

Warszawa, 30 stycznia 2020

Dr Rafał Jakiela

Środowiskowe Laboratorium Badań Rentgenowskich i

Elektronomikroskopowych

Zespół Spektroskopii Rentgenowskiej i Mikroanalizy

Instytut Fizyki Polskiej Akademii Nauk

AUTOREFERAT

1. Dane personalne	2
2. Wykształcenie i stopnie naukowe	2
3. Informacje o dotychczasowym zatrudnieniu	2
4. Omówienie osiągnięć, o których mowa w art. 219 ust. 1 pkt. 2 ustawy.....	3
5. Omówienie celu naukowego ww. prac i osiągniętych wyników.	5
6. Informacje bibliometryczne	24
6.1 Całkowita liczba publikacji	24
6.2 Sumaryczny Impact Factor publikacji	24
6.3 Liczba cytowań publikacji.....	24
6.4 Indeks Hirscha opublikowanych prac.....	24
7. Informacja o wykazywaniu się istotną aktywnością naukową albo artystyczną realizowaną w więcej niż jednej uczelni, instytucji naukowej, w szczególności zagranicznej.....	25
7.1 Dorobek naukowy do uzyskania stopnia doktora nauk fizycznych	25
7.2 Dorobek naukowy po uzyskaniu stopnia doktora nauk fizycznych	27
8. Informacja o osiągnięciach dydaktycznych, organizacyjnych oraz popularyzujących naukę.	33
8.1 Twórcze prace zawodowe.....	33
8.2 Kierowanie i udział w krajowych lub międzynarodowych projektach badawczych przed uzyskaniem stopnia doktora	34
8.3 Kierowanie i udział w krajowych lub międzynarodowych projektach badawczych po uzyskaniu stopnia doktora	34
8.4 Wykaz referatów zaproszonych wygłoszonych na międzynarodowych lub krajowych konferencjach tematycznych:	35
8.5 Inne referaty wygłoszone osobiście na konferencjach krajowych i międzynarodowych	35
8.6 Wygłoszone seminaria.....	36
8.7 Budowa unikatowej aparatury badawczej	36
8.8 Organizacja konferencji, działalność recenzencka i edytorska	36
8.9 Dydaktyka i popularyzacja nauki	37
8.10 Patenty i zgłoszenia patentowe	37
9. Bibliografia	38

1. Dane personalne

Rafał Jakiela



2. Wykształcenie i stopnie naukowe

- | | |
|-------------|--|
| 2000 – 2005 | Polska Akademia Nauk, Instytut Fizyki
Uzyskany stopień: doktor
Praca doktorska pt.: Mechanizmy dyfuzji w półprzewodnikach A3B5.
Promotor: prof. dr hab. A. Barcz |
| 1998 – 1999 | Szkoła Nauk Ścisłych w Warszawie
Uzyskany stopień: magister
Praca magisterska pt.: Implantacja krzemu do arsenku galu
Opiekun: prof. dr hab. A. Barcz |
| 1994 – 1997 | Szkoła Nauk Ścisłych w Warszawie
Uzyskany stopień: licencjat na makrokierunku fizyka, matematyka i chemia ze specjalnością w obsłudze elektronicznej aparatury pomiarowej |

3. Informacje o dotychczasowym zatrudnieniu

- | | |
|-------------------------|--|
| 01/07/2005 – do dzisiaj | Instytut Fizyki Polskiej Akademii Nauk
Stanowisko: specjalista
Badania struktur i materiałów półprzewodnikowych metodą SIMS |
| 01/09/2006 – do dzisiaj | Zespół Szkół nr 127 w Warszawie
Stanowisko: administrator IT
Stanowisko: nauczyciel fizyki |
| 30/09/1998 – 31/06/2005 | Instytut Fizyki Polskiej Akademii Nauk
Stanowisko: doktorant |
| 01/11/1998 – 31/12/2015 | Instytut Technologii Materiałów Elektronicznych
Stanowisko: asystent (laboratorium epitaksji)
Badania struktur półprzewodnikowych wytwarzanych metodą epitaksji MOCVD. |

01/05/1998 – 31/12/1998

Computer Service Matrix sp. z o.o.

Stanowisko: programista

Tworzenie aplikacji obsługujących relacyjne bazy danych, przy pomocy programu Power Builder i języka SQL.

4. Omówienie osiągnięć, o których mowa w art. 219 ust. 1 pkt. 2 ustawy.

Jako osiągnięcie wskazuję: cykl powiązanych tematycznie artykułów naukowych opublikowanych w czasopismach naukowych lub w recenzowanych materiałach z konferencji międzynarodowych, które w dniu publikacji były ujęte w wykazie sporządzonym zgodnie z przepisami wydanymi na podstawie art. 268 ust. 2 pkt 2 lit. b.

Tytuł cyklu: *Rola pierwiastków atmosferycznych w półprzewodnikach*

H1 **R. Jakiela**, E. Dumiszewska, P. Caban, A. Stonert, A. Turoś, A. Barcz – *Oxygen diffusion into GaN from oxygen implanted GaN or Al₂O₃* – Phys. Status Solidi C 8 (2011) 1513

(IF=0, cyt. 7)

Mój wkład do tej publikacji polegał na pomyśle i przygotowaniu całego doświadczenia, przygotowaniu próbek otrzymanych metodą MOCVD do implantacji, a następnie wygrzewania, przeprowadzeniu wszystkich pomiarów metodą SIMS, opracowaniu uzyskanych wyników. Manuskrypt został w całości napisany i zredagowany przeze mnie. Mój wkład oceniam na 70%.

H2 A. Barcz, M. Kozubal, **R. Jakiela**, J. Ratajczak, J. Dyczewski, K. Gołaszewska, T. Wojciechowski, G. K. Celler – *Diffusion and impurity segregation in hydrogen-implanted silicon carbide* – Journal of Applied Physics 115 (2014) 223710

(IF = 2,183, cyt. 11)

Mój wkład do tej publikacji polegał na przeprowadzeniu wszystkich pomiarów metodą SIMS, opracowaniu uzyskanych wyników, oraz na uczestnictwie w redagowaniu manuskryptu. Mój wkład oceniam na 40%.

H3 A. Barcz, **R. Jakiela**, M. Kozubal, J. Dyczewski, G.K. Celler – *Incorporation of oxygen in SiC implanted with hydrogen* – Nuclear Instruments and Methods in Physics Research B 365 (2015) 146

(IF = 1,389, cyt. 2)

Mój wkład do tej publikacji polegał na przeprowadzeniu wszystkich pomiarów metodą SIMS, opracowaniu uzyskanych wyników, oraz na uczestnictwie w redagowaniu manuskryptu. Mój wkład oceniam na 40%.

- H4** R. Czernecki, E. Grzanka, **R. Jakiela**, S. Grzanka, C. Skierbiszewski, H. Turski, P. Perlin, T. Suski, K. Donimirski, M. Leszczynski – *Hydrogen diffusion in GaN:Mg and GaN:Si* – Journal of Alloys and Compounds 747 (2018) 354

(IF = 4,175, cyt. 5)

Mój wkład do tej publikacji polegał na przeprowadzeniu wszystkich pomiarów metodą SIMS, opracowaniu uzyskanych wyników oraz na uczestnictwie w redagowaniu manuskryptu. Mój wkład oceniam na 40%.

- H5** **R. Jakiela**, A. Barcz, J. Sarnecki, G. K. Celler – *Ultrahigh sensitivity SIMS analysis of oxygen in silicon* – Surface and Interface Analysis 50 (2018) 729

(IF = 1,319, cyt. 3)

Powyższy artykuł jest podsumowaniem wspólnych ponad 10 letnich badań nad dyfuzją tlenu w krzemie. Mój wkład polegał na przeprowadzeniu wszystkich pomiarów SIMS, napisaniu programu do symulacji dyfuzji metodą FTCS (Forward Time Center Space) i porównaniu wyników SIMS z wynikami otrzymanymi z symulacji, oraz współredagowaniu manuskryptu. Mój wkład oceniam na 80%.

- H6** **R. Jakiela** – *The role of atmospheric elements in the wide band-gap semiconductors* – Acta Physica Polonica A 136(6) (2019) 916

(IF = 0.545, cyt. 0)

Powyższy artykuł jest podsumowaniem ponad 20 letniego doświadczenia autora w pomiarach domieszek i zanieczyszczeń w półprzewodnikach szerokoprzerwowych tj. GaN, ZnO i SiC, w których kluczową rolę odgrywały pierwiastki atmosferyczne, czyli H, C, N i O. Artykuł jest podzielony na 4 rozdziały (po jednym dla każdego pierwiastka) obejmujące podsumowanie obecnego stanu literatury dotyczącego właściwości pierwiastka w danych półprzewodniku oraz oryginalne wyniki mające na celu pokazanie metodologii pomiaru koncentracji danego pierwiastka metodą SIMS z naciskiem na jego wykrywalność przy odpowiedniej rozdzielczości głębokościowej pomiaru. Pomysł, przeprowadzenie pomiarów oraz napisanie i redagowanie manuskryptu jest moim udziałem w 100%.

Łączna liczba cytowań, wyłączając autocytowania, wynosi **23**.

Oświadczenia współautorów publikacji, potwierdzające ich indywidualny wkład w powstanie dorobku znajdują się w załączniku nr 5.

5. Omówienie celu naukowego ww. prac i osiągniętych wyników.

5.1 Wprowadzenie

Od początku powstania w Instytucie Fizyki PAN laboratorium Spektrometrii Masowej Jonów Wtórnych (*ang. SIMS – Secondary Ion Mass Spectrometry*) uczestniczyłem w rozwijaniu i udoskonalaniu tej skomplikowanej metody analitycznej i w jej zastosowaniach do badania półprzewodników. W wyniku opracowania specjalnych procedur i konfiguracji spektrometru udało się uzyskać czułość wykrywania dla, szczególnie wymagających ze względu na ich rozpowszechnienie, pierwiastków takich jak H, C, N, O – na poziomie nieosiągalnym dla większości laboratoriów na świecie [H5]. Okoliczność ta niejako zdeterminowała główny zakres moich zainteresowań i, w konsekwencji, tematykę pracy habilitacyjnej.

Wszelkie procesy chemiczne odbywające się w atmosferze ziemskiej są, siłą rzeczy, narażone na kontaminację jej składnikami gazowymi. Dlatego też, główne pierwiastki ziemskiej atmosfery, czyli wodór (H), węgiel (C), azot (N) i tlen (O), mogą wchodzić w skład materii czy to jako główne składniki, czy też jako śladowe zanieczyszczenia. To samo dotyczy się materiałów półprzewodnikowych gdzie stanowią bądź główny składnik niektórych półprzewodników jak GaN, ZnO, SiC, lub intencjonalną domieszkę jak C w GaN, czy N w ZnO i SiC. Są powszechnym źródłem kontaminacji w procesach zachodzących przy ciśnieniu atmosferycznym, ale też takich, prowadzonych w warunkach wysokiej próżni, poprzez oddziaływanie z gazami resztkowymi. Dla wielu procesów wzrostu materiałów półprzewodnikowych pierwiastki te są gazami obojętnymi, jednak bardzo często mają dominujący wpływ na ich właściwości elektryczne. Mogą wprowadzać do materiału nośniki donorowe lub akceptorowe, czy też powodować pasywację nośników w materiale półprzewodnikowym.

Z drugiej strony, powszechność występowania gazów atmosferycznych nakłada limit detekcji przy pomiarze ich koncentracji w półprzewodnikach, uzależniony od stopnia ich adsorpcji na powierzchni badanej próbki. Większość ilościowych metod analitycznych niezbyt radzi sobie z pomiarem zawartości tych pierwiastków w ciałach stałych m.in. ze względu na wysoki wkład otoczenia do użytecznego sygnału. Metoda spektrometrii masowej jonów wtórnych działająca w ultra wysokiej próżni oraz wykorzystująca łatwość jonizacji pierwiastków atmosferycznych, pozwala, jako jedna z niewielu metod, mierzyć ich koncentrację w materiałach na poziomie *ppm* lub niższym, dając jednocześnie możliwość określenia ich rozkładu głębokościowego w głąb próbki. To pozwala wyznaczyć właściwości

takich domieszek w półprzewodnikach tj. ich współczynniki dyfuzji i segregacji, czy energie tworzenia związane z rozpuszczalnością danej domieszki w półprzewodniku.

5.2 Właściwości tlenu w azotku galu [H1]

Tlen jest drugim co do zawartości pierwiastkiem atmosferycznym i stanowi ponad 20% atmosfery ziemskiej, a jednocześnie ~46% atomowej zawartości skorupy ziemskiej i ~61% ludzkiego ciała. Jest też najbardziej reaktywnym pierwiastkiem, jaki zawiera atmosfera, łatwo tworzącym związki chemiczne z większością pierwiastków. Wysoka reaktywność tlenu jest spowodowana jego konfiguracją elektronową. Dwa niesparowane elektrony molekuly O_2 sprawiają, że cząsteczka jest wysoce podatna na tworzenie wiązań.

Tlen występuje w dwóch odmianach alotropowych (dwutlenek tlenu – O_2 i ozon – O_3), obie są doskonałymi utleniaczami. Zwykle tlen obserwuje się w stopniu utlenienia -2 , w postaci O^{2-} , ale może również tworzyć inne jony, np. O_2^{2-} i O_2^- . Przy różnych możliwych stanach utlenienia może powstać wiele możliwych związków cząsteczkowych, gdy inny pierwiastek reaguje z tlenem.

W inżynierii materiałowej tlen stanowi problem głównie w półprzewodnikach III-V, w których w większości przypadków jest donorem. Duża zawartość tlenu występuje w półprzewodnikach zawierających pierwiastki bardzo łatwo reagujące z tlenem, tj. Al w AlGaN czy AlGaAs.

Tlen w GaN ze względu na zbliżoną wielkość atomów bardzo łatwo wbudowuje się w miejsce azotowe, tworząc stan donorowy O_N . Z tego powodu, nominalnie niedomieszkowany GaN wykazuje na ogół przewodnictwo typu n . Pierwsze prace dotyczące wzrostu kryształów GaN sugerowały, że za wysokie przewodnictwo materiału odpowiedzialne są defekty, a głównie wakans azotowy V_N . Jako pierwszy poddał w wątpliwość tę hipotezę Seifert [1], wykazując, że bardziej prawdopodobne jest zanieczyszczenie tlenem. Usuwając tlen z amoniaku wykorzystywanego do wzrostu kryształu poprzez zastosowanie Mg_3N_2 , spowodował znaczącą redukcję koncentracji elektronów w kryształach GaN. Bardziej kompleksowe badania tlenu w warstwach GaN otrzymanych metodą MOCVD wykonali Chung i Gershenson [2]. Wykazali oni wzrost koncentracji nośników wraz ze wzrostem koncentracji tlenu oraz wyznaczyli za pomocą pomiarów luminescencji poziom energetyczny donoru O_N , wynoszący 78 meV. Inna grupa badała właściwości tlenu implantowanego do GaN [3]. Na podstawie pomiarów elektrycznych wyznaczono energię jonizacji domieszki tlenowej (~29 meV), stwierdzając niską wydajność aktywacji. Z redystrybucji implantowanego tlenu wyznaczonej pomiarem SIMS wyznaczono górny limit dyfuzji domieszki na poziomie $2,7 \times 10^{-13} \text{ cm}^2/\text{s}$ w temperaturze

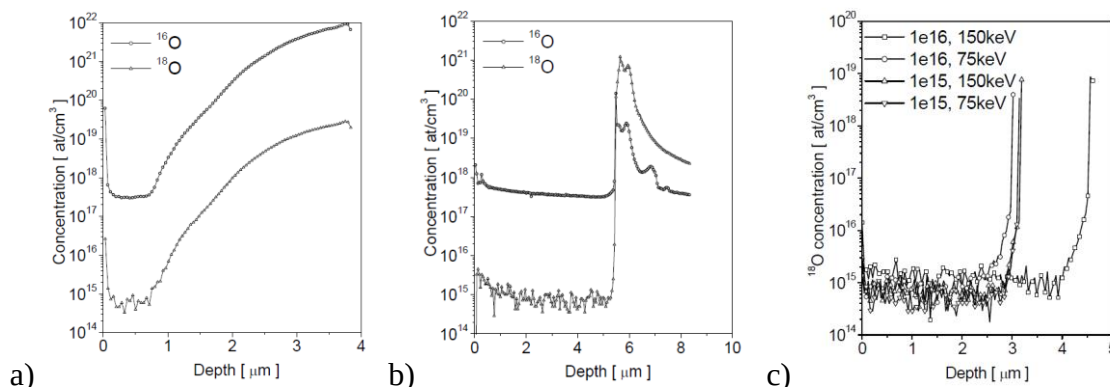
1125°C. Tak niski współczynnik dyfuzji został potwierdzony w badaniach dyfuzji tlenu w próbkach SiO₂/GaN [4].

Koncentracja tlenu w GaN zależy od warunków jego wzrostu [5]. Technologia wzrostu metodą MBE czy MOCVD pozwala na otrzymanie na tyle czystych próbek, że poziom koncentracji tlenu znajduje się poniżej wykrywalności metodą SIMS, czyli $<10^{16}$ at/cm³ [H6]. Równie niską koncentrację tlenu osiągnięto również w kryształach wzrastanych metodą wodorkową HVPE (*ang. Halide Vapor Phase Epitaxy*), pozwalającą otrzymywać warstwy grubości nawet kilkuset mikronów [6,7]. Technologie wzrostu kryształów objętościowych, takie jak metoda wysokociśnieniowa [8] wdrożona w Instytucie Wysokich Ciśnień PAN Unipress, metoda ammonotermalna [9] opatentowana przez firmę Ammono czy coraz popularniejsza metoda topnika sodowego (*ang. Na flux*) niestety nie osiągnęły jeszcze takich czystości kryształów pod względem zawartości tlenu [10,11]. Najlepiej pod tym względem wypada metoda topnika sodowego, w której udało się obniżyć zawartość tlenu do poziomu $\sim 3 \times 10^{16}$ at/cm³. W metodzie ammonotermalnej i wysokociśnieniowej koncentracje te wynoszą odpowiednio $>10^{18}$ at/cm³ i $>10^{19}$ at/cm³.

W pracy [H1] skupiłem się na, często obserwowanej w pomiarach warstw GaN osadzanych na Al₂O₃ różnymi metodami epitaksjalnymi, wysokiej zawartości tlenu w warstwie GaN sąsiadującej bezpośrednio z podłożem szafirowym. Celem pracy było sprawdzenie na ile tlen wbudowujący się do półprzewodnika podczas wzrostu warstw GaN jest tlenem pochodzącym z szafiru, a na ile tlenem zaadsorbowanym na podłożu będący wynikiem niewłaściwego przygotowania podłoża do procesu epitaksji. W tym celu napisałem projekt badawczy do konsorcjum SPIRIT, dzięki któremu mogłem wyjechać do laboratorium **Helmholtz-Zentrum Dresden-Rossendorf** w celu przygotowania odpowiednich próbek doświadczalnych. Doświadczenie polegało na zaimplantowaniu tlenu i argonu do podłoża szafirowych jak również tlenu do warstw GaN, na których następnie wykonano epitaksję GaN metodą MOCVD, w standardowych warunkach wzrostu dla tego materiału w temperaturze 1150°C. W celu zwiększenia wykrywalności badanego pierwiastka do implantacji użyto izotopu tlenu ¹⁸O o abundancji 0,2%, pozwalającego na obniżenie progu detekcji tlenu w GaN o 3 rzędy wielkości. Następnie w tak przygotowanych próbkach zostały wyznaczone profile głębokościowe tlenu w celu zbadania dyfuzji tego pierwiastka z 3 różnych źródeł: podłoża GaN zaimplantowanego tlenem, podłoża szafirowego zaimplantowanego tlenem oraz podłoża szafirowego, w którym tlen powinien zostać uwolniony poprzez zniszczenia radiacyjne.

Wyniki badań wykazały, że dyfuzja tlenu do osadzanej warstwy GaN następuje tylko w przypadku, implantacji tlenu do podłoża Al₂O₃ (Rys. 1a). W przypadku tlenu implantowanego

do GaN oraz tlenu uwolnionego z szafiru poprzez zniszczenia radiacyjne spowodowane implantacją Ar, dyfuzja tego pierwiastka do wzrastającej warstwy GaN nie jest obserwowana (Rys. 1 b, c).



Rysunek 1 – Profile głębokościowe tlenu w warstwie GaN osadzonej na: a) szafirze implantowanym tlenem, b) GaN implantowanym tlenem, c) szafirze implantowanym argonem. [H1]

Eksperyment pokazał, że niezwiązane resztkowe atomy tlenu z interfejsu GaN / szafir lub z samej powierzchni szafiru mogą dyfundować i wbudowywać się w warstwę GaN podczas procesu epitaksji. Jednocześnie tlen zaimplantowany do GaN zostaje na tyle silnie związany w warstwie GaN, najprawdopodobniej podstawiając wakanse azotowe, że nie ma możliwości dyfuzji i wbudowywania się w rosnącą warstwę epitaksjalną. Podobnie, wykluczono również sam szafir poddany bombardowaniu jonowemu, jako potencjalne źródło tlenu obserwowanego w warstwie GaN.

5.3 Właściwości wodoru w węglu krzemu [H2] i [H3]

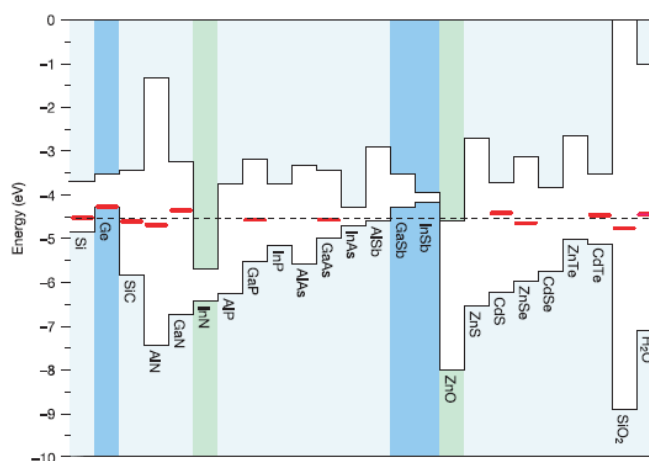
Wodór jest także jednym z najbardziej rozpowszechnionych pierwiastków na Ziemi. W atmosferze ziemskiej w największej ilości występuje oczywiście w związku z tlenem, tworząc wodę, ale dużym jego rezerwuarem są również węglowodory będące głównym składnikiem wszelkich paliw kopalnych. Wodór jest tym samym powszechnym zanieczyszczeniem w wielu półprzewodnikach, głównie ze względu na obecność w atmosferze, ale również poprzez jego obecność w prekursorach używanych do epitaksji praktycznie wszystkich półprzewodników. Pomimo prostej budowy (tylko jeden proton i jeden elektron) zachowanie wodoru wykazuje bardzo złożony charakter. Jego zdolność do wiązania się z zerwanymi lub słabymi wiązaniami kowalencyjnymi znajdującymi się najczęściej w zlokalizowanych lub rozciągniętych centrach defektowych skutkuje często przesunięciem poziomów energetycznych tych defektów z przerwy energetycznej lub do niej. Powoduje to w rezultacie pasywowanie lub kompensowanie

zarówno płytkich, jak i głębokich defektów, ale również tworzenie rozciągniętych defektów mających duży wpływ na własności elektryczne i optyczne materiałów półprzewodnikowych. Te procesy są dobrze znane w tradycyjnych półprzewodnikach, takich jak Si i GaAs, mniej natomiast poznane są właściwości tego pierwiastka w półprzewodnikach szerokoprzernowych, jak azotek galu GaN, tlenek cynku ZnO czy węgiel krzemu SiC.

Wodór, ze względu na swoją budowę, w sieci krystalicznej półprzewodnika występuje najczęściej w pozycji międzywęzłowej i jako taki może mieć najwyżej 3 stany elektryczne: H^0 , H^+ i H^- . Ze względu na oddziaływanie kulombowskie H^+ (proton) wbudowuje się w miejsca o wysokiej gęstości elektronowej, stąd oddziałuje częściej z anionami, natomiast H^- (proton z 2 elektronami) wbudowuje się w miejsca o niskiej gęstości elektronowej, czyli łączy się z kationami. O stanie ładunkowym wodoru decyduje oczywiście poziom Fermiego w półprzewodniku, stąd H^+ jest stanem preferowanym w półprzewodniku typu p, natomiast H^- w półprzewodniku typu n. Amfoteryczne właściwości wodoru sprawiają, że może kompensować przewodnictwo zarówno elektronowe, jak i akceptorowe.

Chris van der Walle w swojej publikacji [12] pokazał, że stan H^0 jest generalnie niestabilny w półprzewodnikach, a wartość poziomu energetycznego przejścia między H^+ a H^- jest zakotwiczona względem poziomu próżni. Stąd właściwości wodoru w określonym półprzewodniku zależą od położenia przerwy energetycznej półprzewodnika względem poziomu próżni, czyli od takich wielkości jak powinowactwo elektronowe i potencjał jonizacji

Rys.2

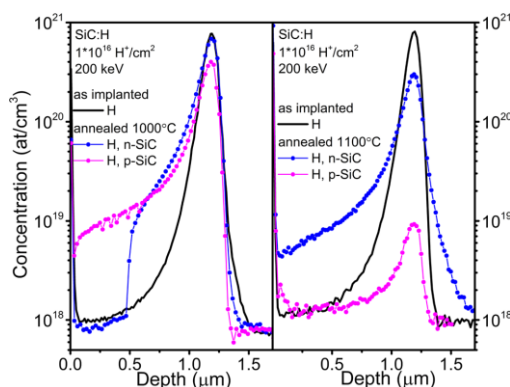


Rys. 2 Pasma energetyczne w półprzewodnikach odniesione do poziomu próżni z zaznaczonymi (kolor czerwony) poziomami przejścia (+/-) wodoru. Dla każdego półprzewodnika, niższa linia wskazuje pozycję maksimum pasma walencyjnego, natomiast wyższa linia – minimum pasma przewodnictwa [12]

Jak widać, w zależności od usytuowania przerwy energetycznej względem poziomu próżni w danym półprzewodniku wodór może wykazywać właściwości akceptorowe, jak w Ge i GaSb, lub donorowe - jak w InN i ZnO.

Węglik krzemu SiC jest doskonałym materiałem do wytwarzania podzespołów elektronicznych pracujących w wysokich temperaturach, jak również osiągających wysoką moc i wysokie napięcie przebicia. Ze względu na szeroką przerwę wzbronioną wynoszącą od 3 eV dla politypu 6H do 3,2 eV dla politypu 4H, typowe prądy upływu w urządzeniach na bazie tego materiału są rzędy niższe niż dla krzemu. Ponadto SiC jest jedynym dwuskładnikowym półprzewodnikiem, który może być utleniany termicznie powodując wytworzenie jednolitego tlenku SiO₂. Wysoka stabilność elektryczna jest niewątpliwie zaletą, jednak nakłada duże wymagania jeśli chodzi o procesy technologiczne takie jak np. domieszkowanie. Ze względu na niskie współczynniki dyfuzji domieszek, muszą one być wprowadzane w procesie implantacji, a następnie aktywowane poprzez wygrzewanie w wysokich temperaturach. Zastosowanie wysokich temperatur bardzo często powoduje jednak wbudowywanie się zanieczyszczeń np. wodoru. Wodór jest także składnikiem prekursorów gazowych używanych do wzrostu epitaksjalnego SiC tj. silan (SiH₄) czy propan (C₃H₈), jak również domieszki np. diboran (B₂H₆).

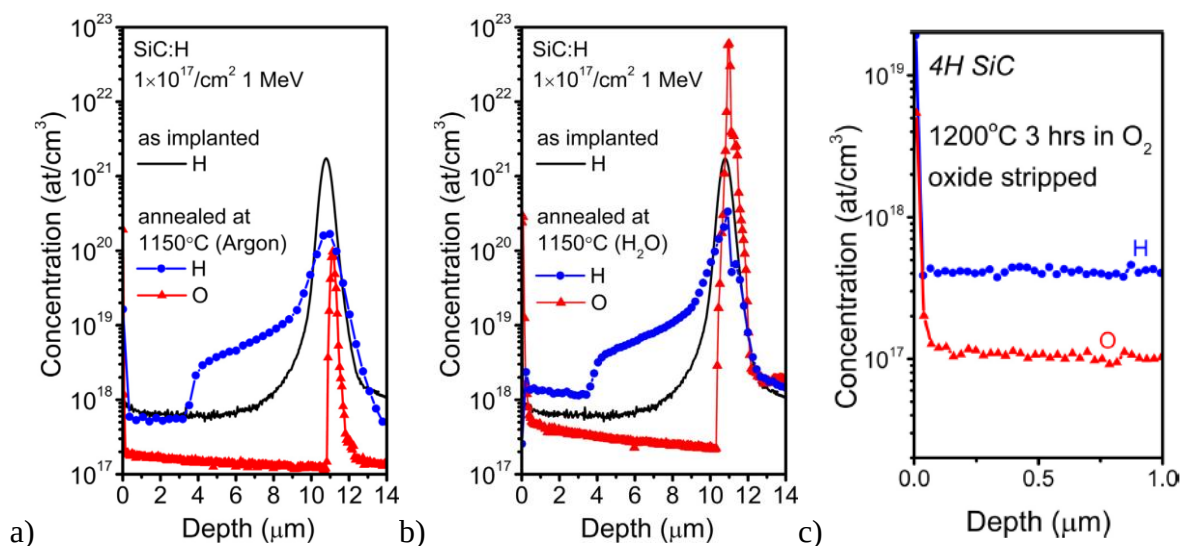
Celem naszych badań było określenie mobilności wodoru w węgliku krzemu w zależności od rodzaju domieszkowania. Wykazano dużą mobilność wodoru w węgliku krzemu o obu typach przewodnictwa ale w temperaturach powyżej 1000°C [H2], oraz potwierdzono znaczną różnicę we współczynniku dyfuzji w zależności od typu przewodnictwa półprzewodnika. W materiale typu *p* gdzie wodór występuje jako proton, zasięg dyfuzji w temperaturze 1000°C w czasie 1h jest o ~0,5 mikrona większy niż w materiale typu *n* Rys 3.



Rys. 3 Profile wodoru w kryształach SiC typu *p* i *n* implantowanym i wygrzewanym w temperaturze 1000 i 1100°C przez 1 godz. w argonie. [H2]

Zaobserwowana wyższa ruchliwość wodoru w materiale o przewodnictwie dziurowym wynika najprawdopodobniej z większej koncentracji zjonizowanych wakansów, których populacja jest opisywana statystyką Fermiego-Dirac'a, a zatem zależna od poziomu Fermiego w półprzewodniku. Jednocześnie oba profile głębokościowe wykazują charakterystyczne gwałtowne spadki koncentracji, wskazujące na dyfuzję ze współczynnikiem dyfuzji zależnym od koncentracji. Tak charakterystyczne przebiegi pojawiają się w przypadku wielu różnych domieszek w różnych półprzewodnikach i wskazują, że dyfuzja atomów jest determinowana przez dodatkowy czynnik spowalniający dyfuzję [13, 14, 15, 16]. Może to być poziom defektów pułapkujących domieszkę wynikający z poziomu Fermiego, stan ładunkowy domieszki wpływający na jej mobilność również zależny od poziomu Fermiego czy, jak to może mieć również miejsce w SiC, koncentracja domieszek tworzących kompleksy z dyfundującymi atomami. Wodór dyfundując w kolejne warstwy półprzewodnika najpierw pasywuje domieszkę stając się mniej mobilny, następnie po wysyceniu wszystkich defektów nadmiarowe atomy dyfundują głębiej i proces się powtarza. Charakterystyczny punkt „zagięcia profilu” dla wodoru w SiC występuje przy poziomie równym zarówno koncentracji akceptorów jak i donorów. Jednocześnie szybkość dyfuzji jest większa dla materiału domieszkowanego borem, co wskazywałoby na niższą energię wiązania H–B w porównaniu do wiązania H–N. W swojej pracy wykazaliśmy również, że zastosowanie wyższych dawek implantacji prowadzi do utworzenia nieodwracalnej, dobrze zdefiniowanej warstwy mikrowgłębień, pęcherzyków i innych defektów rozciągniętych zawierających duże ilości zaaglomerowanego wodoru. W wysokich temperaturach, taka warstwa ma tendencję do tzw. eksfoliacji, czyli oddzielania się od podłoża. Dodatkowo w zdefektowanej warstwie zaobserwowano wysoką zawartość tlenu, którego koncentracja drastycznie przekraczała poziom obserwowany zazwyczaj w objętościowym węglu krzemu. Wyniki badań nad pochodzeniem tych nadmiarowych ilości tlenu przedstawiliśmy w kolejnej publikacji [H3]. Celem tej pracy było wyjaśnienie źródła wbudowywania się tlenu do 4H-SiC – półprzewodnika, w którym uważa się, że zarówno rozpuszczalność jak i dyfuzyjność tlenu są niezmiernie niskie. W tym celu do węgla krzemu został zaimplantowany wodór oraz deuter w zakresie energii 200 – 1000 keV i dawek 10^{16} – 10^{17} at/cm². Zastosowanie deuteru zamiast wodoru pozwoliło na lepszą wykrywalność pierwiastka metodą SIMS i wyższą gęstość energii zdeponowanej na końcu ścieżki penetracji jonów gdzie formuje się najwięcej zniszczeń. Dla porównania, zaimplantowane zostały w ten sam sposób również podłoża krzemowe otrzymane metodą Czochralskiego oraz FZ (floating–zone). Badania SIMS podobnie jak w pierwszej publikacji [H2] wykazały, że wygrzewanie tak zniszczonej radiacyjnie warstwy zarówno w Si jak i w SiC powoduje aglomerację wielu

zanieczyszczeń. Tlen został wykryty w obu tak wytworzonych warstwach w krzemie. W przypadku SiC również zostały zaobserwowane wysokie koncentracje tlenu na międzypowierzchni pomiędzy podłożem a zaimplantowaną warstwą po wygrzewaniu w temperaturze 1150°C zarówno w parze wodnej jak i w czystym argonie Rys. 4a i 4b.



Rys. 4 Profil wodoru i tlenu w warstwach implantowanych wodorem o energii 1MeV dawką 10¹⁷/cm² wygrzewanej w 1150°C: a) w Ar, b) w H₂O, oraz c) w warstwie nieimplantowanej wygrzewanej w temperaturze 1200°C w H₂O. [H3]

W przypadku wygrzewania podłożowego kryształu SiC w atmosferze pary wodnej, dyfuzji tlenu ani wodoru nie zaobserwowano Rys. 4c. Poza tym poczyniono następujące obserwacje. Wygrzewanie implantowanych próbek krzemowych w powietrzu i w argonie w temperaturze 725°C spowodowało całkowitą ucieczkę deuteru i pojawienie się wodoru w obszarze zniszczeń. Dalsze wygrzewania próbek Si w wyższych temperaturach skutkowało obniżeniem zawartości wodoru i zwiększanie tlenu w warstwie zdefektowanej radiacyjnie.

W przypadku SiC, wodór nie wydyfundował całkowicie z półprzewodnika nawet w temperaturze 1150°C. Jednocześnie nastąpiła całkowita eksfoliacja warstwy SiC w warunkach:

- implantacji H o energii 400keV i dawce 8×10¹⁶/cm² i wygrzewaniu w 1050°C
- implantacji ²H o energii 600keV i dawce 1,2×10¹⁷/cm² i wygrzewaniu w 950°C.

Najciekawsze wyniki otrzymaliśmy natomiast w próbkach implantowanych atomami o najwyższej energii czyli 1 MeV. Podobnie jak w przypadku doświadczenia opisanego w publikacji [H2] przy wygrzewaniu w najwyższej temperaturze 1150°C, zaobserwowaliśmy dyfuzję wodoru do powierzchni z charakterystycznym spadkiem koncentracji wskazującym na współczynnik dyfuzji zależny od koncentracji Rys. 4a i 4b. Jednocześnie wygrzewanie nie

przyniosło mierzalnej dyfuzji wodoru do głębszych warstw próbki. Jednak najbardziej spektakularnym wynikiem było wytworzenie warstwy wzbogaconej w tlen w miejscu największych zniszczeń radiacyjnych, odpowiadającej zasięgowi implantacji wodoru. Warto dodać, że warstwę tlenową zaobserwowano również w próbce wygrzewanej w nominalnie czystym argonie Rys. 4b. Porównując ilość tlenu zawartego we wzbogaconej warstwie w próbce wygrzewanej w argonie ($[O] = 10^{15} / \text{cm}^2$) do maksymalnej ilości tlenu wyliczonej z jego koncentracji na podstawie Rys. 4c, można stwierdzić, że ilość zaglomerowanego tlenu przekracza ilość tlenu w całej 300 mikronowej próbce SiC. Taki wynik sugeruje, że źródłem tlenu nie jest kryształ SiC tylko atmosfera, w której jest wygrzewana próbka. Wniosek ten umacnia fakt, że jeszcze wyższą zawartość tlenu uzyskano w próbce wygrzewanej w parze wodnej Rys. 4b. Jednocześnie bardzo niska rozpuszczalność tlenu w SiC nie sprzyja dyfuzji pierwiastka z powierzchni próbki do warstwy tlenowej, więc tworzenie się takiej warstwy nie może być wynikiem standardowego procesu dyfuzji. W publikacji zapostulowaliśmy, że większość tlenu znajdująca się w takiej warstwie przedostaje się do tej porowatej warstwy z brzegów próbki. Natura takiej dyfuzji przez brzegi próbki wymaga dalszych badań, nie ulega jednak wątpliwości, że okolicznością sprzyjającą temu nieobserwowanemu dotąd procesowi jest znaczna porowatość warstwy zagrzebanej, z widocznymi w obrazie TEM pustymi przestrzeniami (voids) i jamami (cavities).

5.4 Właściwości wodoru w GaN [H4]

Wzrost zainteresowania badaniami nad wodorem w azotku galu nastąpił w momencie, gdy próbowano wytworzyć złącze *p-n* na bazie GaN. Okazało się, że warstwy domieszkowane magnezem mają wysoką oporność mimo bardzo wysokiej koncentracji domieszki. Dopiero Nakamura pokazał, że wynika to z pasywacji magnezu przez wodór, który tworzy z nim nieaktywne kompleksy [17]. Wygrzewanie warstw w odpowiedniej temperaturze powoduje zrywanie wiązań Mg-H a tym samym aktywację domieszki. Co ciekawe, późniejsze doświadczenia z wodorem w GaN w niskich jak na azotek temperaturach wykazały zupełny brak mobilności domieszki do temperatury 900°C zarówno w GaN, jak i w InN i AlN [18]. Wynikałoby stąd, że przy wygrzewaniu w wysokich temperaturach wodór jedynie zrywa wiązania z magnezem, natomiast nie jest usuwany z materiału. Kolejne badania pokazały jednak, że można wygasić przewodnictwo akceptorowe w warstwach GaN wytworzonych metodą MBE poprzez wprowadzenie do nich wodoru [19]. Dopiero wyliczenia z *pierwszych zasad* wyjaśniły, na czym polega różnica w mobilności wodoru w materiałach z różnym

poziomem Fermiego [20]. Wodór jako proton H^+ preferuje pozycję w pobliżu azotu, tworząc z nim wiązanie podobne do wiązania występujących w amoniaku NH_3 . Wśród możliwych pozycji obu atomów pozycja antywiążąca azotu jest energetycznie najbardziej stabilna dla ich wiązania. Co ciekawe, jest to zupełnie inna pozycja niż w Si i GaAs, a wynika to z polarnośći azotku galu. Autorzy wyliczyli energię migracji dla tak związanego wodoru, która wynosi 0,7 eV. Dla wodoru neutralnego H^0 stwierdzono dużo mniejsze różnice w energii w zależności od miejsca w sieci, przez co najbardziej stabilną konfiguracją dla neutralnego wodoru jest pozycja antywiążąca z Ga. Dla protonu z dwoma elektronami H^- również pozycja antywiążąca Ga jest najbardziej stabilna, podobnie jak pozycja tetraedryczna-miedzywęzłowa, w której wodór jest maksymalnie odległy od atomów Ga, a gęstość ładunku kryształu w miejscu wiązania ma minimum. W tej pozycji bariera energetyczna dla migracji wodoru wynosi aż 3,4 eV. Jak widać z wyliczeń teoretycznych, stan ładunkowy wodoru w GaN wpływa na jego współczynnik dyfuzji. W materiale typu *n* (np. GaN:Si) jest on znacznie niższy niż w materiale typu *p* (np. GaN:Mg), co zostało pokazane poprzez wyliczenia z pierwszych zasad [21,22] oraz dobrze potwierdzone eksperymentalnie w warstwach implantowanych wodorem [23], w warstwach, do których wodór wdyfundowano z plazmy [24, 25] oraz w strukturach epitaksjalnych [26].

Podczas mojej współpracy z laboratorium epitaksji warstw półprzewodnikowych w ITME, jednym z pierwszych zadań było opracowanie metody usuwania wodoru w warstwach GaN:Mg otrzymanych metodą MOCVD. Tym samym wykonano serię wygrzewań tak otrzymanych warstw w różnych temperaturach i atmosferach. Koncentrację wodoru w wygrzewanych warstwach wyznaczano metodą SIMS. Praca opublikowana w *Optica Applicata* [47] opisuje wyniki tych badań. Pomiary SIMS pokazały, że wygrzewanie już w temperaturze 900°C przez 15 min w atmosferze N_2 pozwala usunąć wodór do poziomu tła będącego w tych pomiarach SIMS na poziomie 10^{18} at/cm³.

Jednoczesne pomiary wodoru i magnezu pozwoliły mi opracować metodologię pomiaru Mg w GaN przy użyciu jonów ujemnych, co jest niestandardową metodą pomiaru tego elektrododatniego pierwiastka. Wykazałem, że profil Mg można otrzymać mierząc klaster jonowy $MgGaN^-$ uzyskując wykrywalność Mg w warstwach GaN na poziomie 10^{17} at/cm³.

W doświadczeniu z dyfuzją wodoru w różnie domieszkowanych warstwach GaN opisanych w artykule [H4] wykazaliśmy zależność współczynnika dyfuzji od rodzaju domieszkowania. Jednak w odróżnieniu od wcześniejszych prac na ten temat, doświadczenie przeprowadzono na homoepitaksjalnych warstwach GaN z niską (10^7 /cm²) koncentracją dyslokacji. Pozwoliło to obserwować jedynie dyfuzję w objętości kryształu i obniżyć wpływ dyfuzji wodoru po dyslokacjach. W tym celu 4 różne warstwy z gęstością dyslokacji i typem przewodnictwa

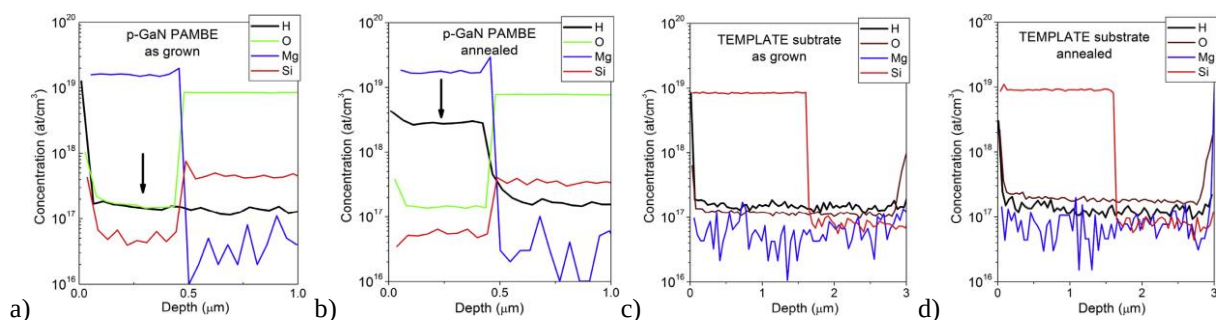
przedstawionym w tabeli 1, zostały wygrzane w reaktorze MOCVD w temperaturze 1020°C w atmosferze H_2-NH_3 przez 20 min.

Próbka	Gęstość dyslokacji ($1/cm^2$)	Typ przewodnictwa i koncentracja nośników ($1/cm^3$)
kryształ objętościowy	10^7	$n = 6,1 \times 10^{18}$
warstwa GaN:Mg (MBE)	10^7	$p = 3,5 \times 10^{17}$
warstwa GaN:Si template	5×10^8	$n = 3,6 \times 10^{18}$
warstwa GaN:Mg (MOCVD)	5×10^8	$p = 7,2 \times 10^{17}$

Tabela 1 Parametry próbek wykorzystanych w doświadczeniu.

Kluczową metodą wykorzystaną do badania profili głębokościowych wodoru była oczywiście metoda SIMS. Główną trudnością w pomiarze SIMS było osiągnięcie odpowiedniej wykrywalności wodoru w warstwach GaN:Mg grubości 0,5 μm i GaN:Si grubości 1,5 μm . Przy takich grubościach warstw GaN wartość prądu wiązki pierwotnej oraz ustawienia optyki wiązki wtórnej musi być odpowiednia dla osiągnięcia jednocześnie wysokiej wykrywalności (niskie tło wodoru) przy zachowaniu odpowiedniej rozdzielczości głębokościowej. W swoich pomiarach osiągnąłem wykrywalność wodoru na poziomie 2×10^{17} at/cm³, co jest wartością tylko rząd wyższą w porównaniu do osiągniętej w kryształach objętościowych GaN [H6], gdzie można zastosować wyższe gęstości prądu wiązki pierwotnej.

W badaniach wykazaliśmy wysoki współczynnik dyfuzji wodoru w warstwach azotku galu typu *p* (Rys. 5a i 5b), oraz brak dyfuzji wodoru w warstwach typu *n* (Rys. 5c i 5d).



Rys. 5 Profile głębokościowe pierwiastków w: a) niewygrzewanej warstwie GaN:Mg, b) wygrzewanej warstwie GaN:Mg, c) niewygrzewanej warstwie GaN:Si, d) wygrzewanej warstwie GaN:Si, zmierzone metodą SIMS. [H4]

Pomiary luminescencji przeprowadzone na próbkach wykazały największe efekty w warstwie GaN:Mg otrzymanej metodą MBE. W warstwie tej, która w pomiarze SIMS nie wykazała obecności wodoru przed wygrzewaniem i wysoką koncentrację wodoru po wygrzewaniu (Rys 5a i 5b), zaobserwowano obniżenie i przesunięcie „niebieskiej” luminescencji oraz wzrost „żółtej” luminescencji w porównaniu do próbki wyjściowej. Efekt wynikał

najprawdopodobniej z pasywacji domieszki Mg przez wodór poprzez utworzenie kompleksów Mg-H (obniżenie „niebieskiej luminescencji”), oraz utworzenie kompleksów wodoru z wakansem galowym V_{Ga} -H („żółta luminescencja”).

5.5 Właściwości tlenu w krzemie [H5]

Powyższe prace zostały poświęcone tematowi chyba najlepiej zbadanemu przez naszą grupę, a mianowicie badaniom właściwości termodynamicznych tlenu w krzemie za pomocą metody SIMS, na podstawie jego rozpuszczalności i dyfuzji. Pierwsze wyniki tych badań zostały opublikowane jeszcze przed doktoratem w pracy [49]. Praca [H5], która ukazała się w czasopiśmie *Surface and Interface Analysis* w ubiegłym roku, jest podsumowaniem naszych wieloletnich badań w tym zakresie, prowadzonych głównie na detektorach krzemowych wykonanych dla **Europejskiego Zderzacza Hadronów Europejskiej Organizacji Badań Jądrowych CERN**.

W krzemie, podobnie jak w SiC, warstwy SiO_2 służą jako izolatory, maski i bariery bramkowe w tranzystorach półprzewodnikowych MOS. Kryształy krzemu wyprodukowane metodą Czochralskiego zawierają zwykle tlen w ilościach od $7\text{--}10 \times 10^{17}$ at/cm³. W temperaturze pokojowej przesycony tlenem Si jest stabilny, ponieważ atomy tlenu zajmują głównie miejsca międzywęzłowe (*ang. bond-centered interstitial*) w sieci krystalicznej [27]. W podwyższonych temperaturach dyfuzja tlenu prowadzi do jego agregacji, wytrącania się SiO_x oraz do migracji tlenu atomowego w kierunku zewnętrznych granic próbki [28]. Jeśli zawartość tlenu jest wystarczająco niska, jak w przypadku krzemu otrzymanego metodą FZ (*ang. floating-zone*), możliwe jest wprowadzenie tlenu do półprzewodnika z termicznie uformowanej lub osadzonej warstwy SiO_2 [29]

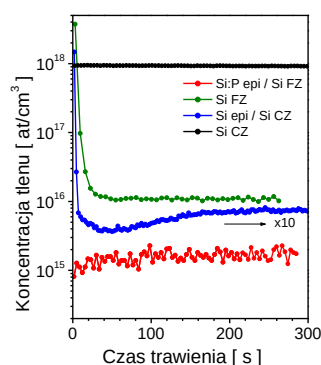
W celu określenia głównych wielkości termodynamicznych tlenu w Si przedmiotem wielu badań przy użyciu szerokiego spektrum metod były dyfuzyjność i rozpuszczalność tego pierwiastka w kryształach. Absorpcja w podczerwieni z transformacją Fouriera FTIR (*ang. fourier transform infrared absorption*) umożliwia pomiar zawartości tlenu w kryształach otrzymanych metodą Czochralskiego (CZ Si) [30]. Metodą analizy rentgenowskiej można wykryć gradient naprężenia sieci wywołany przez indyfuzję tlenu do krzemu FZ [31]. Do określenia koncentracji izotopu tlenu ^{18}O z warstw SiO_2 posłużyła również metoda szybkości rozpadu β izotopu fluoru ^{18}F wytworzonego przez reakcję jądrową (p, n) [32]. Jednocześnie pierwsze analizy metodą SIMS miały niewystarczający poziom wykrywalności domieszki [33]. Należy zauważyć, że FTIR nie ma odpowiedniej rozdzielczości przestrzennej i jest wrażliwy

wyłącznie na międzywęzłowe atomy tlenu, podczas gdy SIMS dostarcza informacji na temat profilu głębokości zarówno izolowanych, jak i zaglomerowanych atomów tlenu. Ogrzewanie przesyconego tlenem krzemu prowadzi do ucieczki (outdiffusion) międzywęzłowych atomów O i ich segregacji na powierzchni materiału, pozostawiając tak zwaną "strefę zubożoną" w półprzewodniku. Uzyskaną w ten sposób koncentrację pierwiastka przy powierzchni $C_{\text{surf}}(\text{out})$, powszechnie przyjmowano jako rozpuszczalność C_s tlenu w danej temperaturze. [34, 35, 36] W toku naszych prac wykazaliśmy, że właściwą miarą C_s jest stężenie powierzchniowe $C_{\text{surf}}(\text{in})$, wyznaczone z profilu głębokościowego powstałego z dyfuzji tlenu do krzemu FZ Si [49]. Dzieje się tak, ponieważ dyfuzja atomowa jest procesem równowagowym i stosując wystarczająco szybkie chłodzenie do temperatury pokojowej, można zapobiec wytrącaniu się nadmiarowego tlenu w niższych temperaturach. Profil wynikający z dyfuzji nie może dostarczyć wiarygodnych informacji o rozpuszczalności tlenu, gdyż dyfuzji atomowej towarzyszy agregacja w wytrącenia SiO_2 , które nie są usuwane z materiału poprzez dyfuzję. W konsekwencji koncentracja powierzchniowa wynikająca z profilu dyfuzji $C_{\text{surf}}(\text{out})$, określana na podstawie pomiaru SIMS, zawsze jest wyższa niż koncentracja wynikająca w profilu dyfuzji tlenu do kryształu krzemu $C_{\text{surf}}(\text{in})$. Ostatecznie wyznaczony przez nas wzór na rozpuszczalność tlenu w krzemie przedstawia się następująco:

$$C_s = 9,1 \times 10^{22} e^{\left(\frac{-1,57 \text{ eV}}{kT}\right)}$$

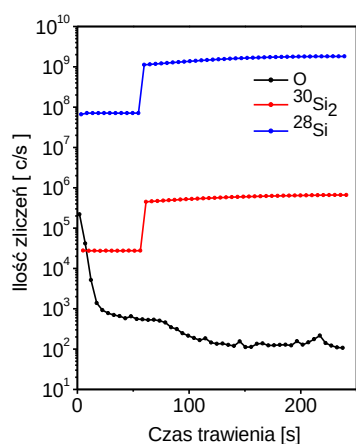
Jeśli chodzi o współczynnik dyfuzji tlenu w Si, którego oznaczenie wymaga jedynie względnych wartości profilu stężenia, nasze wyniki nie odbiegają znacząco od wcześniej ustalonych [37].

Nasze rozważania nt. pomiarów tlenu w krzemie metodą SIMS warto rozpocząć od limitu detekcji tego pierwiastka. Rys. 6 przedstawia wykres pomiarów koncentracji tlenu w krzemie wytworzonym różnymi metodami:



Rys. 6 Koncentracja tlenu zmierzona w kryształach krzemu otrzymanych różnymi metodami: epi Si / FZ Si, FZ Si, epi Si / CZ Si oraz CZ Si. [H5]

Wartości 10^{18} at/cm³ i 10^{16} at/cm³ są typowymi wartościami koncentracji tlenu w kryształach otrzymanym odpowiednio metodą Czochralskiego oraz metodą FZ. Zmierzony przez nas rekordowo niski sygnał tlenu odpowiadający koncentracji 2×10^{15} at/cm³ został osiągnięty w pomiarze krzemu osadzonego metodą epitaksji CVD (*ang. chemical vapour deposition*). Ta koncentracja zgadza się z limitem detekcji przewidzianym przez autorów [38] poprzez ekstrapolację danych eksperymentalnych do idealnej próżni. Profil tlenu otrzymano przy kilkuminutowym nieprzerwanym trawieniu próbki wiązką Cs⁺ o energii 14,5 keV. Warto zauważyć, że do pomiaru zostało użyte źródło cezowe z zawartością chromianu cezu, które daje dużo większą jasność źródła niż standardowo używane obecnie w spektrometrach źródła z węglanem cezu. Pozwoliło to osiągnąć prąd wiązki na poziomie 600 nA. Seria testów z różnymi rozmiarami rastra (obszarami trawienia) pokazała, że sygnał tlenu pochodzi od cząsteczek adsorbowanych podczas pomiaru na mierzonej powierzchni, które są następnie rozpylane przez wiązkę pierwotną. Jeden z takich testów został przedstawiony na wykresie Rys. 7.



Rys. 7. Profil jonów tlenu i krzemu otrzymany metodą SIMS. Skok sygnału na profilach Si jest spowodowany intencjonalnym zwiększeniem gęstości prądu wiązki pierwotnej (zmiana rastra) [H5]

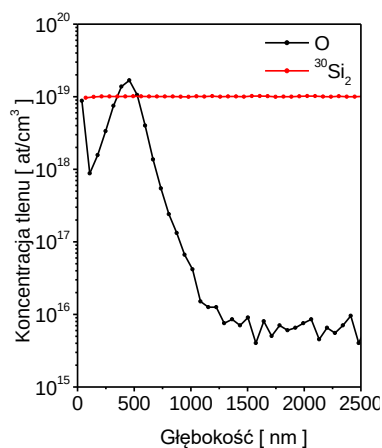
Próbkę epitaksjalnego krzemu najpierw trawiono wiązką rastrowaną na obszarze 200×200 mikrometrów, a następnie zmieniono obszar skanowania na 50×50 mikrometrów, co spowodowało skok sygnału Si przy jednoczesnym braku podobnego efektu dla tlenu. Niepodążanie sygnału tlenowego za sygnałem matrycy oznacza, że źródło sygnału nie pochodzi z próbki, lecz z jej otoczenia. W naszym systemie pomiarowym współczynnik RSF (*ang. relative sensitivity factor*), czyli współczynnik konwersji sygnału jonów tlenu do koncentracji tlenu wynosi:

$$C_O = 10^{19} \frac{I_{16O}}{I_{30Si_2}} (\text{at/cm}^3)$$

gdzie: C_O – koncentracja tlenu, I_{16O} – sygnał tlenu, I_{30Si_2} – sygnał krzemu.

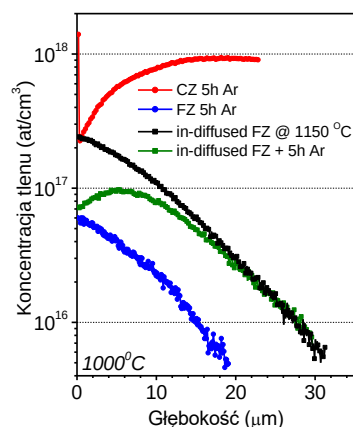
Tym samym wynik przedstawiony na wykresie wskazuje, że warstwy epitaksjalne krzemu mają ekstremalnie niską koncentrację tlenu ($<10^{15}$ at/cm³), natomiast adsorpcja tlenu podczas tak czułego pomiaru musi być monitorowana i minimalizowana w największym możliwym stopniu. Warto zauważyć, że nie ma w literaturze potwierdzonego pomiaru profilu dla tak niskiej zawartości tlenu w Si. Większość struktur epitaksjalnych wytwarzanych jest na podłożu krzemowym otrzymywanym metodą Czochralskiego z koncentracją tlenu powyżej 10^{18} at/cm³, który podczas wzrostu w temperaturze 1100°C dyfunduje do warstwy zewnętrznej.

Tak więc osiągnięcie niskiego poziomu wykrywalności pierwiastka wymaga dużej gęstości wiązki pierwotnej, tak aby strumień jonów (w tym przypadku tlenu) pochodzących z próbki w wiązce wtórnej przeważał nad jonami adsorbowanymi na powierzchni, a następnie wtórnie wybijanymi z próbki. Jednakże, podczas gdy strumień adsorbowanych jonów jest stały, to strumień jonów wybijanych z próbki zależy od gęstości prądu wiązki pierwotnej. Tak więc gęstość prądu musi być tak dobrana, żeby prędkość trawienia próbki była odpowiednia do rozdzielczości głębokościowej, jaką chcemy osiągnąć w celu uwidocznienia struktur/warstw, które zwiera próbka. Poniżej przykład próbki krzemu implantowanej tlenem o energii 210 keV i dawce 5×10^{14} /cm². Aby móc poprawnie określić profil tlenu, prędkość trawienia należało obniżyć do 20 nm/s, co jednocześnie podwyższyło poziom tła, a tym samym wykrywalności tlenu do 5×10^{16} at/cm³ Rys. 8.



Rys. 8. Profil głębokościowy tlenu implantowanego do krzemu epitaksjalnego. Dawka 5×10^{14} at/cm², energia 210 keV [H5]

Zastosowanie opisanych powyżej warunków pozwoliło poznać kinetykę tlenu w kryształach Si. Na wykresie Rys. 9 pokazane są profile tlenu otrzymane w różnych warunkach.

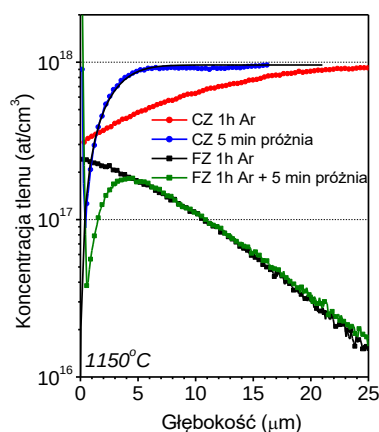


Rys. 9. Profile tlenu: - po dyfuzji z CZ Si (czerwony), - po dyfuzji do FZ Si (niebieski), - po dyfuzji do FZ Si w temp. 1150°C (czarne), - po dodatkowym wygrzewaniu próbki poprzedniej (zielone) [H5]

Przede wszystkim warto zauważyć różnicę w koncentracjach powierzchniowych tlenu w kryształach otrzymanych metodą FZ (niska koncentracja O) i Czochralskiego (wysoka koncentracja O) po wygrzewaniu w 1000°C. Do pierwszej próbki tlen dyfunduje, natomiast z drugiej wydyfundowuje. Jednocześnie koncentracje powierzchniowe tlenu nie są identyczne mimo jednakowych warunków wygrzewania. Inaczej jest w warunkach, gdy wdyfundujemy tlen w wyższej temperaturze (czarny profil), a następnie wygrzejemy w niższej (zielony) profil. Wtedy koncentracja powierzchniowa tlenu staje się porównywalna w tych samych warunkach wygrzewania (profil zielony i niebieski).

Powszechnie obserwowanym zjawiskiem przy wygrzewaniu krzemu otrzymanego metodą Czochralskiego ($C_O = 10^{18}$ at/cm³) jest dyfuzja (outdiffusion) tlenu z warstwy przypowierzchniowej kryształu do tlenku powierzchniowego. Koncentracja tlenu na międzypowierzchni SiO₂/Si jest wówczas zależna od rozpuszczalności i stopnia segregacji tlenu w określonych warunkach wygrzewania. Teoretycznie, przy atomowo czystej powierzchni niezawierającej tlenku wygrzewanie powinno skutkować zerową koncentracją tlenu na powierzchni kryształu.

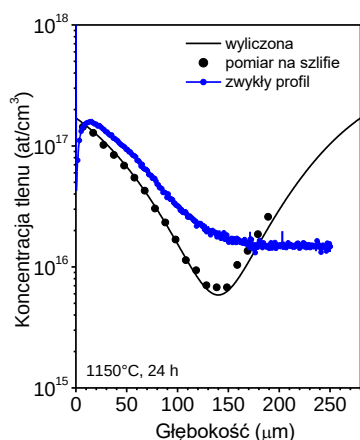
Jedną z metod próby realizacji takich warunków jest wygrzewanie krzemu w próżni. Do tego doświadczenia zastosowano komorę próżniową do odparowywania metali. Profile tlenu w próbkach krzemowych poddanych takiemu eksperymentowi prezentuje wykres na Rys. 10.



Rys. 10. Profile dyfuzji tlenu do Si FZ (czarny) i dyfuzji tlenu z Si CZ (czerwony) po wygrzewaniu w 1150°C, oraz efekt 5 min. wygrzewania w próżni w temp. 1150°C dla próbki CZ Si (niebieski) i próbki FZ Si (zielony) [H5]

Profile tlenu w próbce CZ Si oraz w próbce z wcześniej dyfundowanym tlenem wykazują koncentrację powierzchniową o rząd niższą niż dla próbek wygrzewanych w argonie. Wynik ten pokazuje, że naturalny tlenek znajdujący się na powierzchni krzemu w warunkach wygrzewania w próżni sublimuje, przez co otrzymujemy czystą powierzchnię krzemu, przez którą tlen dyfunduje do otoczenia bez przeszkód.

Jedną z trudności w pomiarach SIMS jest wykonanie bardzo głębokich profilów głębokościowych, tak jak np. w przypadku dyfuzji tlenu z obydwu stron 300 mikronowego podłoża krzemowego. W takim przypadku głębokość trawionego krateru byłaby porównywalna z jego rozmiarami poprzecznymi, co skutkuje redepozycją rozpylonego materiału na dnie krateru i powoduje uzyskanie nierzeczywistego profilu pierwiastka (Rys. 11). W tym celu wykonuje się pomiar wielopunktowy na szlifie skośnym próbki, otrzymując koncentracje mierzonego pierwiastka na coraz większych głębokościach próbki. Warto zauważyć, że zwiększenie rozpylanej powierzchni skutkowałoby polepszeniem profilu tlenu, jednakże wydłużyłoby znacznie czas pomiaru oraz pogorszyło wykrywalność pierwiastka.



Rys. 11. Porównanie wyników dotyczących dyfuzji tlenu do FZ Si [H5]: (1) wyliczonego numerycznie $D=2 \times 10^{-10} \text{ cm}^2/\text{s}$, $C_0=1,7 \times 10^{17} \text{ at/cm}^3$, (2) pomiar punktowy na szlifie (3) zwykły profil SIMS. Szczegóły w publikacji [39]

5.6 Właściwości pierwiastków atmosferycznych w półprzewodnikach szerokoprzerwowych (H6)

Powyższa publikacja jest przeglądem i podsumowaniem wieloletnich badań związanych z obecnością pierwiastków atmosferycznych w półprzewodnikach szerokoprzerwowych tj. GaN, ZnO i SiC wykonywanych w moim laboratorium. Publikacja zawiera 4 działy dotyczące właściwości poszczególnych pierwiastków atmosferycznych czyli H, C, N i O i tak, pierwszy rozdział dotyczy właściwości wodoru w GaN, ZnO i SiC, drugi rozdział opisuje właściwości węgla w GaN i ZnO, trzeci rozdział dotyczy właściwości azotu w ZnO i SiC, natomiast czwarty rozdział opisuje właściwości tlenu w GaN i SiC. Wszystkie rozdziały zawierają również metodologię pomiarów metodą SIMS poszczególnych pierwiastków w odpowiednich materiałach opracowaną na podstawie własnych doświadczeń pomiarowych. W tym celu zostały wykonane wzorce poszczególnych pierwiastków w badanych półprzewodnikach w postaci implantowanych próbek o określonej dawce D i energii implantacji E:

a) wodór w

- GaN – $D=1e16\text{ cm}^{-2}$, $E=25\text{ keV}$,
- ZnO – $D=1e16\text{ cm}^{-2}$, $E=250\text{ keV}$,
- SiC – $D=1e16\text{ cm}^{-2}$, $E=150\text{ keV}$

b) węgiel w

- GaN – $D=1e16\text{ cm}^{-2}$, $E=350\text{ keV}$,
- ZnO – $D=1e16\text{ cm}^{-2}$, $E=500\text{ keV}$,

c) azot w

- ZnO – $D=8,6e15\text{ cm}^{-2}$, $E=500\text{ keV}$,
- SiC – $D=2e16\text{ cm}^{-2}$, $E=100\text{ keV}$,

d) tlen w

- GaN – $D=1e16\text{ cm}^{-2}$, $E=400\text{ keV}$,
- SiC – $D=5e15\text{ cm}^{-2}$, $E=100\text{ keV}$.

Wszystkie wzorce zostały zmierzone metodą SIMS w różnych warunkach pomiarowych:

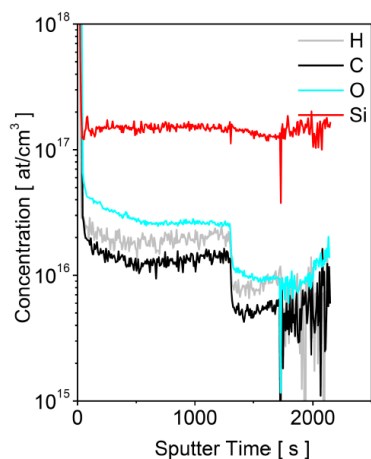
- a) wiązka O_2^+ (8keV), mierzone jony dodatnie, prąd 800 nA, powierzchnia trawiona $R=200\times200\text{ }\mu\text{m}$,
- b) wiązka Cs^+ (5,5keV), mierzone jony dodatnie, prąd $I=200\text{ nA}$, powierzchnia trawiona $R=200\times200\text{ }\mu\text{m}$,

- c) wiązka Cs^+ (14,5keV), mierzone jony ujemne, prąd $I = 200 \text{ nA}$, powierzchnia trawiona $R=200 \times 200 \text{ }\mu\text{m}$,

jednakowych dla poszczególnych pierwiastków. Porównanie profili głębokościowych pierwiastków atmosferycznych dla poszczególnych warunków pomiarowych pozwoliło wyznaczyć najlepszą metodologię pomiarową dla tych pierwiastków. Mimo, że wszystkie te pierwiastki osiągają najlepszą wykrywalność jako aniony, to jednocześnie opracowałem metodologię pomiarów tych pierwiastków jako jonów dodatnich. Wyniki przedstawione w pracy przedstawiają okoliczności i możliwości detekcji pierwiastków atmosferycznych jako wtórnych jonów dodatnich. Ma to szczególne zastosowanie w przypadku gdzie jednocześnie badanie tych pierwiastków z pierwiastkami ściśle elektrododatnimi ma kluczowe znaczenie dla zrozumienia procesów zachodzących w materiałach półprzewodnikowych. Przykłady takich pomiarów opublikowanych w recenzowanych czasopismach są zgromadzone w odnośnikach do pracy.

Szczególny nacisk został położony na wykrywalność azotu, który ze wszystkich pierwiastków atmosferycznych ma najniższe powinowactwo elektronowe i na najwyższą energię jonizacji. Te parametry azotu są również skrajnie niekorzystne dla badania metodą SIMS, w porównaniu do pozostałych pierwiastków Układu okresowego. W swojej pracy opisałem metodologię potrzebną do osiągnięcia odpowiedniej wykrywalności azotu (detekcje jak najniższych koncentracji) poprzez pomiar jego klastrów z innymi pierwiastkami tj. N-Si i N-C w węglu krzemu czy N-O w tlenku cynku.

Praca zawiera również wynik pomiaru SIMS pokazujący rekordowo niski pomiar pierwiastków atmosferycznych w azotku galu otrzymanego metodą HVPE (*ang. Halide Vapor Phase epitaxy*). Odpowiednia metodologia pozwoliła na osiągnięcie poziomu detekcji dla wodoru na poziomie $8 \times 10^{15} \text{ at/cm}^3$, węgla – $5 \times 10^{15} \text{ at/cm}^3$ i tlenu – $10 \times 10^{16} \text{ at/cm}^3$ (Rys. 12)



Rys. 12. Profile głębokościowe H, C, O i Si w kryształach objętościowym GaN [H6]

Wyraźne spadki na profilach SIMS poszczególnych pierwiastków atmosferycznych wynikają właśnie z testowania metodologii pomiaru poprzez zwiększenie gęstości prądu wiązki pierwotnej przy odpowiednich ustawieniach optyki wiązki wtórnej.

Przygotowane przeze mnie próbki implantowane poszczególnymi pierwiastkami, posłużyły również jako wzorce dla wyznaczenia współczynników RSF (*ang. relative sensitivity factor*) dla tych pierwiastków, umożliwiając ilościowe określanie koncentracji atomowej.

Bibliografia powyższej publikacji zawiera blisko 50 odnośników literaturowych, w których wykonane przeze mnie pomiary metodą SIMS stanowiły istotny wkład w zrozumienie wyników przedstawionych w cytowanych pracach.

6. Informacje bibliometryczne

6.1 Całkowita liczba publikacji

191 w tym **160** po uzyskaniu stopnia doktora nauk fizycznych. Prace w znakomitej większości publikowane były w recenzowanych czasopismach o wysokiej renomie międzynarodowej, takich jak:

- Acta Physica Polonica – 21 artykułów (wszystkie po uzyskaniu stopnia doktora)
- Journal of Crystal Growth – 14 artykułów (w tym 13 po uzyskaniu stopnia doktora)
- Applied Physics Letters – 13 artykułów (w tym 10 po uzyskaniu stopnia doktora)
- Journal of Alloys and Compounds – 12 artykułów (w tym 11 po uzyskaniu stopnia doktora)
- Physical Review B – 9 artykułów (wszystkie po uzyskaniu stopnia doktora)
- Semiconductor Science and Technology – 8 artykułów (w tym 7 po uzyskaniu stopnia doktora)
- Journal of Physics: Condensed Matter – 4 artykuły (wszystkie po uzyskaniu stopnia doktora)
- Journal of Applied Physics – 4 artykuły (wszystkie po uzyskaniu stopnia doktora)

6.2 Sumaryczny Impact Factor publikacji

według listy *Journal Citation Reports* (JCR) zgodnie z rokiem opublikowania = **302**

6.3 Liczba cytowań publikacji

według bazy WoS z dn. 20/01/2020 = **1974** w tym bez autocytowań **1737**

6.4 Indeks Hirscha opublikowanych prac

według bazy WoS z dn. 20/01/2020 = **22**

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

7.1 Dorobek naukowy do uzyskania stopnia doktora nauk fizycznych

Po ukończeniu Technikum Elektronicznego w Rzeszowie w 1994 r. rozpocząłem studia w **Szkole Nauk Ścisłych, Niepublicznej Wyższej Szkole przy Polskiej Akademii Nauk**. Po wykonaniu dwóch ćwiczeń licencjackich: a) *Mikrofalowa spektroskopia rotacyjna i oscylacyjna cząsteczek* pod kierownictwem **prof. Z. Kisiela**, oraz b) *Niskotemperaturowe własności transportowe warstw PbTe otrzymanych metodą MBE* pod kierownictwem **prof. G. Grabeckiego**, uzyskałem stopień licencjata na makrokierunku fizyka, chemia i matematyka. Następnie kontynuowałem studia magisterskie na kierunku fizyczna aparatura pomiarowa. Jednocześnie zacząłem odbywać staż studencki w nowopowstałym laboratorium Spektrometrii Masowej Jonów Wtórnych na nowej aparaturze IMS6F firmy CAMECA pod kierownictwem **prof. Adama Barcza**. Na stażu oprócz doskonalenia pomiarów metodą SIMS, prowadziłem badania dotyczące dyfuzji i aktywacji krzemu w kryształach GaAs. Studia magisterskie zostały zakończone obroną pracy magisterskiej pt. *Implantacja krzemu do arsenku galu*, której promotorem był **prof. Adam Barcz**.

Po uzyskaniu tytułu magistra podjąłem studia doktoranckie w Instytucie Fizyki PAN w laboratorium SIMS pod kierownictwem **prof. Adama Barcza**. Jednocześnie podjąłem współpracę z **Laboratorium Epitaksji Warstw Półprzewodnikowych w Instytucie Technologii Materiałów Elektronicznych**. Celem współpracy było badanie struktur półprzewodnikowych na bazie GaAs, InP i GaN wytwarzanych metodą MOCVD. Współpraca przyniosła znaczący postęp w charakteryzacji struktur półprzewodnikowych metodą SIMS, co pozwoliło kolegom z laboratorium epitaksji wytwarzać coraz lepszej jakości struktury. Skutkowało to opublikowaniem wielu publikacji dotyczących właściwości i parametrów wzrostu epitaksjalnego takich materiałów jak InP [40, 41], GaN [42,43], InGaAs [44,45,46]. Współpraca z laboratorium epitaksji warstw półprzewodnikowych pozwoliła również prowadzić własne badania na dyfuzję domieszek w azotku galu. Wynikiem tych badań była własna praca opublikowana w czasopiśmie *Optica Applicata* [47] dotycząca usuwania wodoru z warstw GaN:Mg w celu aktywacji domieszki magnezowej.

W celu doskonalenia techniki pomiarowej SIMS odbyłem dwutygodniowy staż w laboratorium SIMS w Chalmers University of Technology w Geteborgu. W trakcie pobytu wyznaczałem krzywe kalibracyjne pozwalające określać skład trójskładnikowego związku półprzewodnikowego (Ga,Mn)As za pomocą metody SIMS.

W ramach studiów doktoranckich prowadziłem badania nad dyfuzją domieszek w materiałach półprzewodnikowych. Jeden z kierunków badań dotyczył dyfuzji tlenu w krzemie, których wyniki zostały opublikowane w czasopiśmie *Vacuum* [48] i *Semiconductor Science and Technology* [49]. Jednak moje główne zainteresowania dotyczyły dyfuzji domieszek w materiałach III-V. Pierwszym kierunkiem badawczym była dyfuzja i aktywacja krzemu w arsenku galu. W ramach tych badań zaobserwowano wpływ domieszkowania, a tym samym poziomu Fermiego, na dyfuzję Si w GaAs. Wyniki zostały opublikowane w czasopiśmie *Vacuum* [50]. Równoległym kierunkiem badań wynikającym jednocześnie z prac prowadzonych w ITME nad fotodetektorami na bazie fosorku indu, była dyfuzja Zn w InP. W tym półprzewodniku zaobserwowano wpływ warunków wygrzewania na generację wakansów indowych i fosforowych a w wyniku na współczynnik dyfuzji domieszki, jak również zależność współczynnika dyfuzji od koncentracji domieszki. Wyniki zostały również opublikowane w czasopiśmie *Vacuum* [51]. Kolejnym tematem badań wynikającym z wcześniejszych doświadczeń była dyfuzja krzemu w azotku galu. W tym materiale również zaobserwowano wpływ warunków wygrzewania na generację wakansów galowych uczestniczących w dyfuzji krzemu. Wyniki zostały zaprezentowane na konferencji ICNS-6 w Bremie i opublikowane w czasopiśmie *physica status solidi (c)* [52]. Ostatnim tematem badań wynikającym ze wzrostu zainteresowania półprzewodnikami półmagnetycznymi, była dyfuzja manganu w arsenku galu. Podobnie jak w poprzednich przypadkach badano wpływ warunków wygrzewania na współczynnik dyfuzji, zaobserwowano też zależność współczynnika dyfuzji od koncentracji. Wyniki zostały opublikowane w czasopiśmie *Journal of Alloys and Compounds* [53]. Ciekawe badania dotyczące dyfuzji Mn w CdTe wykonane we współpracy z **prof. Karczewskim** zostały opublikowane w czasopiśmie *Thin Solid Films* [54].

W ramach współpracy laboratorium SIMS z laboratoriami **Instytutu Fizyki PAN** prowadziłem również badania nad domieszkami i zanieczyszczeniami krysztalów objętościowych ZnO [55,56] (zakład ON 1.1 pod kierownictwem **prof. A. Mycielskiego**) oraz warstw ZnO otrzymanych metodą ALD [57] (zakład ON 4.2 pod kierownictwem **prof. M. Godlewskiego**). Ponadto zawiązałem współpracę z wiodącymi polskimi instytutami zajmującymi się technologiami półprzewodnikowymi. Dla Zakładu Mikro i Nanotechnologii Półprzewodników Szerokoprzerwowych w **Instytucie Technologii Elektronowej** pod kierownictwem **prof. Anny Piotrowskiej** wykonywałem analizy SIMS wspomagające badania nad warstwami ZnO [58, 59, 60, 61, 62] oraz kontaktami do półprzewodników szerokoprzerwowych [63, 64, 65, 66]. Dla **Instytutu Wysokich Ciśnień PAN** wykonywałem analizy domieszkowania warstw GaN:Mg otrzymanych metodą MBE [67].

Ponadto prowadziłem wspólne badania z wieloma laboratoriami zagranicznymi. We współpracy z laboratorium MBE w **Physikalisches Institut Universität Würzburg** badałem metodą SIMS właściwości warstw (Ga,Mn)As [68, 69]. Współpraca z **Lawrence Berkeley National Laboratory** przy badaniu zanieczyszczeń wodorem i tlenem jednej z pierwszych warstw InN otrzymaną metodą MBE, zaowocowała publikacją z największą w mojej bibliografii liczbą cytowań (195) [70].

Doskonalenie techniki pomiarowej SIMS oraz pomiarów profilometrem C-V (*ang. capacitance-voltage*) do badania dyfuzji i własności elektrycznych domieszek w półprzewodnikach GaAs, InP i GaN doprowadziło do napisania i obrony w czerwcu 2005 rozprawy doktorskiej pt. *Mechanizmy dyfuzji w półprzewodnikach A3B5*, której promotorem był **prof. A. Barcz**. W ramach studiów doktoranckich napisałem też program do konwersji danych otrzymanych z pomiaru aparaturą SIMS, do formatu ułatwiającego ich import do programu Origin. Napisałem również program symulujący dyfuzję w różnych warunkach termodynamicznych i różnych parametrach współczynnika dyfuzji.

7.2 Dorobek naukowy po uzyskaniu stopnia doktora nauk fizycznych

Po uzyskaniu stopnia doktora kontynuowałem współpracę z laboratoriami **Instytutu Fizyki PAN** jak również z pozostałymi instytutami zajmującymi się technologiami półprzewodnikowymi t.j. ITME, ITE i IWC PAN. Poszerzałem również współpracę z instytutami z Polski i zagranicy. Duży wkład w badania nad domieszkowaniem i zanieczyszczeniami krysztalów objętościowych GaN, które jednak ze względów komercyjnych nie miały przełożenia na publikację, przyniosła współpraca z firmą **Ammono**, która od 2007 r. zaczęła zlecać naszemu laboratorium badania swoich próbek. Podobną współpracę zawiązaliśmy z firmą **VIGO**, dla której mierzyliśmy struktury półprzewodnikowe na bazie CdTe.

Oprócz współpracy z poszczególnymi zespołami badawczymi w Instytucie Fizyki PAN w ramach prac statutowych kontynuowałem prace badawcze dotyczące dyfuzji i aktywacji atomów w półprzewodnikach. Ze względu na coraz większą popularność badań nad półprzewodnikami półmagnetycznymi (*ang. diluted magnetic semiconductors*) jednym w pierwszych tematów moich badań po obronie doktoratu była charakteryzacja dyfuzji żelaza w azotku galu. Wyniki zostały zaprezentowane w formie posterów na konferencjach Jaszowiec 2006 oraz ELTE 2007. Kolejnym podjętym przeze mnie tematem badań ściśle związanym z rozprawą habilitacyjną, była dyfuzja tlenu w azotku galu. W ramach tych badań napisałem wniosek do projektu **SPIRIT (Support of Public and Industrial Research using Ion Beam**

Technology) i otrzymałem kontrakt na badania zatytułowane *Oxygen diffusion into GaN from oxygen or argon implanted Al₂O₃*. W ramach tego kontraktu odbyłem tygodniowy staż w **Helmholtz-Zentrum Dresden-Rossendorf** Ev w celu wykonania implantacji tlenu do kryształów GaN i Al₂O₃. Wyniki badań nad dyfuzją tlenu w GaN zostały opublikowane w czasopiśmie *physica status solidi (c)* [71] oraz zaprezentowane jako prezentacje posterowe na konferencjach Jaszowiec 2009 i The 3rd International Symposium on Growth of III-Nitrides w Montpellier. Kolejnym tematem badań wykonywanym w ramach statutu Instytutu Fizyki PAN, a związanym z rozprawą habilitacyjną, była dyfuzja wodoru w kryształach węgla krzemu. Różnie domieszkowane kryształy SiC implantowane wodorem, wygrzewane były metodą RTA (*ang. rapid thermal annealing*). Wynik badań wykazały zależność współczynnika dyfuzji od rodzaju domieszkowania, oraz inne efekty związane z segregacją domieszek i zostały opublikowane w czasopismach *Journal of Applied Physics* [72] oraz *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research B* [73].

Doświadczenia z dyfuzją arsenu w kryształach tlenku cynku poprzez wygrzewanie półprzewodnika w ampułach zawierających pary arsenu skutkowały napisaniem pracy dotyczącej właściwości As w ZnO opublikowanej w renomowanym czasopiśmie *Journal of Alloy and Compounds* [74], oraz prezentacją na konferencji Jaszowiec 2013.

Współpraca z grupą **prof. Macieja Sawickiego** w ramach badań nad właściwościami warstw półprzewodnika półmagnetycznego (Ga,Mn)N otrzymanego metodą MBE, zaowocowała ciekawymi wynikami dotyczącymi wpływu reszkowego tlenu w aparaturze MBE na dyfuzję Mn w badanym półprzewodniku. Wyniki te zostały opublikowane w renomowanym czasopiśmie *Journal of Alloy and Compounds* [75] oraz zaprezentowane na konferencji 34th International Conference on Physics of Semiconductors 2018 w Montpellier i 7th International Symposium on Nitride Growth 2018 w Warszawie.

Równolegle z badaniami dotyczącymi dyfuzji atomów w półprzewodnikach doskonaliłem swój warsztat związany z pomiarami SIMS oraz prezentowałem na konferencjach dotyczących spektrometrii masowej wyniki związane z tą techniką pomiarową [76, 77, 78].

Jeszcze przed obroną doktoratu, razem z moim promotorem prof. Adamem Barczem nawiązaliśmy współpracę z **Europejską Organizacją Badań Jądrowych CERN** w ramach badań nad strukturami detektorowymi na bazie krzemu. Pomiary detektorów krzemowych wytworzonych w CERN na okoliczność zawartości tlenu, oraz własnych próbek wytworzonych w celu zbadania właściwości termodynamicznych oraz mechanizmów dyfuzji O w Si, zaowocowała kompleksową pracą na ten temat, która została opublikowana w czasopiśmie *Surface and Interface Analysis* [79]. W tym artykule opisujemy pomiary bardzo niskich

koncentracji tlenu w krzemie metodą SIMS. Stosując bardzo wysoki prąd wiązki jonów pierwotnych Cs⁺, wydłużone wstępne rozpylanie materiału (ang. *presputtering*), odpowiednie wygrzewanie komory próżniowej, tytanową pompę sublimacyjną i pułapkę LN, osiągnęliśmy granicę wykrywalności tlenu na poziomie $\sim 2 \times 10^{15}$ at/cm³ w warstwach epitaksjalnych otrzymanych metodą osadzania chemicznego CVD (ang. *chemical vapor deposition*). Wartość ta jest co najmniej 10 razy niższa niż jakimkolwiek w znanym nam opublikowanym lub nieopublikowanym źródle. Kluczowym narzędziem, które pozwoliło nam obniżyć limit detekcji do 10^{15} at/cm³, było zastosowanie pompy jonowej w komorze pomiarowej spektrometru. W niniejszym artykule przedstawiliśmy zoptymalizowane warunki analityczne dla pomiarów koncentracji tlenu w Si jako funkcję głębokości:

- bardzo płytkie profile – pomiar jest praktycznie niemożliwy z powodu natywnego tlenku na powierzchni,
- płytkie do średniej głębokości profile <20 μm – najbardziej odpowiednie do pomiarów SIMS,
- średnie do głębokich profile (~20 – 50 μm) – wymagane do śledzenia dyfuzji i segregacji w warstwach epitaksjalnych,
- bardzo głębokie profile nawet do grubości podłoża krzemowego (300 μm) – wymagane wykonanie skośnego szlifu i pomiaru punktowego na szlifie.

Nasze badania wyjaśniły mechanizmy dyfuzji tlenu podczas wygrzewania kryształów krzemu w argonie i w próżni, wskazując że wyniki są jakościowo i ilościowo różne dla krzemu FZ i krzemu otrzymanego metodą Czochralskiego. Użycie krzemu FZ Si i obserwacja dyfuzji domieszki do materiału, zapewnia najdokładniejsze wyznaczenie wartości równowagowego stężenia rozpuszczalności tlenu w krzemie.

W przypadku współpracy z laboratoriami **Instytutu Fizyki PAN**, najbardziej owocne w odniesieniu do pomiarów SIMS są badania właściwości warstw otrzymanych metodą ALD (ang. *atomic layer deposition*) w grupie ON4.2 kierowanej przez **prof. Marka Godlewskiego**. Razem z naukowcami z tego laboratorium opublikowaliśmy wspólnie 31 publikacji. Większość dotyczyła tlenku cynku i jego właściwości [80, 81, 82, 83, 84]. Opublikowane wyniki badań w szczególności odnosiły się do defektów [85, 86], domieszkowania [87, 88, 89, 90, 91] czy właściwości elektrycznych [92, 93] tego materiału. Pomiary SIMS warstw tlenku cynku polegały głównie na badaniu zanieczyszczeń tj. H i C, oraz domieszek tj. N, i Al. Szeroko badaną klasą materiałów były również półprzewodniki półmagnetyczne DMS (ang. *diluted magnetic semiconductors*), w przypadku ZnO realizowane poprzez dodanie do materiału

pierwiastków Co lub Mn [94]. W przypadku tych materiałów badania dotyczyły warunków wzrostu [95, 96, 97], własności optycznych [98, 99, 100] oraz elektrycznych i magnetycznych [101, 102, 103, 104, 105]. Pomiar SIMS miał za zadanie zbadać ilość wbudowanych atomów pierwiastków magnetycznych, jednorodność domieszkowania, oraz wbudowywania się zanieczyszczeń podczas domieszkowania tymi pierwiastkami. W tym celu zostały wytworzone odpowiednie wzorce Co i Mn w ZnO, oraz wyznaczone współczynniki RSF (*ang. relative sensitivity factor*), pozwalające wyznaczyć zawartość obu pierwiastków z dokładnością $\pm 10\%$.

W ramach współpracy z grupą zajmującą się wzrostem ALD rozpoczęto również badania nad trójskładnikowym półprzewodnikiem ZnMgO [106], tlenkiem hafnu HfO_2 jako barierą dyfuzyjną złącza ZnO/Ag [107] czy właściwościami $\text{Ti}_{1-x}\text{Nb}_x\text{O}_2$ otrzymanego metodą ALD [108].

Równie bogata w publikację jest moja współpraca z Laboratorium Badań Kriogenicznych i Spintronicznych SL2 kierowana przez **prof. Tomasza Dietla**, a obecnie przez **prof. Macieja Sawickiego** razem z **Institut für Halbleiter- und Festkörperphysik Johannes Kepler University z Linz** kierowanym przez panią **prof. Albertę Bonanni**. Łącznie po uzyskaniu stopnia doktora razem z kolegami z SL2 zostałem współautorem 13 publikacji, z czego większość w renomowanym czasopiśmie Physical Review B. Głównym tematem badań przy współpracy z tą grupą były półprzewodniki półmagnetyczne na bazie azotku galu GaN, zawierające magnetyczne jony Fe i Mn. W ramach tych badań charakteryzowano właściwości strukturalne, elektryczne i magnetyczne [109, 110] oraz właściwości optyczne [111], warstw GaN:Fe, (Ga,Fe)N otrzymanych metodą MOCVD, ale również wpływ domieszkowania Mg na ich wzrost epitaksjalny [112]. Podobne badania prowadzone były dla warstw GaN:Mn i (Ga,Mn)N [113, 114, 115]. We współpracy grup z IFPAN, JKU i grupy z **Institute of Solid State Physics University of Bremen** badano również warstwy magnetyczne (Ga,Mn)N otrzymane metodą MBE [116, 117]. Jedna z prac w tym temacie badań [118], otrzymała Nagrodę Dyrektora IF PAN za najlepszą publikację w 2016 roku. Zakres badań obejmował również domieszkowanie warstw GaN magnezem [119, 120]. Część badań obejmująca pomiary SIMS polegała na wyznaczaniu zawartości zarówno pierwiastków magnetycznych Fe i Mn, jak również domieszek tj. Mg i Si, oraz zanieczyszczeń H i O. Podobnie jak w przypadku ZnO również dla GaN zostały opracowane i wykonane odpowiednie wzorce Mn i Fe w tym materiale, pozwalające wyznaczać zawartość atomową tych pierwiastków w warstwach GaN, nawet do wartości 10% at. składu. Pomiary SIMS warstw domieszkowanych manganem

przyniosły również spostrzeżenia odnośnie artefaktów pomiarowych związanych z profilami głębokościowymi samego Mn, zaprezentowane na konferencji SIMS Europe 2016 [121].

Kolejną grupą naukową z Instytutu Fizyki PAN, z którą ściśle współpracuję od dłuższego czasu biorąc m. in. udział w grantach, jest grupa ON1.1 kierowana przez **prof. Andrzeja Mycielskiego**. Naukowcy z tej grupy zajmują się głównie wzrostem kryształów objętościowych na bazie CdTe. Oprócz badania czystości pierwiastków używanych do wzrostu takich kryształów, moja część badań obejmowała również sprawdzanie jednorodności stechiometrii, jak również domieszkowania samych kryształów. Zakres publikacji z kolegami z grupy ON1.1 odnosi się do takich zagadnień jak: wytwarzanie kontaktów do półizolacyjnych kryształów CdMnTe:V [122, 123, 124], detektory promieni X na bazie CdMnTe i CdMgTe [125, 126], wzrost i wygrzewanie kryształów CdMnTe [127, 128] oraz właściwości kryształów CdTe domieszkowanych Se [129]. Dla grupy prof. Mycielskiego charakteryzowałem również wytwarzane przez nich kryształy ZnO [130, 131].

W ramach badań statutowych Instytutu Fizyki PAN współpracowałem również z grupami zajmującymi się epitaksją z wiązek molekularnych MBE: grupą ON1.2 badającą warstwy i kryształy na bazie tellurków pod kierownictwem **prof. Tomasz Storego** i grupą ON4.7 zajmującą się badaniem warstw epitaksjalnych ZnO wytwarzanych metodą MBE pod kierownictwem **prof. Adriana Kozaneckiego**. Zakres badań we współpracy grupą **prof. T. Storego** obejmował głównie charakteryzację warstw GeMnTe/BaF₂ [132, 133, 134, 135]. W grupie prof. A. Kozaneckiego najściślejszą współpracę zawiązałem z **dr. hab. Ewą Przeździecką** odnośnie charakteryzacji warstw ZnO głównie pod względem domieszkowania As i Sb [136, 137, 138, 139, 140] oraz N [141, 142].

Kontynuację badań nad dyfuzją Mn w GaAs rozpoczętych w ramach pracy doktorskiej prowadziłem z grupą badawczą w laboratorium SL1.2, której jestem członkiem, pod kierownictwem **prof. Krystyny Ławniczak-Jabłońskiej**. W ramach projektu EAGLE badaliśmy lokalne właściwości atomów manganu w kryształach GaAs [143, 144, 145].

Poza tym ramach współpracy z laboratoriami z Instytutu Fizyki PAN brałem udział w takich projektach jak: badanie właściwości GaMnSb/GaSb wygrzewanego w wysokich temperaturach [146], badanie właściwości złącza In/PbTe [147], badanie właściwości GaN/Si otrzymanego metodą MBE [148], badanie właściwości super-sieci GaN/AlGaIn [149], badanie dyfuzji Co w kryształach Gd₃Ga₅O₁₂ [150] oraz badanie właściwości warstw (Ga,Mn)As i (Ga,Mn)(Bi,As) [151, 152].

Obecnie w ramach prac statutowych prowadzę badania nad dyfuzją i aktywacją sodu w kryształach tlenku cynku. Pierwsze wyniki z nowatorskiej metody wprowadzania sodu do

kryształów ZnO z wodnego roztworu NaCl w temperaturach do 300°C zostały zaprezentowane na konferencji 10th International Workshop on Zinc Oxide and Other Oxide Semiconductors w Warszawie [153].

Po obronie doktoratu kontynuowałem również współpracę w innych polskich instytutach zajmujących się wzrostem i charakteryzacją kryształów. Największą liczbą projektów, a tym samym i publikacji zaowocowała współpraca **Instytutem Technologii Elektronowej**, a szczególnie z Zakładem Mikro i Nanotechnologii Półprzewodników Szerokoprzerwowych pod kierownictwem **prof. Anny Piotrowskiej** oraz z Zakładem Fotoniki – Laboratorium Epitaksji Struktur pod kierownictwem **prof. Macieja Bugajskiego**.

Badania we współpracy z zakładem pani prof. Piotrowskiej polegały głównie na charakteryzacji warstw ZnO otrzymanych metodą rozpylania katodowego [154, 155]. Opublikowane wyniki badań dotyczyły: charakteryzacji warstw ZnO i ZnMnO otrzymanych poprzez utlenianie Zn(Mn)Te [156, 157, 158], domieszkowania ZnO pierwiastkami N, As i Sb [159, 160, 161] czy domieszkowania ZnO pierwiastkami z grupy IB [162]. Część prac skupiała się również na badaniu kontaktów tj. Ti-Al-N [163, 164, 165] czy Ni-Si [166] do półprzewodników szerokoprzerwowych. Badania prowadzone z Zakładem Fotoniki ITE dotyczyły głównie charakteryzacji warstw oraz przyrządów na bazie półprzewodników III-V otrzymanych metodą MBE [167, 168, 169, 170, 171, 172, 173, 174]. Dla grup badawczych z **Instytutu Technologii Elektronowej** charakteryzowałem metodą SIMS również takie materiały jak Si:Mn [175], GaMnAs [176] czy TaO₂ [177].

Po uzyskaniu stopnia doktora kontynuowałem również współpracę z **Instytutem Technologii Materiałów Elektronicznych** przy charakteryzacji warstw półprzewodnikowych na bazie GaAs, InP, GaN i SiC otrzymywanych metodą MOVPE [178], jednak szczególnie owocna była współpraca z **dr. Katarzyną Racką-Dzietko** przy charakteryzacji kryształów objętościowych SiC otrzymywanych metodą PVT (*ang. Physical Vapor Transport*), której wyniki zostały przedstawione w szeregu publikacji [179, 180, 181, 182, 183, 184, 185].

Równie szeroką współpracę prowadziłem z **Instytutem Wysokich Ciśnień PAN** przy charakteryzacji warstw oraz struktur półprzewodnikowych na bazie GaN. Dla grupy **prof. Tadeusza Suskiego** zajmowałem się charakteryzacją warstw otrzymywanych metodą MOVPE [186, 187, 188, 189, 190], natomiast dla grupy kierowanej przez **prof. Izabellę Grzegory** a obecnie przez **prof. Michała Boćkowskiego** zajmowałem się charakteryzacją warstw i kryształów objętościowych otrzymywanych metodą HVPE (*ang. Halide Vapor Phase Epitaxy*) [191, 192, 193]. W ramach badań na właściwościach azotku galu ukazały się również

publikacje opracowane wspólnie z kolegami z **Politechniki Warszawskiej** [194, 195], którzy wytwarzali krysztaly GaN metodą SSM (*ang. Sublimation Sandwich Method*).

Poniższa lista zawiera inne badania materiałów wraz ze współpracującymi instytucjami i publikacjami:

- (Ga,Mn)N [196, 197, 198] – **Institute of Solid State Physics University of Bremen**
- (Ga,Mn)As [199, 200] i (In,Fe)As [201] – **Helmholtz-Zentrum Dresden-Rossendorf, Institute of Ion Beam Physics and Materials Research**
- InSe:Mn [202, 203] i ZnO [204] – **I. M. Frantsevich Institute for Problems of Materials Science National Academy of Sciences of Ukraine,**
- HgCdTe:As [205, 206, 207, 208] – **National Research Tomsk State University,**
- dyfuzja wodoru w LiNbO₃ [209] i Mn w YAlO₃ [210] – **Lviv Polytechnic National University,**
- (Ga,Mn)As [211, 212, 213] – **Department of Physics University of Notre Dame,**
- SnTe:In [214] i struktur InAlAs/InAs:Mn [215] – **Institut für Experimentelle und Angewandte Physik Universität Regensburg,**
- GaN:Si/Al₂O₃ [216] – **V. Lashkaryov Institute of Semiconductor Physics, National Academy of Sciences of Ukraine.**

Obecnie prowadzę dwa projekty badawcze. W ramach statutu Instytutu Fizyki PAN badam możliwość uzyskanie przewodnictwa akceptorowego w ZnO poprzez domieszkowanie Na oraz dyfuzję Li w krysztalach ZnO, natomiast w ramach grantu TECHMAGSTRATEG otrzymanego przez Instytut Wysokich Cisnień PAN, charakteryzuję mechanizmy dyfuzji Be w krysztalach GaN.

8. Informacja o osiągnięciach dydaktycznych, organizacyjnych oraz popularyzujących naukę.

8.1 Twórcze prace zawodowe

- Współautorstwo w rozdziale książki: *Crystal Growth: Theory, Mechanism and Morphology*, Chapter 9: *MBE Growth of Type-II InAs/GaSb Superlattices on GaSb Buffer* – A. Jasik, I. Sankowska, K. Regiński, E. MAchowska-Podsiadło, A. Wawro, M. Wzorek, R. Kruska, **R. Jakiela**, J. Kubacka-Traczyk, M. Motyka, J. Kaniewski
- Staż zagraniczny w laboratorium SIMS w Chalmers Institute w Geteborgu, Szwecja – wyznaczanie składu warstw MnGaAs metodą SIMS
- Pobyt w instytucie badawczym Helmholtz-Zentrum Dresden - Rossendorf e.V., Niemcy w ramach European Community as an Integrating Activity Support of Public

and Industrial Research Using Ion Beam Technology (SPIRIT) w celu realizacji projektu *Oxygen diffusion into GaN from oxygen or argon implanted Al₂O₃*.

- 6 seminariów, w tym 5 wygłoszonych po uzyskaniu stopnia doktora
- 155 prezentacje konferencyjne w tym:
 - współautor 2 wykładów zaproszonych,
 - 15 prezentacji ustnych (2 wygłoszone osobiście), w tym 11 po uzyskaniu stopnia doktora (1 wygłoszony osobiście)
 - 138 prezentacji plakatowych (23 prezentowane osobiście), w tym 109 po uzyskaniu stopnia doktora (15 prezentowanych osobiście)

8.2 Kierowanie i udział w krajowych lub międzynarodowych projektach badawczych przed uzyskaniem stopnia doktora

- 2001 – 2002 **kierownik wykonawca** grantu KBN 7 11TB 001 21 pt.: *Si and Zn diffusion in InP* otrzymanego w Instytucie Technologii Materiałów Elektronicznych

8.3 Kierowanie i udział w krajowych lub międzynarodowych projektach badawczych po uzyskaniu stopnia doktora

- 1996 – 1999 **wykonawca** w grantie KBN 8T11B08210 *Badanie właściwości termodynamicznych GaAs* kierowanym przez prof. A. Barcza
- 2000 – 2003 **wykonawca** w grantie Komisji Europejskiej IN LINE SIMS IST-01-6-2B
- 2001 – 2005 **wykonawca** w grantie KBN 7T08A06021 *Kinetyka transportu tlenu w układzie SiO₂ – krzem FZ* kierowanym przez prof. A. Barcza
- 2008 – 2011 **wykonawca** w grantie MNiSW N507436834 *Charakteryzacja materiałów i struktur na bazie SiC – SIMS, DLTS, I(C)-V* kierowanym przez prof. A. Barcza
- 2009 – 2013 **wykonawca** w projekcie ERC Advanced Grant Research Functionalisation of Diluted Magnetic Semiconductors FunDMS – UE-27/1 kierowanym przez prof. Tomasza Dietla i realizowanym w Instytucie Fizyki PAN w Warszawie
- 2010 **kierownik wykonawca** kontraktu 227012 w projekcie SPIRIT (Support of Public and Industrial Research using Ion Beam Technology) pt: *Oxygen diffusion into GaN from oxygen or argon implanted Al₂O₃*

- 2012 – 2017 **wykonawca** w projekcie NCN *Kwantowe przemiany fazowe w warstwach magnetycznych kontrolowane zewnętrznym polem elektrycznym* P-376/M kierowanym przez prof. Tomasza Dietla i realizowanym w Instytucie Fizyki PAN w Warszawie
- 2014 – 2017 **wykonawca** w projekcie krajowym NCN *Tunelowanie elektronów i par Coopera w strukturach kwantowych zawierających ferromagnetyczny izolator (Ga, Mn)N* P-418/O kierowanym przez prof. Tomasza Dietla i realizowanym w Instytucie Fizyki PAN w Warszawie
- 2018 – teraz **wykonawca** w projekcie krajowym TECHMATSTRATEG 1/346720/8/NCBR/2017 *Technologie wytwarzania materiałów i struktur do detekcji promieniowania X i gamma, z wykorzystaniem nisko defektowych jednorodnych kryształów (Cd,Mn)Te, o wysokiej odporności na generację defektów w wyniku napromieniowania* kierowanym przez prof. Andrzeja Mycielskiego
- 2016 – 2018 **wykonawca** w projekcie krajowym NCN *Polizolujące kryształy (Cd,Mn)Te: Zbadanie i opis transportu ładunku przestrzennego oraz warunków kompensacji* kierowanym przez prof. Andrzeja Mycielskiego
- 2019 – 2022 **wykonawca** w projekcie krajowym NCN Opus 15 nr 2018/29/B/ST5/00338 *Implantacja akceptorów w intencjonalnie niedomieszkowane warstwy GaN wzrastane metodą HVPE – struktury będące podstawą wertykalnych tranzystorów wysokiej mocy* kierowanym przez prof. Michała Boćkowskiego

8.4 Wykaz referatów zaproszonych wygłoszonych na międzynarodowych lub krajowych konferencjach tematycznych:

- E. Kamińska, E. Przeździecka, A. Piotrowska, J. Kossut, E. Dynowska, A. Barcz, **R. Jakiela**, W. Dobrowolski, I. Pasternak, P. Bogusławski – *p-type doping in ZnO - invited lecture* – XXXV International School on the Physics of Semiconducting Compounds, Jaszowiec 2006
- Andrzej Mycielski, M. Witkowska-Baran, D. Kochanowska, A. Szadkowski, B. Witkowska, W. Kaliszek, **R. Jakiela**, V. Domukhovski – *(Cd,Mn)Te as a New Material for X-ray and Gamma-ray Detectors* – MRS 2007 Fall Meeting, Boston

8.5 Inne referaty wygłoszone osobiście na konferencjach krajowych i międzynarodowych

- **R. Jakiela**, A. Jasik, W. Strupiński, K. Góra, K. Kosiel, M. Wesołowski – *Zależność koncentracji wodoru w warstwach epitaksjalnych GaN:Mg od sposobu ich wygrzewania – charakteryzacja metodą SIMS* – IX Seminarium: Powierzchnia i Struktury Cienkowarstwowe, Szklarska Poręba 2002
- **R. Jakiela**, A. Barcz, J. Sarnecki, G. K. Celler – *Ultra-high Sensitivity SIMS Analysis of Oxygen in Silicon* – 21st International Conference on SIMS, Kraków 2017

8.6 Wygłoszone seminaria

- *Charakteryzacja struktur półprzewodnikowych metodą SIMS* – Seminarium Fizyki Ciała Stałego Wydziału Przyrodniczego WSP Rzeszów, 2000
- *SIMS ... ? .. seems good !* – seminarium w firmie Ammono, 2008
- *Spektrometria Masowa Jonów Wtórnych* – Seminarium Rentgenowskie IFPAN – styczeń 2008
- *Transport atomowy w ciele stałym* (2 seminaria) – Konwersatorium ITME – kwiecień 2008
- *Dyfuzja powierzchniowa* – Konwersatorium ITME – Maj 2008
- *Spektrometria Masowa Jonów Wtórnych – podstawy i zastosowanie w badaniach struktur półprzewodnikowych* – Seminarium Centrum Dydaktyczno-Naukowe Mikroelektroniki i Nanotechnologii Uniwersytetu Rzeszowskiego– maj 2014

8.7 Budowa unikatowej aparatury badawczej

- Samodzielny serwis i utrzymanie w działaniu Spektrometru Masowego Jonów Wtórnych – CAMECA IMS 6F
- Adaptacja Profilometru C-V (Capacitance-Voltage) firmy BIORAD PN4300 do badania półprzewodników szerokoprzerwowych

8.8 Organizacja konferencji, działalność recenzencka i edytorska

- Recenzja artykułu *P-type single-crystalline ZnO films obtained by (P,O) dual implantation through dynamic annealing process* dla czasopisma **Superlattices and Microstructures** 2018
- Recenzja artykułu *The effect of alpha particle irradiation on electrical properties and defects of ZnO thin films prepared by sol-gel spin coating* dla czasopisma **Material Science in Semiconductor Processing** 2018

- Recenzja artykułu *Structural and Optical Characteristics Investigations in Oxygen Ion Implanted GaN Epitaxial layers* dla czasopisma **Material Science in Semiconductor Processing 2019**

8.9 Dydaktyka i popularyzacja nauki

- Prezentacja laboratorium SIMS w corocznym *Festiwalu Nauki*
- Prezentacja laboratorium SIMS w corocznych pokazach w związku z organizacją *Dni Otwartych Instytutu Fizyki PAN*
- Nauczyciel fizyki w 1 klasie LO o profilu biol-chem
- Notki w dziale nauka strony blogowej Salon24.pl:
 - *Merkury – rzadka możliwość obserwacji.*
 - *Budowa niebieskiego lasera półprzewodnikowego dla laików*
 - *Dwuwymiarowy gaz elektronowy w tranzystorze polowym.*

8.10 Patenty i zgłoszenia patentowe

- współautor patentu: PL218567, uzyskany 20.05.2014 – *Sposób wytwarzania płytek półprzewodnikowych z CdTe* – **Rafał Jakiela**, Zbigniew Gołacki
- współautor patentu: PL215095, uzyskany 15.04.2013 – *Sposób wytwarzania heterostruktur półprzewodnikowych n-(Eu,Gd)Te/p-PbTe oraz heterostruktura do generowania liczb losowych* – Mąkosa Andrzej, Wrotek Sylwia, Dziawa Piotr, Osinnij Victor, Taliashvili Badri, Tkaczyk Zbigniew, **Jakiela Rafał**, Figielski Tadeusz, Wosiński Tadeusz, Story Tomasz

9. Bibliografia

-
- [1] W. Seifert, R. Franzheld, E. Butter, H. Sobotta, V. Riede – *On the Origin of Free Carriers in High-Conducting n-GaN* – Crystal Res. & Technol. 18 (1983) 383
- [2] B-C. Chung, and M. Gershenson – *The influence of oxygen on the electrical and optical properties of GaN crystals grown by metalorganic vapor phase epitaxy* – Journal of Applied Physics 72 (1992) 651
- [3] J. C. Zolper, R. G. Wilson, S. J. Pearton, R. A. Stall – *Ca and O ion implantation doping of GaN* – Appl. Phys. Lett. 68 (1996) 1945
- [4] S. J. Pearton, H. Cho, J. R. LaRoche, F. Ren, R. G. Wilson J. W. Lee – *Oxygen diffusion into SiO₂-capped GaN during annealing* – Appl. Phys. Lett. 75 (1999) 2939
- [5] E. Dumiszewska, W. Strupinski, P. Caban, M. Wesolowski, D. Lenkiewicz, **R. Jakiela**, K. Pagowska, A. Turos, K. Zdunek – *The Influence of Growth Temperature on Oxygen Concentration in GaN Buffer Layer* – Mater. Res. Soc. Symp. Proc. 1068 (2008) 1068-C03-09
- [6] M. Bockowski, M. Iwinska, M. Amilusik, M. Fijalkowski, B. Lucznik, T. Sochacki – *Challenges and future perspectives in HVPE GaN growth on ammonothermal GaN seeds* – Semicond. Sci. Technol. 31 (2016) 093002
- [7] **R. Jakiela**, A. Barcz, J. Sarnecki, G. K. Celler - *Ultra-high Sensitivity SIMS Analysis of Oxygen in Silicon* – oral presentation on SIMS 2017 conference in Kraków
- [8] J. Karpiński, J. Jun, S. Porowski - *Equilibrium Pressure of N₂ Over GaN And High-Pressure Solution Growth of GaN* – Journal of Crystal Growth 66 (1984) 1
- [9] R. Dwiliński et. al. – *Bulk ammonothermal GaN* – Journal of Crystal Growth 311 (2009) 3015
- [10] Y. Mori, Y. Kitaoka, M. Imade, F. Kawamura, N. Miyoshi, M. Yoshimura, T. Sasaki – *Growth of GaN crystals by Na flux LPE method* – Phys. Status Solidi A 207 (2010) 1283
- [11] Y. Mori et. al. – *Growth of bulk GaN crystal by Na flux method under various conditions* – Journal of Crystal Growth 350 (2012) 72
- [12] Chris G. Van de Walle, J. Neugebauer – *Universal alignment of hydrogen levels in semiconductors, insulators and solutions* – Nature 423 (2003) 626
- [13] **R. Jakiela**, A. Barcz – *Diffusion and activation of Si implanted into GaAs* – Vacuum 70 (2003) 97
- [14] **R. Jakiela**, A. Barcz, E. Wegner, A. Zagojski – *Diffusion and activation of Zn implanted into InP:S* – Vacuum 78 (2005) 417
- [15] **R. Jakiela**, A. Barcz, E. Dumiszewska, Andrzej Jagoda – *Si diffusion in epitaxial GaN* – phys. stat. sol. (c) 3(6) (2006) 1416
- [16] **R. Jakiela**, A. Barcz, E. Wegner, A. Zagojski – *Diffusion of Mn in gallium arsenide* – Journal of Alloys and Compounds 423 (2006) 132
- [17] S. Nakamura et. al. – *Hole Compensation Mechanism of P-Type GaN Films* – Jpn. J. Appl. Phys. 31 (1992) 1258
- [18] J. M. Zavada, R. G. Wilson, C. R. Abernathy, S. J. Pearton – *Hydrogenation of GaN, AlN, and InN* – Applied Physics Letters 64 (1994) 2724
- [19] M. S. Brandt, N. M. Johnson, R. J. Molnar, R. Singh, T. D. Moustakas – *Hydrogenation of p-type gallium nitride* – Applied Physics Letters 64 (1994) 2264
- [20] J. Neugebauer, C. G. Van de Walle – *Hydrogen in GaN: Novel Aspects of a Common Impurity* – Phys. Rev. Lett. 75 (1995) 4452
- [21] S. M. Myers, A. F. Wright, G. A. Petersen, W. R. Wampler, C. H. Seager, M. H. Crawford, and J. Han – *Diffusion, release, and uptake of hydrogen in magnesium-doped gallium nitride: Theory and experiment* – Journal of Applied Physics 89 (2001) 3195

- [22] S. M. Myers, A. F. Wright – *Theoretical description of H behavior in GaN p-n junctions* – Journal of Applied Physics 90 (2001) 5612
- [23] S. J. Pearton, R. G. Wilson, J. M. Zavada, J. Han, R. J. Shul – *Thermal stability of ^2H -implanted n- and p-type GaN* – Appl. Phys. Lett. 73 (1998) 1877
- [24] A. Y. Polyakov et. al. – *Fermi level dependence of hydrogen diffusivity in GaN* – Applied Physics Letters 79 (2001) 1834
- [25] B. Theys, Z. Teukam, F. Jomard, P. de Mierry, A Y Polyakov, M Barbe – *Deuterium diffusion in Mg-doped GaN layers grown by metalorganic vapour phase epitaxy* – Semicond. Sci. Technol. 16 (2001) L53
- [26] S.J. Pearton, H. Cho, F. Ren, J.-I. Chyi, J. Han, R.G. Wilson – *Properties and Effects of Hydrogen in GaN* – MRS Online 595 (1999) F99W10.6
- [27] B. Pajot, E. Artacho, CAJ. Ammerlaan, J-M Spaeth – *Interstitial O isotope effects in silicon* – J Phys Condens Matter. 7 (1995) 7077
- [28] R.C. Newman – *Oxygen diffusion and precipitation in Czochralski silicon* – J Phys Condens Matter. 12 (2000) R335
- [29] F.M. Livingston, S. Messoloras, R.C. Newman et al. – *An infrared and neutron scattering analysis of the precipitation of oxygen in dislocation-free silicon* – J Phys C: Solid State Phys. 17 (1984) 6253
- [30] A.R. Bean, R.C. Newman – *The solubility of carbon in pulled silicon crystals* – J Phys Chem Solid. 32 (1971) 1211
- [31] Y. Takano, H. R. Huff, R. R. Burgess – *Semiconductor Silicon 1973: 2nd Int. Symp. on Silicon Materials Science and Technology* – New York: Electrochem. Soc. (1973) 469.
- [32] J. Gass, H.H. Mueller, H. Stuessi, S. Schweitzer – *Oxygen diffusion in silicon and the influence of different dopants* – J. Appl. Phys. 51 (1980) 2030
- [33] S.T. Lee, D. Nichols – *Outdiffusion and diffusion mechanism of oxygen in silicon* – Appl. Phys. Lett. 47 (1985) 1001
- [34] S.A. McQuaid, B.K. Johnson, D. Gambaro, R. Falster, M.A. Ashwin, J. H. Tucker – *The conversion of isolated oxygen atoms to a fast diffusing species in Czochralski silicon at low temperatures* – J. Appl. Phys. 86 (1999) 1878
- [35] L. Zhong, F. Shimura – *Hydrogen enhanced out - diffusion of oxygen in Czochralski silicon* – J. Appl. Phys. 73 (1993) 707
- [36] F. Shimura, T. Higuchi, R. S. Rockett – *Outdiffusion of oxygen and carbon in Czochralski silicon* – Appl. Phys. Lett. 53 (1988) 69
- [37] J. C. Mikkelsen – *The diffusivity and solubility of oxygen in silicon.* – Mater. Res. Soc. Symp. Proc. 59 (1985) 19.
- [38] H. Gnaser – *Greatly enhanced detection sensitivity for carbon, nitrogen, and oxygen in silicon by secondary ion mass spectrometry* – Appl. Phys. Lett. 79 (2001) 497
- [39] A. Barcz, M. Zieliński, E. Nosarzewska, G. Lindstroem – *Extremely deep SIMS profiling: oxygen in FZ silicon* – Appl. Surf. Sci. 203 (2003) 396
- [40] W. Strupinski, K. Kosiel, A. Jasik, **R. Jakiela**, A. Jelenski, E. Kollberg, L. Dillner, M. Nawaz – *MOVPE InP based material for millimeter and submillimeter wave generation and amplification* – Journal of Telecommunications and Information Technology 1/2002
- [41] W. Strupinski, L. Dillner, J. Sass, K. Kosiel, J. Stake, M. Ingvarson, **R. Jakiela** – *MOVPE strain layers – growth and application* – Journal of Crystal Growth 221 (2000) 20
- [42] G. Tomaka, E. M. Sheregii, T. Kąkol, W. Strupiński, A. Jasik, **R. Jakiela** – *Charge carrier parameters in the conductive channels of HEMTs* – phys. stat. sol. (a) 195 (2003) 127
- [43] E. Dumiszewska, D. Lenkiewicz, W. Strupinski, A. Jasik, **R. Jakiela**, M. Wesołowski – *Problems with cracking of $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}$ layers* – Optica Applicata 35(1) (2005) 111

- [44] G. Tomaka, E. M. Sheregii, T. Kakol, W. Strupinski, **R. Jakiela**, A. Kolek, A. Stadler, K. Mleczo – *Magneto-transport in single InGaAs quantum wells of different shapes* – Cryst. Res. Technol. 38 (2003) 407 – 415
- [45] J. Zynek, A. Jasik, W. Strupiński, J. Rutkowski, A. Jagoda, K. Przyborowska, **R. Jakiela**, M. Piersa, A. Wnuk – *Photodiode with resonant cavity based on InGaAs/InP for 1,9 μm band* – Opto-Electronics Review 12(1) (2004) 149
- [46] E. M. Sheregii, D. Ploch, M. Marchewka, G. Tomaka, A. Kolek, A. Stadler, K. Mleczo, W. Strupiński, A. Jasik, and **R. Jakiela** – *Parallel magnetotransport in multiple quantum well structures* – Low Temperature Physics 30 (2004) 858
- [47] **R. Jakiela**, A. Jasik, W. Strupiński, K. Góra, K. Kosiel, M. Wesołowski – *Influence of the thermal annealing on hydrogen concentration in GaN layers - SIMS characterization* – Optica Applicata, 32(3) (2002) 365
- [48] B. Jaroszewicz, T. Budzynski, A. Panas, A. Kociubinski, W. Slys, W. Jung, **R. Jakiela**, A. Barcz, J. Marczewski, P. Grabiec – *High-quality p-n junction fabrication by ion implantation using the LPCVD amorphous silicon films* – Vacuum 70 (2003) 81
- [49] A. Barcz, A. Panas, **R. Jakiela** – *Out- and in-diffusion of oxygen ^{16}O in silicon* – Semicond. Sci. Technol. 19 (2004) 1311
- [50] **R. Jakiela**, A. Barcz – *Diffusion and activation of Si implanted into GaAs* – Vacuum 70 (2003) 97
- [51] **R. Jakiela**, A. Barcz, E. Wegner, A. Zagojski – *Diffusion and activation of Zn implanted into InP:S* – Vacuum 78 (2005) 417
- [52] **R. Jakiela**, A. Barcz, E. Dumiszewska, A. Jagoda – *Si diffusion in epitaxial GaN* – phys. stat. sol. (c) 3 (2006) 1416
- [53] **R. Jakiela**, A. Barcz, E. Wegner, A. Zagojski – *Diffusion of Mn in gallium arsenide* – Journal of Alloys and Compounds 423 (2006) 132
- [54] A. Seweryn, T. Wojtowicz, G. Karczewski, A. Barcz, **R. Jakiela** – *Cation diffusion in MBE-grown CdTe layers* – Thin Solid Films 367 (2000) 220
- [55] A. Mycielski, A. Szadkowski, L. Kowalczyk, B. Witkowska, W. Kaliszek, B. Chwalisz, A. Wyszmołek, R. Stępniewski, J. M. Baranowski, M. Potemski, A. M. Witowski, **R. Jakiela**, A. Barcz, P. Aleshkevych, M. Jouanne, W. Szuszkiewicz, A. Suchocki, E. Łusakowska, E. Kamińska, W. Dobrowolski – *ZnO and ZnO:Mn crystals obtained with the chemical vapour transport method* – phys. stat. sol. (c) 1 (2004) 884
- [56] A. Mycielski, L. Kowalczyk, A. Szadkowski, B. Chwalisz, A. Wyszmołek, R. Stępniewski, J.M. Baranowski, M. Potemski, A. Witowski, **R. Jakiela**, A. Barcz, B. Witkowska, W. Kaliszek, A. Jędrzejczak, A. Suchocki, E. Łusakowska, E. Kamińska – *The chemical vapour transport growth of ZnO single crystals* – Journal of Alloys and Compounds 371 (2004) 150
- [57] A. Wójcik, K. Kopalko, M. Godlewski, E. Łusakowska, E. Guziejewicz, R. Minikayev, W. Paszkowicz, J. Świdorski, M. Klepka, **R. Jakiela**, M. Kiecana, M. Sawicki, K. Dybko, M. R. Phillips – *Thin films of ZnO and ZnMnO by atomic layer epitaxy* – Optica Applicata 35(3) (2005) 413
- [58] E. Kamińska, A. Piotrowska, J. Kossut, R. Butkute, W. Dobrowolski, K. Golaszewska, A. Barcz, **R. Jakiela**, E. Dynowska, E. Przeździecka, D. Wawer – *p-type in ZnO:N by codoping with Cr* – Mat. Res. Soc. Symp. Proc. 786 (2004) E6.1.1
- [59] E. Kamińska, A. Piotrowska, J. Kossut, R. Butkutė, W. Dobrowolski, R. Łukasiewicz, A. Barcz, **R. Jakiela**, E. Dynowska, E. Przeździecka, M. Aleszkiewicz, P. Wojnar, E. Kowalczyk – *p-type conducting ZnO: fabrication and characterisation* – phys. stat. sol. (c) 2 (2005) 1119
- [60] E. Przeździecka, E. Kamińska, E. Dynowska, R. Butkutė, W. Dobrowolski, H. Kępa, **R. Jakiela**, M. Aleszkiewicz, E. Łusakowska, E. Janik, J. Kossut – *Preparation and characterization of hexagonal MnTe and ZnO layers* – phys. stat. sol. (c) 2 (2005) 1218

- [61] E. Kaminska, J. Kossut, A. Piotrowska, E. Przeddziecka, W. Dobrowolski, E. Dynowska, R. Butkute, A. Barcz., **R. Jakiela**, M. Aleszkiewicz, E. Janik, E. Kowalczyk – *Transparent p-ZnO by oxidation of Zn-based compounds* – AIP Conference Proceedings 772 (2005) 185
- [62] E. Kaminska, A. Piotrowska, J. Kossut, A. Barcza, R. Butkute, W. Dobrowolski, E. Dynowska, **R. Jakiela**, E. Przeddziecka, R. Lukasiewicz, M. Aleszkiewicz, P. Wojnar, E. Kowal – *Transparent p-type ZnO films obtained by oxidation of sputter-deposited Zn₃N₂* – Solid State Communications 135 (2005) 11
- [63] A. Piotrowska, E. Kaminska, A. Barcz., K. Golaszewska, H. Wrzesinska, T. T. Piotrowski, E. Dynowska, **R. Jakiela** – *Stable ohmic contacts on GaAs and GaN devices for high temperatures* – Mat. Res. Soc. Symp. Proc. 743 (2003) L11.57.1
- [64] E. Kaminska, A. Piotrowska, A. Szczesny, A. Kuchuk, R. Lukasiewicz, K. Golaszewska, R. Kruska, A. Barcz., **R. Jakiela**, E. Dynowska, A. Stonert, A. Turos – *Thermally stable Ru-Si-O gate electrode for AlGaIn/GaN HEMT* – phys. stat. sol. (c) 2 (2005) 1060
- [65] E. Kaminska, A. Piotrowska, K. Golaszewska, R. Lukasiewicz, A. Szczesny, E. Kowalczyk, P. Jagodzinski, M. Guziejewicz, A. Kudla, A. Barcz, **R. Jakiela** – *Thermally stable transparent Ru-Si-O Schottky contacts for n-type GaN and AlGaIn* – Mater. Res. Soc. Symp. Proc. 831 (2005) E3.41.1
- [66] D. Dobosz, K. Golaszewska, Z. R. Zytewicz, E. Kaminska, A. Piotrowska, T. Piotrowski, A. Barcz, **R. Jakiela** – *Properties of Zn films as substrate masks in liquid phase epitaxial lateral overgrowth of compound semiconductors* – Cryst. Res. Technol. 40 (2005) 492
- [67] A. Feduniewicz, C. Skierbiszewski, M. Siekacz, Z. R. Wasilewski, I. Sproule, S. Grzanka, **R. Jakiela**, J. Borysiuk, G. Kamler, E. Litwin-Staszewska, R. Czernecki, M. Boćkowski, S. Porowski – *Control of Mg doping of GaN in RF-plasma molecular beam epitaxy* – Journal of Crystal Growth 278 (2005) 443
- [68] G. M. Schott, G. Schmidt, G. Karczewski, L. W. Molenkamp, **R. Jakiela**, A. Barcz, G. Karczewski – *Influence of growth conditions on the lattice constant and composition of (Ga,Mn)As* – Appl. Phys. Lett. 82 (2003) 4678
- [69] G. M. Schott, C. Rüster, K. Brunner, C. Gould, G. Schmidt, and L. W. Molenkamp, M. Sawicki, **R. Jakiela**, A. Barcz, and G. Karczewski – *Doping of low-temperature GaAs and GaMnAs with carbon* – Appl. Phys. Lett. 85 (2004) 4678
- [70] J. Wu and W. Walukiewicz, S. X. Li, R. Armitage, J. C. Ho, E. R. Weber, and E. E. Haller, H. Lu, W. J. Schaff, A. Barcz, **R. Jakiela** – *Effects of electron concentration on the optical absorption edge of InN* – Appl. Phys. Lett. 84 (2004) 2805
- [71] **R. Jakiela**, E. Dumiszewska, P. Caban, A. Stonert, A. Turos, A. Barcz – *Oxygen diffusion into GaN from oxygen implanted GaN or Al₂O₃* – Phys. Status Solidi C 8 (2011) 1513
- [72] A. Barcz, M. Kozubal, **R. Jakiela**, J. Ratajczak, J. Dyczewski, K. Gołaszewska, T. Wojciechowski, G. K. Celler – *Diffusion and impurity segregation in hydrogen-implanted silicon carbide* – Journal of Applied Physics 115 (2014) 223710
- [73] A. Barcz, **R. Jakiela**, M. Kozubal, J. Dyczewski, G.K. Celler – *Incorporation of oxygen in SiC implanted with hydrogen* – Nuclear Instruments and Methods in Physics Research B 365 (2015) 146
- [74] D. Snigurenko, **R. Jakiela**, E. Guziejewicz, E. Przeddziecka, M. Stachowicz, K. Kopalko, A. Barcz, W. Lisowski, J.W. Sobczak, M. Krawczyk, A. Jablonski – *XPS study of arsenic doped ZnO grown by Atomic Layer Deposition* – Journal of Alloys and Compounds 582 (2014) 594
- [75] **R. Jakiela**, K. Gas, M. Sawicki, A. Barcz – *Diffusion of Mn in gallium nitride: Experiment and modelling* – Journal of Alloys and Compounds 771 (2019) 215
- [76] **R. Jakiela**, M. Trzyna, A. Barcz – *Methodology of Dopant Measurement in SiC using SIMS* – a poster presentation on conference SIMS Europe 2014, Munster, Niemcy
- [77] **R. Jakiela**, A. Barcz – *Distortion of the Manganese Depth Profile as Measured by SIMS Technique* – a poster presentation on conference SIMS Europe 2016, Munster, Niemcy

- [78] **R. Jakiela**, M. Galicka, P. Dziawa, G. Springholz, A. Barcz – *Accurate determination of matrix composition of topological insulator $Pb_{1-x}Sn_xSe$ by SIMS* – a poster presentation on conference SIMS Europe 2018, Munster, Niemcy
- [79] **R. Jakiela**, A. Barcz, J. Sarnecki, G.K. Celler – *Ultrahigh sensitivity SIMS analysis of oxygen in silicon* – Surface and Interface Analysis 50 (2018) 729
- [80] M. Godlewski, E. Guzewicz, J. Szade, A. Wójcik-Głodowska, Ł. Wachnicki, T. Krajewski, K. Kopalko, **R. Jakiela**, S. Yatsunenko, E. Przeździecka, P. Kruszewski, N. Huby, G. Tallarida, S. Ferrari – *Vertically stacked non-volatile memory devices – material considerations* – Microelectronic Engineering 85 (2008) 2434
- [81] B.S. Witkowski, Ł. Wachnicki, **R. Jakiela**, E. Guzewicz, M. Godlewski – *Cathodoluminescence Measurements at Liquid Helium Temperature of Poly- and Monocrystalline ZnO Films* – Acta Physica Polonica A 120 (2012) A28
- [82] G. Luka, L. Wachnicki, B. S. Witkowski, **R. Jakiela**, I. S. Virt – *Structure-property relationships in ZnO:Al-hydroquinone films grown on flexible substrates by atomic and molecular layer deposition* – Materials and Design 119 (2017) 297
- [83] T. A. Krajewski, P. S. Smertenko, G. Luka, D. Snigurenko, K. Kopalko, E. Lusakowska, **R. Jakiela**, E. Guzewicz – *Tuning the properties of ALD-ZnO-based rectifying structures by thin dielectric film insertion e Modeling and experimental studies* – Journal of Alloys and Compounds 693 (2017) 1164
- [84] T. A. Krajewski, P. Terziyska, G. Luka, E. Lusakowska, **R. Jakiela**, E. S. Vlachov, E. Guzewicz – *Diversity of contributions leading to the nominally n-type behavior of ZnO films obtained by low temperature Atomic Layer Deposition* – Journal of Alloys and Compounds 727 (2017) 902
- [85] T. A. Krajewski, G. Łuka, Ł. Wachnicki, **R. Jakiela**, B. Witkowski, E. Guzewicz, M. Godlewski, N. Huby, G. Tallarida – *Optical and electrical characterization of defects in zinc oxide thin films grown by atomic layer deposition* – Optica Applicata, 39 (2009) 865
- [86] T. A. Krajewski, K. Dybko, G. Luka, E. Guzewicz, P. Nowakowski, B. S. Witkowski, **R. Jakiela**, L. Wachnicki, A. Kaminska, A. Suchocki, M. Godlewski – *Dominant shallow donors in zinc oxide layers obtained by low-temperature atomic layer deposition: Electrical and optical investigations* – Acta Materialia 65 (2014) 69
- [87] G. Luka, L. Wachnicki, B.S. Witkowski, T.A. Krajewski, **R. Jakiela**, E. Guzewicz, M. Godlewski – *The uniformity of Al distribution in aluminum-doped zinc oxide films grown by atomic layer deposition* – Materials Science and Engineering B 176 (2011) 237
- [88] G. Luka, B.S. Witkowski, L. Wachnicki, **R. Jakiela**, I.S. Virt, M. Andrzejczuk, M. Lewandowska, M. Godlewski – *Electrical and mechanical stability of aluminum-doped ZnO films grown on flexible substrates by atomic layer deposition* – Materials Science and Engineering B 186 (2014) 15
- [89] V.I. Kolkovsky, D. Snigurenko, **R. Jakiela**, E. Guzewicz – *Electrical and structural characterization of nitrogen doped ZnO layers grown at low temperature by atomic layer deposition* – Semicond. Sci. Technol. 29 (2014) 085006
- [90] D. Snigurenko, K. Kopalko, T. A. Krajewski, **R. Jakiela**, E. Guzewicz – *Nitrogen doped p-type ZnO films and p-n homojunction* – Semicond. Sci. Technol. 30 (2015) 015001
- [91] D. Snigurenko, E. Guzewicz, T. A. Krajewski, **R. Jakiela**, Y. Syryanyy, K. Kopalko, W. Paszkowicz – *N and Al co-doping as a way to p-type ZnO without post-growth annealing* – Mater. Res. Express 3 (2016) 125907
- [92] T. A. Krajewski, G. Luka, L. Wachnicki, A. J. Zakrzewski, B. S. Witkowski, M. I. Lukasiwicz, P. Kruszewski, E. Lusakowska, **R. Jakiela**, M. Godlewski, E. Guzewicz – *Electrical parameters of ZnO films and ZnO-based junctions obtained by atomic layer deposition* – Semicond. Sci. Technol. 26 (2011) 085013

- [93] E. Guziewicz, M. Godlewski, L. Wachnicki, T. A. Krajewski, G. Łuka, S. Gieraltowska, **R. Jakiela**, A. Stonert, W. Lisowski, M. Krawczyk, J. W. Sobczak, A. Jablonski – *ALD grown zinc oxide with controllable electrical properties* – Semicond. Sci. Technol. 27 (2012) 074011
- [94] M. I. Łukasiewicz, A. Wojcik-Głodowska, E. Guziewicz, A. Wolska, M. T. Klepka, P. Dłuzewski, **R. Jakiela**, E. Łusakowska, K. Kopalko, W. Paszkowicz, Ł. Wachnicki, B. S. Witkowski, W. Lisowski, M. Krawczyk, J.W. Sobczak, A. Jablonski, M. Godlewski – *ZnO, ZnMnO and ZnCoO films grown by atomic layer deposition* – Semicond. Sci. Technol. 27 (2012) 074009
- [95] A. Wójcik, M. Godlewski, E. Guziewicz, K. Kopalko, **R. Jakiela**, M. Kiecana, M. Sawicki, M. Guziewicz, M. Putkonen, L. Niinistö, Y. Dumont, N. Keller – *Low temperature growth of ZnMnO: A way to avoid inclusions of foreign phases and spinodal decomposition* – Appl. Phys. Lett. 90 (2007) 082502
- [96] M. Łukasiewicz, A. Wojcik-Głodowska, M. Godlewski, E. Guziewicz, **R. Jakiela**, T. Krajewski, L. Wachnicki, A. Szczepanik, E. Łusakowska, W. Paszkowicz, R. Minikayev, M. Kiecana, M. Sawicki – *ZnCoO Films Obtained at Low Temperature by Atomic Layer Deposition Using Organic Zinc and Cobalt Precursors* – Acta Physica Polonica A 114 (2008) 1235
- [97] M. I. Łukasiewicz, B. Witkowski, M. Godlewski, E. Guziewicz, M. Sawicki, W. Paszkowicz, E. Łusakowska, **R. Jakiela**, T. Krajewski, I.A. Kowalik, B.J. Kowalski – *ZnCoO Films by Atomic Layer Deposition – Influence of a Growth Temperature on Uniformity of Cobalt Distribution* – Acta Physica Polonica A 116 (2009) 921
- [98] E. Guziewicz, M. I. Łukasiewicz, L. Wachnicki, K. Kopalko, A. Kovacs, R. E. Dunin-Borkowski, B. S. Witkowski, B. J. Kowalski, J. Sadowski, M. Sawicki, **R. Jakiela**, M. Godlewski – *Synchrotron photoemission study of (Zn,Co)O films with uniform Co distribution* – Radiation Physics and Chemistry 80 (2011) 1046
- [99] E. Guziewicz, M. I. Łukasiewicz, L. Wachnicki, K. Kopalko, P. Dłuzewski, **R. Jakiela**, M. Godlewski – *Synchrotron Photoemission Study of Ferromagnetic (Zn,Co)O Films* – Acta Physica Polonica A 120 (2011) A40
- [100] M. Godlewski, A. Wasiakowski, V.Yu. Ivanov, A. Wójcik-Głodowska, M. Łukasiewicz, E. Guziewicz, **R. Jakiela**, K. Kopalko, A. Zakrzewski, Y. Dumont – *Puzzling magneto-optical properties of ZnMnO films* – Optical Materials 32 (2010) 680
- [101] A. Wójcik, K. Kopalko, M. Godlewski, E. Guziewicz, **R. Jakiela**, R. Minikayev, W. Paszkowicz – *Magnetic properties of ZnMnO films grown at low temperature by atomic layer deposition* – Appl. Phys. Lett. 89 (2006) 051907
- [102] M. Godlewski, A. Wojcik, K. Kopalko, V.Yu. Ivanov, Z. Wilamowski, **R. Jakiela**, E. Guziewicz, A. Szczepanik, P. Dłuzewski, E. Chikoidze, J. Barjon, Y. Dumont, M. Putkonen, L. Niinisto, Dong Tang – *Do We Understand Magnetic Properties of ZnMnO?* – Acta Physica Polonica A 112 (2007) 261
- [103] M. I. Łukasiewicz, B. Witkowski, M. Godlewski, E. Guziewicz, M. Sawicki, W. Paszkowicz, **R. Jakiela**, T. A. Krajewski, G. Łuka – *Effects related to deposition temperature of ZnCoO films grown by atomic layer deposition – uniformity of Co distribution, structural, optical, electrical and magnetic properties* – Phys. Status Solidi B 247 (2010) 1666
- [104] M. Godlewski, E. Guziewicz, M. I. Łukasiewicz, I. A. Kowalik, M. Sawicki, B. S. Witkowski, **R. Jakiela**, W. Lisowski, J. W. Sobczak, M. Krawczyk – *Role of interface in ferromagnetism of (Zn,Co)O films* – Phys. Status Solidi B (2011) 1596
- [105] M. Sawicki, E. Guziewicz, M. I. Łukasiewicz, O. Proselkov, I. A. Kowalik, W. Lisowski, P. Dłuzewski, A. Wittlin, M. Jaworski, A. Wolska, W. Paszkowicz, **R. Jakiela**, B. S. Witkowski, L. Wachnicki, M. T. Klepka, F. J. Luque, D. Arvanitis, J. W. Sobczak, M. Krawczyk, A. Jablonski, W. Stefanowicz, D. Sztenkiel, M. Godlewski, T. Dietl – *Homogeneous*

- and heterogeneous magnetism in (Zn,Co)O: From a random antiferromagnet to a dipolar superferromagnet by changing the growth temperature* – Phys. Rev. B 88 (2013) 085204
- [106] G. Luka, B. S. Witkowski, L. Wachnicki, K. Goscinski, **R. Jakiela**, E. Guziejewicz, M. Godlewski, E. Zielony, P. Bieganski, E. Placzek-Popko, W. Lisowski, J. W. Sobczak, A. Jablonski – *Atomic layer deposition of Zn_{1-x}Mg_xO:Al transparent conducting films* – J Mater Sci 49 (2014) 1512
- [107] T. A. Krajewski, G. Luka, S. Gieraltowska, A. J. Zakrzewski, P. S. Smertenko, P. Kruszewski, L. Wachnicki, B. S. Witkowski, E. Lusakowska, **R. Jakiela**, M. Godlewski, E. Guziejewicz – *Hafnium dioxide as a passivating layer and diffusive barrier in ZnO/Ag Schottky junctions obtained by atomic layer deposition* – Appl. Phys. Lett. 98 (2011) 263502
- [108] G. Luka, L. Wachnicki, **R. Jakiela**, E. Lusakowska – *Structural properties and metallic conductivity of Ti_{1-x}Nb_xO₂ films grown by atomic layer deposition on crystalline substrates* – J. Phys. D: Appl. Phys. 48 (2015) 495305
- [109] A. Bonanni, M. Kiecana, C. Simbrunner, T. Li, M. Sawicki, M. Wegscheider, M. Quast, H. Przybylińska, A. Navarro-Quezada, **R. Jakiela**, A. Wolos, W. Jantsch, T. Dietl – *Paramagnetic GaN:Fe and ferromagnetic (Ga,Fe)N: The relationship between structural, electronic, and magnetic properties* – Phys. Rev. B 75 (2007) 125210
- [110] J.-G. Rousset, J. Papierska, W. Pacuski, A. Golnik, M. Nawrocki, W. Stefanowicz, S. Stefanowicz, M. Sawicki, **R. Jakiela**, T. Dietl, A. Navarro-Quezada, B. Faina, T. Li, A. Bonanni, J. Suffczynski – *Relation between exciton splittings, magnetic circular dichroism, and magnetization in wurtzite Ga_{1-x}Fe_xN* – Phys. Rev. B 88 (2013) 115208
- [111] M. Wegscheider, T. Li, A. Navarro-Quezada, B. Faina, A. Bonanni, W. Pacuski, **R. Jakiela**, T. Dietl – *Effects of magnetic ions on optical properties: the case of (Ga, Fe)N* – J. Phys.: Condens. Matter 20 (2008) 454222
- [112] A. Navarro-Quezada, N. Gonzalez Szwacki, W. Stefanowicz, Tian Li, A. Grois, T. Devillers, M. Rovezzi, **R. Jakiela**, B. Faina, J. A. Majewski, M. Sawicki, T. Dietl, A. Bonanni – *Fe-Mg interplay and the effect of deposition mode in (Ga,Fe)N doped with Mg* – Phys. Rev. B 84 (2011) 155321
- [113] W. Stefanowicz, D. Sztenkiel, B. Faina, A. Grois, M. Rovezzi, T. Devillers, F. d’Acapito, A. Navarro-Quezada, T. Li, **R. Jakiela**, M. Sawicki, T. Dietl, A. Bonanni – *Structural and paramagnetic properties of dilute Ga_{1-x}Mn_xN* – Phys. Rev. B 81 (2010) 235210
- [114] A. Bonanni, M. Sawicki, T. Devillers, W. Stefanowicz, B. Faina, Tian Li, T. E. Winkler, D. Sztenkiel, A. Navarro-Quezada, M. Rovezzi, **R. Jakiela**, A. Grois, M. Wegscheider, W. Jantsch, J. Suffczynski, F. D’Acapito, A. Meingast, G. Kothleitner, T. Dietl – *Experimental probing of exchange interactions between localized spins in the dilute magnetic insulator (Ga,Mn)N* – Phys. Rev. B 84 (2011) 035206
- [115] T. Devillers, M. Rovezzi, N. Gonzalez Szwacki, S. Dobkowska, W. Stefanowicz, D. Sztenkiel, A. Grois, J. Suffczynski, A. Navarro-Quezada, B. Faina, T. Li, P. Glatzel, F. d’Acapito, **R. Jakiela**, M. Sawicki, J. A. Majewski, T. Dietl, A. Bonanni – *Manipulating Mn–Mg cation complexes to control the charge- and spin-state of Mn in GaN* – Scientific Reports 2 (2012) 722
- [116] S. Stefanowicz, G. Kunert, C. Simserides, J. A. Majewski, W. Stefanowicz, C. Kruse, S. Figge, Tian Li, **R. Jakiela**, K. N. Trohidou, A. Bonanni, D. Hommel, M. Sawicki, T. Dietl – *Phase diagram and critical behavior of the random ferromagnet Ga_{1-x}Mn_xN* – Phys. Rev. B 88 (2013) 081201
- [117] K. Gas, J. Z. Domagala, **R. Jakiela**, G. Kunert, P. Dłuzewski, E. Piskorska-Hommel, W. Paszkowicz, D. Sztenkiel, M. J. Winiarski, D. Kowalska, R. Szukiewicz, T. Baraniecki, A. Mischczuk, D. Hommel, M. Sawicki – *Impact of substrate temperature on magnetic properties of plasma-assisted molecular beam epitaxy grown (Ga,Mn)N* – Journal of Alloys and Compounds 747 (2018) 946

- [118] D. Sztenkiel, M. Foltyn, G.P. Mazur, R. Adhikari, K. Kosiol, K. Gas, M. Zgierski, R. Kruszka, **R. Jakiela**, Tian Li, A. Piotrowska, A. Bonanni, M. Sawicki, T. Dietl – *Stretching magnetism with an electric field in a nitride semiconductor* – Nature Communications 7 (2016) 13232
- [119] C. Simbrunner, M. Wegscheider, M. Quast, Tian Li, A. Navarro-Quezada, H. Sitter, A. Bonanni, **R. Jakiela** – *On the effect of periodic Mg distribution in GaN:δ-Mg* – Appl. Phys. Lett. 90 (2007) 142108
- [120] M. Wegscheider, C. Simbrunner, T. Li, **R. Jakiela**, A. Navarro-Quezada, M. Quast, H. Sitter, A. Bonanni – *Periodic Mg distribution in GaN:δ-Mg and the effect of annealing on structural and optical properties* – Applied Surface Science 255 (2008) 731
- [121] Rafał Jakiela, Adam Barcz – *Distortion of the Manganese Depth Profile as Measured by SIMS Technique* – SIMS Europe 2016, Munster, Niemcy, prezentacja posterowa
- [122] M. Witkowska-Baran, A. Mycielski, A. J. Szadkowski, E. Łusakowska, V. Domukhovski, **R. Jakiela**, B. Witkowska, W. Kaliszek – *Semi-insulating (Cd,Mn)Te:V crystals: Electrical contacts* – phys. stat. sol. (b) 244 (1706) 5
- [123] M. Witkowska-Baran, A. Mycielski, D. Kochanowska, A. J. Szadkowski, **R. Jakiela**, B. Witkowska, W. Kaliszek, J. Domagała, E. Łusakowska, V. Domukhovski, K. Dybko, Y. Cui, R. B. James – *Contacts for High-Resistivity (Cd,Mn)Te Crystals* – IEEE Transactions On Nuclear Science 58 (2011) 347
- [124] M. Witkowska-Baran, A. Mycielski, D. Kochanowska, B. Witkowska, W. Kaliszek a, **R. Jakiela**, E. Łusakowska, V. Domukhovski, M. Wegrzycki – *Amorphous contact layers on (Cd,Mn)Te crystals* – Journal of Crystal Growth 320 (2011) 1
- [125] A. S. Cross, J. P. Knauer, A. Mycielski, D. Kochanowska, M. Wiktowska-Baran, **R. Jakiela**, J. Domagała, Y.Cui, R. B. James, R. Sobolewski – *(Cd,Mn)Te detectors for characterization of X-ray emissions generated during laser-driven fusion experiments* – Nuclear Instruments and Methods in Physics Research A 624 (2010) 649
- [126] A. Mycielski, D. M. Kochanowska, M. Witkowska-Baran, A. Wardak, M. Szot, J. Domagała, B. S. Witkowski, **R. Jakiela**, L. Kowalczyk, B. Witkowska – *Investigation of $Cd_{1-x}Mg_xTe$ as possible materials for X and gamma ray detectors* – Journal of Crystal Growth 491 (2018) 73
- [127] D. Kochanowska, M. Witkowska-Baran, A. Mycielski, A. Szadkowski, B. Witkowska, W. Kaliszek, J. Domagała, **R. Jakiela**, P. Nowakowski, A. Dużyńska, P. Łach, A. Kamińska, A. Suchocki, A. Reszka, B. J. Kowalski, T. Wojtowicz, M. Wiater, P. Kamiński, R. Kozłowski, Z. Sidor, M. Juchniewicz, E. Kamińska – *Growth and Characterization of (Cd, Mn)Te* – IEEE Transactions On Nuclear Science 60 (2013) 3805
- [128] M. Witkowska-Baran, D. M. Kochanowska, A. Mycielski, **R. Jakiela**, A. Wittlin, W. Knoff, A. Suchocki, P. Nowakowski, K. Korona – *Influence of annealing on the properties of (Cd,Mn)Te crystals* – Phys. Status Solidi C 11 (2014) 1528
- [129] A. Mycielski, D. Kochanowska, M. Witkowska-Baran, A. Wardak, M. Szot, J. Z. Domagała, **R. Jakiela**, L. Kowalczyk, B. Witkowska – *Semiconductor crystals based on CdTe with Se – Some structural and optical properties* – Journal of Crystal Growth 498 (2018) 405
- [130] P. Skupinski, K. Kopalko, K. Grasza, E. Łusakowska, V. Domukhovski, **R. Jakiela**, A. Mycielski – *Substrates Grown from the Vapor for ZnO Homoepitaxy* – Acta Physica Polonica A 114 (2008) 1361
- [131] P. Skupinski, K. Grasza, A. Mycielski, W. Paszkowicz, E. Łusakowska, E. Tymicki, **R. Jakiela**, B. Witkowski – *Seeded growth of bulk ZnO by chemical vapor transport* – Phys. Status Solidi B 247 (2010) 1457
- [132] W. Knoff, P. Dziawa, V. Osinniy, B. Taliashvili, V. Domukhovski, R. Diduszko, J. Domagała, E. Łusakowska, **R. Jakiela**, T. Story – *Ferromagnetic and structural properties of $Ge_{1-x}Mn_xTe$ epitaxial layers* – Materials Science-Poland 26 (2008) 959

- [133] P. Dziawa, W. Knoff, V. Domukhovski, J. Domagala, **R. Jakiela**, E. Lusakowska, V. Osinniy, K. Swiatek, B. Taliashvili, T. Story – *Magnetic and Structural Properties of Ferromagnetic GeMnTe Layers* – Springer Proceedings In Physics 119 (2008) 11
- [134] W. Knoff, V. Domukhovski, K. Dybko, P. Dziawa, M. Górski, **R. Jakiela**, E. Lusakowska, A. Reszka, B. Taliashvili, T. Story, J.R. Anderson, C.R. Rotund – *Magnetic Properties of Epitaxial (Ge,Mn)Te Thin Films with Varying Crystal Stoichiometry* – Acta Physica Polonica A 114 (2008) 1159
- [135] W. Knoff, V. Domukhovski, K. Dybko, P. Dziawa, **R. Jakiela**, E. Lusakowska, A. Reszka, K. Swiatek, B. Taliashvili, T. Story, K. Szałowski, T. Balcerza – *Ferromagnetic Transition in $Ge_{1-x}Mn_xTe$ Layers* – Acta Physica Polonica A 116 (2009) 904
- [136] E. Przeździecka, A. Wierzbicka, A. Reszka, K. Goscinski, A. Droba, **R. Jakiela**, D. Dobosz, T. A. Krajewski, K. Kopalko, J. M. Sajkowski, M. Stachowicz, M. A. Pietrzyk, A. Kozanecki – *Characteristics of ZnO: As/GaN heterojunction diodes obtained by PA-MBE* – J. Phys. D: Appl. Phys. 46 (2013) 035101
- [137] E. Przeździecka, K. Gościński, S. Gieraltowska, E. Guzewicz, **R. Jakiela**, A. Kozanecki – *PA-MBE grown p-n ($p\text{-ZnO:}(\text{As+Sb})/n\text{-GaN}$) and p-i-n ($p\text{-ZnO:As/HfO}_2/n\text{-GaN}$) heterojunctions as a highly selective UV detectors* – Key Engineering Materials 605 (2014) 310
- [138] E. Przeździecka, A. Wierzbicka, P. Dłużewski, M. Stachowicz, **R. Jakiela**, K. Goscinski, M. A. Pietrzyk, K. Kopalko, A. Kozanecki – *Dual-acceptor doped p-ZnO:(As,Sb)/n-GaN heterojunctions grown by PA-MBE as a spectrum selective ultraviolet photodetector* – Phys. Status Solidi A 211 (2014) 2072
- [139] E. Przeździecka, M. Stachowicz, W. Lisowski, E. Guzewicz, J.W. Sobczak, **R. Jakiela**, A. Jablonski, D. Jarosz, A. Kozanecki – *The chemical states of As 3d in highly doped ZnO grown by Molecular Beam Epitaxy and annealed in different atmospheres* – Thin Solid Films 605 (2016) 283
- [140] E. Zielony, E. Przeździecka, E. Placzek-Popko, W. Lisowski, M. Stachowicz, K. M. Paradowska, **R. Jakiela**, A. Kozanecki – *Deep levels in the MBE ZnO:As/n-GaN diodes – Photoluminescence, electrical properties and deep level transient spectroscopy* – Journal of Alloys and Compounds 742 (2018) 296
- [141] E. Przeździecka, M. Stachowicz, S. Chusnutdinow, **R. Jakiela**, A. Kozanecki – *Electron beam induced current profiling of the p-ZnO:N/n-GaN heterojunction* – Appl. Phys. Lett. 106 (2015) 062106
- [142] E. Przeździecka, W. Lisowski, **R. Jakiela**, J.W. Sobczak, A. Jablonski, M. A. Pietrzyk, A. Kozanecki – *Arsenic chemical state in MBE grown epitaxial ZnO layers – doped with As, N and Sb* – Journal of Alloys and Compounds 687 (2016) 937
- [143] I. N. Demchenko, K. Lawniczak-Jablonska, T. Story, V. Osinniy, **R. Jakiela**, J. Z. Domagala, J. Sadowski, M. Klepka, A. Wolska, M. Chernyshova – *Modification of the local atomic structure around Mn atoms in (Ga, Mn)As layers by high temperature annealing* – J. Phys.: Condens. Matter 19 (2007) 496205
- [144] A. Wolska, K. Lawniczak-Jablonska, M. T. Klepka, **R. Jakiela**, J. Sadowski, I.N. Demchenko, E. Holub-Krappe, A. Persson, D. Arvanitis – *XANES Studies of Mn K and $L_{3,2}$ Edges in the (Ga,Mn)As Layers Modified by High Temperature Annealing* – Acta Physica Polonica A 114 (2008) 357
- [145] K. Lawniczak-Jablonska, J. Libera, A. Wolska, M. T. Klepka, **R. Jakiela**, J. Sadowski – *The ratio of interstitial to substitutional site occupation by Mn atoms in GaAs estimated by EXAFS* – Radiation Physics and Chemistry 78 (2009) S80
- [146] P. Romanowski, J. Bak-Misiuk, E. Dynowska, J.Z. Domagala, J. Sadowski, T. Wojciechowski, A. Barcz, **R. Jakiela**, W. Calieb – *Defect Structure of High-Temperature-Grown GaMnSb/GaSb* – Acta Physica Polonica A 117 (2010) 341

- [147] G. Grabecki, K. A. Kolwas, J. Wróbel, K. Kapcia, R. Puźniak, **R. Jakiela**, M. Aleszkiewicz, T. Dietl, G. Springholz, G. Bauer – *Contact superconductivity in In–PbTe junctions* – J. Appl. Phys. 108 (2010)
- [148] M. Sobanska, K. Klosek, Z. R. Zytkeiwicz, J. Borysiuk, B. S. Witkowski, E. Lusakowska, A. Reszka, **R. Jakiela** – *Plasma-assisted MBE growth of GaN on Si(111) substrates* – Cryst. Res. Technol. 47 (2012) 307
- [149] K. Koronski, P. Strak, A. Wierzbicka, E. Grzanka, J. Borysiuk, K. Sobczak, **R. Jakiela**, M. Sobanska, K. Klosek, E. Monroy, Z. R. Zytkeiwicz, S. Krukowski, A. Kaminska - *Experimental and theoretical analysis of influence of barrier composition on optical properties of GaN/AlGaIn multi-quantum wells: Temperature- and pressure-dependent photoluminescence studies* – Journal of Alloys and Compounds 769 (2018) 1064
- [150] D. Sugak, I. I. Syvorotka, U. Yakhnevych, O. Buryy, M. Vakiv, S. Ubizskii, D. Włodarczyk, Ya. Zhydachevskyy, A. Pieniazek, **R. Jakiela**, A. Suchocki – *Investigation of Co Ions Diffusion in Gd₃Ga₅O₁₂ Single Crystals* – Acta Physica Polonica A 133 (2018) 959
- [151] L. Gluba, O. Yastrubchak, J. Z. Domagala, **R. Jakiela**, T. Andrearczyk, J. Żuk, T. Wosinski, J. Sadowski, M. Sawicki – *Band structure evolution and the origin of magnetism in (Ga,Mn)As: From paramagnetic through superparamagnetic to ferromagnetic phase* – Phys. Rev. B 97 (2018) 115201
- [152] K. Levchenko, T. Prokscha, J. Sadowski, I. Radelytskyi, **R. Jakiela**, M. Trzyna, T. Andrearczyk, T. Figielski, T. Wosinski – *Evidence for the homogeneous ferromagnetic phase in (Ga,Mn)(Bi,As) epitaxial layers from muon spin relaxation spectroscopy* – Scientific Reports 9 (2019) 3394
- [153] **R. Jakiela**, R. Schifano, A. Barcz – *Fast Sodium Diffusion in ZnO* – poster presentation on conference 10th International Workshop on Zinc Oxide and Other Oxide Semiconductors, Warsaw 2018
- [154] M. A. Borysiewicz, I. Pasternak, E. Dynowska, **R. Jakiela**, M. Wzorek, V. Kolkovski, A. Duzynska, E. Kaminska, A. Piotrowska – *ZnO Thin Films of High Crystalline Quality Deposited on Sapphire and GaN Substrates by High Temperature Sputtering* – Mater. Res. Soc. Symp. Proc. 1315 (2011) 113
- [155] M. A. Borysiewicz, I. Pasternak, E. Dynowska, **R. Jakiela**, V. Kolkovski, A. Duzynska, E. Kaminska, A. Piotrowska – *ZnO Thin Films Deposited on Sapphire by High Vacuum High Temperature Sputtering* – Acta Physica Polonica A 119 (2011) 686
- [156] E. Przeździecka, E. Kamińska, E. Dynowska, W. Dobrowolski, **R. Jakiela**, Ł. Kłopotowski, M. Sawicki, M. Kiecana, J. Kossut – *p-type ZnO and ZnMnO by oxidation of Zn(Mn)Te films* – phys. stat. sol. (c) 3 (2006) 988
- [157] E. Kaminska, E. Przeździecka, A. Piotrowska, J. Kossut, E. Dynowska, W. Dobrowolski, A. Barcz, **R. Jakiela**, E. Lusakowska, J. Ratajczak – *ZnO-based p-n Junctions with p-type ZnO by ZnTe Oxidation* – Mater. Res. Soc. Symp. Proc. 891 (2006) 0891-EE08-11.1
- [158] E. Kaminska, E. Przeździecka, A. Piotrowska, J. Kossut, P. Boguslawski, I. Pasternak, **R. Jakiela**, E. Dynowska – *Properties of p-Type ZnO Grown by Oxidation of Zn-Group-V Compounds* – Mater. Res. Soc. Symp. Proc. 957 (2007) 0957-K08-04
- [159] E. Kaminska, E. Przeździecka, A. Piotrowska, J. Kossut, E. Dynowska, **R. Jakiela**, W. Dobrowolski, P. Boguslawski, I. Pasternak, E. Lusakowska – *Towards efficient p-type doping of ZnO with group-V atoms: N versus As and Sb* – AIP Conference Proceedings 893 (2007) 337
- [160] E. Przeździecka, E. Kamińska, K. P. Korona, E. Dynowska, W. Dobrowolski, **R. Jakiela**, W. Pacuski, L. Kłopotowski, J. Kossut – *Optical properties of p-type ZnO and ZnMnO doped by N and/or As acceptors* – AIP Conference Proceedings 893 (2007) 339

- [161] E. Przezdziecka, E. Kaminska, K. P. Korona, E. Dynowska, W. Dobrowolski, **R. Jakiela**, Ł. Kłopotowski, J. Kossut – *Photoluminescence study and structural characterization of p-type ZnO doped by N and/or As acceptors* – Semicond. Sci. Technol. 22 (2007) 10
- [162] E. Kaminska, I. Pasternak, P. Boguslawski, A. Jezierski, E. Dynowska, **R. Jakiela**, E. Przezdziecka, A. Piotrowska, J. Kossut – *Group IB acceptors in ZnO: experiment and theory* – AIP Conference Proceedings 1199 (2010) 120
- [163] M.A. Borysiewicz, E. Kaminska, A. Piotrowska, I. Pasternak, **R. Jakiela**, E. Dynowska – *Ti-Al-N MAX Phase, a Candidate for Ohmic Contacts to n-GaN* – Acta Physica Polonica A 114 (2008) 1061
- [164] M. A. Borysiewicz, E. Kamińska, A. Piotrowska, I. Pasternak, **R. Jakiela**, E. Dynowska – *Phase Formation in Ti-Al-N MAX-Phase Contacts to GaN* – Materials Science Forum 615-617 (2009) 947
- [165] M. A. Borysiewicz, M. Mysliwiec, K. Gołaszewska, **R. Jakiela**, E. Dynowska, E. Kaminska, A. Piotrowska – *Thermal stability of multilayer Ti₂AlN-based ohmic contacts to n-GaN in ambient air* – Solid-State Electronics 94 (2014) 15
- [166] A. V. Kuchuk, V. P. Kladko, A. Piotrowska, R. Ratajczak, **R. Jakiela** – *On the Formation of Ni-based Ohmic Contacts to n-type 4H-SiC* – Materials Science Forum 615-617 (2009) 573
- [167] K. Kosiel, J. Muszalski, A. Szerling, M. Bugajski, R. Jakiela – *Improvement of quantum efficiency of MBE grown AlGaAs/InGaAs/GaAs edge emitting lasers by optimisation of construction and technology* – Vacuum 82 (2008) 383
- [168] A. Jasik, A. Wnuk, A. Wojcik-Jedlinska, **R. Jakiela**, J. Muszalski, W. Strupinski, M. Bugajski – *The influence of the growth temperature and interruption time on the crystal quality of InGaAs/GaAs QW structures grown by MBE and MOCVD methods* – Journal of Crystal Growth 310 (2008) 2785
- [169] P. Karbownik, A. Barańska, A. Szerling, W. Macherzyński, E. Papis, K. Kosiel, M. Bugajski, M. Tłaczała, **R. Jakiela** – *Low resistance ohmic contacts to n-GaAs for application in GaAs/AlGaAs quantum cascade lasers* – Optica Applicata, 39(4) (2009) 655
- [170] A. Jasik, J. Kubacka-Traczyk, K. Reginski, I. Sankowska, **R. Jakiela**, A. Wawro, J. Kaniewski – *Method of determination of AlGaAsSb layer composition in molecular beam epitaxy processes with regard to unintentional As incorporation* – J. Appl. Phys. 110 (2011) 073509
- [171] A. Szerling, K. Kosiel, M. Szymański, Z. Wasilewski, K. Gołaszewska, A. Łaszczyńska, M. Płuska, A. Trajnerowicz, M. Sakowicz, M. Walczakowski, N. Pałka, **R. Jakiela**, A. Piotrowska – *Processing of AlGaAs/GaAs quantum-cascade structures for terahertz laser* – Journal of Nanophotonics 9 (2015) 093079-1
- [172] A. Szerling, K. Kosiel, M. Kozubal, M. Myśliwiec, **R. Jakiela**, M. Kuc, T. Czyszanowski, R. Kruszka, K. Pągowska, P. Karbownik, A. Barcz, E. Kamińska, A. Piotrowska – *Proton implantation for the isolation of AlGaAs/GaAs quantum cascade lasers* – Semicond. Sci. Technol. 31 (2016) 075010
- [173] A. Jasik, I. Sankowska, A. Wawro, J. Ratajczak, **R. Jakiela**, D. Pierścińska, D. Smoczyński, K. Czuba, K. Regiński – *Comprehensive investigation of the interfacial misfit array formation in GaSb/GaAs material system* – Applied Physics A 124 (2018) 512
- [174] M. A. Kozubal, A. Szerling, K. Kosiel, M. Myśliwiec, K. Pągowska, **R. Jakiela**, R. Kruszka, M. Guziwicz, A. Barcza – *Electrical isolation of GaAs and AlGaAs/GaAs Quantum Cascade Lasers by deep hydrogen implantation* – Materials Science in Semiconductor Processing 74 (2018) 88
- [175] J. Bak-Misiuka, A. Misiuk, P. Romanowski, A. Barcz, **R. Jakiela**, E. Dynowska, J.Z. Domagala, W. Caliebe – *Effect of processing on microstructure of Si:Mn* – Materials Science and Engineering B 159–160 (2009) 99

- [176] J. Bak-Misiuk, P. Romanowski, A. Misiuk, J. Sadowski, **R. Jakiela**, A. Barcz – *Effect of Stress on Structural Transformations in GaMnAs* – Journal of Nanoscience and Nanotechnology 12 (2012) 8721
- [177] K. Kosiel, K. Pągowska, M. Kozubal, M. Guziewicz, K. Lawniczak-Jablonska, **R. Jakiela**, Y. Syryanyy, T. Gabler, M. Śmietana – *Compositional, structural, and optical properties of atomic layer deposited tantalum oxide for optical fiber sensor overlays* – Journal of Vacuum Science & Technology A 36 (2018) 031505
- [178] M. Marchewka, E.M. Sheregii, I. Tralle, D. Ploch, G. Tomaka, M. Furdak, A. Kolek, A. Stadler, K. Mleczko, D. Zak, W. Strupinski, A. Jasik, **R. Jakiela** – *Magnetospectroscopy of symmetric and anti-symmetric states in double quantum wells* – Physica E 40 (2008) 894
- [179] K. Racka-Dzietko, E. Tymicki, M. Racziewicz, K. Grasza, M. Kozubal, E. Jurkiewicz-Wegner, **R. Jakiela**, A. Brzozowski, M. Pawłowski, M. Piersa, J. Sadło, J. Krupka – *Characterization of 6H-SiC Single Crystals Grown by PVT Method Using Different Source Materials and Open or Closed Seed Backside* – Materials Science Forum 615-617 (2009) 19
- [180] K. Racka-Dzietko, E. Tymicki, K. Grasza, M. Racziewicz, **R. Jakiela**, M. Kozubal, E. Jurkiewicz-Wegner, A. Brzozowski, R. Diduszko, M. Piersa, K. Kościwicz, M. Pawłowski, J. Krupka – *Characterization of Vanadium Doped 4H- and 6H-SiC Grown by PVT Method Using the Open Seed Backside* – Materials Science Forum 645-648 (2010) 21
- [181] E. Tymicki, K. Grasza, K. Racka, T. Łukasiewicz, M. Piersa, K. Kościwicz, D. Teklińska, R. Diduszko, P. Skupiński, **R. Jakiela**, J. Krupka – *Effect of Nitrogen Doping on the Growth of 4H Polytype on the 6H-SiC Seed by PVT Method* – Materials Science Forum 717-720 (2012) 29
- [182] K. Racka, E. Tymicki, K. Grasza, I. A. Kowalik, D. Arvanitis, M. Pisarek, K. Kościwicz, **R. Jakiela**, B. Surma, R. Diduszko, D. Teklińska, J. Mierczyk, J. Krupka – *Growth of SiC by PVT method in the presence of cerium dopant* – Journal of Crystal Growth 377 (2013) 88
- [183] A. Avdonin, K. Racka, E. Tymicki, K. Grasza, **R. Jakiela**, M. Pisarek, W. Dobrowolski – *Structural and Electrical Properties of SiC Grown by PVT Method in the Presence of the Cerium Vapor* – Acta Physica Polonica A 123 (2013) 761
- [184] K. Racka, E. Tymicki, K. Grasza, **R. Jakiela**, M. Pisarek, B. Surma, A. Avdonin, P. Skupiński, J. Krupka – *Growth of SiC by PVT method with different sources for doping by a cerium impurity, CeO₂ or CeSi₂* – Journal of Crystal Growth 401 (2014) 677
- [185] K. Racka, A. Avdonin, M. Sochacki, E. Tymicki, K. Grasza, **R. Jakiela**, B. Surma, W. Dobrowolski – *Magnetic, optical and electrical characterization of SiC doped with scandium during the PVT growth* – Journal of Crystal Growth 413 (2015) 86
- [186] T. Suski, E. Litwin-Staszewska, R. Piotrkowski, R. Czernecki, M. Krysko, S. Grzanka, G. Nowak, G. Franssen, L. H. Dmowski, M. Leszczynski, P. Perlin, B. Łucznik, I. Grzegory, **R. Jakiela** – *Substrate misorientation induced strong increase in the hole concentration in Mg doped GaN grown by metalorganic vapor phase epitaxy* – Appl. Phys. Lett. 93 (2008) 172117
- [187] P. Perlin, G. Franssen, J. Szeszko, R. Czernecki, G. Targowski, M. Krysko, S. Grzanka, G. Nowak, E. Litwin-Staszewska, R. Piotrkowski, M. Leszczyński, B. Łucznik, I. Grzegory, **R. Jakiela**, M. Albrecht, T. Suski – *Nitride-based quantum structures and devices on modified GaN substrates* – Phys. Status Solidi A 206(6) (2009) 1130
- [188] L. Marona, P. Perlin, R. Czernecki, M. Leszczyński, M. Boćkowski, **R. Jakiela**, T. Suski, S. P. Najda – *Secondary ions mass spectroscopy measurements of dopant impurities in highly stressed InGaN laser diodes* – Appl. Phys. Lett. 98 (2011) 241115
- [189] Z. Liliental-Weber, R. dos Reis, J. L. Weyher, G. Staszczak, **R. Jakiela** – *The importance of structural inhomogeneity in GaN thin films* – Journal of Crystal Growth 456 (2016) 160
- [190] R. Czernecki, E. Grzanka, **R. Jakiela**, S. Grzanka, C. Skierbiszewski, H. Turski, P. Perlin, T. Suski, K. Donimirski, M. Leszczynski – *Hydrogen diffusion in GaN:Mg and GaN:Si* – Journal of Alloys and Compounds 747 (2018) 354

- [191] J. L. Weyher, T. Sochacki, M. Amilusik, M. Fijałkowski, B. Łucznik, **R. Jakiela**, G. Staszczak, A. Nikolenko, V. Strelchuk, B. Sadovyi, M. Boćkowski, I. Grzegory – *Photo-etching of HVPE-grown GaN: Revealing extended non-homogeneities induced by periodic carrier gas exchange* – Journal of Crystal Growth 403 (2014) 77
- [192] M. Iwinska, T. Sochacki, M. Amilusik, P. Kempisty, B. Lucznik, M. Fijałkowski, E. Litwin-Staszewska, J. Smalc-Koziorowska, A. Khapuridze, G. Staszczak, I. Grzegory, M. Bockowski – *Homoepitaxial growth of HVPE-GaN doped with Si* – Journal of Crystal Growth 456 (2016) 91
- [193] M. Iwinska, R. Piotrkowski, E. Litwin-Staszewska, T. Sochacki, M. Amilusik, M. Fijałkowski, B. Lucznik, M. Bockowski – *Highly resistive C-doped hydride vapor phase epitaxy-GaN grown on ammonothermally crystallized GaN seeds* – Applied Physics Express 10 (2017) 011003
- [194] M. Kaminski, S. Podsiadlo, K. Wozniak, L. Dobrzycki, **R. Jakiela**, A. Barcz, M. Psoda, J. Mizera – *Growth and structural properties of thick GaN layers obtained by sublimation sandwich method* – Journal of Crystal Growth 303 (2007) 395
- [195] M. Kaminski, S. Podsiadlo, P. Dominik, K. Wozniak, L. Dobrzycki, **R. Jakiela**, A. Barcz, M. Psoda, J. Mizera, R. Bacewicz, M. Zajac, A. Twardowski – *New Chemical Method of Obtaining Thick Ga_{1-x}Mn_xN Layers: Prospective Spintronic Material* – Chem. Mater. 19 (2007) 3139
- [196] G. Kunert, S. Dobkowska, Tian Li, H. Reuther, C. Kruse, S. Figge, **R. Jakiela**, A. Bonanni, J. Grenzer, W. Stefanowicz, J. von Borany, M. Sawicki, T. Dietl, D. Hommel – *Ga_{1-x}Mn_xN epitaxial films with high magnetization* – Appl. Phys. Lett. 101 (2012) 022413
- [197] L. Tropic, G. Kunert, **R. Jakiela**, R. A. Wilhelm, S. Figge, J. Grenzer, D. Hommel – *Polarity dependence of Mn incorporation in (Ga,Mn)N superlattices* – Journal of Crystal Growth 437 (2016) 49
- [198] L. Janicki, G. Kunert, M. Sawicki, E. Piskorska-Hommel, K. Gas, **R. Jakiela**, D. Hommel, R. Kudrawiec – *Fermi level and bands offsets determination in insulating (Ga,Mn)N/GaN structures* – Scientific Reports 7 (2017) 41877
- [199] Y. Yuan, C. Xu, R. Hübner, **R. Jakiela**, R. Böttger, M. Helm, M. Sawicki, T. Dietl, S. Zhou – *Interplay between localization and magnetism in (Ga,Mn)As and (In,Mn)As* – Phys. Rev. Mat. 1 (2017) 054401
- [200] Y. Yuan, M. Wang, C. Xu, R. Hübner, R. Böttger, **R. Jakiela**, M. Helm, M. Sawicki, S. Zhou – *Electronic phase separation in insulating (Ga,Mn)As with low compensation: superparamagnetism and hopping conduction* – J. Phys.: Condens. Matter 30 (2018) 095801
- [201] Y. Yuan, R. Hübner, M. Birowska, C. Xu, M. Wang, S. Prucnal, **R. Jakiela**, K. Potzger, R. Böttger, S. Facsko, J. A. Majewski, M. Helm, M. Sawicki, S. Zhou, Tomasz Dietl – *Nematicity of correlated systems driven by anisotropic chemical phase separation* – Phys. Rev. Mat. 2 (2018) 114601
- [202] G. V. Lashkarev, V. I. Sichkovskiy, M. V. Radchenko, V. A. Karpina, P. E. Butorin, O. I. Dmitriev, V. I. Lazorenko, E. I. Slynko, P. M. Lytvyn, **R. Jakiela**, W. Knoff, T. Story, P. Aleshkevych – *Diluted magnetic semiconductors based on II–VI, III–VI, and IV–VI compounds* – Low Temp. Phys. 35 (2009) 62
- [203] G.V. Lashkarev, V.I. Sichkovskiy, M.V. Radchenko, A.I. Dmitriev, P.E. Butorin, V.E. Slynko, E.I. Slynko, Z. D. Kovalyuk, W. Knoff, T. Story, R. Szymczak, **R. Jakiela**, P. Aleshkevych, W. Dobrowolski – *Ferromagnetism of Narrow-Gap Ge_{1-x}Sn_xMn_yTe and Layered In_{1-x}Mn_xSe Semiconductors* – Acta Physica Polonica A 114 (2008) 1219
- [204] A. Ievtushenko, O. Khyzhun, I. Shtepliuk, O. Bykov, **R. Jakiela**, S. Tkach, E. Kuzmenko, V. Baturin, O. Karpenko, O. Olifan, G. Lashkarev – *X-ray photoelectron spectroscopy study of highly-doped ZnO:Al,N films grown at O-rich conditions* – Journal of Alloys and Compounds 722 (2017) 683

- [205] I. I. Izhnin, S. A. Dvoretzky, K. D. Mynbaev, N. N. Mikhailov, Yu. G. Sidorov, V. S. Varavin, **R. Jakiela**, M. Pociask, G. Savitsky – *Arsenic incorporation in MBE-grown HgCdTe studied with the use of ion milling* – Phys. Status Solidi C 7 (2010) 1618
- [206] I. I. Izhnin, K. D. Mynbaev, M. V. Yakushev, A. I. Izhnin, E. I. Fitsych, N. L. Bazhenov, A. V. Shilyaev, H. V. Savitsky, **R. Jakiela**, A. V. Sorochkin, V. S. Varavin, S. A. Dvoretzky – *Electrical and Optical Properties of CdHgTe Films Grown by Molecular Beam Epitaxy on Silicon Substrates* – Semiconductors 46 (2012) 1341
- [207] I. I. Izhnin, A. V. Voitsekhovskiy, A. G. Korotaev, O. I. Fitsych, A. Yu. Bonchuk, H. V. Savitsky, K. D. Mynbaev, V. S. Varavin, S. A. Dvoretzky, N. N. Mikhailov, M. V. Yakushev, **R. Jakiela** – *Optical and electrical studies of arsenic-implanted HgCdTe films grown with molecular beam epitaxy on GaAs and Si substrates* – Infrared Physics & Technology 81 (2017) 52
- [208] I. I. Izhnin, A. V. Voitsekhovskii, A. G. Korotaev, O. I. Fitsych, O. Yu. Bonchuk, H. V. Savitsky, K. D. Mynbaev, V. S. Varavin, S. A. Dvoretzky, M. V. Yakushev, **R. Jakiela**, M. Trzyna – *Properties of arsenic-implanted Hg_{1-x}Cd_xTe MBE films* – EPJ Web of Conferences 133 (2017) 01001
- [209] D. Yu. Sugak, I. I. Syvorotka, O. A. Buryy, U. V. Yakhnevych, I. M. Solskii, N. V. Martynyuk, Yu. Suhak, A. Suchocki, Ya. Zhydachevskii, **R. Jakiela**, S. B. Ubizskii, G. Singh, V. Janyani – *Spatial distribution of optical coloration in single crystalline LiNbO₃ after high-temperature H₂/air treatments* – Optical Materials 70 (2017) 106
- [210] Y. Zhydachevskii, A. Suchocki, D. Sugak, A. Luchechko, M. Berkowski, S. Warchol, **R. Jakiela** – *Optical observation of the recharging processes of manganese ions in YAlO₃:Mn crystals under radiation and thermal treatment* – J. Phys.: Condens. Matter 18 (2006) 5389
- [211] R. Chakarvorty, Y.-Y. Zhou, Y.-J. Cho, X. Liu, **R. Jakiela**, A. Barcz, J. K. Furdyna, M. Dobrowolska – *Determination of Mn Acceptor Compensation in MBE-Grown GaMnAs via Magnetic Circular Dichroism (MCD)* – IEEE Transactions On Magnetics 43 (2007) 3031
- [212] R. Chakarvorty, S. Shen, K. J. Yee, T. Wojtowicz, **R. Jakiela**, A. Barcz, X. Liu, J. K. Furdyna, M. Dobrowolska – *Common origin of ferromagnetism and band edge Zeeman splitting in GaMnAs at low Mn concentrations* – Appl. Phys. Lett. 91 (2007) 171118
- [213] M. Berciu, R. Chakarvorty, Y. Y. Zhou, M. T. Alam, K. Traudt, **R. Jakiela**, A. Barcz, T. Wojtowicz, X. Liu, J. K. Furdyna, M. Dobrowolska – *Origin of Magnetic Circular Dichroism in GaMnAs: Giant Zeeman Splitting versus Spin Dependent Density of States* – Phys. Rev. Lett. 102 (2009) 247202
- [214] C. M. Polley, V. Jovic, T.-Y. Su, M. Saghir, D. Newby, Jr., B. J. Kowalski, **R. Jakiela**, A. Barcz, M. Guzewicz, T. Balasubramanian, G. Balakrishnan, J. Laverock, K. E. Smith – *Observation of surface states on heavily indium-doped SnTe(111), a superconducting topological crystalline insulator* – Phys. Rev. B 93 (2016) 075132
- [215] U. Wurstbauer, M. Soda, **R. Jakiela**, D. Schuh, D. Weiss, J. Zweck, W. Wegscheider – *Coexistence of ferromagnetism and quantum Hall effect in Mn modulation-doped two-dimensional hole systems* – Journal of Crystal Growth 311 (2009) 2160
- [216] B. I. Tsykaniuk, A. S. Nikolenko, V. V. Strelchuk, V. M. Naseka, Y. I. Mazur, M. E. Ware, E. A. DeCuir Jr, B. Sadovyi, J. L. Weyher, **R. Jakiela**, G. J. Salamo, A. E. Belyaev – *Infrared Reflectance Analysis of Epitaxial n-Type Doped GaN Layers Grown on Sapphire* – Nanoscale Research Letters 12 (2017) 397