

Kraków, 28.10.2024r.

Prof. dr hab. Tomasz Stapiński  
Instytut Elektroniki  
Akademia Górniczo-Hutnicza  
im. Stanisława Staszica w Krakowie  
al. Mickiewicza 30, 30-059 Kraków

## **Recenzja rozprawy doktorskiej**

Pani mgr inż. Moniki Masłyk

Pt.:

**Domieszkowanie warstw GaN tlenem metodą rozpylania  
magnetronowego i analiza kontaktów omowych z warstwą  
podkontaktową n+-GaN:O do n-GaN i tranzystorów  
AlGaIn/GaN HEMT**

Promotor: dr hab. inż. Lidia Łukasiak

Promotor pomocniczy: dr Paweł Prystawko

### **Problematyka rozprawy**

Problematyka rozprawy związana jest z zagadnieniami z obszaru mikroelektroniki dotyczącymi ewolucji rozwoju przyrządów mocy w kierunku zastosowania półprzewodników azotkowych (GaN). Pani mgr inż. Monika Masłyk prowadziła badania intencjonalnego domieszkowania cienkich warstw GaN tlenem metodą rozpylania magnetronowego w temperaturze pokojowej w celu uzyskania

warstw o wysokiej koncentracji elektronów n+-GaN:O. Uzyskane materiały cienkowarstwowe były badane jako warstwy podkontaktowe dla kontaktu omowego do n-GaN i tranzystorów HEMT oraz analizowano ich wpływ na parametry elektryczne kontaktów i charakterystyk przyrządów.

Autorka uzyskiwała i charakteryzowała domieszkowane cienkie warstwy n+-GaN:O o wysokiej koncentracji elektronów rzędu  $10^{18}$ - $10^{19}$  cm<sup>-3</sup> i kontakty omowe dla n-GaN z warstwą podkontaktową n+-GaN:O i metalizacją Ti/Al. Badania stanowiły poszerzenie stanu wiedzy w dziedzinie półprzewodników azotkowych. Opracowana technologia domieszkowania warstw GaN tlenem została przedmiotem zgłoszenia patentowego.

### **Charakterystyka rozprawy**

Rozprawa ukazała się w formie nieksiążkowej zwartej i posiada oryginalny układ. Językiem rozprawy jest język polski, jednakże zamieszczono szereg angielskojęzycznych pojęć i akronimów. Wskazano publikacje Pani mgr inż. Moniki Masłyk stanowiące dzieła Autorki, gdzie była również pierwszym Autorem. Wykaz Publikacji Autorki z listy filadelfijskiej i znaczących materiałów konferencyjnych, które są związane z realizacją pracy doktorskiej i ogólną działalnością naukową obejmuje 8 pozycji. Rozprawa doktorska składa się ze 124 stron i ma prawidłowy układ edytorski, a jej struktura jest przejrzysta. Przytoczona bibliografia jest w pełni wystarczająca dla naświetlenia problematyki i zawiera pozycje, w większości z kilku ostatnich lat wydanych w liczących się czasopismach naukowych, z czego Pani mgr inż. Monika Masłyk powołuje się na 2 własne współautorskie publikacje. Bibliografia świadczy o dobrym rozeznaniu literaturowym Autorki w uprawianej przez nią dyscyplinie naukowej oraz o znacznym dorobku naukowym.

Rozprawa zawiera 6 rozdziałów, spis treści, wykaz symboli i akronimów oraz streszczenie. Na końcu pracy zamieszczono podsumowanie i wnioski końcowe, dorobek naukowy Autorki związany z rozprawą i niezwiązany z rozprawą. Każdy z rozdziałów pracy zakończony jest bibliografią.

Pani mgr inż. Monika Masłyk przyjęła następujący układ swojej rozprawy: Rozdziały 1-3 dotyczą przeprowadzonych badań literaturowych w zakresie roli GaN w elektronice wysokich mocy i częstotliwości, intencjonalnego domieszkowania tlenem warstw GaN osadzanych metodą rozpylania magnetronowego w temperaturze pokojowej oraz aktualnego stanu wiedzy w zakresie kontaktów

omowych do n-GaN, domieszkowania warstw n-GaN dla kontaktu omowego, roli tlenu w warstwach GaN i wpływu na właściwości transportowe i strukturalne z uwzględnieniem warunków osadzania, kontaktów omowych źródła i drenu dla tranzystorów AlGaIn/GaN HEMT oraz technologii rozpylania magnetronowego cienkich warstw GaN. Autorka wymienia przesłanki uzasadniające intencjonalne domieszkowanie warstw GaN tlenem. Koncentrację tlenu i sposób jego wbudowywania się w sieć GaN można kontrolować uzyskując pożądane właściwości warstw GaN. Wybrana przez Panią mgr inż. Monikę Małyk niedroga metoda rozpylania magnetronowego w temperaturze pokojowej może być konkurencyjna do metod obecnie stosowanych w technologii kontaktów omowych do n-GaN i tranzystorów AlGaIn/GaN HEMT. Uzyskane w ten sposób warstwy mogą charakteryzować się koncentracją defektów porównywalną do warstw nakładanych metodami MBE i MOCVD.

W Rozdziale 4 o charakterze technologicznym przedstawiono metodykę badawczą. Badania podzieliła Autorka na 3 etapy obejmujące kolejno analizę właściwości warstw GaN osadzanych metodą rozpylania magnetronowego, analizę kontaktów omowych do n-GaN z wysoko przewodzącą warstwą pod kontaktową n+-GaIn:O z uwzględnieniem analizy mechanizmu formowania kontaktu omowego wraz z charakteryzacją elektryczną struktur metodą linii transmisyjnej oraz badanie wpływu kontaktów omowych źródła i drenu tranzystorów AlGaIn/GaN HEMT na charakterystyki elektryczne przyrządu.

Obszerny Rozdział 5 wraz z podrozdziałami obejmuje wyniki zastosowanych metod technologicznych i pomiarowych oraz dyskusję. Przedstawiono w nim wyniki badania właściwości warstw GaN i GaIn:O, charakterystyki prądowo-napięciowe kontaktów omowych do n-GaN z warstwą podkontaktową n+-GaIn:O i tranzystorów AlGaIn/GaN HEMT wraz z wyznaczonymi parametrami elektrycznymi. Pani mgr inż. Monika Małyk bardzo szczegółowo opisała technologię rozpylania targetu polikrystalicznego GaN prowadzącą do uzyskania warstw GaN a następnie ich charakteryzację strukturalną (XRD). Przeprowadziła również pomiary elektryczne i transportowe oraz profilowanie koncentracji domieszek (SIMS). Pani mgr inż. Monika Małyk prowadziła badanie ferromagnetyzmu w temperaturze pokojowej i badała mechanizm samokompensacji nośników w wysokooporowych warstwach GaN metodą SQUID. Przeprowadziła również rozpylanie monokrystalicznej płytki objętościowego GaN w kierunku domieszkowania nieintencjonalnego i intencjonalnego tlenem ze źródła gazowego a uzyskane warstwy poddała kompleksowej charakteryzacji (badania strukturalne, optyczne). Ponadto materiały

uzyskane poprzez rozpylanie płytki objętościowego GaN:O poddane zostały dogłębnej analizie i charakteryzacji. Istotną część badań stanowi określenie wpływu technologii na charakterystyki I-V i parametry elektryczne kontaktów. Pani mgr inż. Monika Małyk nie ograniczyła się do badań samych materiałów cienkowarstwowych, lecz również wykonała (w ramach prac zespołowych) tranzystor AlGaIn/GaN HEMT (demonstrator). Prowadzone badania charakterystyk wyjściowych i przejściowych tranzystorów stanowiły silny aspekt aplikacyjny całości prowadzonych badań.

Ostatni Rozdział 6. obejmuje podsumowanie i wnioski końcowe rozprawy doktorskiej.

### **Oryginalne osiągnięcia Autorki**

Należy zauważyć, iż Pani mgr inż. Monika Małyk podjęła się trudnego zadania w warstwie technologiczno-eksperymentalnej. Po pierwsze przeanalizowała możliwości intencjonalnego domieszkowania cienkich warstw GaN tlenem w celu uzyskania przewodnictwa typu n i zbadała mechanizm takiego domieszkowania. Autorka wykonała analizę jakości warstw wykorzystując badania strukturalne, chemiczne, optyczne i elektryczne. Istotne było sprawdzenie i wykazanie możliwości zastosowania opracowanych materiałów jako kontaktów omowych dla n-GaN i jako kontaktów dla źródła i drenu w tranzystorze HEMT AlGaIn/GaN. Za silne strony badań Autorki uważam: dobre opanowanie technologii i dobrą znajomość licznych technik pomiarowych służących charakteryzacji warstw. Istotnymi osiągnięciami Pani mgr inż. Moniki Małyk są zdaniem recenzenta: opracowanie technologii pozwalającej na uzyskanie warstw n-GaN:O posiadających koncentrację elektronów rzędu  $10^{19} \text{ cm}^{-3}$ , wykazanie i potwierdzenie pełnej przydatności technologii magnetronowego rozpylania w celu uzyskania warstw n-GaN:O w temperaturze pokojowej. Zwrócić należy uwagę, że wspomniana metoda została zgłoszona do opatentowania (numer zgłoszenia: P.442495, data zgłoszenia do UP RP: 11.10.2022r). Na uwagę zasługuje możliwość uzyskiwania kontaktów omowych z warstwą podkontaktową n-GaN:O do n-GaN o rezystywności  $10^{-3} - 10^{-5} \text{ Ohm} \cdot \text{cm}^2$  w stosunkowo niskiej temperaturze wygrzewania.

## **Mocne strony rozprawy**

Nie ulega wątpliwości, iż fakt uprzedniego opublikowania wyników części badań składających się na doktorat Pani Mgr inż. Monika Małyk w recenzowanym czasopiśmie ściśle związanym ze specjalizacją Doktorantki świadczy o randze prowadzonych badań. Bardzo istotny jest fakt kierowania projektem NCN Preludium 16 oraz współpracy z licznymi ośrodkami naukowymi w Polsce takimi jak Sieć Łukasiewicz, IF PAN, IWC PAN.

Aktywny udział w opracowaniu koncepcji eksperymentów jak i ich wykonaniu, świadczy o przygotowaniu Doktorantki do prowadzenia badań na wysokim poziomie. Zdaniem recenzenta wyniki badań Autorki mogą się przyczynić do rozwoju technologii przyrządów wysokiej mocy i częstotliwości w ramach elektroniki azotowej. Recenzent zauważył nieliczne nieścisłości natury redakcyjnej w przedstawionej do oceny pracy, lecz nie ulega wątpliwości, iż mocne strony rozprawy są dominujące.

## **Wnioski końcowe**

Recenzent wysoko ocenia przedłożoną rozprawę doktorską. Autorka w czasie realizacji swojej pracy doktorskiej wykazała się dużym wkładem w prowadzone badania i intuicją jako naukowiec oraz wiedzą teoretyczną i doświadczeniem praktycznym. Na podkreślenie zasługuje możliwość wykorzystania wyników badań dla rozwoju zaawansowanych konstrukcji struktur elektronicznych.

Cel pracy został osiągnięty a recenzowana rozprawa doktorska posiada wysoki poziom naukowy i stanowi znaczący wkład w dyscyplinę naukową automatyka, elektronika, elektrotechnika i technologie kosmiczne. Dojrzałość naukową Autorki potwierdza fakt, iż częściowe wyniki prac były już opublikowane w recenzowanym czasopiśmie naukowym (Ohmic contact to n-GaN using RT-sputtered GaN:O, Materials 16 (2023) 5574).

Pani Mgr inż. Monika Małyk realizowała badania związane z doktoratem w ramach projektu NCN - Mechanizm domieszkiowania tlenem cienkich warstw GaN za pomocą rozpylania magnetronowego i analiza formowania kontaktu omowego z wysokodomieszkowaną warstwą podkontaktową n-GaN:O do n-GaN i tranzystorów AlGaIn/GaN HEMT, Preludium 16, UMO-2018/31/N/ST7/03624, 12.07.2019 r. – 11.02.2023 r., gdzie pełniła rolę kierownika. Wyniki badań prezentowała też na konferencjach naukowych: WOCSDICE-EXMATEC 2023, Palermo, Włochy, International workshop on nitride semiconductors, Berlin, Niemcy, 2022 r., 17th

International conference on reactive sputter deposition, Gandawa, Belgia, 06.12.-07.12.2018 r. Istotny jest fakt przygotowania Zgłoszenia patentowego pn. Sposób wytwarzania półprzewodnikowej warstwy azotku galu o przewodnictwie typu n, numer zgłoszenia: P.442495, data zgłoszenia do UP RP: 11.10.2022 r. Podkreślić też należy, że Autorka znaczącą część prac badawczych wykonała w we współpracy z wiodącymi ośrodkami naukowymi w kraju. **Reasumując stwierdzam, że cel pracy został z nadmiarem osiągnięty, recenzowana rozprawa doktorska Pani mgr inż. Monika Małyk posiada wysoki poziom naukowy i spełnia z naddatkiem warunki stawiane rozprawom doktorskim. Na podstawie stosownej Ustawy wnoszę o jej dopuszczenie do publicznej obrony.**

**Równocześnie, po przyjęciu publicznej obrony pracy doktorskiej, mając na uwadze, że cel pracy został osiągnięty, a wyniki badań recenzowanej rozprawy doktorskiej Pani mgr inż. Moniki Małyk mają istotne znaczenie dla rozwoju dyscypliny naukowej automatyka, elektronika, elektrotechnika i technologie kosmiczne, wnioskuję o jej wyróżnienie.**

Tomasz Stapiński