

Dr Ewa Przeździecka

Instytut Fizyki Polskiej Akademii Nauk

Warszawa, 2017

AUTOREFERAT

1. Dane personalne	3
2. Wykształcenie i stopnie naukowe	3
3. Informacje o dotychczasowym zatrudnieniu	3
4. Wskazanie osiągnięcia wynikającego z art. 16 ust. 2 ustawy z dnia 14 marca 2003r. będącego podstawą ubiegania się o stopień doktora habilitowanego	4
4.1 Tytuł cyklu publikacji powiązanych tematycznie oraz wykaz tych publikacji	4
4.2 Dane bibliometryczne	6
4.3 Wprowadzenie - tło naukowe badań	6
4.3.1 Tlenek cynku jako materiał pod detektory UV	8
4.3.2 Domieszkowanie ZnO atomami grupy V i kontrola defektów w ZnO	11
4.4 Badanie stanów domieszek i detekcji promieniowania UV w warstwach i heterostrukturach bazujących na ZnO - opis cyklu publikacji H1-H9	14
4.4.1. Zmiana stanu domieszek akceptorowych na skutek wygrzewania [H1]	14
4.4.2. Stan domieszki w warstwach ZnO wykonanych w różnych warunkach wzrostu [H1, H2]	17
4.4.3. Zmiana stanu domieszek akceptorowych na skutek dodatkowego domieszkowania [H3]	19
4.4.4. Kontrola defektów i międzypowierzchni w celu uzyskania wysokiej jakości złącz [H4 - H8]	21
4.4.5. Modyfikacja międzypowierzchni i jej wpływ na parametry struktur [H9]	29
4.4.6. Podsumowanie osiągnięć prezentowanych w cyklu prac [H1-H9]	31

5.	Omówienie pozostałych osiągnięć naukowo-badawczych	36
5.1	Opis dorobku naukowego nie związanego z tematem habilitacji.....	36
5.2	Kierowanie i udział w krajowych lub międzynarodowych projektach badawczych.	39
5.3	Wykaz referatów zaproszonych wygłoszonych na międzynarodowych lub krajowych konferencjach tematycznych	39
5.4	Inne referaty wygłoszone osobiście na konferencjach krajowych i międzynarodowych.....	41
5.5	Wygłoszone seminaria.....	42
5.6	Budowa unikatowej aparatury badawczej	43
5.7	Organizacja konferencji, działalność recenzencka i edytorska	43
5.8	Dydaktyka i popularyzacja nauki	44
5.9	Uczestnictwo i nagrody na targach:.....	44
5.10	Patenty i zgłoszenia patentowe	45
6	Bibliografia	46

1. Dane personalne

Ewa Przeździecka



2. Wykształcenie i stopnie naukowe

2001-2008	Polska Akademia Nauk, Instytut Fizyki Uzyskany stopień: doktor Praca doktorska pt.: „ <i>Własności optyczne i elektryczne ZnO typu p otrzymanego metodą utleniania ZnTe</i> ”.
1999-2001	Uniwersytet Warszawski, Wydział Fizyki Uzyskany tytuł: magister Praca magisterska pt.: „ <i>Wpływ światła na przewodnictwo struktur zawierających kropki kwantowe</i> ”.
1997-1999	Uniwersytet Warszawski, Wydział Fizyki Uzyskany tytuł: licencjat Praca licencjacka pt.: „ <i>Badania domieszkowanych planarnie heterostruktur GaAs/InGaAs/AlGaAs metodami pojemnościowymi</i> ”.

3. Informacje o dotychczasowym zatrudnieniu

01.08.2008 do dziś	Instytut Fizyki Polska Akademia Nauk Stanowisko: adiunkt
01.01.2007-31.07.2008	Instytut Fizyki Polska Akademia Nauk Stanowisko: fizyk -pomiarы fotoluminescencji próbek ZnO wykonanych metodą utleniania termicznego oraz ALD -pomiarы fotoluminescencji proszków ZnO z domieszkami metali przejściowych
01.07.2001-30.09.2001	Instytut Technologii Elektronowej Stanowisko: inżynier

-praca przy wzroście warstw półprzewodnikowych metodą MBE

01.04.2001-30.06.2001

Instytut Technologii Elektronowej

Stanowisko: stażysta

-praca przy wzroście warstw półprzewodnikowych metodą MBE

Dodatkowe informacje o dłuższych przerwach w pracy:

W okresie od 01.01.2011 do 01.08.2013 praca na stanowisku adiunkt w niepełnym wymiarze godzin 0.5 oraz 0.6 etatu.

W okresie od 30.12.2009 do 09.07.2010 zwolnienie lekarskie (czas trwania 7 miesięcy).

W okresie od 10.07.2010 do 10.12.2010 urlop macierzyński.

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

4.1 Tytuł cyklu publikacji powiązanych tematycznie oraz wykaz tych publikacji

Osiągnięciem naukowym będącym podstawą ubiegania się o stopień naukowy doktora habilitowanego jest cykl dziewięciu prac opublikowanych w czasopiśmie o międzynarodowym zasięgu zatytułowany:

„Badanie stanów domieszek i detekcji promieniowania UV w warstwach i heterostrukturach bazujących na ZnO”

Publikacje wchodzące w skład cyklu:

[H1] The chemical states of As 3d in highly doped ZnO grown by Molecular Beam Epitaxy and annealed in different atmospheres

E. Przeździecka, M. Stachowicz, W. Lisowski, E. Guzewicz, J.W. Sobczak, R. Jakiela, A. Jablonski, D. Jarosz, A. Kozanecki *Thin Solid Films* 605, 283-288 (2016).

[H2] XPS study of arsenic doped ZnO grown by Atomic Layer Deposition

D. Snigurenko, R. Jakiela, E. Guzewicz, **E. Przeździecka**, M. Stachowicz, K. Kopalko, A. Barcz, W. Lisowski, J.W. Sobczak, M. Krawczyk, A. Jablonski *Journal of Alloys and Compounds*, 582, 594–597 (2014).

- [H3] Arsenic chemical state in MBE epitaxial grown ZnO layers - Doped with As, N and Sb
E. Przeździecka, W. Lisowski, R. Jakiela, J.W. Sobczak, A. Jablonski, M.A. Pietrzyk, A. Kozanecki *Journal of Alloys and Compounds*, 687, 937–942 (2016).
- [H4] Characteristics of ZnO:As/GaN heterojunction diodes obtained by PA-MBE
E. Przeździecka, A. Wierzbička, A. Reszka, K. Gościński, A. Droba, R. Jakiela, D. Dobosz, T. A. Krajewski, K. Kopalko, J. M. Sajkowski, M. Stachowicz, M. A. Pietrzyk, A. Kozanecki *J. Phys. D: Appl. Phys.* 46, 035101 (2013).
- [H5] Spectrum selective UV detectors from an p-ZnO:As/n-GaN diodes grown by Molecular Beam Epitaxy
E. Przeździecka, K. Gościński, M. Stachowicz, D. Dobosz, E. Zielony, J.M. Sajkowski, M.A. Pietrzyk, E. Płaczek-Popko, A. Kozanecki *Sensors and Actuators A: Physical*, 195, 27 (2013).
- [H6] Dual-acceptor doped p-ZnO:(As,Sb)/n-GaN heterojunctions grown by PA-MBE as a spectrum selective ultraviolet photodetector
E. Przeździecka, A. Wierzbička, P. Dłużewski, M. Stachowicz, R. Jakiela, K. Gościński, M. A. Pietrzyk, K. Kopalko and A. Kozanecki *Physica Status Solidi A-Applications and Materials Science* 211, 2072-2077 (2014).
- [H7] Electron beam induced current profiling of the p-ZnO:N/n-GaN heterojunction
E. Przeździecka, M. Stachowicz, S. Chusnutdinow, R. Jakiela, A. Kozanecki *Appl. Phys. Lett.* 106, 062106 (2015).
- [H8] n-ZnO/p-4H-SiC diode: Structural, electrical, and photoresponse characteristics
M. Guzewicz, R. Schifano, **E. Przeździecka**, J. Z. Domagala, W. Jung, T. A. Krajewski, E. Guzewicz *Appl. Phys. Lett.* 107, 101105 (2015).
- [H9] The p-ZnO:N/i-Al₂O₃/n-GaN heterostructure-electron beam induced profiling, electrical properties and UV detectivity
E. Przeździecka, S. Chusnutdinow, E. Guzewicz, D. Snigurenko, M. Stachowicz, K. Kopalko, A. Reszka, A. Kozanecki, *J. Phys. D: Appl. Phys.* 48, 325105 (2015).

Oświadczenia współautorów, określające indywidualny wkład każdego z nich w powstanie w/w publikacji załączone są w załączniku nr 5 pt. „Oświadczenia współautorów”.

4.2 Dane bibliometryczne

Na mój dorobek naukowy składa się **41 publikacji** indeksowanych w Journal of Citation Reports (pod nazwiskiem **Przeździecka** oraz nazwiskiem panieńskim **Ilczuk**). Sumaryczny impact factor publikacji naukowych według tej listy wynosi **50.464**, a całkowita liczba cytowań - **484**, bez uwzględniania auto-cytowań - **416**. Indeks Hirscha moich publikacji h wynosi **12**.

Na mój dorobek naukowy składają się prace z różnych czasopism naukowych, takich jak: Physical Review B, Journal of Applied Physics, Semiconductors Science and Technology, Microelectronic Engineering, Sensors and Actuators A, Journal of Crystal Growth, Physica Status Solidi B, Physica Status Solidi A, Journal of Luminescence –po 1 pracy; Thin Solid Films, Solid State Communication, Journal of Physics D, Applied Physics Letters po-2 prace; Physica Status Solidi C-3 prace; Journal Alloys and Compounds – 4 prace, Acta Physica Polonica A-5 prac.

Powyższe dane zostały odczytane na podstawie *Web of Science* (stan z dnia 25 maja 2017 roku).

4.3 Wprowadzenie - tło naukowe badań

Tlenek cynku (ZnO) jest szerokoprzerwowym półprzewodnikiem, który rozpoczął swą karierę w życiu codziennym jako proszki i ceramiki w stomatologii, kosmetologii i chemii. ZnO jest materiałem szeroko dostępnym, bio-kompatybilnym, bezpiecznym dla organizmów żywych i nietoksycznym[1]. Cienkie warstwy i struktury ZnO można wykonywać wieloma metodami między innymi takimi jak: MOCVD¹, MBE², ALD³, napyłanie katodowe oraz metoda hydrotelmalna. Materiał ten można osadzać na różnych podłożach w tym także na giętkich foliach, bibule i papierze. Występuje on w postaci warstw, nanoproszków, nanodrutów, nanosłuków oraz w postaci innych form. Ze względu na szeroką, prostą przerwę energetyczną wynoszącą w temperaturze pokojowej ~3.37 eV oraz na fakt, iż energia wiązania ekscytonu w ZnO wynosi 60 meV [2] jest materiałem niezwykle atrakcyjnym dla zastosowania go w strukturach pod wydajne źródła światła i detektory pracujących w zakresie ultrafioletu (UV).

Ze względu na możliwość zmiany przerwy energetycznej na większą poprzez domieszkowanie magnezem Mg, możliwe jest wytworzenie i użycie stopów $Zn_{1-x}Mg_xO$ do uzyskiwania detektorów światła z zakresu ultrafioletu, nieczułych nie tylko na zakres widzialny, ale działających także poniżej 280 nm, tzw. „solar blind” [3], użytecznych np. w przypadku pracy w przestrzeni kosmicznej w warunkach promieniowania jonizującego. Duża twardość materiału na promieniowanie o wysokiej energii, charakterystyczna dla ZnO, jest w tym przypadku pożądaną cechą materiału [4]. Zapewnia ona lepszą trwałość struktur podczas

¹ MOCVD ang. *Metal Organic Chemical Vapor Deposition* - technika osadzania warstw na powierzchni materiałów poprzez stosowanie związków metaloorganicznych w formie gazowej.

² MBE ang. *Molecular Beam Epitaxy*- Epitaksja z wiązek molekularnych

³ ALD ang. *Atomic Layer Deposition* - technologia nanoszenia cienkich warstw atomowych w sposób sekwencyjny.

pracy w przestrzeni kosmicznej. Zmiana przerwy energetycznej pozwala ponadto na wzrost struktur kwantowych, w tym studni kwantowych, zawierających warstwy $Zn_{1-x}Mg_xO$ jako bariery dla studni ZnO. Umożliwia to zwiększenie wydajności świecenia ze struktur, co jest istotne z punktu widzenia zastosowań pod wydajne źródła światła. Tlenek cynku wydaje się być bardzo przyszłościowym materiałem, łatwym do uzyskania. Istotnym faktem jest, że zawartość cynku (Zn) w skorupie ziemskiej wynosi 70 ppm (0.007%) podczas gdy zawartość galu (Ga) czy indu (In), stosowanego do wykonywania warstw i struktur GaN i InN wynosi odpowiednio 19 ppm i 0.25 ppm.

Aby w pełni wykorzystać potencjał aplikacyjny warstw bazujących na ZnO w opto- i mikro-elektronice, konieczne jest uzyskiwanie materiału o kontrolowanym typie przewodnictwa zarówno dziurowym jaki i elektronowym. Otrzymanie dziurowego typu przewodnictwa w ZnO stanowi poważne wyzwanie ze względu na rodzime defekty typu donorowego, takie jak luki tlenowe [5] i międzywęzłowy cynk [6] oraz nieintencjonalne domieszki np. wodór i węgiel [7, 8]. Rodzime defekty i nieintencjonalne domieszki są między innymi odpowiedzialne za silne przewodnictwo n-typu w niedomieszkowanych warstwach ZnO, będące jedną z przyczyn trudności uzyskania typu p.

Pomimo trudności z uzyskaniem dziurowego typu przewodnictwa, istnieje wiele prac raportujących uzyskanie p-typu ZnO. Od momentu pojawienia się pierwszych wyników dotyczących domieszkowania na typ p w literaturze trwa szeroka dyskusja która zaowocowała szeregiem modeli teoretycznych [9–13], dotyczących sposobu wbudowywania się domieszek akceptorowych do ZnO. Spośród domieszek akceptorowych niezwykle ważną grupę stanowią domieszki grupy V układu okresowego. Ich sposób wbudowywania się w strukturę krystaliczną ZnO jest nadal tematem otwartym i kontrowersyjnym. W związku z tym, badania podstawowe mające na celu zrozumienie natury defektów akceptorowych są niezwykle istotne i ważne. Zastosowanie wielu technik badawczych w celu lepszego zrozumienia natury defektów akceptorowych pozwala na szersze spojrzenie na to zagadnienie. Kolejnym niezwykle istotnym elementem trudnej układanki - jaką jest domieszkowanie na typ p w ZnO, jest sprawa wygrzewania domieszkowanych próbek po wzroście. Wiele prac naukowych pokazuje, iż wygrzewanie stanowi często niezbędny element w uzyskiwaniu zadowalających rezultatów dla domieszkowania np.: atomami grupy V układu okresowego pierwiastków.

Obecność defektów zarówno w warstwach domieszkowanych akceptorami jak i w warstwach o elektronowym typie przewodnictwa jest niezwykle istotna z punktu widzenia zastosowań warstw ZnO. Defekty występujące w objętości warstw i na międzypowierzchniach ujawniają się zarówno we właściwościach elektrycznych jak i optycznych uzyskiwanych warstw i struktur, i wpływają na końcowe parametry urządzeń bazujących na ZnO.

Prezentowana rozprawa habilitacyjna obejmuje połączenie badań podstawowych dotyczących defektów związanych z domieszkowaniem warstw ZnO, kontrolą jakości międzypowierzchni oraz badań z potencjałem aplikacyjnym obejmujących zastosowanie warstw ZnO do wykonania złącz półprzewodnikowych wysokiej jakości w celu uzyskania selektywnej detekcji promieniowania z zakresu UV.

Celem moich badań jest:

- Wytworzenie wysokiej jakości warstw tlenku cynku i intencjonalne domieszkowanie tych warstw atomami grupy V w kierunku prac nad uzyskaniem typu p.

- Wykonanie serii dedykowanych badań tych warstw w celu głębszego zrozumienia sposobu wbudowywania się domieszek grupy V w strukturę krystaliczną ZnO.
- Sprawdzenie wpływu wygrzewania warstw oraz wpływu dodatkowego domieszkowania na stan domieszek grupy V, a w rezultacie lepsze zrozumienie ich natury.
- Określenie najlepszych parametrów domieszkowania i wygrzewania warstw domieszkowanych i zastosowanie tych warstw do uzyskania wysokiej jakości złącz półprzewodnikowych.
- Zastosowanie złącz zawierających tlenek cynku do uzyskania selektywnej detekcji promieniowania z zakresu UV.
- Zbadanie wpływu modyfikacji międzypowierzchni w złączu poprzez dodanie przekładki izolującej na parametry uzyskanych struktur diodowych.

W ramach wprowadzenia do tematu moich badań naukowych zostanie najpierw przedstawiony problem detekcji promieniowania UV (4.3.1), następnie problem domieszkowania warstw ZnO ze szczególnym uwzględnieniem domieszkowania atomami grupy V oraz ogólnie problem defektów (4.3.2), wpływających na końcowe własności urządzeń bazujących na ZnO.

4.3.1 Tlenek cynku jako materiał pod detektory UV

Jednym z najprostszych półprzewodnikowych urządzeń elektronicznych są złącza półprzewodnikowe. Używane są one w wielu zastosowaniach, w tym mogą być używane w strukturach pracujących jako detektory promieniowania. Fakt, iż ludzie dobrze widzą w zakresie fal czerwonych, żółtych i niebieskich podczas gdy wiele zwierząt, głównie owady i ptaki ale także niektóre ssaki np. renifery, widzą wyraźnie w zakresie UV, jest jedną z najważniejszych przyczyn konieczności wykonywania detektorów na zakres UV. Światło słoneczne jest czynnikiem warunkującym życie na planecie Ziemia. Jego szerokie spektrum widmowe zawiera także ultrafiolet (Rys. 1). Udowodnionym medycznie korzystnym efektem działania promieniowania UVB (280-315 nm) na skórę jest umożliwienie syntezy witaminy D₃, która odgrywa podstawową rolę w metabolizmie wapnia, zwiększając wchłanianie jelitowe, stymulując tworzenie i mineralizację tkanki kostnej. Ponadto pełni ona ważne funkcje regulacyjne, modulując procesy wzrostu komórek w wielu narządach i tkankach. Promienie UV, działając na receptory skórne, powodują lepsze unaczynienie i odżywienie skóry.

Oprócz dobroczynnego wpływu na organizmy żywe promieniowanie z zakresu UV wywiera wiele niekorzystnych efektów. Dzięki rozwojowi nauki w ostatnich dekadach świadomość tego faktu jest coraz powszechniejsza. Ogólnie znanymi niekorzystnymi skutkami promieniowania słonecznego są: poparzenia słoneczne, ryzyko rozwoju nowotworów skóry, osłabienia odporności, przedwczesnego starzenia się skóry. W ich generowaniu zasadniczą rolę odgrywa promieniowanie w zakresie widma ultrafioletu (UV), w tym UVA (315-400 nm) i UVB (280-315 nm). Promieniowanie UVA jest obecne przez cały rok, nawet w pochmurne dni, i stanowi 95% promieniowania ultrafioletowego, które dociera do powierzchni ziemi. Promienie te przenikają przez chmury, szkło i naskórek. W przeciwieństwie do promieni UVB nie wywołują bolesności skóry, mogą wnikać w nią głęboko i dotrzeć do komórek skóry właściwej. Promieniowanie UVC (100–280 nm) ma najmniejszy zasięg i dzięki warstwie ozonowej nie powinno osiągać powierzchni ziemi. Na

skutek przerezedzania owej warstwy dociera ono jednak do powierzchni ziemi, a nawet krótki kontakt z promieniowaniem UVC może skutkować oparzeniem słonecznym. W celu ochrony przed niewidocznym dla ludzkiego oka promieniowaniem UV ważna jest możliwość detekcji promieniowania z tego zakresu. Jest to szczególnie istotne przy występowaniu zjawiska dziury ozonowej, kiedy jesteśmy znacznie bardziej narażeni na niekorzystny wpływ promieniowania UV.

Detektory promieniowania towarzyszą człowiekowi w wielu dziedzinach nauki. Obecnie najbardziej rozpowszechnionymi detektorami promieniowania są detektory pracujące w oparciu o krzem. Detektory UV przydatne są do wykrywania zanieczyszczeń atmosfery i dymu. Mogą być one używane do przesyłania informacji w przestrzeni kosmicznej oraz wykorzystywane są do działań obronnych. Używane są także w procesie sterylizacji wody i znajdują zastosowanie w systemach ochrony środowiska, na przykład w wykrywaniu na akwenach wodnych obecności związków oleju. Systemy takie są także często wykorzystywane do monitorowania nieszczelności instalacji tankowania samolotów na lotniskowcach i w portach. Czujniki ultrafioletu są też powszechnie stosowane w systemach spalania do kontrolowania płomienia i iskier. Wiele tych aplikacji wymaga urządzeń o wysokim stosunku sygnału do szumu i wysokiej prędkości reakcji [14, 15]. Detekcja promieniowania ultrafioletowego jest szeroko używana również w wielu zastosowaniach przemysłowych do monitorowania dawki i widma wykorzystywanego promieniowania ultrafioletowego. Mogą to być urządzenia do dezynfekcji i oczyszczania, narzędzia do analizy kryminalistycznej i etapy fotolitograficzne.

Ponadto, innowacyjny pomysł litografii na ekstremalny zakres ultrafioletowy, która jest technologią litografii następnej generacji przy użyciu fal ultrafioletowych EUV (o długości wynoszącej około ~13,5 nm), potrzebuje także nowego typu detektorów UV, które mogłyby zastąpić te pracujące w oparciu o krzem [16]. Korzystnie nowy typ detektorów powinien być odporny na promieniowanie o wysokiej energii, więc rozważa się takie które bazować będą w oparciu o materiały z szeroką przerwą energetyczną.

Również, prowadzone obecnie badania atmosfery słonecznej wykazują, że potrzeba ulepszonych obserwacji UV jest bardzo ważna. BOLD (Blind to the Optical Light Detectors) jest międzynarodową inicjatywą poświęconą opracowaniu nowych detektorów odpornych na promieniowanie o wysokiej energii i ślepych na zakres widzialny, do obserwacji słonecznych promieni UV.

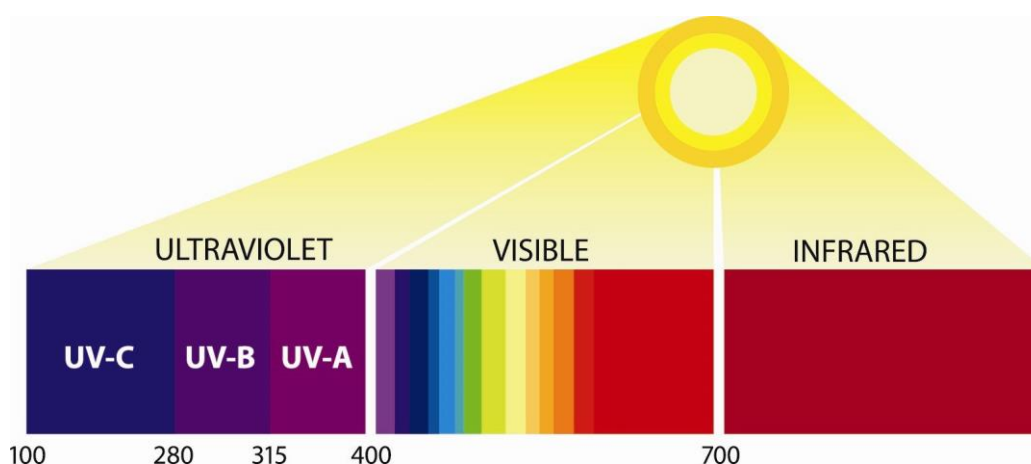
Zadawalające, dane obserwacyjne można uzyskać poprzez położenie nacisku na pozornie niezależne atrybuty detektorów takie jak: czasowa, widmowa i przestrzenna rozdzielczość widma spektralnego, stosunku sygnału do szumu czy zakresu pola widzenia itp. W przypadku badań naukowych dotyczących obserwacji zakresu UV wszystkie te aspekty są korzystne. Są one jednak sprzężone z procesami fizycznymi, które mają być obserwowane i dla przykładu mniejsze zjawiska zachodzące na słońcu zwykle mają mniejszą jasność i ewoluują szybciej. Oznacza to, że parametry detektorów, takie jak wysoka rozdzielczość i czułość są zasadniczo niepodzielne, a celem przyszłościowym jest maksymalizacja wszystkich z nich jednocześnie.

Niezależnie, w przypadku szybkiej i innowacyjnej komunikacji bezprzewodowa Li-Fi (Light-Fidelity), opartej o transmisję danych za pomocą światła i wykorzystującej elementy optyczne takie jak diody LED i fotodetektory, poszukiwane są nowej generacji, bardzo szybkie detektory światła (w tym konkretnym przypadku światła z zakresu widzialnego).

Wysokiej jakości detektory powinny zatem spełniać następujące wymagania: powinny być one bardzo czułe, posiadać wysoki stosunek sygnału do szumu, mieć wysoką spektralną selektywność, być szybkie i stabilne. Detektory UV bazujące na materiałach szerokoprzerwowych opartych na ZnO, GaN oraz SiC są bardzo często detektorami światła nieczułymi na zakres widzialny i nie wymagają konieczności nakładania dodatkowych filtrów, jak to ma miejsce w przypadku np. detektorów pracujących w oparciu o krzem.

Związane jest to z tym, że detektory, w tym te oparte o materiały z szeroką przerwą energetyczną zazwyczaj reagują na promieniowanie o energii powyżej przerwy energetycznej materiału z którego są wykonane, czyli w przypadku ZnO jak i GaN z zakresu UV.

W przypadku obecnie używanych detektorów pracujących w oparciu o krzem, wykorzystywanych do pracy w przestrzeni kosmicznej, chłodzenie musi być zaimplementowane w celu zmniejszenia prądu ciemnego i zapobieganiu degradacji z powodu promieniowania jonizującego. Jest to jednak trudne i kosztowne zadanie w misjach kosmicznych. Innego rodzaju detektory takie jak przetworniki CCD są z natury mniej wrażliwe na promienie kosmiczne i nie wymagają chłodzenia. Ale matryce CCD mają poważne dodatkowe wady, takie jak potrzeba wysokiego napięcia do wzmocnienia. Zarówno GaN jak i ZnO są bardziej odporne na działanie tego promieniowania, a dodatkowo zastosowanie złącz p-n pod detektory promieniowania daje szansę uzyskania detekcji bez konieczności przykładania zewnętrznego napięcia [17]. Fotodiody⁴, mają także tę przewagę nad innymi typami detektorów, że ich czasy odpowiedzi na padające promieniowanie są zazwyczaj znacznie krótsze niż ma to miejsce w przypadku np. fotorezystorów⁵.



Rys. 1. Schematyczny rysunek zakresu widmowego światła słonecznego z podziałem na zakresy: podczerwony, widzialny i ultrafioletowy.

Defekty występujące w poszczególnych warstwach struktur, które mogą znaleźć zastosowanie jako źródła światła jak i efektywne detektory światła, mogą stanowić ważny problem w uzyskiwaniu ich wysokiej wydajności. Defekty występujące w warstwach stanowiących bariery dla studni kwantowych, jak i w warstwach stanowiących obszar studni ograniczają możliwość wykorzystania tych struktur na szerszą skalę. Wzrost warstw na różnych podłożach może znacząco zmieniać rodzaj występujących w nich defektów. Ponadto, jakość międzypowierzchni pomiędzy poszczególnymi warstwami, a w szczególności występujące na niej defekty, będące między innymi centrami rekombinacji niepromienistej, stanowią podstawowy problem limitujący intensywność świecenia z tych struktur. W celu uzyskania wysokiej jakości złącz, zarówno dla źródeł światła jak i detektorów, istotna jest zatem kontrola defektów i międzypowierzchni.

⁴ Fotodiody-dioda półprzewodnikowa pracująca jako fotodetektor.

⁵ Fotorezystor- jest wykonany z półprzewodnika o wysokiej rezystancji. W ciemności, fotorezystor może mieć rezystancję kilka megaomów (MΩ), podczas gdy po oświetleniu, fotorezystor może mieć oporność na poziomie kilkuset omów.

W przypadku detektorów promieniowania jednym z ważnych parametrów jest ich selektywność spektralna. Jedną z metod uzyskania wysoce selektywnych detektorów promieniowania może być zastosowanie połączenia dwu różnych półprzewodników w złączu (heterozłącza).

Połączenie ZnO i GaN jest od wielu lat przedmiotem intensywnych badań. Dobre dopasowanie sieciowe i strukturalne obu materiałów sprawia, że wzrost ZnO na GaN jest korzystny z punktu widzenia otrzymania warstw epitaksjalnych dobrej jakości. Ze względu na trudności w uzyskaniu dziurowego typu przewodnictwa w ZnO szeroko badano złącza n-ZnO/p-GaN. Bardzo często przedmiotem tych badań była elektroluminescencja z takich struktur. W trakcie rozpoczynania moich badań istniały pojedyncze prace dotyczących detekcji promieniowania przy użyciu złącz ZnO/GaN. Raportowano mianowicie selektywną detekcję promieniowania dla złącza nanodrutu ZnO/p-GaN, przy czym stosunek prądu ciemnego (przy braku oświetlenia) do jasnego (po oświetleniu struktury) wynosił w tym przypadku zaledwie piętnaście [18], oraz złącze n-ZnO/i-ZnO/p-GaN, które detekowało w relatywnie szerokim zakresie ultrafioletu [19].

Wzrost ZnO na warstwie/podłożu z węgliku krzemu (SiC) także cieszy się od wielu lat zainteresowaniem [20, 21]. W przypadku heterozłącz ZnO/SiC ważny jest użyty rodzaj politypu SiC. Dla heterozłącz ZnO/SiC detekcja promieniowania badana była jedynie dla struktur n-ZnO/p-SiC(6H) [22] podczas gdy elektroluminescencja była obserwowana dla heterostruktur n-ZnO/p-SiC(4H) [23].

Do zastosowań pod detektory UV badane były także heterozłącza ZnO/Si, jednakże w tym przypadku często obserwowano detekcję promieniowania zarówno w obszarze UV jak i w obszarze widzialnym [24–27]. W celu poprawienia selektywności heterozłącz ZnO/Si stosowano odpowiedniej grubości warstwę przekładki na międzypowierzchni ZnO/Si np. warstwę SiO₂ [28].

Przed rozpoczęciem moich badań nie badano szeroko heterostruktur złożonych z ZnO domieszkowanego atomami grupy V oraz n-GaN. Znane były detektory ultrafioletu bazujące na ZnO [17] oraz na GaN [29, 30] czy SiC [31, 32], ale w znakomitej większości nie były to detektory bardzo wysoce selektywne (zazwyczaj detekcja promieniowania obserwowana była w szerokim zakresie widmowym w obszarze ultrafioletu). Jak wspomniałam wcześniej, poszukiwanie struktur w których możliwa jest detekcja promieniowania w wąskim zakresie widmowym, z szybkim czasem reakcji i dużą różnicą pomiędzy prądem ciemnym i jasnym jest jednym z wyzwań współczesnej fizyki. Badania podstawowe warstw wchodzących w skład takiej struktury, zrozumienie natury domieszkowania warstw i występujących w niej defektów jest ważnym i koniecznym etapem w kierunku potencjalnych aplikacji.

4.3.2 Domieszkowanie ZnO atomami grupy V i kontrola defektów w ZnO

Domieszkowanie jest sposobem mogącym w znaczący sposób zmienić parametry półprzewodników. Jeśli chodzi o warstwy ZnO domieszkowane pierwiastkami grupy V w celu uzyskania dziurowego typu przewodnictwa, tutaj literatura jest bardzo szeroka. Domieszki akceptorowe wprowadzono do ZnO na wiele sposobów, w efekcie uzyskując lub nie dziurowy typ przewodnictwa.

Trudność domieszkowania półprzewodników szeroko-przerwowych, takich jak ZnO, często wiąże się z małą rozpuszczalnością i z wysoką energią jonizacji defektu związanego z domieszką, więc defekt ten nie jest wtedy zjonizowany w temperaturze pokojowej. Chociaż niskie rozpuszczalności domieszek mogą być czasami poprawione przez zastosowanie

nierównowagowych technik wzrostu, takich jak epitaksja z wiązek molekularnych (MBE), to zmniejszenie energii jonizacji akceptora jest trudnym zagadnieniem, zwłaszcza dla tlenków i azotków [33]. W przypadku domieszkowania arsenem (As), antymonem (Sb) i fosforem (P) ze względu na dużą niezgodność promieni jonowych P^{3+} (2,12 Å), As^{3+} (2,22 Å) i Sb^{3+} (2,45 Å) z O^{2+} (1,38 Å) zostało stwierdzone, że te domieszki mają małą rozpuszczalność jeśli zastępują tlen w ZnO [34]. Zostało to również poparte przez obliczenia teoretyczne, które sugerują, że te pierwiastki dają bardziej stabilne stany domieszek wbudowując się w miejscach cynku. Ponadto, poziomy energetyczne domieszek P, As, Sb w przypadku wbudowania się ich w pozycje tlenu znajdują się głęboko w przerwie energetycznej ZnO. W przypadku As i Sb defekty postaci atom domieszki w miejscu tlenu As_O , Sb_O tworzyłyby bardzo głębokie stany w przerwie energetycznej, o energii powyżej 1 eV [9], w przypadku zaś azotu energia akceptora postaci azot w miejscu tlenu N_O wyniosłaby 0.4 eV [9]. W 2004 roku zaproponowano nowy model domieszkowania dla As i Sb w ZnO, w którym zarówno As jak i Sb wbudowują się w miejsce Zn (donory) i łączą się z dwoma lukami cynkowymi (akceptory) dając w rezultacie płytkie kompleksy postaci donor plus dwa akceptory [10]. W pewnym sensie model ten jest niejako przykładem kodomieszkowania czyli jednoczesnego domieszkowania akceptory+donory w proporcji 2:1. Ponadto, w roku 2012 pojawiła się nowa koncepcja pokazująca, że stabilne kompleksy domieszek grupy V w ZnO mogą składać się z podstawieniowej domieszki otoczonej przez trzy luki cynkowe ($D_{Zn}-3V_{Zn}$ gdzie $D=P, As, \text{ lub } Sb$) [11]. Jednakże w obu przypadkach, tzn. w przypadku defektów postaci ($D_{Zn}-3V_{Zn}$) oraz postaci ($D_{Zn}-2V_{Zn}$) gdzie $D=P, As, \text{ lub } Sb$, były to modele teoretyczne. Badania kryształów objętościowych ZnO implantowanych arsenem częściowo potwierdziły obliczenia teoretyczne i pokazały, że pierwiastek ten nie wbudowuje się w miejsce tlenu, a raczej w miejsce cynku [35].

Charakter funkcji falowych poziomu akceptorowego, w szczególności dla płytkiego akceptora, jest podobny do tego z jakich składa się maksimum pasma walencyjnego, zbudowanego głównie z orbitali p anionu oraz p i d kationu. W związku z tym, aby wytworzyć płytki poziom akceptorowy, domieszka powinna być silnie elektronegatywna, powinna mieć zatem niską energię orbitalu p. W przypadku rozważania domieszek podstawieniowych grupy V w materiałach II-VI najbardziej obiecującą domieszką wydaje się być azot. Związane jest to z faktem, że poziom orbitalu p dla N jest najniższy, najbardziej elektronegatywny spośród elementów grupy V. W związku z tym, azot podstawiający pierwiastki grupy VI: N_x ($x=O, S, Se, Te$) wydaje się być preferowaną domieszką akceptorową, z grupy V domieszek, dla grupy półprzewodników II-VI [33].

Jednakże prosty akceptor postaci N_O (atom azotu w miejscu tlenu) wydaje się być relatywnie głęboki (~0.4 eV) [9]. W związku z tym w ostatnich latach pojawiły się nowe teorie dotyczące problemu w jaki sposób azot wbudowuje się do ZnO. W 2011 roku Lautenschlaeger i współautorzy zaproponowali kompleks pary atomów azotu stabilizowanych przez wodór N_O-H-N_O . W 2012 Liu i inni zaproponowali kompleksy postaci $N_{Zn}-V_O$ [12], w 2013 Boonchun i inni pokazali, że molekula N_2 w miejscu Zn może być płytkim akceptorem, podczas gdy N_2 w miejscu O jest donorem, a pojedynczy atom N w miejscu O zachowuje się jak głęboki akceptor [36]. W tym samym roku Reynolds i inni zaproponowali, iż za przewodnictwo typu p w przypadku domieszkowania azotem odpowiada kompleks postaci $V_{Zn}-N_O-H^+$, a jego energia jonizacji wynosi 130 meV [13]. W 2015 ukazała się praca sugerująca, że $(NH_4)_{Zn}$ także może być płytkim akceptorem w ZnO [37]. Jak widać, trwa mnożenie bytów a problem wbudowywania się azotu do struktury ZnO jest nadal otwarty. Wiadomo, że w przypadku domieszkowania azotem bardzo często obserwuje się małą

wydajność domieszkowania tzn. wprowadzona duża liczba atomów azotu do warstwy tlenku odpowiada zazwyczaj niewielkiej koncentracji elektrycznie aktywnych domieszek. Efekt ten związany jest prawdopodobnie z tworzeniem się kompleksów N-N [38]. W związku z tym wskazane jest używanie bardziej aktywnego źródła azotu np. gazu NO, bądź plazmy azotowej.

Ponadto, w celu zwiększenia szansy na efektywne domieszkowanie stosowano metody kodomieszkowania (akceptory i donory) oraz podwójnego domieszkowania akceptorami. Metoda kodomieszkowania została zaproponowana w celu obniżenia energii jonizacji poziomu akceptorowego [39], podwójne domieszkowanie domieszkami akceptorowymi stosowano z powodzeniem w przypadku jednoczesnego domieszkowania ZnO atomami grupy I oraz V układu okresowego pierwiastków [40–42].

Oprócz defektów wynikających z wprowadzenia domieszki istnieją defekty rodzime [43, 44], których obecność również znacząco wpływa na końcowe własności urządzeń bazujących na ZnO. Rodzime defekty oraz nieintencjonalne domieszki występujące w ZnO zależą od sposobu/metody i warunków w jakich wykonana była warstwa ZnO. Ich obecność wpływa także na sposób wbudowywania się domieszek intencjonalnych. Wydaje się zatem zasadne oczekiwanie, iż domieszkowanie tym samym pierwiastkiem warstw ZnO wykonanych różnymi metodami może dać w rezultacie inny wynik w sensie końcowych parametrów uzyskanych warstw i urządzeń.

Kolejnym ważnym zagadnieniem w przypadku planowania konstrukcji złącz do zastosowań praktycznych, w tym do detektorów UV, jest analiza międzypowierzchni złącza, jest to szczególnie istotne w przypadku heterozłącz, w których łączymy dwa różne materiały. Defekty obecne na interfejsie złącza mają znaczący wpływ na jego parametry elektryczne.

Aby zbadać stan domieszek w kryształach można stosować wiele technik badawczych, takich jak: luminescencja, spektroskopia głębokich poziomów (DLTS)⁶, fotoprąd, techniki mikroskopowe czy też technika rentgenowskiej spektroskopii fotoemisyjnej (XPS). Jak wcześniej wspomniałam, domieszkowanie akceptorowe w przypadku ZnO i zrozumienie w jaki sposób domieszki wbudowują się w strukturę matrycy nie jest łatwym zadaniem.

Zmiana luminescencji warstw wskutek domieszkowania pierwiastkami grupy V została pokazana w wielu publikacjach [45–47], ujawniając w większości przypadków dodatkowe piki w widmie luminescencyjnym przypisywane przejściom akceptorowym. W tym przypadku wysoka jakość próbek oraz dokładny pomiar PL pozwalały na uchwycenie większej ilości przejść optycznych, a tym samym na głębszą ich interpretację. W tym względzie także moje wcześniejsze prace (przed rozpoczęciem prac nad habilitacją) stanowią ważny wkład [48, 49]. Jednakże interpretacja natury linii w widmach PL z próbek ZnO domieszkowanych atomami grupy V bywa różna. W tym miejscu należy podkreślić, że pojedynczy pomiar luminescencji nie daje nam jednoznacznej odpowiedzi na pytanie z jakiego typu defektem związanym z domieszkowaniem mamy do czynienia, jednak w połączeniu z innymi technikami eksperymentalnymi stanowi ważny wkład w wiedzę na temat domieszek w ZnO. Między innymi, pomiar PL w funkcji temperatury pozwala na wyznaczenie energii aktywacji termicznej przejść oraz oszacowanie położenia poziomów energetycznych w przerwie wzbronionej półprzewodnikowej matrycy.

Badania XPS pozwalają na przyjrzenie się otoczeniu chemicznemu atomu i jego położeniu w strukturze krystalicznej, np. atomu arsenu w ZnO. Takie wstępne prace dotyczące domieszkowania ZnO były częściowo prowadzone przez rozpoczęciem naszych badań [47, 50–53]. W przypadku domieszkowania tlenku cynku arsenem w badaniach

⁶ DLTS z ang. *Deep Level Transient Spectroscopy*

XPS prezentowano zazwyczaj szeroki pik związany z As. Brak badań wysokorozdzielczych znacznie utrudniał interpretację. W przypadku badań XPS dla ZnO:Sb pokazano, iż Sb wbudowuje się raczej w miejscu cynku niż w miejscu tlenu [54–58]. Należy nadmienić, że w przypadku szerokiego piku XPS trudno zauważyć zmianę stanu domieszki w skutek wygrzewania, czy dodatkowego domieszkowania, a obie te metody (wygrzewanie oraz dodatkowe domieszkowanie) są często stosowane w celu uzyskania dziurowego typu przewodnictwa.

Jak widać prowadzenie dedykowanych badań dotyczących stanu domieszek akceptorowych w ZnO jest wysoce zasadne podobnie jak badania jakości międzypowierzchni. Badania takie muszą być starannie zaplanowane a badane kryształy powinny być tak dobrane by stanowić serie próbek będących podstawą wyselekcjonowanych i zaawansowanych badań.

4.4 Badanie stanów domieszek i detekcji promieniowania UV w warstwach i heterostrukturach bazujących na ZnO - opis cyklu publikacji H1-H9

Na początku omawiania cyklu prac zostaną przedstawione wyniki badań dotyczące wpływu wygrzewania, sposobu domieszkowania oraz dodatkowego domieszkowania na stan domieszek grupy V w warstwach ZnO, ze szczególnym uwzględnieniem arsenu [prace H1-H3]. Następnie przedstawię wyniki dotyczące użycia warstw ZnO, w szczególności warstw domieszkowanych atomami grupy V w heterozłączach półprzewodnikowych [prace H4-H9]. Ponadto, omówię wpływ domieszkowania, defektów i modyfikacji międzypowierzchni na parametry uzyskanych diodowych detektorów promieniowania UV.

4.4.1. Zmiana stanu domieszek akceptorowych na skutek wygrzewania [H1]

Jedną z najczęściej stosowanych metod zmiany właściwości warstw ZnO domieszkowanych pierwiastkami mogącymi stanowić źródło domieszek akceptorowych jest ich wygrzewanie. Wygrzewanie może wpłynąć na koncentrację i rodzaj rodzimych defektów oraz nieintencjonalnych domieszek. Rodzime defekty i nieintencjonalne domieszki mają, jak już wspomniałam, znaczący wpływ na własności materiału. Zastosowanie wysokiej temperatury podczas wygrzewania może spowodować zmniejszenie ewentualnego zanieczyszczenia warstw ZnO np. wodorem [59]. Zostało pokazane, że wodór obecny w wielu technikach wzrostu, jest płytką domieszką donorową w ZnO [60] i może być on odpowiedzialny za wysoką koncentrację n-typu warstw niedomieszkowanych.

Przy odpowiednim doborze parametrów i sposobu wygrzewania warstw ZnO celowo domieszkowanych możemy wpłynąć na rozpuszczalność oraz stany chemiczne/ulożenie w sieci krystalicznej intencjonalnych domieszek. Wygrzewanie zatem może zarówno wpływać na rodzime defekty, nieintencjonalne domieszki, jak i na domieszki intencjonalne. Odpowiednio dobrana procedura, polegająca na doborze sposobu oraz parametrów wygrzewania domieszkowanych warstw w celu zmiany stanu domieszki, stosowana np. do uzyskania przewodnictwa typu p w ZnO, często nazywana jest aktywacją domieszek [61, 62] a jednym z istotnych parametrów wygrzewania jest odpowiedni dobór atmosfery.

Pierwsza praca z cyklu [H1] przedstawia wpływ atmosfery wygrzewania warstw ZnO:As po wzroście na własności domieszki arsenowej oraz ogólne własności warstw ZnO

otrzymanych metodą epitaksji z wiązek molekularnych (MBE). Połączenie dwóch metod eksperymentalnych tj. XPS⁷ oraz PL daje szerszy obraz wpływu wygrzewania na defekty wynikające z obecności As. Dedykowana seria próbek ZnO zawierała intencjonalnie tyle samo arsenu, były one po wdrożeniu wygrzewane w tej samej temperaturze, ale w różnych atmosferach (tlen, azot, argon) metodą RTP⁸.

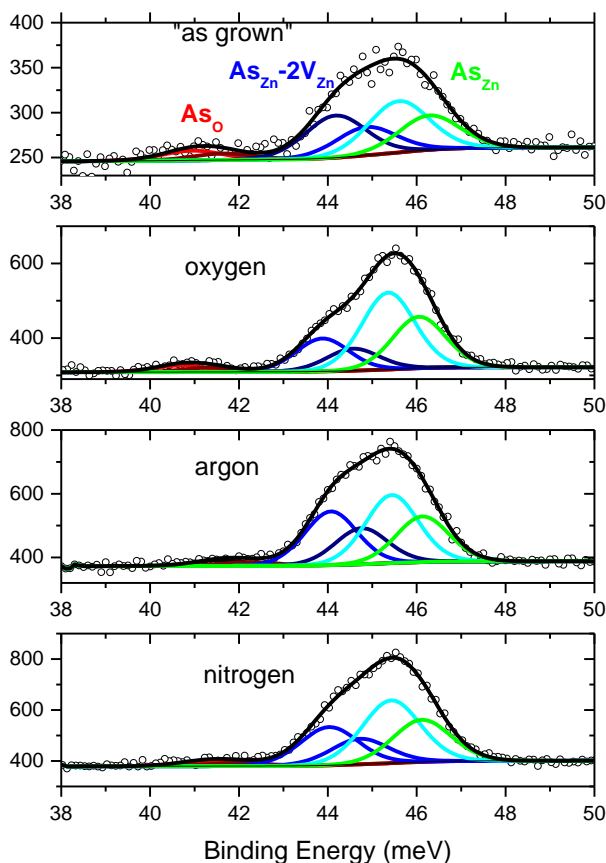
Zastosowanie wysokorozdzielczej metody XPS, odpowiednie zaplanowanie i przygotowanie próbek oraz parametrów pomiaru daje wyjątkową szansę na wnikliwą obserwację stanu domieszek. W wysokorozdzielczych badaniach XPS piku As3d widoczne są trzy wkłady (Rys. 2). Obecne są dwa główne wkłady zarówno w próbce bezpośrednio po wdrożeniu, jak i w próbkach wygrzanych, scharakteryzowane położeniem dubletu pików dla energii wiązania około 44.0 i 45.5 eV. Wkład As3d znajdujący się pomiędzy energią wiązania (BE)⁹ 44.3 eV i 45 eV może być związany z kompleksem: arsen w miejscu cynku As_{Zn} i dwie luki cynkowe V_{Zn} jako drudzy najbliżsi sąsiedzi. Powstanie defektów typu $As_{Zn}-2V_{Zn}$ zostało zaproponowane w pracy [10] w celu wyjaśnienia przewodnictwa typu p w ZnO domieszkowanym As. Zgodnie z tym modelem takie kompleksy są tworzone w energetycznie korzystnej reakcji pomiędzy As_{Zn} i luką cynkową, co powoduje powstanie stabilnych stanów płytkich akceptorów $As_{Zn}-2V_{Zn}$ zlokalizowanych na poziomie 0,15 eV powyżej maksimum pasma walencyjnego. Jak wspomniałam, teoretyczne obliczenia pokazały, iż arsen może wbudować się w miejscu Zn (wtedy występuje jako donator) tworząc wokół siebie dwie luki cynkowe (funkcjonujące jako akceptory), mamy zatem kompleks postaci $As_{Zn}-2V_{Zn}$. Cały kompleks wykazuje zatem naturę akceptorową. Zostało zasugerowane, iż arsen może wbudować się także w postaci innego kompleksu postaci $As_{Zn}-3V_{Zn}$ [11], jednak jak dotąd model ten nie znalazł potwierdzenia eksperymentalnego. W rzeczywistości, współistnienie przewodnictwa typu p- oraz stanów elektronowych As3d znajdujących się między 44,5 eV i 45 eV poniżej poziomu Fermiego zaobserwowano w kilku badaniach widm XPS dla ZnO z domieszką As [63, 64]. Na podstawie danych XPS, przedstawione w pracy [H1], możemy przypisać kolejny wkład w widmie XPS, BE 45,5 eV, do arsenu ułożonego w miejscu cynku As_{Zn} (w ZnO) [63–65]. Trzeci, najmniejszy wkład do sygnału - stanowiący jedynie kilka procent (Rys. 2), reprezentowany przez parę pików przy energii wiązania 40.9 i 41.6 eV przypisywany jest wiązaniu As-Zn (arsenowi znajdującemu się w pozycji tlenu As_O) [63, 64, 66]. Uzyskany wynik potwierdza przypuszczenia, że arsen (atom grupy V) nie zajmuje po prostu pozycji tlenu (atomu grupy VI) czego spodziewalibyśmy się w przypadku prostego modelu podstawnikowego. Ponadto, obserwowana w pracy [H1] znaczna intensywność wkładu wiążanego z istnieniem kompleksu $As_{Zn}-2V_{Zn}$ sugeruje, że w epitaksjalnych warstwach ZnO:As powinniśmy się spodziewać dużej ilości stanów akceptorowych związanych z wprowadzaniem domieszki As. Potwierdza to również, obserwowana we wszystkich badanych próbkach silna emisja, którą przypisujemy rekombinacji swobodnych elektronów z dziurami związanymi na akceptorach, a także emisja związaną z parami donor-akceptor.

W pracy [H1] wykazano, że w przypadku warstw ZnO:As otrzymywanych metodą MBE część atomów domieszki wbudowuje się podstawieniowo (zarówno w miejsce Zn jak i w miejsce O), a część w postaci kompleksów z lukami Zn, ujawniając złożony problem domieszkowania arsenem. Ponadto, wzajemna intensywność wkładów piku arsenu As3d zależy od atmosfery wygrzewania próbek, a zatem zmienia się ilość atomów arsenu

⁸ RTP-ang. Rapid Thermal Processing

⁹ BE-ang. Binding Energy

wbudowanych odpowiednio w miejsce Zn, O lub w miejscu Zn w otoczeniu luk cynkowych. Dodatkowo, zmienia się także luminescencja pochodząca z warstw różnie wygrzewanych. Obserwowana zmiana luminescencji potwierdza także zmianę własności warstw. Dla klarowności eksperymentu do badań użyto próbek będących częścią tego samego procesu wzrostu, a próbki bezpośrednio po wzroście oraz bezpośrednio po wygrzewaniu zostały zapakowane próżniowo, w celu uniknięcia długotrwałego kontaktu powierzchni z atmosferą.



Rys. 2. Wysokorozdzielcze widma XPS pików As3d próbek MBE ZnO:As-bezpośrednio po wzroście oraz po wygrzewaniu w atmosferze tlenu, argonu lub azotu. Spektrum As3d zostało rozdzielone na trzy części, reprezentowane przez trzy dublety $As3d_{5/2} - As3d_{3/2}$. Deconvolucja widma XPS As3d była wykonana przy użyciu oprogramowania CasaXPS. Rysunek zaczerpnięty z pracy H1.

Wyniki przedstawione w pracy [H1] pokazują, że w wyniku wygrzewania zmienia się jednocześnie wzajemna intensywność pików XPS jak i luminescencja pochodząca z próbek (Fig 3 (a-c) z pracy [H1]). Arsen wbudowuje się w strukturę ZnO zarówno w miejscu cynku jak i w miejscu tlenu, oraz w postaci kompleksu. Widać zatem, że założenie prostego modelu podstawieniowego w tym przypadku nie wyczerpuje pełnego opisu wbudowywania się tej domieszki grupy V w strukturę materiału II-VI. Zastosowanie wysokorozdzielczych badań XPS pozwoliło zauważyć, iż względna intensywność trzech wkładów w widmie XPS As3d zależy od atmosfery wygrzewania, ale w żadnym przypadku żaden z wkładów wyraźnie nie dominuje, co jest odciskiem palca skomplikowanego charakteru stanów arsenu w ZnO. Jest to ważny wynik w szerokiej dyskusji dotyczącej domieszkowania ZnO arsenem.

Obserwowana zmiana stanu domieszki na skutek wygrzewania warstw ZnO po wzroście przedstawiona w pracy [H1] tłumaczy potrzebę wygrzewania warstw domieszkowanych w celu „aktywacji” domieszki. Pokazuje także, iż w procesie „aktywacji” domieszki ważną rolę odgrywa nie tylko temperatura ale także atmosfera w której wygrzewamy warstwy.

4.4.2. Stan domieszki w warstwach ZnO wykonanych w różnych warunkach wzrostu [H1, H2]

Tlenek cynku jest półprzewodnikiem, który można otrzymywać wykorzystując różnorakie metody wzrostu takie jak: epitaksja z wiązek molekularnych (MBE), osadzanie warstw atomowych (ALD), metoda hydrotermalna, rozpylanie katodowe i inne. Różnorodność metod wzrostu pozwala na uzyskiwanie tego materiału w bardzo różnych temperaturach, od temperatury pokojowej do temperatur bardzo wysokich. Nasuwa się zatem pytanie, czy uzyskany różnymi metodami materiał ma te same właściwości i czy można wyciągnąć np. ogólne wnioski dotyczące domieszkowania, wprowadzając tę samą domieszkę do warstw czy kryształów ZnO otrzymywanych w różnych temperaturach i w różnych warunkach wzrostu (np.: w warunkach bogatych w cynk, lub bogatych w tlen). W przypadku ZnO rodzaj defektów rodzimych zależy będzie od warunków wzrostu warstw [67] i będzie on miał istotny wpływ na wbudowywanie się atomów domieszki w strukturę a tym samym na możliwość efektywnego domieszkowania, w tym na uzyskiwanie przewodnictwa p-typu.

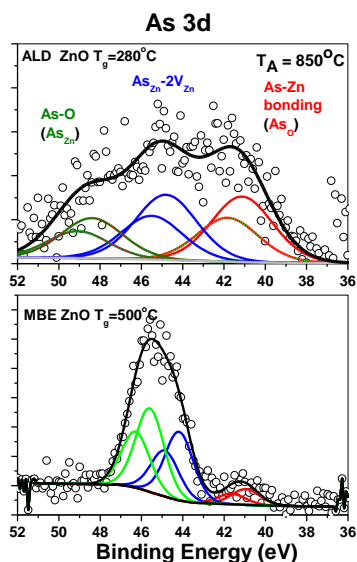
Odrębnym problemem jest sposób wprowadzania domieszki. Arsen można wprowadzić do ZnO różnymi metodami zarówno „in-situ” jak „ex-situ”, stosując różne „źródła” arsenu, może to być np.: Zn_3As_2 [46, 68], wygrzewanie w atmosferze arsenu [69], dyfuzja z podłoża GaAs [70], komórka efuzyjna zawierająca czysty As [45].

Istniejąca literatura na temat stanu domieszki As w ZnO jest niespójna [50, 71]. Prezentowane wyniki dotyczą próbek ZnO otrzymywanych różnymi metodami wzrostu. I tak w przypadku warstw ZnO wykonanych na podłożu GaAs metodą MOCVD [64] w widmie fotoemisyjnym stanu As3d obecne są dwa piki przy BE 45.2 eV oraz przy BE 43.9 eV. Wkład przy wyższej energii wiązania jest przypisywany atomom arsenu związanymi z tlenem As-O w As_2O_3 . Stan As dla energii wiązania w okolicy 43.9 eV uważa się za pochodzący od As w kompleksie $As_{Zn}-2V_{Zn}$. Nie są widoczne wkłady od As_{Zn} oraz As_O . W przypadku warstw ZnO hodowanych metodą pulsacyjnej ablacji laserowej z targetów ZnO/ As_2O_3 , autorzy pokazują szeroki pojedynczy pik As3d arsenu zlokalizowany w BE ~45 eV przypisując go As w miejscu cynku [50]. W przypadku zaś warstw wykonanych metodą rozpylania magnetronowego pojedynczy pik As3d przy BE ~45 eV przypisywany jest stanowi $As_{Zn}-2V_{Zn}$ [71]. Podobna sytuacja obecności szerokiego piku As3d widoczna jest w próbkach wykonanych metodą MOCVD na podłożach GaAs [70].

Obecność tylko jednego szerokiego piku pomiędzy energią wiązania 42 eV a 48 eV znacznie utrudnia, lub wręcz uniemożliwia jego poprawną interpretację. W celu lepszego zrozumienia jak As wbudowuje się w matrycę ZnO konieczne są zatem wysokorozdzielcze badania XPS (prace H1, H2, H3) wykonane na wysokiej jakości próbkach. Ponadto w literaturze przedmiotu brakuje prac porównujących dedykowane serie próbek, gdzie zmieniamy np. tylko jeden parametr wzrostu lub wygrzewania, mierzonych na takim samym układzie pomiarowym z zadaną rozdzielczością.

Aby porównać stan domieszki arsenowej w warstwach ZnO wykonanych różnymi metodami wzrostu, w pracy [H2], przyjrzelśmy się arsenowi w próbkach ZnO wykonanych metodą ALD w temperaturze 280°C, która jest znacznie niższa niż w przypadku warstw MBE dla których temperatura wzrostu wynosi około 500°C. W tych pierwszych próbkach As został wprowadzony poprzez wygrzewanie warstw ZnO w atmosferze arsenu. W wyniku wygrzewania w ampule, w atmosferze zawierającej As, zostały uzyskane warstwy domieszkowane arsenem na poziomie około 1%. Badania wysokorozdzielcze XPS ujawniły w domieszkowanych próbkach ALD obecność trzech wkładów w As3d, których pochodzenie wiążemy z obecnością As w miejscu tlenu, cynku lub w kompleksie z dwoma lukami

cynkowymi. Relatywne natężenie tych trzech wkładów arsenu jest podobne (Rys. 3 w pracy H2), np. w próbce wygrzanej w 850°C, natomiast znacznie odbiega od wyniku uzyskanego dla próbek MBE (Rys. 3), w których wkład pochodzący od As zlokalizowanego w miejscu tlenu jest bardzo mały - na poziomie kilku procent. Porównując zatem próbki ZnO:As uzyskane metodą MBE oraz metodą ALD, widzimy że As w tych próbkach wbudowuje się inaczej, a przede wszystkim występuje znaczna różnica zawartości arsenu wbudowującego się w miejscu tlenu (Rys. 3).



Rys. 3. Porównanie widm XPS stanu chemicznego domieszki arsenu As3d w warstwach ZnO wykonanych metodą ALD w temperaturze 280°C oraz metodą MBE w temperaturze 500°C. W przypadku warstw ALD arsen został wprowadzony na skutek wygrzewania w ampule w atmosferze arsenu, natomiast w przypadku warstw MBE podczas wzrostu poprzez zastosowanie komórki As Knudsen. Rysunek górny zaczerpnięty z pracy [H2] rysunek dolny z pracy [H1].

Ponadto, w pracy [H2], zaobserwowaliśmy, iż zmiana temperatury wygrzewania od 850°C do 950°C skutkuje zmianą w stanie chemicznym As3d, co widzimy jako zmianę relacji intensywności pików interpretowanych jako pochodzących od arsenu w miejscu cynku As_Zn , arsenu w miejscu tlenu As_O oraz arsenu w kompleksie z dwoma lukami cynkowymi $\text{As}_\text{Zn-2V}_\text{Zn}$, przy czym wkład od $\text{As}_\text{Zn-2V}_\text{Zn}$ jest większy w przypadku wygrzewania w temperaturze wyższej. Ponadto, dla wyższej temperatury wygrzewania w niskotemperaturowej luminescencji obserwujemy nowy pik w energii 3.355 eV (Rys. 2 w pracy [H2]) interpretowany jako pik ekscytonu związanego na akceptorze A^0X . Obecność tego pik w widmie świadczy o dodatkowych stanach akceptorowych istniejących w próbce. W odróżnieniu od próbek opisanych w pracy [H1], próbki ALD ZnO:As wykazują znacząco większy wkład pochodzący od arsenu w miejscu tlenu. Przeprowadzone badania [H1, H2, H3] pokazały, że stan chemiczny¹⁰ domieszki arsenowej a w konsekwencji efektywne domieszkowanie akceptorowe zależy także od sposobu wytwarzania, domieszkowania i wygrzewania warstw ZnO:As.

Należy zatem podkreślić, że na stan chemiczny domieszki As wpływają: rodzaj wygrzewania oraz warunki wzrostu warstwy ZnO. Jest to bardzo istotny wynik. Rozważając jak dana domieszka wbudowuje się w matrycę ZnO, musimy także brać pod uwagę warunki wzrostu kryształu czy warstwy macierzystego materiału.

¹⁰ Dla uściślenia: *Stan chemiczny* pierwiastka chemicznego jest to jego elektronowa, chemiczna i fizyczna natura, jaka istnieje w połączeniu go z grupą jednego lub więcej innych elementów.

4.4.3. Zmiana stanu domieszek akceptorowych na skutek dodatkowego domieszkowania [H3]

Jedną z proponowanych metod ułatwiających możliwość efektywnego domieszkowania ZnO na typ p, jest zastosowanie metody tzw. „dual acceptor doping” [72], polegającego na jednoczesnym wprowadzeniu do materiału dwu domieszek akceptorowych. Obliczenia teoretyczne oraz eksperymenty pokazują, że można efektywniej domieszkować ZnO np. poprzez jednoczesne dodanie srebra i azotu (Ag+N) [42], fosforu i azotu (P+N) [73], bądź też litu i azotu (Li+N) [40, 41]. Literatura niewiele mówi jak takie podwójne domieszkowanie wpływa na stan pojedynczej domieszki, czy zmienia się jej otoczenie w matrycy ZnO, czy tworzą się nowe kompleksy? Wychodząc naprzeciw tym trudnym zagadnieniom wykonaliśmy i scharakteryzowaliśmy próbki ZnO MBE domieszkowane pojedynczo arsenem, podwójnie arsenem i azotem oraz dodatkowo arsenem, azotem i antymonem. Obecność domieszek potwierdzono badaniami spektrometrii mas jonów wtórnych (SIMS) (Rys. 1 w pracy H3).

Wykonano badania wysokorozdzielcze XPS próbek bezpośrednio po wzroście oraz próbek wygrzanych odpowiednio w tlenie i w argonie metodą RTP. Skupiono się przede wszystkim na stanach domieszek. We wszystkich próbkach badanych bezpośrednio po wzroście ilość arsenu umiejscowionego w miejscu tlenu była mała (5-10 %) i ponadto ten wkład był relatywnie najmniejszy w próbce pojedynczo domieszkowanej arsenem. Główny wkład arsenu w warstwach bezpośrednio po wzroście pochodził z pików przypisanego arsenowi w miejscu cynku As_{Zn} , podczas gdy w próbkach podwójnie i potrójnie domieszkowanych dominował pik przypisywany $As_{Zn}-2V_{Zn}$ (Rys. 4)

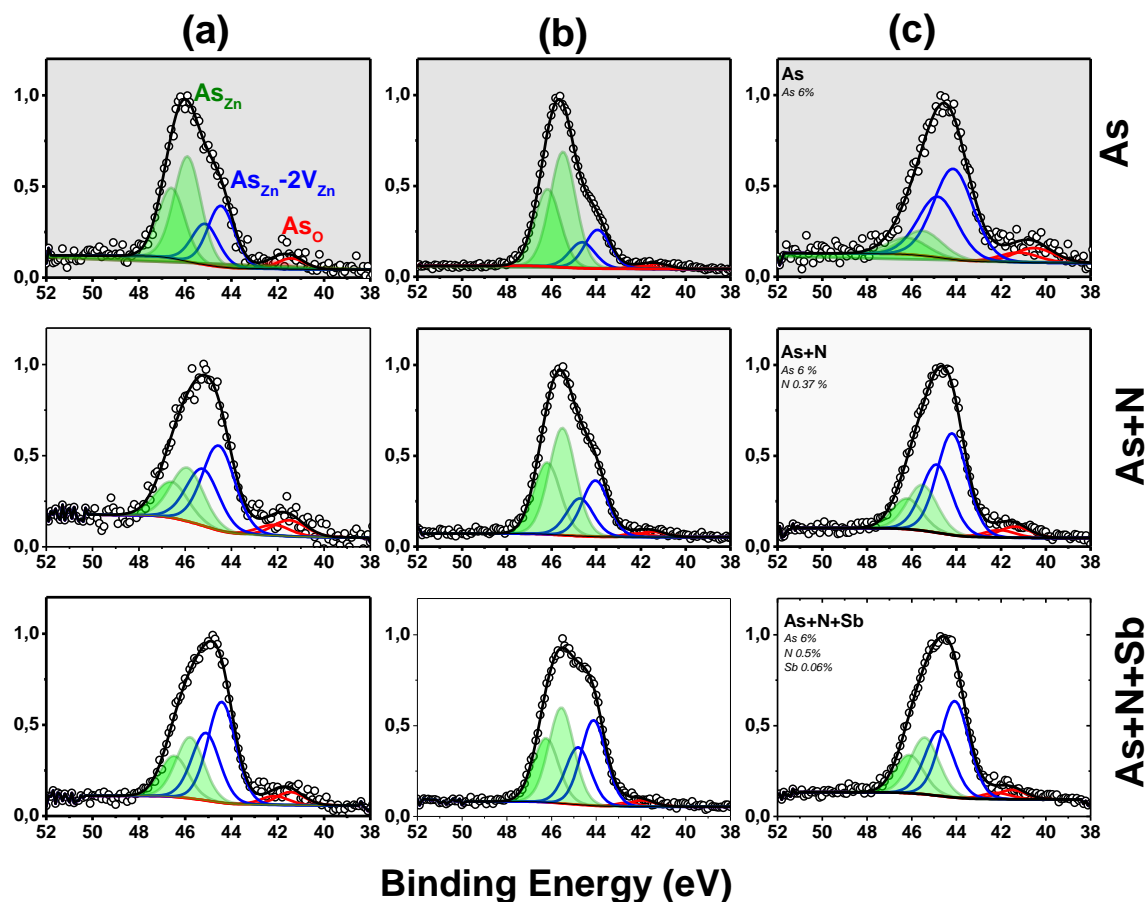
Jak wspominałam wcześniej, wygrzewanie próbek ZnO:As może skutkować zmianami cech pików As3d. We wszystkich próbkach wygrzewanych w tlenie stan As związany z arsenem w miejscu cynku As_{Zn} dominuje i zawartość tego stanu maleje kiedy dodatkowo domieszkujemy próbki Sb i/lub N, w tym samym czasie rośnie wkład przypisywany $As_{Zn}-2V_{Zn}$. Intensywność pików As_O jest mała, podobnie jak to ma miejsce w przypadku próbek bezpośrednio po wzroście.

W próbkach wygrzewanych w argonie sytuacja jest diametralnie różna, najbardziej intensywny jest dublet As3d w energii wiązania ~ 44.2 eV, który przypisujemy do kompleksu arsenowego z dwoma lukami cynkowymi $As_{Zn}-2V_{Zn}$. W próbkach wygrzewanych w argonie ten pik współistnieje z mało intensywnym pikiem arsenu w miejscu cynku As_{Zn} .

Dodatkowe domieszkowanie azotem i antymonem warstw ZnO:As otrzymanych metodą MBE wpływa na stan domieszki arsenowej i zależy silnie od wygrzewania tych warstw po wzroście. Widać zatem, iż poprzez dodatkowe domieszkowanie możemy modyfikować stan/otoczenie chemiczne domieszki akceptorowej, a zaobserwowanie tych zmian pozwala na lepsze zrozumienie zagadnienia podwójnego domieszkowania akceptorami.

Aby głębiej zrozumieć dlaczego atomy danej domieszki zmieniają swoje położenie/otoczenie w sieci krystalicznej matrycy na skutek dodatkowego domieszkowania należy się także zastanowić, jak atomy dodatkowej domieszki (w tym przypadku Sb i N) wbudowują się w tę matrycę. W przypadku domieszki Sb badania stanu Sb3d3 w próbkach ZnO:AsNSb pokazały obecność pików dla energii wiązania 539.5 eV [Rys. 6 w H3]. Jak to zostało pokazane we wcześniejszych pracach, Sb zajmuje raczej miejsce cynku niż miejsce tlenu dzięki podobieństwu między promieniem jonowym $Sb^{3+}(0.76 \text{ \AA})$ i $Zn^{2+}(0.74 \text{ \AA})$.

Ponadto, stopień utlenienia Sb między 3 i 5 został ujawniony w badaniach XPS i badaniach XANES¹¹ [74].



Rys. 4. Znormalizowane wysokorozdzielcze widma XPS piku As3d dla warstw MBE ZnO pojedynczo, podwójnie i potrójnie domieszkowanych As, N i Sb (a) próbki bezpośrednio po wzroście (b) próbki wygrzewane w tlenie (c) próbki wygrzewane w argonie. Rysunek zaczerpnięty z pracy [H3].

Badania stanu domieszki azotu metodą XPS są trudne ze względu na mały przekrój czynny tego pierwiastka na fotojonizację. Wykonaliśmy takie badania na próbkach domieszkowanych ZnO:AsN oraz ZnO:N. Przy długotrwałym zbieraniu widma N1s zaobserwowaliśmy, że pik azotowy jest złożony z kilku składowych, natomiast sygnał posiada wysoki poziom szumu, co znacznie utrudnia jednoznaczną interpretację wyników.

Oprócz spojrzenia na położenie domieszek w sieci ważne jest także przyjrzenie się, rodzimym defektom kryształu. Badając pik pochodzący od tlenu, możemy wnioskować także o ilości pozycji gdzie atomy tlenu mają w swym otoczeniu mniej sąsiadów w postaci atomów tlenów, niż jest to w idealnej strukturze ZnO. Wkład ten pozwala nam pośrednio wnioskować o ilości luk tlenowych w kryształach. Ilość luk tlenowych bądź luk cynkowych może znacząco wpłynąć na sposób wbudowania się domieszki. W przypadku badań warstw domieszkowanych pojedynczo, podwójnie lub potrójnie atomami grupy V, przyjrzelśmy się więc także składowej piku O1s przypisywanej niedoborowi tlenu w drugiej strefie koordynacyjnej w energii wiązania 531.4 eV [75, 76]. W przeprowadzonych badaniach zaobserwowano, że pik As_O w próbkach wygrzewanych jest znacznie niższy niż w warstwach

¹¹ XANES- Rentgenowska absorpcyjna struktura przykrawędziowa ang. X-ray absorption near edge structure

bezpośrednio po wzroście i jednocześnie pik tlenowy związany z niedoborem tlenu w drugiej strefie koordynacyjnej rośnie (Rys. 5 w H3).

W pracy H3 zostało pokazane, że otoczenie chemiczne domieszek w strukturze krystalicznej ZnO zależy od dodatkowego domieszkowania. Istotne jest, że dodatkowe domieszkowanie atomami grupy V zwiększa koncentrację atomów As wbudowanego w kompleksie $As_{Zn}-2V_{Zn}$ arsenu zarówno w próbkach „as grown”, jak i próbkach wygrzanych. Dotychczas taki wynik nie był raportowany dla warstw ZnO domieszkowanych potrójnie lub podwójnie atomami grupy V układu okresowego.

W literaturze możemy znaleźć natomiast, między innymi, badania XPS pokazujące zmianę stanu domieszki azotu w przypadku kodomieszkowania próbek ZnO donorami: aluminium Al [77], galem Ga [78] bądź indem In [79]. Raportowana była także zmiana stanu domieszki w przypadku podwójnego domieszkowania atomami grupy I i grupy V np. zmiana stanu litu Li na skutek dodatkowego domieszkowania azotem [80] oraz zmiana domieszki srebra Ag na skutek dodatkowego domieszkowania azotem [81, 82].

Badania podstawowe stanu domieszek grupy V, w szczególności arsenu prezentowane w pracach H1-H3, pozwoliły na zaobserwowanie zmian stanu domieszki na skutek wygrzewania w różnych atmosferach, dodatkowego domieszkowania oraz zmiany metody wzrostu i sposobu domieszkowania warstw. Wyniki te stanowią ważny wkład do wiedzy na temat sposobu wbudowywania się atomów grupy V w matrycę ZnO. Zaplanowanie i wykonanie dedykowanych serii wysokiej jakości próbek oraz ustalenie parametrów wygrzewań pozwoliło na co istotne, systematyczne i unikalne badania. W odróżnieniu od większości prac prezentowanych wcześniej w literaturze, wykorzystanie, wysokorozdzielczej metody XPS pozwoliło na ujawnienie szczegółów dotyczących zmian położenia domieszki w sieci krystalicznej ZnO i pozwoliło ukazać jej skomplikowany charakter. Przedstawione tutaj wyniki stanowiły istotny wkład do szerokiej dyskusji na temat charakteru domieszkowania typu p w tlenku cynku.

Zostało pokazane, że wygrzewanie a także wprowadzanie intencjonalnych domieszek wpływa na rodzaj i ilość defektów rodzimych w kryształach, a z drugiej strony istniejące w materiale defekty rodzime mają wpływ na sposób wbudowywania się danej domieszki a co za tym idzie na własności warstw. Rezultat ten uzmysławia nam znaczącą rolę zaawansowanych badań podstawowych koniecznych do planowania i uzyskiwania warstw a w rezultacie struktur o zadanych i kontrolowanych parametrach fizycznych.

4.4.4. Kontrola defektów i międzypowierzchni w celu uzyskania wysokiej jakości złącz [H4 - H8]

W celu uzyskania złącz półprzewodnikowych wysokiej jakości istotna jest możliwość kontroli własności fizycznych poszczególnych warstw w złączu. Lepsze zrozumienie procesów fizycznych w domieszkowanych warstwach ZnO, w tym zmiany stanów domieszek na skutek wygrzewania, bądź dodatkowego domieszkowania (opisane w pracach H1-H3), mają podstawowe znaczenie, ponieważ torują drogę do ich ulepszeń, jak również do praktycznego zastosowania tych warstw. Domieszkowane i niedomieszkowane warstwy ZnO były szeroko charakteryzowane i zostały użyte do wytworzenia złącz półprzewodnikowych. W pracach [H4-H9] badaliśmy złącza bazujące na tlenku cynku. W szczególności w pracach [H4-H7, H9] wykorzystane były warstwy ZnO domieszkowane pojedynczo lub podwójnie akceptorami grupy V oraz odpowiednio wygrzane po wzroście. Jednocześnie prowadzone badania podstawowe własności warstw i stanu domieszek w warstwach oraz badania nad

procedurą uzyskania wysokiej jakości złącz pozwoliło na ich lepsze planowanie, a w konsekwencji na uzyskanie lepszej jakości struktur.

Wzrost ZnO na podłożach GaN daje nam wiele korzyści. Wzrastamy tlenek cynku na podłożu/warstwie o strukturze heksagonalnej, a niedopasowanie sieciowe wynosi w tym przypadku 1.8 % na płaszczyźnie a. Jak wspomniałam we wstępie, w przypadku warstw ZnO domieszkowanych atomami grupy V w celu aktywacji domieszki stosuje się wygrzewanie. Wygrzewając uzyskaną strukturę ZnO/GaN po wzroście nie natrafiamy na efekt dalekozasięgowej dyfuzji domieszki akceptorowej obecnej w warstwie ZnO, np. arsenu, na inne warstwy złącza. Stabilne termicznie podłoże/warstwa GaN będące jednocześnie partnerem typu n, również nie rozdyfundowuje się do warstwy ZnO. Taka redystrybucja domieszki może mieć miejsce np. w przypadku homołączka p-ZnO/n-ZnO i była wcześniej obserwowano w przypadku warstw ZnO wzrastających na podłożach GaAs, będąc w rzeczywistości jedną z metod otrzymywania ZnO: As [48, 83, 84].

W przypadku planowania złącz półprzewodnikowych zawierających warstwy domieszkowane istotna jest kontrola jednorodności domieszkowania tych warstw. Jednorodność domieszkowania i profil głębokościowy domieszek w warstwach ZnO był badany poprzez wykorzystanie spektrometrii masowej jonów wtórnych (SIMS) [H4, H5]. Możemy zauważyć (Rys. 1 w pracy H4; Rys. 1 w pracy H7; Rys. 1 w pracy H5), iż za pomocą epitaksji z wiązek molekularnych możliwe jest jednorodne wprowadzenie domieszki (w przypadku opisywanych badań: arsenu, azotu lub antymonu) do całej grubości warstwy, oraz nie obserwujemy efektu dalekozasięgowej dyfuzji tej domieszki do podłoża GaN. Możemy zatem uzyskać heterozłącza o dobrze zdefiniowanej, ostrej międzypowierzchni. Ponadto, defekty, pułapki i warstwy pośrednie zlokalizowane na interfejsach mogą skutecznie zmniejszyć potencjał aplikacji struktur. Międzypowierzchnia ZnO/GaN [H4, H6] została staranie zbadana poprzez wykorzystanie technik mikroskopowych takich jak mikroskopia skaningowa oraz transmisyjna, w celu przetestowania kluczowych parametrów związanych z chemicznym przygotowaniem podłoża i początkowymi warunkami wzrostu warstw. W przypadku wzrostu na podłożach/warstwach GaN istotne jest odpowiednie przygotowanie chemiczne podłoża do wzrostu i zabezpieczenie go przed utlenianiem i powstaniem na powierzchni GaN nieintencjonalnej warstwy tlenku Ga_2O_3 [85]. W tym celu zastosowano odpowiednie trawienie chemiczne najpierw $\text{H}_2\text{SO}_4:\text{H}_2\text{O}_2$ (1:1) a następnie $\text{NH}_4\text{F}*\text{HF}$ ¹².

Równie ważna jest metoda stosowana do zainicjowania procesu wzrostu ZnO na GaN. Wstępna praca eksperymentalna poświęcona została opracowaniu optymalnej procedury. Procedura ta bazuje na naniesieniu cienkiej metalicznej warstwy Zn na podłoże przed ekspozycją podłoża na tlen i przed rozpoczęciem procedury zapłonu plazmy tlenowej - wydajnego źródła aktywnego tlenu. Istotnymi parametrami tej procedury są: *i*) temperatura osadzania, którą należy tak dobrać, aby uzyskać właściwą przyczepność warstwy Zn *ii*) odpowiednia grubość warstwy metalicznej. Dodatkowo, początkowy etap wzrostu był kontrolowany przy wykorzystaniu techniki RHEED¹³. Po optymalizacji wyżej opisanej procedury, opublikowane wyniki badań TEM potwierdziły brak obecności warstwy

¹² $\text{NH}_4\text{F}*\text{HF}$ -mieszanina fluorku amonu i kwasu fluoro-wowodorowego.

¹³ RHEED- Reflection High Energy Electron Diffraction, czyli odbiciowa dyfrakcja wysokoenergetycznych elektronów. Jest to technika dyfrakcyjna, w której wiązka elektronów o energii od kilku do kilkudziesięciu keV pada na powierzchnię badanej próbki pod kątem od 0° do około 5° do powierzchni próbki, gdzie elektrony ulegają zjawisku dyfrakcji.

nieintencjonalnego tlenku Ga_2O_3 na międzypowierzchni ZnO/GaN (Rys. 3 w pracy H6). Obserwowany jest zatem bezpośredni wzrost ZnO na GaN . Dodatkowo, w tym przypadku badania przełomu próbki metodą SEM oraz dodatkowe badania katodoluminescencji wzdłuż linii z przełomu pokazały, że granica pomiędzy GaN oraz ZnO jest gładka i dobrze zdefiniowana (Rys. 3 w pracy H4). Ponadto, badania dyfrakcji rentgenowskiej ujawniły, że warstwy wzrastane bezpośrednio na GaN są w pełni zrelaksowane oraz wzrost warstwy odbywa się w kierunku osi „c” (Rys. 2 w pracy H6).

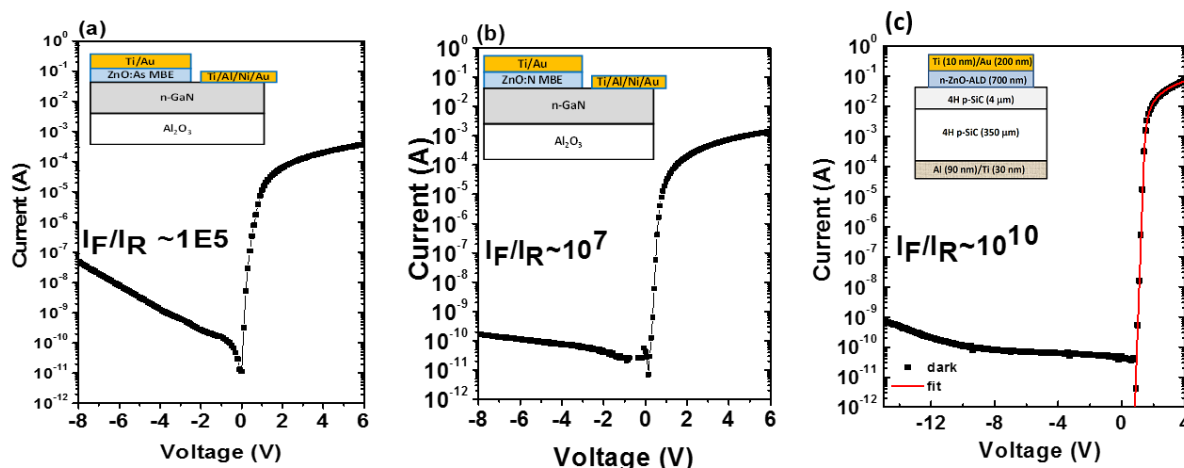
W pracach [H4-H7, H9] badane były złącza zawierające warstwy ZnO domieszkowane atomami grupy V. Wyniki przedstawione w tych publikacjach oparte są na obszernych badaniach prowadzonych równocześnie i dotyczących wygrzewaniem warstw ZnO [H1], jak również prac umożliwiających odpowiednie dobranie stężenia domieszki. Doprowadziło to do dokładnej kontroli międzypowierzchni, dając nam możliwość uzyskania złącz o dobrych parametrach elektrycznych.

W przypadku złącz $\text{ZnO}:\text{As}/\text{n-GaN}$ opisanych w pracy [H4 i H5] współczynnik idealności diod η wyniósł, $\eta=1.4$. Współczynnik prostowania (stosunek prądu płynącego w kierunku przewodzenia I_F^{14} do prądu płynącego w kierunku zaporowym I_R^{15}) wyniósł $I_F/I_R \sim 10^5$. Potencjał wbudowany wyniósł 0.6 V w 300 K (Rys. 2 w pracy H5). Jak wspomniałam we wstępie, w czasie rozpoczynania moich badań dotyczących heterozłączy bazujących na ZnO , znane były doniesienia dotyczące struktur $\text{n-ZnO}/\text{p-GaN}$. W momencie rozpoczynania moich prac nad tym tematem pojawiło się także doniesienie o złączu $\text{ZnO}:\text{As}/\text{n-GaN}$ [86] jednakże w przytoczonej publikacji nie zaprezentowano jego parametrów elektrycznych, a na podstawie prezentowanych wyników charakterystyk prądowo-napięciowych I-V możemy jedynie oszacować, iż współczynnik prostowania dla tego złącza był kilka rzędów wielkości mniejszy niż dla naszych struktur .

W przypadku użycia w złączach warstwy ZnO podwójnie domieszkowanej jednocześnie arsenem i antymonem [H6] pokazano, że proces wygrzewania po wroście może poprawić jakość złącza poprzez obniżenie prądu w kierunku zaporowym przy braku oświetlenia, tzw. prądu ciemnego (patrz Rys. 5 w pracy H6). W przypadku naszych złącz prąd ciemny był na poziomie 10^{-11} A. Niski prąd ciemny pozwala na zastosowanie złączy jako efektywne detektory promieniowania. W przypadku diodowych struktur detektorowych jednym z istotnych parametrów jest różnica pomiędzy prądem ciemnym w kierunku zaporowym oraz prądem jasnym. W przypadku badanych złącz, ze względu na niski prąd ciemny, różnica ta wynosiła zazwyczaj kilka rzędów wielkości dla mocy padającego promieniowania ~ 1 mW. Zatem realizowane struktury okazały się być odpowiednie do wykrywania promieniowania o małym natężeniu.

¹⁴ I_F Prąd w kierunku przewodzenia (z ang. Forward current).

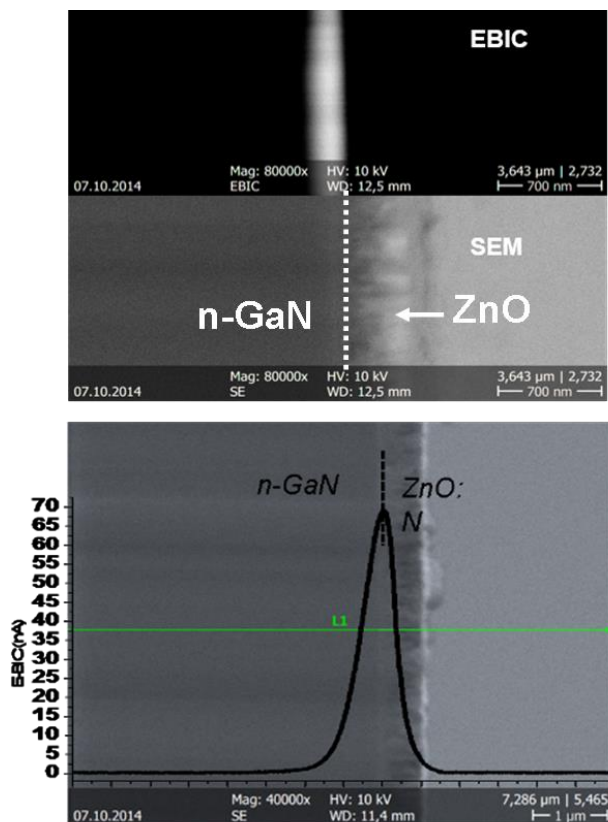
¹⁵ I_R Prąd w kierunku zaporowym (z ang. Reverse current).



Rys. 5. Przykładowe charakterystyki prądowo-napięciowe heterozłączy: (a) ZnO:As/n-GaN (b) ZnO:N/n-GaN (c) ZnO/p-SiC. Rysunek na podstawie prac H4, H7, H8.

Aby uzyskać warstwy ZnO domieszkowanej azotem, jako efektywne źródła azotu wykorzystano komórkę plazmową, zazwyczaj używaną do otrzymania niskoenergetycznych strumieni atomowego azotu, który może być wprowadzony, jako domieszka, w trakcie procesu wzrostu. Do warstwy ZnO wprowadzono azot na poziomie 10^{20} at/cm³ jak zostało to zweryfikowane przez badania SIMS. Wiadomo, że wprowadzanie domieszki do kryształu może powodować pojawianie się defektów punktowych i kompleksów w objętości, które mogą wpływać na ostateczne właściwości warstw i struktur. Luminescencja została wybrana jako główna technika badania charakteru defektów w objętości, jak również celowo wprowadzonych domieszek. Jako przykład, przeanalizowane wyniki luminescencji w funkcji temperatury w pracy H7 (Rys. 2 w pracy H7) pozwoliły na wyznaczenie energii aktywacji domieszki azotu, wyniosła ona 130 meV. Doniesienia dotyczące wartości energii aktywacji domieszki azotowej są nie do końca spójne. We wcześniejszych pracach raportowana wartość energii aktywacji dla akceptora N uzyskana z badań optycznych wyniosła 165 do 248 meV [87–89], podczas gdy wartość uzyskana z pomiarów efektu Halla w funkcji temperatury była mniejsza (90 meV [90] oraz 100 meV [91]). Spośród pierwiastków grupy V, azot uznawany jest jako najbardziej obiecująca domieszka na typ p. Jednakże, wiadomo iż akceptor azotowy może być kompensowany poprzez takie defekty jak luki tlenowe czy kompleksy postaci N_O-Zn_O , gdzie N_O oznacza atom azotu zlokalizowany w miejscu tlenu. Ponadto, N_O jest raczej głębokim akceptorem. Obliczenia teoretyczne pokazują także trudności w uzyskaniu dziurowego typu przewodnictwa wynikające z kompensacji akceptorów azotowych przez molekuly N_2 , wbudowujące się w miejscu anionów O. W związku z tym używanie bardziej reaktywnych źródeł azotu, takich jak plazma azotowa wybrana w przypadku naszych badań, jest korzystne.

Międzypowierzchnia ZnO:N/n-GaN została zbadana dzięki wykorzystaniu połączonych technik badawczych tzn. skaningowej mikroskopii elektronowej (SEM) oraz prądu indukowanego elektronami (E-BIC) (Rys. 6). Badania E-BIC pokazały, iż maksimum sygnału prądu odpowiada międzypowierzchni ZnO:N/n-GaN i potwierdziły, że złącze p-n zlokalizowane jest dokładnie pomiędzy warstwami ZnO i GaN. Jest to unikalny rezultat, nie raportowany wcześniej dla tego typu struktur, potwierdzający obecność oraz lokalizację warstwy zubożonej w złączu i jest on szczególnie ważny w przypadku materiałów, takich jak ZnO, dla których raportowane parametry elektryczne wynikające z wprowadzenia domieszki azotu bądź też innej będącej potencjalnie domieszką na typ p są niespójne.



Rys. 6. Obraz E-BIC oraz SEM, zbierane jednocześnie w tej samej skali, dla złącza ZnO:N/n-GaN.

Skan liniowy E-BIC zbierany wraz z obrazem SEM, maksimum sygnału E-BIC odpowiada międzypowierzchni ZnO/GaN.

W przypadku wygrzewanych struktur złączowych ZnO:N/GaN, uzyskano wysoki współczynnik prostowania I_F/I_R wynoszący 10^7 oraz o bardzo niski prąd ciemny na poziomie 10^{-10} A. Uzyskane złącza miały bardzo dobre parametry elektryczne i można je było zastosować do detekcji promieniowania z zakresu UV. Ponadto, raportowana różnica pomiędzy prądem ciemnym a jasnym (UV 363.8 nm) wyniosła 4 rzędy wielkości (Rys. 5 w pracy H7).

Jak wspominałam wcześniej, jednym z wyzwań współczesnej fizyki struktur półprzewodnikowych jest poszukiwanie struktur pracujących jako selektywne i szybkie detektory promieniowania UV. Aby móc zrealizować to zadanie konieczne jest uzyskiwanie struktur o bardzo dobrych, kontrolowalnych parametrach elektrycznych. Co więcej, w celu wdrożenia nowych i innowacyjnych pomysłów i inicjatyw opisanych we wstępie, takich „Blind to the Optical Light Detectors” czy „Li-Fi” kluczowe znaczenie ma szybka i selektywna detekcja światła.

Opisane w pracach [H4-H7] heterostruktury, w których intencjonalnie domieszkowana warstwa ZnO została wykonana metodą MBE, mogą być wykorzystane do detekcji promieniowania UV. Ponadto tutaj należy zauważyć, że dla wspomnianych złącz udało się uzyskać dużą selektywność widmową. W szczególności, w przypadku struktur ZnO:As/GaN, ZnO:N/GaN, ZnO:AsSb/GaN szerokość połowkowa piku fotoprądu była na poziomie 12-27 nm, a uzyskana selektywność mieści się w czołówce wyników dla struktur detektorowych bazujących na materiałach szerokoprzerwowych. Dzięki zastosowaniu po obu stronach złącza materiałów o szerokiej przerwie energetycznej detekcja promieniowania możliwa była zarówno podczas oświetlania struktur od góry (tzn. od strony warstwy ZnO), jak i od dołu (tzn. od strony podłoża). Warto zauważyć, że z powodu tak wąskich pików detekcji promieniowania możliwa jest obserwacja zmiany położenia maximum piku detekcji przy oświetlaniu struktury od góry oraz od dołu. Piki detekcji był zlokalizowane w 364 nm i 367

nm odpowiednio dla oświetlenia od góry i od dołu (Rys. 6 z pracy[H6]) i tego typu wynik jest stosunkowo rzadko raportowany.

W poszukiwaniu struktur mogących pracować jako selektywne detektory promieniowania UV wykonano także złącza n-ZnO/p-SiC, w których warstwę ZnO n-typu naniesiono w niskiej temperaturze za pomocą techniki ALD. Podłoże SiC (4H) było bezpośrednio przed wzrostem przygotowane chemicznie. W tym przypadku, temperaturę wzrostu tlenku cynku dobrano tak aby uzyskać właściwą koncentrację donorów w warstwie [92] i dobrą jakość krystaliczna warstw (patrz Rys. 1 w pracy H8).

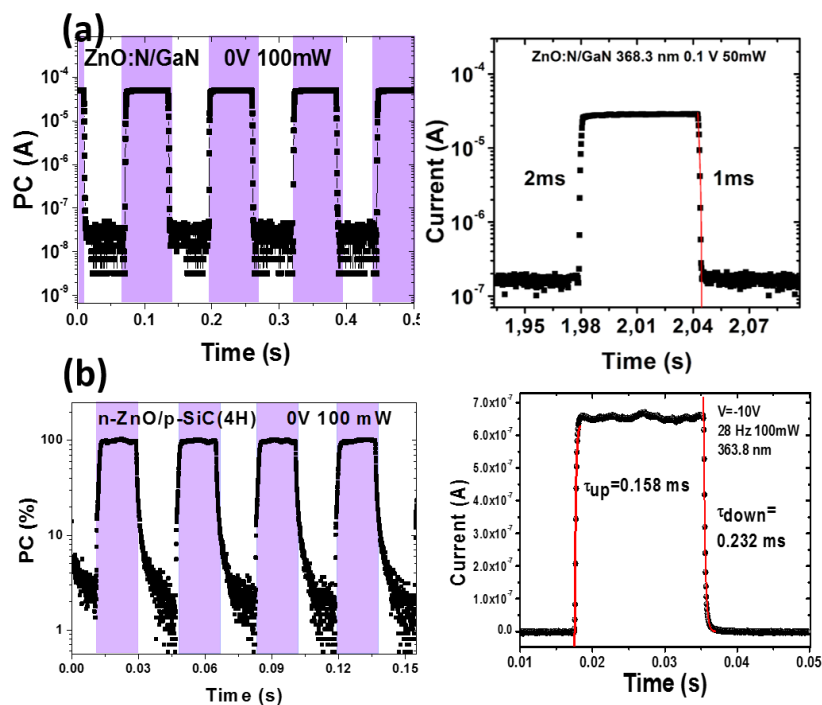
Uzyskano heterozłącza o bardzo wysokim współczynniku prostowania na poziomie $I_F/I_R \sim 10^{10}$ (patrz Rys. 5c) oraz bardzo dobrym współczynniku idealności $\eta=1.17$. Gęstość prądu ciemnego wynosiła 10^{-8} A/cm^2 . Uzyskany wynik był wśród najlepszych dotychczas raportowanych dla struktur ZnO/SiC (4H).

Foto odpowiedź struktur n-ZnO/p-SiC w funkcji energii padającego promieniowania ujawniła 4 wkłady dla energii fotonów około 3.37 eV, 3.23 eV, 3.12 eV, i 2.75 eV. W tym przypadku struktura była oświetlana od tyłu, to znaczy od strony warstwy węgliku krzemu o politypie 4H. W tej konfiguracji, fotony o energii mniejszej niż przerwa energetyczna SiC mogą penetrować całą strukturę, oddziałując z defektami o dużym optycznym przekroju czynnym np. z wtrąceniami innych politypów SiC, bądź też z lukami cynkowymi w warstwie ZnO. Kiedy energia fotonów staje się bliska energii przerwy wzbronionej SiC, następuje absorpcja międzypasmowa w tym materiale i widzimy wkład do fotoprądu w energii 3.23 eV, co odpowiada energii przerwy wzbronionej. Kiedy energia padających fotonów wzrasta, ze względu na fakt, iż mamy do czynienia z materiałem o politypie 4H-SiC o skośnej przerwie energetycznej i absorpcja jest niewielka, nadal jest możliwe aby światło o energii powyżej przerwy ZnO dotarło do interfejsu SiC/ZnO i tam zostało zaabsorbowane. W związku z tym w tym przypadku, najsilniejszy wkład w fotoprądzie w energii 3.37 eV pochodzi zatem od warstwy ZnO. Wkłady w obszarze widzialnym są znacząco mniejsze niż pik detekcji w zakresie UV, różnica wynosi około rząd wielkości porównując piki w energii 3.37 eV oraz 3 eV. Na koniec, w przypadku wyżej wymienionych struktur ZnO/SiC(4H) szerokość połówkowa głównego wkładu fotoprądu wynosiła $\sim 24 \text{ nm}$.

Uzyskane wyniki selektywnej detekcji promieniowania UV dla struktur diodowych opisane w pracach [H4-H8] znajdują się w czołówce wyników światowych uzyskanych dla detektorów bazujących na materiałach szerokoprzerwowych takich jak GaN [93], ZnO oraz SiC. Przy braku użycia filtrów uzyskujemy struktury nieczułe na zakres widzialny i jednocześnie detekujące w bardzo wąskim zakresie widmowym w obszarze ultrafioletu. To toruje drogę do realizacji linijki lub matrycy złącz pracujących na nieco inny zakres widmowy pozwalające nie tylko na detekcję promieniowania UV ale także na ściśle określenie zakresu padającego promieniowania.

Ponadto, z punktu widzenia zastosowania takich złącz jak detektory promieniowania [14], bardzo ważnymi cechami urządzenia są: szybkość reakcji na padające światło i czas niezbędny do powrotu do stanu podstawowego, czyli jego ponowna gotowość do pracy. Czas odpowiedzi struktury detektorowej silnie zależy od jej rodzaju [17], jakości oraz obecności rodzimych jak i wprowadzonych na skutek domieszkowania defektów. Spośród różnych rodzajów struktur półprzewodnikowych złącza p-n oraz złącza p-i-n zalicza się do pracujących najszybciej. Jednakże, w przypadku struktur detektorowych bazujących na ZnO czas odpowiedzi stanowi bardzo często znaczący problem ponieważ powierzchnia tlenku cynku jest niezwykle czuła na gazy. Podczas gdy, czułość powierzchni jest użyteczna do realizacji czujników gazu na bazie ZnO, stanowi ona wyraźną wadę, gdy ten materiał jest używany do wykrywania promieniowania UV, ponieważ może znacznie wpłynąć na czas reakcji struktur detektorowych. Ten efekt jest szczególnie wyraźny w przypadku rozwiązań,

w których powierzchnia ZnO jest wystawiona na działanie zewnętrznej atmosfery, a jednocześnie jej chropowatość jest znacznie zwiększona w celu zmniejszenia odbicia i zwiększenia aktywnego obszaru detektora, jak to ma miejsce w przypadku między innymi nanodrutów ZnO. W takich urządzeniach atmosfera ma istotny wpływ na ogólną charakterystykę elektryczną urządzeń wskutek absorpcji / desorpcji tlenu lub grup OH na powierzchni. W rezultacie, czasy odpowiedzi struktur detektorowych bazujących na wyżej wymienionych obiektach są typowo od 100s do 1s i znacznie zależą od atmosfery w której wykonywano eksperyment [94, 95] – dlatego do komercyjnego zastosowania struktury takie wymagają dodatkowego etapu procesu technologicznego.

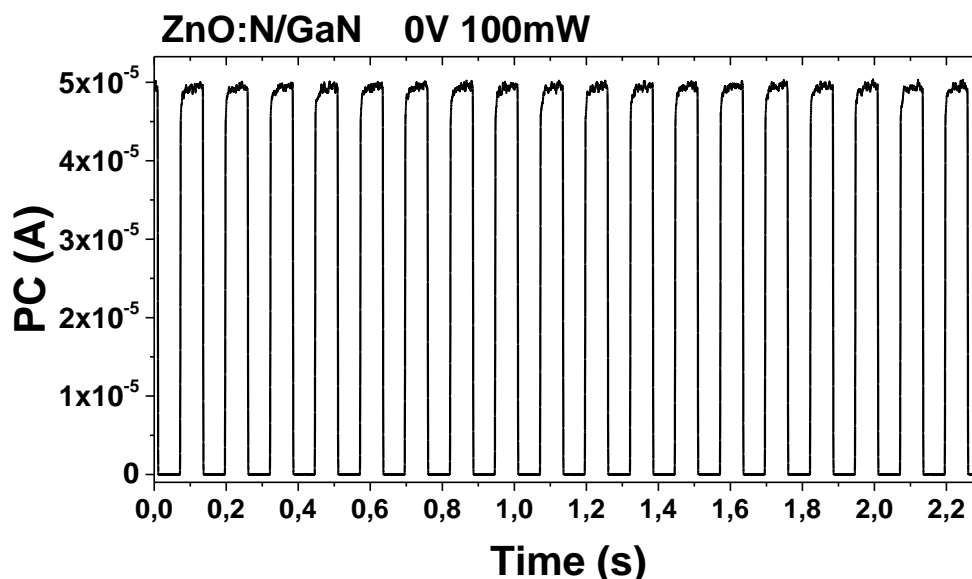


Rys. 7. Przykładowe czasy odpowiedzi struktur detektorowych na światło z zakresu UV (a) dla struktur ZnO:N/n-GaN (b) dla struktur ZnO/p-SiC.

Przeciwnie, w badanych przez nas strukturach diodowych obszar detekcji znajduje się w aktywnym obszarze złącza czyli blisko międzypowierzchni pomiędzy warstwą ZnO a innym szeroko-przerwowym materiałem. Jest on zatem oddzielony przestrzennie od powierzchni struktury a odpowiedź struktury, przedyskutowana szczegółowo dalej, jest silna pomimo braku zabiegów powierzchniowych zwiększających chropowatość powierzchni, a tym samym jest to gotowe do użycia urządzenie.

Ponadto, eksperymentalnie stwierdzono, że czasy odpowiedzi struktur zarówno w próżni jak i w powietrzu, czy też w przepływie gazu azotu są takie same. Pomiary czasu odpowiedzi wykonane zostały przy wykorzystaniu mechanicznego czopowania światła lasera. Dla złączy opisanych w pracach [H4-H8] czasy odpowiedzi są na poziomie 1ms (Rys. 5b w H5; Rys.7).

Stabilność sensora, kolejna kluczowa cecha urządzenia przeznaczonego do wykorzystania jako detektor UV, oceniana jest przez zmianę parametrów czujnika przy jego wielokrotnym przełączeniu ze stanu 'ON' czyli pracuje do stanu 'OFF' czyli nie pracuje/detekuje. Stabilność sensora jest dobra gdy po wielu testach parametry tego czujnika ulegają jak najmniejszej zmianie. W tym sensie uzyskane przez nas struktury możemy uznać za stabilne (Rys. 8).



Rys. 8. Wielokrotna odpowiedź struktury detektorowej, obrazująca jej stabilność, na padające promieniowanie UV, przełączanie układu ze stanu 'ON' do stanu 'OFF'.

Kolejną zaletą zastosowania do detekcji światła struktur złączowych, które zostały zrealizowane, jest możliwość detekcji promieniowania bez przyłożenia zewnętrznego napięcia. Niskie zużycie energii wydłuża czas pracy i obniża całkowite koszty końcowych urządzeń. Ponadto, biorąc pod uwagę fakt że uszkodzenie napromieniowaniem elektronowym w przypadku ZnO jest mniej dotkliwe niż w innych powszechnie stosowanych materiałach półprzewodnikowych, istnieje możliwość zastosowania tego typu struktur w przestrzeni kosmicznej [96]. Biorąc pod uwagę możliwe zastosowania w bezpiecznej komunikacji i w przestrzeni kosmicznej, detektory nie zużywające energii są pożądane. Pionowe fotodiody oparte na heterostrukturach mogą spełnić to wymaganie.

W przypadku detekcji promieniowania kolejnym ważnym aspektem jest możliwość detekcji światła o jak najmniejszym natężeniu. Jakość struktur, a w szczególności wartość prądu ciemnego tzn. prądu płynącego przez złącze w kierunku zaporowym przy braku oświetlenia struktury. Prąd ciemny w badanych złączach był bardzo niski na poziomie 10^{-10} - 10^{-11} A. Tak niski prąd ciemny pozwala na detekcję promieniowania na poziomie $\sim 1 \mu\text{W}$ i nadal różnica pomiędzy prądem ciemnym a prądem jasnym wynosi około rząd wielkości.

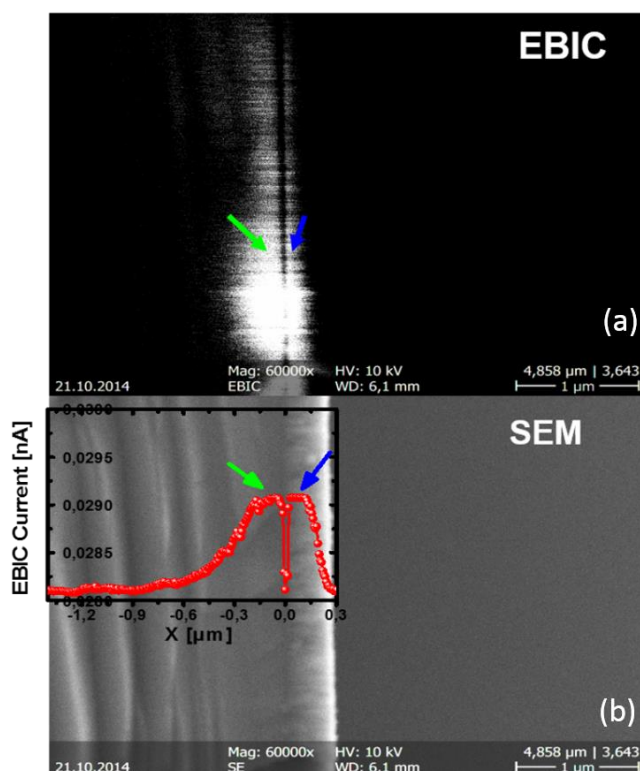
Kontrola procesu wzrostu warstw ZnO, ich domieszkowania oraz procesu wygrzewania po wzroście; odpowiednie przygotowanie powierzchni podłoża a tym samym kontrola międzypowierzchni pozwoliły na uzyskanie wysokiej jakości heterozłączy [H4-H8]. Wysoka jakość struktur w szczególności niski prąd ciemny i wysoki współczynnik prostowania złączy pozwoliły na uzyskanie wysokiej jakości struktur detektorowych. Zaowocowało to w postaci przyznanego patentu nr. patentu: PL 220515, tytuł: *Struktura detektora UV oraz sposób wykonania struktury detektora UV*, oraz w postaci dwu kolejnych zgłoszeń patentowych w tym zakresie badań. Badane heterozłącza uzyskały dwie nagrody na targach innowacyjności: *INTARG* (Katowice) gdzie uzyskały srebrny medal oraz *Brussels Innova* (Bruksela) gdzie uzyskały złoty medal.

4.4.5. Modyfikacja międzypowierzchni i jej wpływ na parametry struktur [H9].

Jedną z metod uzyskiwania wysokiej jakości złącz polega na wprowadzeniu do struktury dodatkowej niezamieszkałej warstwy pomiędzy warstwy o elektronowym i dziurowym typie przewodnictwa. Warstwa taka jest zazwyczaj dodana w celu obniżenia prądu ciemnego w złączu, podniesienia fotoprądu lub zmiany zakresu detekcji struktury lub zwiększenia wydajności elektroluminescencji ze struktury.

Raportowana wartość nieciągłości pasma przewodnictwa dla heterozłącza ZnO/GaN wynosi 0.73 eV [97]. Ograniczanie niedopasowania pasma, korzystne dla zmniejszenia rekombinacji na międzypowierzchni, a także pasywacji stanów międzypowierzchniowych można uzyskać przez wprowadzenie warstwy pośredniej. W przypadku tego typu heterozłączy, różne izolujące przekładki były stosowane głównie w celu poprawy intensywności świecenia złącz takie jak: tlenek magnezu (MgO) [98–100], Al_2O_3 [101, 102] lub izolująca warstwa tlenku cynku *i*-ZnO [103].

Dodanie przekładki może znacznie poprawić jakość złącza, lecz dodatkowo może ona wprowadzić defekty na międzypowierzchni, w obszarze warstwy zubożonej oraz w całej objętości wzrastanej warstwy. Stosowane przekładki nie zawsze są dopasowane pod względem krystalicznym do warstwy ZnO, mogą być to warstwy o znacznie różnych stałych sieci oraz różnej strukturze krystalicznej. W szczególności warstwy izolujące mogą być materiałem amorficznym. Ponadto, jeśli jako warstwę izolacyjną stosuje się materiał amorficzny, to może hamować to wzrost epitaksjalny warstwy tlenku, która rośnie w formie polikrystalicznej.



Rys. 9 (a) Obraz E-BIC oraz (b) SEM (mierzone symultanicznie), wraz ze skanem liniowym E-BIC (linia czerwona) w złączu ZnO:N/ Al_2O_3 /GaN.

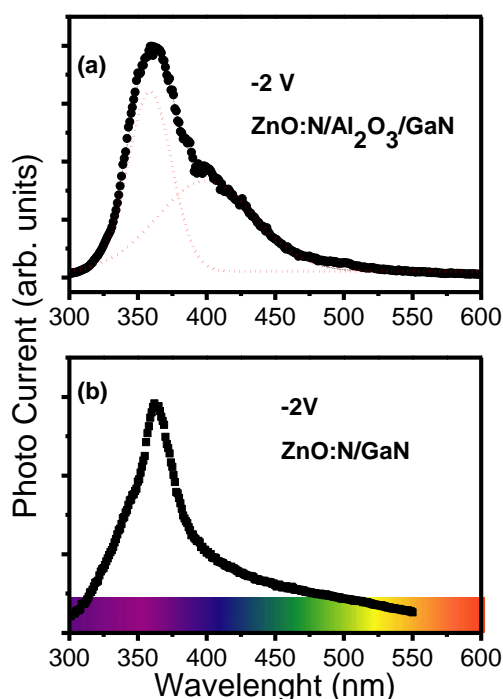
Kiedy prąd indukowany wiązką elektronów wzrasta, wzrasta też ilość elektronów blisko złącza p-i (niebieska strzałka) oraz dziur blisko złącza n-i (zielona strzałka) i fakt ten jest widoczny w obrazie E-BIC jako dwa maksima rozdzielone cienką warstwą izolatora. Rysunek zaczerpnięty z pracy [H9].

Wpływ dodania pomiędzy warstwy ZnO a GaN warstwy izolatora, został przedyskutowany w pracy H9. pomiędzy warstwę ZnO a warstwę GaN wprowadzono cienką amorficzną warstwę Al_2O_3 o grubości do około 10 nm (grubość określona została na podstawie ilości cykli ALD). Warstwa ta wzrastana była w odpowiednio dobranej niskiej

temperaturze przy wykorzystaniu techniki wzrostu ALD. Izolujące właściwości tego typu cienkich, amorficznych warstw zostały wcześniej potwierdzone [104]. W wyniku połączenia dwóch sposobów wzrostu MBE i ALD uzyskano heterozłącza ZnO:N/Al₂O₃/n-GaN o dobrych parametrach elektrycznych. Opublikowane dane [H9] były poprzedzone długimi i szerokimi badaniami dotyczącymi przygotowania podłoża GaN i parametrów wzrostu zarówno warstwy izolatora metodą ALD, jak i warstwy ZnO metodą MBE.

Uzyskane, w wyniku połączenie dwu metod wzrostu MBE oraz ALD, złącza ZnO:N/Al₂O₃/GaN mają dobre parametry elektryczne. Na podstawie badań charakterystyk prądowo napięciowych stwierdzono, że współczynniki prostowania dla tych złącz wyniósł $\sim 10^6$. Prąd ciemny był bardzo niski na poziomie 10^{-11} A, jednakże współczynniki idealności dla złącz z przekładką były większe niż w przypadku złącz bez przekładki tzn. był on wyższy niż 2. Napięcie przebicia było większe niż 10V, napięcie otwarcia zaś ~ 4 V.

Wiadomo, że obecność warstwy izolującej może modyfikować obszar zubożony w złączu oraz wprowadzać inny rodzaj defektów do warstw/struktur. Modyfikacja obszaru zubożonego oraz inne rodzaje defektów są przyczyną obserwowanych zmian w zakresie detekcji promieniowania struktur, w stosunku do złącz bez przekładki. Zostało to eksperymentalnie udowodnione w naszych strukturach, kiedy przekładka jest obecna w strukturze obserwujemy dodatkowy pik detekcji w okolicy 400 nm (Rys. 10). Ze względu na cienką warstwę izolującą pomiędzy warstwami tlenku i azotku, w odróżnieniu do struktur bez przekładki, detekcja promieniowania możliwa jest przy przyłożeniu do struktury zewnętrznego napięcia. Warstwa Al₂O₃ rozdziela nośniki między n-GaN/Al₂O₃ i Al₂O₃/p-ZnO. Pod wpływem przyłożonego napięcia, nośniki albo tunelują przez barierę albo mogą przeskakiwać nad barierą Al₂O₃, co może skutkować także zwiększeniem czasów reakcji detektorów i w badanym przypadku są one na poziomie kilkudziesięciu ms.



Rys. 10. Przykładowe zakresy detekcji struktur diodowych:

(a) ZnO:N/Al₂O₃/GaN napięcie wsteczne -2 V,

(b) ZnO:N/GaN napięcie wsteczne -2 V.

Tego typu struktury nie były badane wcześniej pod kątem użycia ich jako detektory promieniowania UV. Obecność warstwy izolującej Al₂O₃ w heterostrukturze została potwierdzona badaniami E-BIC, (Rys. 9) co jest wynikiem unikalnym, potwierdzającym

zarówno lokalizację złącza jaki i jego modyfikację na skutek dodania przekładki izolującej. Profil E-BIC z przekroju przedstawiony na Rys. 9 (b) jako czerwona linia jest charakterystyczny dla złącz p-i-n. Jest oczywiste, że złącze istnieje na międzypowierzchni i jest ono ciągle.

Modyfikując między powierzchnię poprzez dodanie przekładek izolujących w heterozłączach możemy zatem zmieniać ich zakres detekcji [H9][105]. Część wyników badań dotyczących struktur z przekładką zostało również opatentowanych nr. patentu: P.403520, tytuł: *Struktura p-i-n detektora UV oraz sposób wykonania tej struktury*, a prace dotyczące wykorzystania innych przekładek są kontynuowane.

4.4.6. Podsumowanie osiągnięć prezentowanych w cyklu prac [H1-H9]

Możliwość kontrolowania fizycznych właściwości nowoczesnych materiałów, dzięki zbadaniu ich struktury krystalograficznej, ułożenia atomów w objętości próbki oraz na powierzchni, uwzględniając defekty punktowe, także te wynikające z domieszkowania, ma zasadnicze znaczenie zarówno z punktu widzenia nauk podstawowych, jak i przyszłych zastosowań. Aby zrozumieć mechanizmy zmian właściwości materiałów wynikające z wprowadzania atomów domieszek, musimy poznać lokalne otoczenie tych pierwiastków w skali atomowej. Przewodnictwo intencjonalnie domieszkowanych warstw ZnO zależy silnie od stanu domieszki. Lokalne otoczenie atomu domieszki zależy może od warunków wzrostu, wygrzewania czy dodatkowego domieszkowania, co uzasadnia celowość prowadzenia wszechstronnych badań w tym kierunku. W przypadku trudnego do uzyskania domieszkowania ZnO na typ p to ogólne stwierdzenie ma szczególną wagę ze względu na istniejącą w literaturze znaczną różnorodność modeli budowy centrów akceptorowych, które mogą być odpowiedzialne za przewodnictwo typu p. Lepsze eksperymentalne udokumentowanie budowy przynajmniej niektórych z nich przyczyni się do uporządkowania przynajmniej fragmentu wiedzy na temat skutecznego i powtarzalnego domieszkowania na typ p. Będzie to miało bardzo istotne znaczenie dla kontrolowanego uzyskiwania złącz p-n o dobrych parametrach elektrycznych. Zaprojektowanie, wykonanie i zbadanie złącz zawierających warstwy ZnO jest kluczowe dla ich przyszłych zastosowań. Jednym z takich zastosowań jest poszukiwanie struktur detekujących bez zużycia energii w wąskim zakresie widmowym w obszarze promieniowania UV oraz możliwość kontrolowania zakresu detekcji tych struktur. W tym przypadku użycie heterozłączy, bazujących na materiałach szerokoprzerwowych, jest wysoce zasadne. Przeprowadzone przeze mnie prace badawcze wnoszą istotny wkład w powtarzalne i dobrze kontrolowane otrzymywanie wysokiej jakości diodowych struktur detektorowych na zakres UV, oraz w zrozumienie wbudowywania się domieszek grupy V (N, As, Sb) do sieci krystalicznej ZnO.

Do najważniejszych osiągnięć moich badań zaliczam:

- **Wykazanie zmiany stanu chemicznego/ulokowania w sieci krystalicznej domieszki arsenu w ZnO w wyniku zmiany atmosfery wygrzewania poprzez skuteczne wykorzystanie wysoko-rozdzielczej fotoelektronowej spektroskopii rentgenowskiej (XPS) [H1].**

Obserwacja zmiany stanu domieszki wraz ze zmianą atmosfery wygrzewania warstw wyjaśnia stwierdzoną w wielu pracach dotyczących domieszkowania ZnO konieczność aktywacji domieszki As poprzez zastosowanie wygrzewania warstw ZnO po wzroście.

Zastosowanie wysokorozdzielczej metody XPS do obserwacji lokalnego otoczenia arsenu, pozwoliło na zaobserwowanie kilku wkładów w widmie As3d, pochodzących od różnych centrów arsenowych. Mianowicie, zostało pokazane, że w przypadku warstw MBE część atomów arsenu wbudowuje się w miejsce cynku, część w postaci kompleksu $As_{Zn}-2V_{Zn}$, a tylko niewielka część (kilka procent) zajmuje miejsce tlenu. Ponadto stwierdzono, że wzajemne natężenie poszczególnych wkładów zależy od atmosfery wygrzewania. Wynik ten pokazuje, iż sprawa wbudowywania się arsenu w matrycę ZnO jest bardzo złożona i żaden dotychczasowy model teoretyczny nie opisuje w pełni, jak arsen wbudowuje się w matrycę tlenku. Pokazanie złożonej natury wbudowania się atomów arsenu w ZnO poprzez wysokorozdzielcze badania XPS, jest bardzo ważnym wynikiem w zakresie badań dotyczących domieszkowania na typ *p*. Zmiana sposobu wbudowywania się domieszki w wyniku wygrzewania odzwierciedla się zarówno w badaniach XPS jak też w widmach luminescencji pochodzących z różnie wygrzewanych struktur. We wszystkich zmierzonych próbkach zaobserwowaliśmy silną emisję, którą przypisujemy rekombinacji swobodnych elektronów z dziurami związanymi na akceptorach, a także emisję związaną z parami donor-akceptor. Sugeruje to wysoką koncentrację akceptorów As we wszystkich próbkach. Jednakże różne położenia pików i ich względne intensywności sugerują różne stany akceptora w badanych próbkach. Szczegółowe badania stanu As3d stanowią ważny wkład do dyskusji dotyczącej wbudowywania się tej domieszki w ZnO.

- **Wykazanie wpływu różnych warunków wzrostu ZnO na stan domieszki As, na podstawie badań zawartych w pracach [H1, H2].**

Występujące w kryształach rodzime defekty i zanieczyszczenia mogą mieć znaczący wpływ na sposób wbudowania się domieszki w matrycę ZnO. W pracach [H1] i [H2] zbadano stan domieszki As w warstwach wykonanych odpowiednio metodą MBE oraz ALD. Porównując wyniki XPS dla próbek otrzymanych różnymi metodami, obserwujemy wyraźne różnice we wzajemnej intensywności wkładów do widma As3d, pochodzących od atomów arsenu różnie wbudowanych w strukturę. W przypadku warstw ALD wkład od atomów arsenu wbudowanego w miejscu tlenu jest porównywalny z wkładem od arsenu wbudowanego w miejscu cynku lub w postaci kompleksu $As_{Zn}-2V_{Zn}$, podczas gdy w próbkach MBE wkład od arsenu w miejscu tlenu wynosi kilka procent. Pokazuje to, że sposób wbudowania się domieszki As dla tych warstw jest wyraźnie inny, a co za tym idzie, wyciągnięcie ogólnych wniosków dotyczących lokalnego otoczenia domieszki As w ZnO jest bardzo złożone, gdyż otoczenie tej domieszki zależy może także od warunków wzrostu matrycy.

Na podstawie wyników zawartych w pracy [H2] stwierdzamy także, iż w przypadku warstw ALD wykonanych w niskich temperaturach i wygrzewanych po wzroście w As celowe jest zwiększenie temperatury wygrzewania, gdyż zwiększamy wtedy ilość atomów As wbudowanych w strukturę w postaci kompleksu $As_{Zn}-2V_{Zn}$, który to kompleks wydaje się być dominującym akceptorem odpowiedzialnym za dziurowy typ przewodnictwa. Zmiana stanu arsenu obserwowana w badaniach XPS widoczna jest także w niskotemperaturowej luminescencji w postaci pojawienia się pików akceptorowych w próbkach wygrzanych w wyższej temperaturze.

- **Wykazanie wpływu dodatkowego domieszkowania atomami grupy V na stan domieszki arsenu [H3].**

Badania XPS wykonane zostały na dedykowanej, unikalnej serii próbek ZnO podwójnie i potrójnie domieszkowanych atomami grupy V. Bezpośrednia zmiana

stanu arsenu na skutek domieszkowania innymi atomami grupy V nie była dotychczas raportowana. Ten oryginalny wynik, pokazujący zmianę intensywności wkładów w widmie As3d wraz z dodaniem Sb oraz N, potwierdza, iż dodatkowe domieszkowanie akceptorami może prowadzić do stabilnego i efektywnego uzyskiwania p-typu w ZnO. Istotne jest, że dodatkowe domieszkowanie atomami grupy V zwiększa koncentrację atomów As wbudowanego w kompleksie $As_{Zn}-2V_{Zn}$ zarówno w próbkach „as grown”, jak i próbkach wygrzanych. Biorąc pod uwagę fakt, że badane w pracy [H3] domieszki (As, Sb, N) nie wbudowują się w prosty sposób podstawieniowy, są to ważne wyniki a zagadnienie to nie znalazło jeszcze rozwiązania teoretycznego. Stanowią one bezpośredni dowód na możliwość poprawy skuteczności domieszkowania dzięki zastosowaniu tzw. „dual acceptor doping” i stanowią wartościowy wkład do wiedzy dotyczącej podwójnego domieszkowania ZnO akceptorami.

- **Wykonanie wysokiej jakości struktur diodowych zawierających warstwy ZnO pojedynczo i podwójnie domieszkowane atomami grupy V i zbadanie ich właściwości [H4-H7].**

Wyniki badań zawarte w pracach [H1] i [H3], dotyczące warstw MBE ZnO domieszkowanych atomami grupy V, zostały wykorzystane do wykonania wysokiej jakości heterozłączy o bardzo wysokich współczynnikach prostowania na poziomie 10^5-10^7 . Uzyskane współczynniki prostowania są jednymi z najwyższych raportowanych w literaturze dla tego typu struktur. Osiągnięcie tego wyniku było możliwe dzięki zbadaniu procesu i opracowaniu procedury wygrzewania po wzroście warstw domieszkowanych. Istotna w tym przypadku okazała się wiedza dotycząca wygrzewania domieszkowanych warstw po wzroście [H1]. W przypadku wzrostu domieszkowanych warstw ZnO na warstwach GaN, będących jednocześnie partnerem typu *n*, uzyskujemy złącza o napięciach otwarcia od 1.5V do 3V i napięciach przebicia większych niż -10V. Otrzymane struktury charakteryzowały się niskim prądem ciemnym $\sim 10^{-10}$ A, porównywalnym lub mniejszym niż raportowane wartości dla niektórych komercyjnie dostępnych detektorów diodowych – na GaN¹⁶. Tak niski prąd ciemny pozwala na detekcję promieniowania o bardzo małym natężeniu. W przypadku badanych złącz potwierdziłam w pracy [H7] położenie warstwy zubożonej na międzypowierzchni ZnO:N/GaN. Zaobserwowanie położenia warstwy zubożonej za pomocą badań E-BIC jest wynikiem dotychczas nieraportowanym dla tego typu heterostruktur, potwierdzającym jednocześnie istnienie złącza dokładnie na międzypowierzchni ZnO/GaN.

- **Uzyskanie wysoce selektywnej detekcji promieniowania UV na heterozłączach zawierających warstwy ZnO [H4-H8].**

Zastosowanie w złączu dwóch materiałów szeroko-przerwowych (ZnO, GaN lub SiC), różniących się nieznacznie szerokością przerwy energetycznej, pozwoliło na uzyskanie spektralnie selektywnych struktur detektorowych na zakres promieniowania UV. Uzyskane szerokości piku detekcji na poziomie od kilkunastu do kilkudziesięciu nanometrów jest wynikiem porównywalnym z najlepszymi selektywnymi detektorami UV, bazującymi na materiałach szerokoprzerwowych. Ponadto, wysoką selektywność detekcji uzyskano bez użycia dodatkowych filtrów, co jest konieczne w przypadku np.

¹⁶ http://itme.host.migomedia.com/tl_files/Oferta%20szczegolowa/Nowe_Karty/3.pdf
<http://www.eoc-inc.com/genicom/GUVA-T11GD.pdf>

detektorów krzemowych. Zastosowanie struktur złączowych *p-n* pozwoliło na detekcję promieniowania bez przyłożenia dodatkowego zewnętrznego napięcia, a uzyskane różnice pomiędzy prądem ciemnym i jasnym wynosiły kilka rzędów wielkości. Istotnym w tym przypadku była bardzo niska wartość prądu ciemnego na poziomie $\sim 10^{-10}$ A. W pracy nad wysokiej jakości heterozłączami istotne było odpowiednie przygotowanie/zdefiniowanie międzypowierzchni tak, aby powstało na niej jak najmniej defektów. Zastosowanie po obu stronach złącza materiałów o szerokiej przerwie energetycznej (ZnO oraz GaN lub SiC) pozwoliło na detekcję promieniowania zarówno przy oświetlaniu struktur od dołu (podłoża) jaki i od góry. Zmierzone czasy odpowiedzi dla opracowanych struktur złączowych na padające promieniowanie UV były na poziomie 1 ms i są to wyniki plasujące się w czołówce wyników dla detektorów bazujących na ZnO (tabela 1 w pracy [106]), przy czym uzyskane wartości ograniczone były użyciem ciągłego źródła światła czopowanego mechanicznie.

Podsumowując to osiągnięcie: w wyniku prowadzonych prac udało się uzyskać i scharakteryzować wysoce selektywne i szybkie struktury detektorowe zawierające warstwy ZnO. Biorąc pod uwagę fakt, iż ZnO w porównaniu z Si, GaAs i GaN jest bardziej odporny na promieniowanie radiacyjne, detektory tego typu mogą znaleźć zastosowanie w pracy na dużych wysokościach i w kosmosie.

- **Pokazanie możliwości zmiany zakresu detekcji struktur diodowych poprzez modyfikację międzypowierzchni polegającej na dodaniu przekładki izolującej [H9].**

W przypadku wysoce selektywnej detekcji promieniowania UV sytuacja, w której ZnO jest połączone z innym szeroko-przerwowym półprzewodnikiem, działającym jako dodatkowy „filtr”, jak to ma miejsce w przypadku struktur ZnO/GaN i ZnO/SiC, jest bardzo obiecująca. Jednakże w takich heterostrukturach nieciągłość pasm stanowi istotny problem. W przypadku ZnO/GaN, raportowana wartość niedopasowania pasma przewodnictwa wynosi ~ 0.73 eV [8]. Redukcja nieciągłości pasm korzystna dla zmniejszenia rekombinacji na międzypowierzchni, jak również pasywacji stanów międzypowierzchniowych może być uzyskana poprzez dodanie odpowiedniej przekładki. Zastosowanie przekładek izolujących z materiałów o przerwie energetycznej szerszej niż w ZnO i GaN powoduje, iż nie wprowadzamy warstwy absorbującej światło w o energii poniżej zakresu ultrafioletu, więc detekcja promieniowania UV jest nadal możliwa zarówno w przypadku oświetlania struktur od góry jak i od dołu. Struktury heterozłączowe ZnO/GaN zawierające przekładki Al_2O_3 nie były wcześniej charakteryzowane pod względem ich potencjalnego zastosowania w detekcji promieniowania UV. W wyniku przeprowadzonych badań i połączenia dwu metod wzrostu MBE i ALD, uzyskaliśmy złącza *p-i-n* o bardzo dobrych parametrach elektrycznych, zawierające domieszkowane atomami grupy V warstwy ZnO, a obecność cienkiej ciągłej warstwy izolatora Al_2O_3 została potwierdzona w badaniach E-BIC, co jest niezwykle ważnym i unikalnym wynikiem wcześniej nieraportowanym dla heterostruktur *p-i-n*. Zaobserwowaliśmy zmianę zakresu detekcji tychże złącz, w stosunku do złącz bez przekładek izolujących, co również było wynikiem wcześniej nie opisanym. Szczegółowe badania międzypowierzchni i jej wpływu na parametry struktury stanowią znaczny wkład do planowania konstrukcji detektorowych struktur diodowych mogących znaleźć zastosowania komercyjne.

Kończąc to podsumowanie chciałabym podkreślić mój znaczący wkład w cyklu prac, przedstawionych tu jako osiągnięcie habilitacyjne.

W pracach [H1, H3] mój wiodący wkład polegający na zaplanowaniu i wykonaniu dedykowanej serii próbek metodą MBE, zaplanowaniu serii wygrzewań i eksperymentów w tym badań XPS, interpretacji uzyskanych wyników XPS i PL oraz przygotowania publikacji. W pracy [H2] uczestniczyłam aktywnie w interpretacji wyników XPS oraz miałam wiodący wkład w opisie i interpretacji wyników PL, a także brałam znaczący udział w przygotowaniu publikacji.

Badania XPS wykonane zostały w Instytucie Chemii Fizycznej PAN w ramach zaplanowanej współpracy z ICHF PAN w kierowanym przeze mnie grantem NCN – pt.: *"Badanie właściwości domieszek akceptorowych grupy V i ich wzajemnego wpływu na siebie w heterostrukturach Zn(Mg)O/GaN"*.

W pracach [H4 – H9] mój znaczący wkład polegał na tym, iż wykonałam i zaplanowałam wszystkie badania fotoprądu począwszy od prac nad zaplanowaniem i budową układu pomiarowego, wykonaniu i zaplanowaniu serii eksperymentów, skończywszy na analizie i opisie wyników pomiarowych.

W pracach [H1, H3 - H7, H9] kierowałam pracami, począwszy od pomysłu na doświadczenie, samodzielnym wykonaniu i zaplanowaniu rodzaju struktur, zaplanowaniu ich processingu termicznego oraz na interpretacji znacznej części wyników eksperymentalnych i przygotowaniu publikacji.

Rozwój badań nad tlenkiem cynku spowodował powstanie ogromnej literatury naukowej, w której liczba publikacji przekroczyła 50 000 pozycji. Pomimo to istnieją w tym temacie ciągle obszary stosunkowo słabo zbadane. Jednym z istotnych kierunków badań zarówno dla fizyki jak i technologii oraz zastosowań ZnO jest sposób wbudowywania się domieszek akceptorowych w strukturę. Istotny jest także związek pomiędzy własnościami warstw wynikającymi z istniejących w nich, także na skutek domieszkowania defektów oraz jakością struktur półprzewodnikowych zawierających wspomniane warstwy ZnO. Publikacje będące przedmiotem tej habilitacji przyczyniły się do częściowego wyjaśnienia i pogłębienia wiedzy dotyczącej domieszkowania warstw ZnO akceptorami w kierunku ich zastosowań. Znalazło to wyraz w akceptacji prac w międzynarodowych czasopismach naukowych, zaproszeń do wystąpień na konferencjach międzynarodowych oraz w cytowaniach.

Innym istotnym aspektem jest wykorzystanie badań nad właściwościami warstw i jakością międzypowierzchni do uzyskania wysokiej jakości złącz półprzewodnikowych, niezbędnych w wielu zastosowaniach elektronicznych. Znaczącym wynikiem jest uzyskanie wysokiej jakości złącz ZnO/GaN i ZnO/SiC, posiadających bardzo wysokie współczynniki prostowania, pozwalających na ewentualne zastosowanie ich w urządzeniach optoelektronicznych. Jednym z takich zastosowań są detektory promieniowania ultrafioletowego. Uzyskane wyniki dotyczące złączowych struktur zawierających warstwy ZnO pokazały nowe możliwości w konstrukcji diodowych detektorów promieniowania, które charakteryzują się bardzo wąskim zakresem detekcji.

Opanowanie procesu wzrostu, domieszkowania i obróbki termicznej dedykowanych warstw ZnO pozwoliło na uzyskanie struktur, w których parametry takie jak: niski prąd ciemny, wysoka selektywność, duża różnica między prądem ciemnym i jasnym czy wysoki współczynnik prostowania były znacznie lepsze niż dotychczas uzyskiwano dla podobnych systemów. W rezultacie pozwoliło to na wykonanie wysokiej jakości złączy mogących pracować jako efektywne i szybkie detektory UV i doprowadziło do rozwoju tego kierunku badań. Sposób wykonywania wyżej wymienionych struktur został opatentowany i obecnie posiadamy dwa patenty na struktury detektorowe.

5. Omówienie pozostałych osiągnięć naukowo-badawczych

5.1 Opis dorobku naukowego nie związanego z tematem habilitacji

W czasie trwania studiów magisterskich na wydziale Fizyki Uniwersytetu Warszawskiego a dokładnie podczas wykonywania końcowych eksperymentów i spisywania pracy magisterskiej, rozpocząłam staż w Instytucie Technologii Elektronowej. W trakcie odbywania stażu zajmowałam się pracą w laboratorium Epitaksji z Wiązek Molekularnych (MBE). Moim opiekunem naukowym był dr hab. Kazimierz Regiński. Jednocześnie wykonywałam pracę magisterską. W ramach pracy magisterskiej zajmowałam się pomiarami fotoprądu w próbkach GaInAs/GaAs zawierających kropki kwantowe. Wyniki pracy magisterskiej zostały częściowo opublikowane w [N1]. Po ukończeniu i obronieniu pracy magisterskiej na Uniwersytecie Warszawskim pod kierunkiem dr hab. Krzysztofa Korony pt. „*Wpływ światła na przewodnictwo struktur zawierających kropki kwantowe*” rozpoczęłam studia doktoranckie w Instytucie Fizyki Polskiej Akademii Nauk.

Słuchaczką Studium Doktoranckiego w Instytucie Fizyki PAN byłam w latach 2001 – 2008. Temat mojego doktoratu dotyczył wytwarzania warstw ZnO oraz ZnMnO poprzez wygrzewanie termiczne materiałów wyjściowych bazujących na cynku. Jako materiały wyjściowe zastosowałam metaliczny Zn, tellurek cynku ZnTe, tellurek cynku z manganem ZnMnTe, azotek cynku Zn₃N₂ oraz antymonek cynku Zn₃Sb₂. Materiały wyjściowe były wygrzewane metodą RTA, w związku z czym uzyskiwano na powierzchni warstwę ZnO. W zależności od rodzaju materiału wyjściowego i zastosowanego podłoża uzyskałam cienkie warstwy ZnO domieszkowane N, N+As, As bądź Sb. Część próbek wyjściowych oraz wygrzewania odbywały się dzięki współpracy z ITE z dr hab. Elianą Kamińską. Obecność warstwy tlenku oraz jej jakość krystaliczna potwierdzona została badaniami dyfrakcji rentgenowskiej [N2, N3].

W czasie trwania doktoratu samodzielnie wykonałam metodą MBE warstwy ZnTe oraz ZnMnTe. Poszukiwałam metody uzyskania metastabilnej fazy wurcytowego ZnTe, w tym celu wykonywałam wzrosty na buforze MnTe o strukturze NiAs. Wyniki prac nad materiałem wyjściowym zaowocowały pracami dotyczącym wzrostu i własności warstw MnTe w heksagonalnej strukturze NiAs [N4-N6]. Obecnie tematyka ta cieszy się ponownie zainteresowaniem, a praca [N4] została zacytowana w Nature Communication [107]. W czasie studiów doktoranckich zajmowałam się głównie badaniami optycznymi warstw ZnO uzyskanych metodą utleniania termicznego. Wykonane prze zemnie dokładne pomiary luminescencyjne pozwoliły na obserwację kilku przejść optycznych związanych z obecnością domieszek oraz na oszacowanie ich energii aktywacji [N7, N8]. W szczególności w okolicy energii 3.31 eV zaobserwowałam dwa piki inaczej zachowujące się w funkcji temperatury w odróżnieniu od większości prac raportujących w tym zakresie jeden szeroki pik.

Badalam także własności magnetoptyczne półmagnetycznych warstw Zn_{1-x}Mn_xO [N9, N10]. Uzyskane w moich badaniach całki wymiany były znacznie niższe niż przewidziane teoretycznie [108]. Były to tego typu pierwsze doniesienia na świecie, które następnie potwierdziły się dla innych systemów takich jak ZnCoO, GaFeN [109, 110]. Uzyskane w mojej pracy całki wymiany znalazły się w monografii dotyczącej półprzewodników półmagnetycznych [111]. Po zakończeniu prac nad doktoratem zajmowałam się badaniami warstw ZnO wykonanymi metodą ALD ze szczególnym uwzględnieniem ich własności optycznych, co zaowocowało cyklem prac [N11-N16]. Uczestniczyłam także w pracach dotyczących wzrostu i charakteryzacji drutów i studni kwantowych [N17-N21], w

szczegółności brałam udział w badaniach dotyczących studni i drutów kwantowych wykonywanych techniką MBE zarówno na polarnych jak i niepolarnych kierunkach wzrostu .

[N1] “*Dynamics of photoexcited carrier in GaInAs/GaAs quantum dots*” **E. Ilczuk**, K.P. Korona, A. Babiński, J. Kuhl Acta. Phys. Pol. A 100 (3); 379-386 (2001).

[N2] “*P-type conducting ZnO: fabrication and characterisation* “ E. Kamińska, A. Piotrowska, J. Kossut, R. Łukasiewicz, A. Barcz, R. Jakiela, E. Dynowska, **E. Przeździecka**, M. Aleszkiewicz, P. Wojnar, E. Kowalczyk Physica Status Solidi C-Current Topics in Solid State Physics 2 , 1119-1124 (2005).

[N3] “*Transparent p-type ZnO films obtained by oxidation of sputter-deposited Zn₃N₂*“ E. Kamińska, A. Piotrowska, J. Kossut, A. Barcz, R. Butkute, W. Dobrowolski, E. Dynowska, R. Jakiela, **E. Przeździecka**, R. Łukasiewicz, M. Aleszkiewicz, P. Wojnar, E. Kowalczyk SOLID STATE COMMUNICATIONS 135 , 11-15 (2005).

[N4] “*MnTe and ZnTe grown on sapphire by molecular beam epitaxy*” **Przeździecka E.** , Dynowska E. , Paszkowicz W. , Dobrowolski W. , Kępa H. , Majkrzak C. , Giebultowicz T.M. , Janik E. , Kossut J. Thin Solid Films 516, 4813–4818 (2008).

[N5] “*The crystallographic structure of thin Mn-rich ZnMnTe layers grown by molecular beam epitaxy*” E. Dynowska, **E. Przeździecka** JOURNAL OF ALLOYS AND COMPOUNDS 401 , 265-271 (2005).

[N6] “*Structural properties of MnTe, ZnTe Structural properties of MnTe, ZnTe, and ZnMnTe , and ZnMnTe*” N.G. Szwacki, **E. Przeździecka**, E. Dynowska, P. Bogusławski, J. Kossut ACTA PHYSICA POLONICA A 106 , 233-238 (2004).

[N7] „*Photoluminescence study of p-type ZnO : Sb prepared by thermal oxidation of the Zn-Sb starting material*” **E. Przeździecka**, E. Kamińska, I. Pasternak, A. Piotrowska, J. Kossut PhysRevB.76, 193303 (2007)

[N8] “*Photoluminescence study and structural characterization of p-type ZnO doped by N and/or As acceptors*” **E. Przeździecka**, E. Kamińska, K. Korona, E. Dynowska, W. Dobrowolski, R. Jakiela, Ł. Kłopotowski, J. Kossut SEMICONDUCTOR SCIENCE AND TECHNOLOGY 22 , 10-14 (2007).

[N9] “*p-type ZnO and ZnMnO by oxidation of Zn(Mn)Te films*” **E. Przeździecka**, E. Kamińska, E. Dynowska, W. Dobrowolski, R. Jakiela, Ł. Kłopotowski, M. Sawicki, M. Kiecana, J. Kossut PHYSICA STATUS SOLIDI C - CURRENT TOPICS IN SOLID STATE PHYSICS, VOL 3, NO 4 , 988 (2006).

[N10] “*Magneto-optical properties of the diluted magnetic semiconductor p-type ZnMnO*” **E. Przeździecka**, E. Kamińska, M. Kiecana, M. Sawicki, Ł. Kłopotowski, W. Pacuski, J. Kossut SOLID STATE COMMUNICATIONS 139 , 541-544 (2006).

[N11] “*ZnO grown by atomic layer deposition: A material for transparent electronics and organic heterojunctions*” E. Guziewicz, M. Godlewski, T. Krajewski, L. Wachnicki, A. Szczepanik, K. Kopalko, A. Wójcik-Głodowska, **E. Przeździecka**, W. Paszkowicz, JOURNAL OF APPLIED PHYSICS ,105 , 122413 (2009).

- [N12] “*Vertically stacked non-volatile memory devices - material considerations*” M. Godlewski, E. Guziewicz, J. Szade, A. Wojcik-Głodowska, Ł. Wachnicki, T. Krajewski, K. Kopalko, R. Jakięła, S. Yatsunenko, **E. Przeździecka**, P. Kruszewski, N. Huby, G. Tallarida, S. Ferrari MICROELECTRONIC ENGINEERING , 85 , 2434-2438 (2008).
- [N13] “*Characterization of ZnO Films Grown at Low Temperature*” **E. Przeździecka**, T. Krajewski, Ł. Wachnicki, A. Szczepanik, A. Wojcik-Głodowska, S. Yatusnenko, E. Łuskaowska, W. Paszkowicz, E. Guziewicz, M. Godlewski ACTA PHYSICA POLONICA A 114 , 1303-1310 (2008).
- [N14] “*ZnO by ALD - Advantages of the Material Grown at Low Temperature*” E. Guziewicz, M. Godlewski, T.A. Krajewski, L. Wachnicki, G. Łuka, W. Paszkowicz, J.Z. Domagała, **E. Przeździecka**, E. Łuskaowska, B.S. Witkowski ACTA PHYSICA POLONICA A 116, 814-817 (2009).
- [N15] “*Comparison of dimethylzinc and diethylzinc as precursors for monocrystalline zinc oxide grown by atomic layer deposition method,*” L. Wachnicki, M. Lukasiewicz, B. Witkowski, T. Krajewski, G. Łuka, K. Kopalko, R. Minikayev, **E. Przeździecka**, J.Z. Domagała, M. Godlewski, E. Guziewicz PHYSICA STATUS SOLIDI B-BASIC SOLID STATE PHYSICS 247 , 1699-1701 (2010).
- [N16] “*Epitaxial ZnO Films Grown at Low Temperature for Novel Electronic Application*” L. Wachnicki, A. Duzynska, J.Z. Domagała, B.S. Witkowski, T.A. Krajewski, **E. Przeździecka**, M. Guziewicz, A. Wierzbicka, K. Kopalko, S. Figge, D. Hommel, M. Godlewski, E. Guziewicz, ACTA PHYSICA POLONICA A 120 , A7-A10 (2011).
- [N17] “*Electro-optical characterization of ZnO/ZnMgO structure grown on p-type Si (111) by PA-MBE method*” M.A. Pietrzyk, E. Zielony, M. Stachowicz, A. Reszka, E. Płaczek-Popko, A. Wierzbicka, **E. Przeździecka**, A. Droba, A. Kozanecki JOURNAL OF ALLOYS AND COMPOUNDS 587 , 724-728 (2014).
- [N18] “*Growth conditions and structural properties of ZnMgO nanocolumns on Si(111)*” M. A. Pietrzyk, M. Stachowicz, A. Wierzbicka, P. Dłuzewski, D. Jarosz, **E. Przeździecka**, A. Kozanecki JOURNAL OF CRYSTAL GROWTH 408 , 102-106 (2014).
- [N19] “*Photoluminescence Properties of ZnO Nanowires Grown on Ni Substrate*” W. Zaleszczyk, K. Fronc, **E. Przeździecka**, E. Janik, A. Presz, M. Czapkiewicz, J. Wróbel, W. Paszkowicz, Ł. Kłopotowski, G. Karczewski, T. Wojtowicz ACTA PHYSICA POLONICA A 114 , 1451-1456 (2008).
- [N20] “*Properties of ZnO single quantum wells in ZnMgO nanocolumns grown on Si (111)*” M.A. Pietrzyk, M. Stachowicz, A. Wierzbicka, A. Reszka, **E. Przeździecka**, A. Kozanecki OPTICAL MATERIALS 42 , 406-410 (2015).
- [N21] “*Asymmetric ZnO/ZnMgO double quantum well structures grown on m-plane ZnO substrates by MBE*” M. Stachowicz, M.A. Pietrzyk, J.M. Sajkowski, **E. Przeździecka**, H. Teisseyre, B. Witkowski, E. Alves, A. Kozanecki Journal of Luminescence 186, 262–267 (2017).

5.2 Kierowanie i udział w krajowych lub międzynarodowych projektach badawczych

Od 2014 roku jestem **kierownikiem grantu** Narodowego Centrum Nauki Typu Sonata nr. 2013/09/D/ST3/03750 pt.: *"Badanie właściwości domieszek akceptorowych grupy V i ich wzajemnego wpływu na siebie w heterostrukturach Zn(Mg)O/GaN"*

Uczestniczyłam w projekcie NanoBiom Nr. POIG.01.01.02-00-008/08 *„Kwantowe nanostruktury do zastosowań w biologii i medycynie – rozwój i komercjalizacja nowej generacji urządzeń diagnostyki molekularnej opartych o nowe polskie przyrządy półprzewodnikowe”* w ramach Programu Operacyjnego Innowacyjna Gospodarka w latach 2007-2013. Uzyskane przez ze mnie wyniki były wielokrotnie raportowane w trakcie trwania projektu na panelach ekspertów oraz na konferencjach.

W trakcie doktoratu byłam **głównym wykonawcą** grantu promotorskiego 1P03B 084 30; 0058/H03/2006/30 przyznanego przez Komitet Badań Naukowych: *„Wytwarzanie i charakteryzacja warstw ZnO o dziurowym typie przewodnictwa”*, którego kierownikiem był mój promotor prof. dr hab. Jacek Kossut

Byłam wykonawcą w projekcie: *Mikrostrukturalne i chemiczne uwarunkowania przewodnictwa tlenku cynku (ang. Microstructural and chemical determinants of electrical conductivity of zinc oxide)*, National Science Center (Poland), Project no. DEC-2012/07B/ST3/03567 (2013-2017)

Byłam wykonawcą w projekcie: *Pionowo ułożone komórki pamięci oparte na heterozłączach z hybrydowych organicznych/nieorganicznych materiałów (ang. Vertically stacked memory cells based on heterojunctions made of hybrid organic/inorganic materials)* - projekt europejski VERSATILE, 2006-2009 (project no. 026714)

Brałam udział w projekcie ERASMUS + w ramach którego uczestniczyłam w wyjeździe szkoleniowym

- W ramach programu na lata 2013/2014, byłam na University of Minho, Braga, Portugalia, a opiekunem od strony Portugali była Dr Maria Fátima Guimarães Cerqueira
- W ramach programu na lata 2016/2017, uzyskałam fundusze na wyjazd do Helmholtz-Zentrum Dresden-Rossendorf, opiekun od strony Niemieckiej Dr. Sławomi Prucnal

5.3 Wykaz referatów zaproszonych wygłoszonych na międzynarodowych lub krajowych konferencjach tematycznych

Wygłosiłam 4 referaty zaproszone związanych z tematem habilitacji na konferencjach międzynarodowych i krajowych

- I.1 „*Selective UV Photodetectors based on ZnO*” **E. Przeździecka**, R. Schifano, S. Chusnutidinow, E. Guziewicz, M. Guziewicz, A. Kozanecki E-MRS Warszawa, symposium Z, 19 wrzesień 2016, Polska.
- I.2 “*ZnO doped by one, two or three acceptors (As, N, Sb)- electronic structure, optical and electrical properties*” **E. Przeździecka**, Modern techniques in photoelectron spectroscopy – experiments and data analysis; Październik 19-22, 2015 Leszno, Polska.
- I.3 „*Selektywne detektory promieniowania UV na bazie heterozłączy ZnO/GaN*”, **E. Przeździecka**, M. Stachowicz, S. Chusnutidinow, D. Snigurenko, S. Gierałtowska, A. Kozanecki XIV KRAJOWA KONFERENCJA ELEKTRONIKI 08 – 12.06.2015 Darłówko Wschodnie, Polska.
- I.4 “*Zinc oxide based heterostructures as highly selective UV detectors*” **E. Przeździecka**, R. Schifano, S. Chusnutidinow, M. Stachowicz, T. A. Krajewski, E. Guziewicz, M. Guziewicz, A. Kozanecki Energy Materials Nanotechnology Prague Meeting 2016 (**EMN 2016**), Czerwiec 21-24, Praga, Republika Czeska.

Wykłady zaproszone prezentowane przez współautorów:

- J.1 „*PA-MBE grown ZnMgO/ZnO/ZnMgO heterostructures on p-type Si (111) –optical properties*” M. Pietrzyk, A. Reszka, M. Satchowicz, A. Droba, A. Wierzbicka, **E. Przeździecka**, A. Kozanecki BIT’s 2nd Annual World Congress of Advanced materials (2013) Suzhou, Chiny.
- J.2 „*Struktury kwantowe ZnMgO/ZnO/ZnMgO wykonywane metodą MBE*” A. Kozanecki, J. Sajkowski, M. Stachowicz, **E. Przeździecka**, M. Syperek XIII KRAJOWA KONFERENCJA ELEKTRONIKI 9 – 13.06.2014 Darłówko Wschodnie, Polska.
- J.3 “*p-type Doping in ZnO*” E. Kamińska, **E. Przeździecka**, A. Piotrowska, J. Kossut, E. Dynowska, A. Barcz, W. Dobrowolski, I. Pasternak, P. Bogusławski XXXV Int. School on the Physics of Semiconducting Componds (Ustroń-Jaszowiec) (2006) Polska
- J.4 „*ZnO quantum wells in ZnMgO nanocolumns grown on Si (111) by MBE-optical and structural properties*” M. Pietrzyk, M. Satchowicz, D. Jarosz, **E. Przeździecka**, A. Reszka, A. Kozanecki BIT’s 3rd Annual World Congress of Advanced materials (2014) Suzhou, Chiny.
- J.5 “*p-type ZnO and nanostructured ZnO-based homojunction grown at low temperature*” E. Guziewicz, D. Snigurenko, T.A. Krajewski, **E. Przeździecka**, D. Jarosz, M. Pietrzyk, B.S. Witkowski Energy Materials Nanotechnology Prague Meeting 2016 (**EMN 2016**), June 21-24, 2016, Prague, Czech Republic.
- J.6 “*ZnO by ALD-advantages of the material grown at low temperature*” E. Guziewicz, M. Godlewski, T. Krajewski, G. Łuka, W. Paszkowicz, J.Z. Domagała, **E. Przeździecka**, E. Łusakowska, B.S. Witkowski XXXVIII International School and Conference on the Physic of Semiconductors, Jaszowiec 2009, Polska.
- J.7 “*Functionalizing ZnO*” E. Kamińska, A. Piotrowska, **E. Przeździecka**, I. Pasternak, E. Guziewicz, E. Dynowska, P. Bogusławski, J. Kossut First Polish-American

Symposium: new low dimensional structures of wide gap semiconductors for spintronics and new functional materials (2007) Polska.

- J.8 “*Growth of p-type ZnO by oxidation Zn-based compounds*” E. Kamińska, **E. Przeździecka**, A. Piotrowska, I. Pasternak, P. Bogusławski, J. Kossut 13th Int. Conf. on II-VI Compounds (2007) Jeju, Korea Południowa.

5.4 Inne referaty wygłoszone osobiście na konferencjach krajowych i międzynarodowych

- O.1 **E. Przeździecka**, R. Schifano, S. Chusnutidinow, T. A. Krajewski, E. Guziewicz, M. Guziewicz, M. Stachowicz, A. Kozanecki,
“*Characterization and photoresponse of ZnO based heterostructures*”
9th International Workshop on Zinc Oxide and Related Materials (IWZnO 2016), Taipei, Taiwan, October 30 – November 2nd (2016), Taiwan.
- O.2 **E. Przeździecka**, S. Chusnutidinow, M. Stachowicz, E. Guziewicz, D. Snigurenko, K. Kopalko, R. Jakiela, A. Kozanecki
„*Electrical properties, and Optical properties of p-n and p-i-n heterostructures based on p-ZnO, n-GaN and i-Al₂O₃*”
17th International Conference on II-VI Compounds and Related Materials PARIS 13-18 Wrzesień (2015) Francja.
- O.3 **E. Przeździecka**, W. Lisowski, M. Stachowicz, A. Wierzbicka, A. Reszka, R. Jakiela, M. A. Pietrzyk, J. W. Sobczak, A. Jablonski, A. Kozanecki
„*PA-MBE Zn(Mg)O samples doped by one, two or three acceptors (As, N, Sb)-electronic structure, optical and electrical properties.*” 8th International Workshop on Zinc Oxide and Related Materials (IWZnO 2014) Kanada.
- O.4 **E. Przeździecka**, W. Lisowski, M. Stachowicz, A. Reszka, R. Jakiela, J. W. Sobczak, M. Krawczyk, A. Wierzbicka, M. A. Pietrzyk, A. Jablonski, A. Kozanecki
„*As-N, As-Sb dual acceptor doping in PA-MBE ZnO samples – electronic structure, optical and electrical properties*” Warszawa, E-MRS (2014), Polska.
- O.5 **E. Przeździecka**, M. Stachowicz, A. Wierzbicka, A. Reszka, K. Gościński, A. Droba, S. Gieraltowska, E. Guziewicz, R. Jakiela, J. M. Sajkowski, D. Jarosz, M. A. Pietrzyk, P. Dłużewski, T. Wojciechowski, A. Kozanecki;
“*Highly selective UV detectors bases on PA-MBE grown p-n (p-ZnO:(As-Sb)/n-GaN) and p-i-n (p-ZnO:As/HfO₂/n-GaN) heterojunctions*” (wystąpienie ustne); E-MRS (2013) Fall Meeting; Polska.
- O.6 **E. Przeździecka**, E. Guziewicz, R. Jakiela, D. Snigurenko, M. Stachowicz, A. Barcz, A. Kozanecki, W. Lisowski, J. W. Sobczak, M. Krawczyk, A. Jablonski
„*XPS study of arsenic doped ZnO*” (wystąpienie ustne); E-MRS (2013) Fall Meeting; Polska.
- O.7 **E. Przeździecka**, K. Gościński, A. Wierzbicka, A. Droba, A. Reszka, R. Jakiela, D. Dobosz, K. Kopalko, M. Stachowicz, J.M. Sajkowski, M.A. Pietrzyk, S. Gieraltowska, M. Godlewski, A. Kozanecki „*MBE grown p-ZnO:As/n-GaN diodes as selective UV*

detectors” 41 "Jaszowiec" International School and Conference on the Physics of Semiconductors (2012)- Polska.

- O.8 **E. Przeździecka**, E. Kamińska, K. Korona, E. Dynowska, W. Dobrowolski, R. Jakiela, W. Pacuski, Ł. Kłopotowski, J. Kossut “*Optical properties of p-type ZnO and ZnMnO doped by N and/or As acceptors*” 28th Int. Conf. on the Physics of Semiconductors (2006) -Wiedeń, Austria.
- O.9 **E. Przeździecka**, E. Kamińska, I. Pasternak, E. Dynowska, W. Dobrowolski, R. Jakiela, A. Barcz, Ł. Kłopotowski, K. Korona, J. Kossut “*Optical properties of p-type ZnO:(N,As,Sb)*” E-MRS Fall Meeting (2006)-Warszawa, Polska.

Ponadto byłam współautorem 16 wystąpień ustnych wygłoszonych przez współautorów oraz autorem i współautorem 80 prezentacji plakatowych na konferencjach międzynarodowych.

5.5 Wygłoszone seminaria

Wygłosiłam 7 seminariów związanych z tematem habilitacji oraz 2 związane z tematem doktoratu .

S.1 **E. Przeździecka** „*Tlenek cynku w heterozłączach - selektywne detektory promieniowania UV*” seminarium z fizyki ciała stałego Uniwersytetu Warszawskiego (piątek) 20 maja 2016

S.2 **E. Przeździecka** „*Selektywne detektory UV na bazie struktur diodowych ZnO/GaN wykonanych metodą MBE*” V Konferencja Kwantowe Nanostruktury Półprzewodnikowe do Zastosowań w Biologii i Medycynie 17 - 18 kwietnia 2013

S.3 **E. Przeździecka** „*Selektywne detektory UV na bazie struktur diodowych ZnO/GaN do zastosowań sensorowych wykonanych metodą MBE.*” VI Konferencja Kwantowe Nanostruktury Półprzewodnikowe do Zastosowań w Biologii i Medycynie 7 - 8 maja 2014

S.4 **E. Przeździecka** „*Selektywne detektory UV na bazie struktur diodowych ZnO/GaN wykonanych metodą MBE*” Seminarium Fizyki Materii Skondensowanej IF PAN Wtorek, 12 marca 2013

S.5 **E. Przeździecka** „*Struktury diodowe na bazie ZnO wytwarzanego metodą MBE do zastosowań sensorowych. (Zadanie 6)*” E. Przeździecka prezentacja na Panelu Ekspertów Projektu Kluczowego: Kwantowe Nanostruktury Półprzewodnikowe do Zastosowań w Biologii i Medycynie - Rozwój i Komercjalizacja Nowej Generacji Urządzeń Diagnostyki Molekularnej Opartych o Nowe Polskie Przyrządy Półprzewodnikowe 2012 w IF PAN

S.6 **E. Przeździecka** *MBE grown p-ZnO: As / n-GaN diodes as selective UV detectors* Seminarium oddziału ON4 5 czerwiec 2012

S.7 **E. Przeździecka** „*Heterostruktury bazujące na materiałach szerokoprzerwowych - jako detektory promieniowania UV*” Sprawozdanie z działalności instytutu za rok 2015

S.8 **E. Przeździecka**, K. Gościński, D. Dobosz, K. Kopalko, A. Wierzbička, A. Droba, R. Jakiela, A. Reszka, M. Stachowicz, J. Sajkowski, T. Krajewski, M. Pietrzyk, A. Kozanecki.

„Struktury diodowe na bazie ZnO wytwarzanego metodą MBE do zastosowań sensorowych (zadanie 6)” – prezentacja na Panelu Ekspertów Projektu Kluczowego: Kwantowe Nanostruktury Półprzewodnikowe do Zastosowań w Biologii i Medycynie - Rozwój i Komercjalizacja Nowej Generacji Urządzeń Diagnostyki Molekularnej Opartych o Nowe Polskie Przyrządy Półprzewodnikowe 2011 w IF PAN

S.9 E. Przeździecka „ZnO - prace nad dziurowym typem przewodnictwa” Seminarium Rentgenowskie IF PAN Wtorek, 3 listopada 2009 r.

S.10 E. Przeździecka „Właściwości ZnO i ZnMnO typu p otrzymanego metodą utleniania warstw Zn(Mn)Te., Seminarium Fizyki Materii Skondensowanej IF PAN Wtorek, 28 lutego 2006

5.6 Budowa unikatowej aparatury badawczej

Budowa i modyfikacja układów pomiarowych do pomiarów fotoprądu oraz zaników fotoprądu. Układ do pomiaru fotoprądu pozwala na wykonanie badań fotoprądu w funkcji długości fal padającego promieniowania dzięki wykorzystaniu białego źródła światła przepuszczonego przez monochromator. Pomiar fotoprądu można wykonywać zarówno przy braku napięcia jak i z przyłożonym napięciem do próbki. Zastosowanie lasera argonowego pozwala na pomiar fotoprądu w funkcji mocy padającego promieniowania. Czopowanie wiązki lasera pozwala zaś na pomiary kinetyki fotoprądu dla danej długości fali padającego promieniowania. Układ pomiarowy pozwala na oświetlenie próbki zarówno od góry jak i od dołu. Wykonanie i znaczna modyfikacja tego układu pomiarowego pozwoliło na uzyskanie wyników opisanych w pracach [H4-H9]. Wszystkie badania fotoprądu zawarte w pracach [H4-H9] były wykonane przeze mnie na wspomnianym układzie pomiarowym. W ramach pracowni Technologii i projektowanie nowych materiałów dla studentów inżynierii nanostruktur Uniwersytetu Warszawskiego na wspomnianym układzie pomiarowym prowadzone są przeze mnie zajęcia pt. „Detektory promieniowania”.

Brałam aktywny udział w instalacji, montażu oraz uruchomieniu i testowaniu maszyny MBE Compact 21. Jest to unikalna maszyna do wzrostu epitaksjalnego warstw ZnO pozwalająca między innymi na domieszkowanie tych warstw dzięki zastosowaniu źródeł arsenu, antymonu i azotu. Na wspomnianym układzie wykonałam samodzielnie próbki ZnO będące podstawą prac badawczych prezentowanych w pracach H1, H3, H4, H5, H6, H7, H9.

Uczestniczyłam w zakupie, modyfikacji i rozbudowie układu do pomiarów DLTS dla niższych zakresów częstotliwości.

Przygotowanie specyfikacji do zakupu maszyny MBE dla Centrum Zaawansowanych Materiałów i Technologii CEZAMAT.

5.7 Organizacja konferencji, działalność recenzencka i edytorska

Przygotowałam część prezentacji w staraniu się o konferencję IW ZnO, prezentacja ta została pozytywnie oceniona i w 2018 roku konferencja ta odbędzie się w Warszawie.

Byłam także recenzentem dla czasopism naukowych, takich jak: Sensors and Actuators- 2 recenzje, Appl. Phys. Lett.- 1 recenzja, phys. stat. solidi (c) and (b)- 3 recenzje, Acta Phys. Pol. A - 3 recenzje, Materiale Science – Poland - 1 recenzja, Jurnal of Crystal Growth-1 recenzja, Applied Physics A - 1 recenzja, Applied Materials and Interfaces-1 recenzja, Central European Journal of Physics-1 recenzja, Thin Solid Films-1 recenzja, Solid State Sciences-1 recenzja, Physical Chemistry Chemical Physics-1 recenzja, Journal of Chemistry C-1 recenzja.

5.8 Dydaktyka i popularyzacja nauki

Zajęcia dydaktyczne:

Prowadziłam zajęcia w ramach laboratorium „Technologie i projektowanie nowych materiałów” prowadzonych dla studentów kierunku Inżynieria Nanostruktur Wydziału Fizyki Uniwersytetu Warszawskiego (semestr letni 2016) - moim tematem były „Detektory promieniowania”. W roku 2017, zajęcia z tego tematu będą nadal prowadzone przeze mnie.

Promotorstwo:

Promotor pomocniczy pracy doktorskiej mgr Karoliny Paradowskiej - Politechnika Wrocławska

Tytuł rozprawy: „Właściwości elektrooptyczne heterostruktur na bazie ZnO i ZnMgO wytworzonych metodą PA-MBE”. Data otwarcia przewodu: 05.05.2016.

Opiekowałam się stażami studenckimi w Instytucie Fizyki PAN:

- Magdalena Tyrakowska studentka Wydział Fizyki Politechniki Warszawskiej
- Justyna Pokrzywnicka studentka UKSW
- Michał Solecki vel Szymański student Inżynierii Nanostruktur prowadzonej przez Wydział Fizyki i Chemii Uniwersytetu Warszawskiego

Popularyzacja nauki:

Jestem opiekunem akcji LEKCJE POKAZOWE W INSTYTUCIE FIZYKI 2015-2017

W czasie trwania studiów doktoranckich prowadziłam lekcje pokazowe dla szkół w laboratorium epitaksji z wiązek molekularnych.

Prowadzenie sesji na konferencjach:

Prowadzenie sesji na Energy Materials Nanotechnology Prague Meeting 2016 (EMN 2016), June 21-24, Prague, Czech Republic

5.9 Uczestnictwo i nagrody na targach:

T.1 Międzynarodowe Targi Innowacji Gospodarczych i Naukowych *INTARG* srebrny medal za „Innowacyjne wysoce selektywne detektory UV” – przygotowanie plakatu, prezentacji oraz demonstratora

T. 2 The word exhibitions on inventions, research and new technologies Brussels Innova 17-19.11.2016 Brussels- **złoty medal** za “*Innovative UV detectors based on wide gap semiconductors*”

5.10 Patenty i zgłoszenia patentowe

Patenty:

PL 220515 30.11.2015 *Struktura detektora UV oraz sposób wykonania struktury detektora UV (The structure of a UV detector and the method of manufacturing of the structure of a UV detector);*

autorzy: **E. Przeździecka** A. Kozanecki

P.403520 *Struktura p-i-n detektora UV oraz sposób wykonania tej struktury (The structure of a p-i-n UV detector and the method of manufacturing of this structure);*

autorzy: **E. Przeździecka**, S. Gierałtowska, E. Guzewicz, M. Godlewski, A. Kozanecki

Zgłoszenia patentowe:

P.412613 *Struktura przezroczystego detektora nadfioletu oraz sposób wytwarzania struktury przezroczystego detektora nadfioletu (The structure of a transparent ultraviolet detector and the method of manufacturing of a structure of a transparent ultraviolet detector);*

autorzy: M. Guzewicz, W. Jung, E. Guzewicz, **E. Przeździecka**, R. Schifano, T. Krajewski

P.416263 *Złącze elektryczne na bazie tlenku cynku oraz sposób wytwarzania tego złącza (Electrical junction based on zinc oxide and a method of manufacturing of this junction);*

autorzy: M. Pietrzyk, **E. Przeździecka**, E. Guzewicz, D. Snigurenko



Ewa Przeździecka

6 Bibliografia

- [1] Jagadish C, Pearton SJ. **2006**. Zinc Oxide Bulk, Thin Films and Nanostructures Oxford: Elsevier.
- [2] Ozgur U, Alivov YI, Liu C, Reshchikov MA, Dogan S, Avrutin V, Cho SJ, Morkoc H. **2005**. *Journal of Applied Physics* **98** 041301
- [3] Fan MM, Liu KW, Zhang ZZ, Li BH, Chen X, Zhao DX, Shan CX, Shen DZ. **2014**. *Applied Physics Letters* **105** 011117
- [4] Coskun C, Look DC, Farlow GC, Sizelove JR. **2004**. *Semiconductor Science and Technology* **19** 752
- [5] Kohan AF, Ceder G, Morgan D, Van de Walle CG. **2000**. *Phys. Rev. B* **61** 15019-27
- [6] Wang LG, Zunger A. **2003**. *Phys. Rev. Lett.* **90** 256401
- [7] Van de Walle CG. **2000**. *Phys. Rev. Lett.* **85** 1012-5
- [8] Cox SFJ, Davis EA, Cottrell SP, King PJC, Lord JS, Gil JM, Alberto HV, Vilao RC, Pirotto Duarte J, yres de Campos N, Weidinger A, Lichti RL, Irvine SJC. **2001**. *Phys. Rev. Lett.* **86** 2601-4
- [9] Park CH, Zhang SB, Wei SH. **2002**. *Phys. Rev. B* **66** 073202
- [10] Limpijumnong S, Zhang SB, Wei SH, Park CH. **2004**. *Phys. Rev. Lett.* **92** 155504
- [11] Puchala B, Morgan D. **2012**. *Phys. Rev. B* **85** 195207
- [12] Liu L, Xu J, Wang D, Jiang M, Wang S, Li B, Zhang Z, Zhao D, Shan C-X, Yao B, Shen DZ. **2014**. *Phys. Rev. Lett.* **108** 215501
- [13] Reynolds JG, Reynolds Jr CL, Mohanta A, Muth JF, Rowel JE, Everitt HO, Aspnes DE. **2013**. *Appl. Phys. Lett.* **102** 152114
- [14] Kewei Liu, Makoto Sakurai, Masakazu Aono. **2010**. *Sensors* **10** 8604-34
- [15] Ćwirko R, Bielecki Z, Ćwirko J, Dobrzański L. **2006**. *Opto-Electronics Review* **14** 149–154
- [16] Wagner C, Harned N. **2010**. *Nat Photon* **4** 24-6
- [17] Razeghi M, Rogalski A. **1996**. *Journal of Applied Physics* **79** 7433-73
- [18] Chih-Han Chen, Shouou-Jinn Chang, Sheng-Po Chang, Meng-Ju Li, I-Cherng Chen, Ting-Jen Hsueh, Cheng-Liang Hsu. **2009**. *Chemical Physics Letters* **476** 69
- [19] Ching-Ting Lee, Tzu-Shun Lin, Hsin-Ying Lee. **2010**. *IEEE Photonic Technology Letters* **22** 1117
- [20] Johnsn MAL, Shizuo Fujita, Rwoiland Jr.W.H, Hughes WC, Cook JW, Schetzina JF. **1996**. *Journal of Electronic Materials* **25** 855
- [21] Almamun Ashrafi ABM, Nguyen Thanh Binh, Bao-Ping Zhang, Yusaburo Segawa. **2004**. *Appl. Phys. Lett.* **84** 2014
- [22] Alivov YaI, Ozgur U, Dogan S, Johnstone D, Avrutin V, Onojima N, Liu C, Xie J, Fan Q, Morkoc H. **2005**. *Applied Physics Letters* **86** 241108
- [23] Yuen C, Yu SF, Lau SP, Rusli, Chen TP. **2005**. *Applied Physics Letters* **86** 241111
- [24] Jeong IS, Kim JH, Im S. **2003**. *Applied Physics Letters* **83** 2946-8
- [25] Jeong IS, Kim JH, Park HH, Im S. **2004**. *Thin Solid Films* **447-448** 111-4
- [26] Huang H, Fang G, Mo X, Yuan L, Zhou H, Wang M, Xiao H, Zhao X. **2009**. *Applied Physics Letters* **94** 063512
- [27] Placzek-Popko E, Paradowska KM, Pietrzyk MA, Gumienny Z, Bieganski P, Kozanecki A. **2015**. *Journal of Applied Physics* **118** 074501
- [28] Zhang D, Uchida K, Nozaki S. **2015**. *Journal of Applied Physics* **118** 094502
- [29] Sandvik P, Mi K, Shahedipour F, McClintock R, Yasan A, Kung P, Razeghi M. **2001**. *Journal of Crystal Growth* **231** 366-70
- [30] Van Hove JM, Hickman R, Klaassen JJ, Chow PP, Ruden PP. **1997**. *Applied Physics Letters* **70** 2282-4
- [31] Chen X, Zhu H, Cai J, Wu Z. **2007**. *Journal of Applied Physics* **102** 024505
- [32] Ćwirko J, Ćwirko R, Mikołajczyk J. **2015**. *Metrol. Meas. Syst.* , **22** 119
- [33] Li J, Wei S-H, Li S-S, Xia J-B. **2006**. *Phys. Rev. B* **74** 081201(R)

- [34] Pearton SJ, Norton DP, Ip K, Heo YW, Steiner T. **2004.** *Journal of Vacuum Science & Technology B: Microelectronics and Nanometer Structures Processing, Measurement, and Phenomena* **22** 932-48
- [35] Wahl U, Rita E, Correia JG, Marques AC, Alves E, Soares JC, ISOLDE C. **2005.** *Phys. Rev. Lett.* **95** 215503
- [36] Boonchun A, Lambrecht WRL. **2013.** *physica status solidi (b)* **250** 2091
- [37] Bang J, Sun YY, West D, Meyer BK, Zhang S. **2015.** *J. Mater. Chem. C* **3** 339-44
- [38] Lee EC, Kim Y, Jin Y, Chang K. **2001.** *Phys. Rev. B* **64** 085120
- [39] Lautenschlaeger S, Hofmann M, Eisermann S, Haas G, Pinnisch M, Laufer A, Meyer BK. **2011.** *physica status solidi (b)* **248** 1217
- [40] Duan XY, Yao RH, Zhao YJ. **2008.** *Applied Physics A* **91** 467-72
- [41] Lu JG, Zhang YZ, Ye ZZ, Zhu LP, Wang L, Zhao BH, Liang QL. **2006.** *Applied Physics Letters* **88** 222114
- [42] Bin W, Yue Z, Jiahua M, Wenbin S. **2009.** *Applied Physics A* **94** 715-8
- [43] Fan JC, Sreekanth KM, Xie Z, Chang SL, Rao KV. **2013.** *Progress in Materials Science* **58** 874-985
- [44] Look DC, Farlow GC, Reunchan P, Limpijumngong S, Zhang SB, Nordlund K. **2005.** *Phys. Rev. Lett.* **95** 225502
- [45] Ryu YR, Lee TS, White HW. **2003.** *Applied Physics Letters* **83** 87-9
- [46] Kang HS, Kim GH, Kim DL, Chang HW, Ahn BD, Lee SY. **2006.** *Applied Physics Letters* **89** 181103
- [47] Vaithianathan V, Lee BT, Kim SS. **2005.** *Applied Physics Letters* **86** 062101-3
- [48] Przeździecka E, Kaminska E, Korona K P, Dynowska E, Dobrowolski W, Jakiela R, Kłopotowski L, Kossut J. **2007.** *Semiconductor Science and Technology* **22** 10
- [49] Przeździecka E, Kaminska E, Pasternak I, Piotrowska A, Kossut J. **2007.** *Phys. Rev. B* **76** 193303
- [50] Shen Y, Hu W, Zhang T, Xu X, Sun J, Wu J, Ying Z, Xu N. **2008.** *Materials Science and Engineering: A* **473** 201-5
- [51] Wang P, Chen N, Yin Z, Yang F, Peng C, Dai R, Bai Y. **2006.** *Journal of Applied Physics* **100** 043704
- [52] Wang SP, Shan CX, Li BH, Zhang JY, Yao B, Shen DZ, Fan XW. **2009.** *Journal of Crystal Growth* **311** 3577-80
- [53] Volbers N, Lautenschlager S, Leichtweiss T, Laufer A, Graubner S, Meyer BK, Potzger K, Zhou S. **2008.** *Journal of Applied Physics* **103** 123106
- [54] Pan X, Ye Z, Li J, Gu X, Zeng Y, He H, Zhu L, Che Y. **2007.** *Applied Surface Science* **253** 5067-9
- [55] Zhao JZ, Liang HW, Sun JC, Bian JM, Feng QJ, Hu LZ, Zhang HQ, Liang XP, Luo YM, Du GT. **2008.** *Journal of Physics D: Applied Physics* **41** 195110
- [56] Zeng DW, Xie CS, Zhu BL, Song WL, Wang AH. **2003.** *Materials Science and Engineering: B* **104** 68-72
- [57] Zang CH, Su JF, Wang B, Zhang DM, Zhang YS. **2011.** *Journal of Luminescence* **131** 1817-20
- [58] Qin JM, Yao B, Yan Y, Zhang JY, Jia XP, Zhang ZZ, Li BH, Shan CX, Shen DZ. **2009.** *Applied Physics Letters* **95** 022101
- [59] Wardle MG, Goss JP, Briddon PR. **2006.** *Phys. Rev. Lett.* **96** 205504
- [60] Cox SFJ, Davis EA, Cottrell SP, King PJC, Lord JS, Gil JM, Alberto HV, Vilao RC, Pirote Duarte J, yres de Campos N, Weidinger A, Lichti RL, Irvine SJC. **2001.** *Phys. Rev. Lett.* **86** 2601-4
- [61] Kim KK, Kim HS, Hwang DK, Lim JH, Park SJ. **2003.** *Applied Physics Letters* **83** 63-5
- [62] Kim KK, Niki S, Oh JY, Song JO, Seong TY, Park SJ, Fujita S, Kim SW. **2005.** *Journal of Applied Physics* **97** 066103
- [63] Fan JC, Zhu CY, Fung S, Zhong YC, Wong KS, Xie Z, Brauer G, Anwand W, Skorupa W, To CK, Yang B, Beling CD, Ling CC. **2009.** *Journal of Applied Physics* **106** 073709-6
- [64] Hesong Guan, Xiaochuan Xia, Yuantao Zang, Fubin Gao, Wancheng Li, Guoguang Wu, Xiangping Li, Guotong Du. **2008.** *Journal of Physics: Condensed Matter* **20** 292202

- [65] Ding M, de Jong BHWS, Roosendaal SJ, Vredenberg A. **2000.** *Geochimica et Cosmochimica Acta* **64** 1209-19
- [66] Xu N, Xu Y, Li L, Shen Y, Zhang T, Wu J, Sun J, Ying Z. **2006.** *Journal of Vacuum Science and Technology A: Vacuum, Surfaces, and Films* **24** 517
- [67] Janotti A, Van de Walle CG. **2007.** *Phys. Rev. B* **76** 165202
- [68] Fan JC, Xie Z, Wan Q, Wang YG. **2007.** *Journal of Crystal Growth* **307** 66-9
- [69] Snigurenko D, Jakiela R, Guziewicz E, Przeździecka E, Stachowicz M, Kopalko K, Barcz A, Lisowski W, Sobczak JW, Krawczyk M, Jablonski A. **2014.** *Journal of Alloys and Compounds* **582** 594-7
- [70] Zhao W, Zhao L, Shi Z, Xia X, Li X, Dong X, Chang Y, Zhang B, Du G. **2011.** *Applied Surface Science* **257** 4685-8
- [71] Kumar A, Kumar M, Singh BP. **2010.** *Applied Surface Science* **256** 7200-3
- [72] Volnianska O, Boguslawski P, Kaminska E. **2012.** *Phys. Rev. B* **85** 165212
- [73] Vlasenflin TH, Tanaka M. **2007.** *Solid State Communications* **142** 292-4
- [74] Liang JK, Su HL, Chuang PY, Kuo CL, Huang SY, Chan TS, Wul YC, Huang JCA. **2015.** *Appl. Phys. Lett.* **106** 212101
- [75] Hsieh PT, Chen YC, Kao KS, Wang CM. **2008.** *Applied Physics A* **90** 317-21
- [76] Wei XQ, Man BY, Liu M, Xue CS, Zhuang HZ, Yang C. **2007.** *Physica B: Condensed Matter* **388** 145-52
- [77] Snigurenko D, Guziewicz E, Krajewski T, Jakiela R, Syryanyy Y, Kopalko K, Paszkowicz W. **2016.** *Mater. Res. Express* **3** 125907
- [78] Joseph M, Tabata H, Kawai T. **1999.** *Japanese Journal of Applied Physics* **38** L1205
- [79] Bian JM, Li XM, Gao XD, Yu WD, Chen LD. **2004.** *Applied Physics Letters* **84** 541-3
- [80] Zhang BY, Yao B, Li YF, Zhang ZZ, Li BH, Shan CX, Zhao DX, Shen DZ. **2010.** *Applied Physics Letters* **97** 222101-3
- [81] Duan L, Wang P, Yu X, Han X, Chen Y, Zhao P, Li D, Yao R. **2014.** *Phys. Chem. Chem. Phys.* **16** 4092-7
- [82] Li W, Kong C, Qin G, Ruan H, Fang L. **2014.** *Journal of Alloys and Compounds* **609** 173-7
- [83] Sun J, Liang H, Zhao J, Feng Q, Bian J, Zhao Z, Zhang H, Luo Y, Hu L, Du G. **2008.** *Applied Surface Science* **254** 7482-5
- [84] Huang YC, Weng LW, Uen WY, Lan SM, Li ZY, Liao SM, Lin TY, Yang TN. **2011.** *Journal of Alloys and Compounds* **509** 1980-3
- [85] Hong SK, Ko HJ, Chen Y, Hanada T, Yao T. **2000.** *Journal of Vacuum Science & Technology B: Microelectronics and Nanometer Structures Processing, Measurement, and Phenomena* **18** 2313-21
- [86] Hyung-Kyu Choi and Jang-Ho Park and Sang-Hun Jeong and Byung-Teak Lee. **2009.** *Semiconductor Science and Technology* **24** 105003
- [87] Look DC, Reynolds DC, Litton CW, Jones RL, Eason DB, Cantwell G. **2002.** *Applied Physics Letters* **81** 1830-2
- [88] Liang HW, Lu YM, Shen DZ, Liu YC, Yan JF, Shan CX, Li BH, Zhang ZZ, Fan XW. **2005.** *physica status solidi (a)* **202** 1060
- [89] Zeuner A, Alves H, Hofmann DM, Meyer BK, Hoffmann A, Haboek U, Strassburg M, Dworzak M. **2002.** *physica status solidi (b)* **234** R7
- [90] Look DC, Claflin B, Alivov YI, Park SJ. **2004.** *physica status solidi (a)* **201** 2203
- [91] Tsukazaki A, Akasaka S, Najahara K, Ohno Y, Ohno H, Maryenko D, Ohtomo A, Kawaski M. **2010.** *Nat Mater* **9** 889-893
- [92] Guziewicz E, Godlewski M, Wachnicki L, Krajewski TA, Luka G, Gieraltowska S, Jakiela R, Stonert A, Lisowski W, Krawczyk M, Sobczak JW, Jablonski A. **2012.** *Semiconductor Science and Technology* **27** 074011
- [93] Korona KP, Drabinska A, Caban P, Strupinski W. **2009.** *Journal of Applied Physics* **105** 083712
- [94] Witkowski BS, Wachnicki L, Gieraltowska S, Sybilski P, Kopalko K, Stachowicz M, Godlewski M. **2014.** *physica status solidi (c)* **11** 1447
- [95] Kind H, Yan H, Messer B, Law M, Yang P. **2002.** *Advanced Materials* **14** 158-60
- [96] Look DC. **2001.** *Materials Science and Engineering: B* **80** 383-7

- [97] Kramm B, Laufer A, Reppin D, Kronenberger A, Hering P, Polity A, Meyer BK. **2012.** *Appl. Phys. Lett.* 094102
- [98] Li S, Fang G, Huang H, Long H, Wang H, Mo X, Dong B, Zhao X. **2012.** *Appl. Phys. B* **107** 497-502
- [99] Zhu GY, Li JT, Shi ZL, Lin Y, Chen GF, Ding T, Tian ZS, Xu CX. **2012.** *Appl. Phys. B* **109** 195-9
- [100] Liu WZ, Xu HY, Zhang LX, Zhang C, Ma JG, Wang JN, Liu YC. **2012.** *Applied Physics Letters* **101** 142101
- [101] Wang T, Wu H, Zheng H, Wang JB, Wang Z, Chen C, Xu Y, Liu C. **2013.** *Applied Physics Letters* **102** 141912
- [102] Przeździecka E, Chusnutdinow S, Guziewicz E, Snigurenko D, Stachowicz M, Kopalko K, Reszka A, Kozanecki A. **2015.** *Journal of Physics D: Applied Physics* **48** 325105
- [103] Xu HY, Liu YC, Liu YX, Xu CS, Shao CL, Mu R. **2005.** *Appl. Phys. B* **80** 871-4
- [104] Taube A, Gieraltowska S, Guut T, Malachowski T, Pasternak I, Wojciechowski T, Rzodkiewicz W, Sawicki M, Piotrowska A. **2011.** *Acta Phys Pol A* **119** 696
- [105] Przeździecka E, Gościński K, Gieraltowska S, Guziewicz E, Jakiela R, Kozanecki A. **2014.** *Key Engineering Materials* **605** 310
- [106] Vikas LS, Vanaja KA, Subha PP, Jayaraj MK. **2016.** *Sensors and Actuators A: Physical* **242** 116-22
- [107] Kriegner D, Vyborny K, Olejnik K, Reichlova H, Novak V, Marti X, Gazquez J, Saidl V, Nemeč P, Volobuev VV, Springholz G, Holy V, Jungwirth T. **2016.** *Nature Communications* **7** 11623
- [108] Dietl T, Ohno H, Matsukura F, Cibert J, Ferrand D. **2000.** *Science* **287** 1019
- [109] Pacuski W, Kossacki P, Ferrand D, Golnik A, Clibert J, Wegscheider M, Navarro-Quezada A, Bonanni A, Kiceana M, Sawicki M, Dietl T. **2008.** *Phys. Rev. Lett.* **100** 037204
- [110] Pacuski W, Ferrand D, Clibert J, Deparis C, Gaj JA, Kossacki P, Morhain C. **2006.** *Phys. Rev. B* **73** 035214
- [111] Dietl T, Awschalom D, Kaminska M, Ohno H. Spintronics. **2008.** *Semiconductors and Semimetals.*