhang, S.-H. Wei, C.H. Park, *Doping by large-size-mismatched impurities: the microscopic origin of arsenic-or antimony-doped p-type zinc oxide*, Phys. Rev. Lett. 92 (2004) 155504.
- [36] W.-J. Lee, J. Kang, K.J. Chang, *Defect properties and p-type doping efficiency in phosphorus-doped ZnO*, Phys. Rev. B 73 (2006) 024117.
- [37] Y.R. Ryu, T.S. Lee, H.W. White, *Properties of arsenic-doped p-type ZnO grown by hybrid beam deposition*, Appl. Phys. Lett. 83 (2003) 87-89.
- [38] R.L. Hoffman, J.F. Wagner, M.K. Jayaraj, *Electrical characterization of transparent p-i-n heterojunction diodes*, J. Tate, J. Appl. Phys. 90 (2001) 5763-5767.
- [39] M. Lopez-Ponce, A. Nakamura, M. Suzuki, J. Temmyo, S. Agouram, M.C. Martínez-Tomás, V. Muñoz-Sanjosé, P. Lefebvre, J.M. Ulloa, E. Muñoz, A. Hierro, *VIS-UV ZnCdO/ZnO multiple quantum well nanowires and the quantification of Cd diffusion*, Nanotechnology 25 (2014) 255202.
- [40] S.-Y. Ting, H.-S. Chen, W.-M. Chang, J.-J. Huang, C.-H. Liao, C.-Y. Chen, C. Hsieh, Y.-F. Yao, H.-T. Chen, Y.-W. Kiang, C.-C. Yang, *MBE-grown CdZnO/ZnO multiple quantum-well light-emitting diode on MOCVD-grown p-type GaN*, IEEE Photon. Technol. Lett. 24 (2012) 909-911.
- [41] B. Jenichen, O. Brandt, C. Pfüller, P. Dogan, M. Knelangen, A. Trampert, *Macro- and micro-strain in GaN nanowires on Si(111)*, Nanotechnology 22 (2011) 295714.
- [42] M.A. Moram and M.E. Vickers, *X-ray diffraction of III-nitrides*, Rep. Prog. Phys. 72 (2009) 036502.
- [43] B. Li, D. Yu, S.-L. Zhang, *Raman spectral study of silicon nanowires*, Phys. Rev. B 59 (1999) 1645-1648.
- [44] G. Yao, Y. Tang, Y. Fu, Z. Jiang, X. An, Y. Chen, Y. Liu, *Fabrication of high-quality ZnCdO epilayers and ZnO/ZnCdO heterojunction on sapphire substrates by pulsed laser deposition*, Appl. Surf. Sci. 326 (2015) 271-275.
- [45] S.O. Tan, İ. Taşcıođlu, S. Altındal Yerişkin, H. Tecimer, F. Yakuphanođlu, *Illumination dependent electrical data identification of the CdZnO interlayered metal-semiconductor structures*, Silicon 12 (2020) 2885-2891.
- [46] X. Tang, H. Lü, Q. Zhang, J. Zhao, Y. Lin, *Study on interactions between cadmium and defects in Cd-doped ZnO by first-principle calculations*, Solid. State Sci. 13 (2011) 384-387.
- [47] M.A. Pietrzyk, M. Stachowicz, P. Dłuzewski, A. Wierzbicka, A. Kozanecki, *Self-organized ZnMgO nanocolumns with ZnO/ZnMgO quantum wells on c-plane Al₂O₃ substrates by MBE: Growth conditions and properties*, J. Alloys Compd. 737 (2018) 748-751.
- [48] F. Yang, S. Ma, X. Zhang, M. Zhang, F. Li, J. Liu, Q. Zhao, *Blue-green and red luminescence from ZnO/porous silicon and ZnO:Cu/porous silicon nanocomposite films*, Superlattice. Microst. 52 (2012) 210.

-
- [49] I. Shalish, H. Temkin, V. Narayanamurti, *Size-dependent surface luminescence in ZnO nanowires*, Phys. Rev. B 69 (2004) 245401.
- [50] K. Yadav, B.R. Mehta, S. Bhattacharya, J.P. Singh, *A fast and effective approach for reversible wetting-dewetting transitions on ZnO nanowires*, Sci. Rep. 6 (2016) 35073.
- [51] A. Cros, A.G. Cristóbal, K. Hestroffer, B. Daudin, J. Wang, F. Demangeot, R. Pécou, *Resonant Raman scattering of core-shell GaN/AlN nanowires*, Nanotechnology 32 (2021) 085713.
- [52] D.E. Aspnes, *Optical properties of thin films*, Thin Solid Films 89 (1982) 249.
- [53] H.-Y. Chen, H.-W. Lin, C.-Y. Wu, W.-C. Chen, J.-S. Chen, S. Gwo, *Gallium nitride nanorod arrays as low-refractive-index transparent media in the entire visible spectral region*, Opt. Express 16 (2008) 8106.

Eunika Zielony

.....
(podpis wnioskodawcy)