

Recenzja rozprawy doktorskiej

mgr. Macieja Kozubala

„Badanie wpływu implantacji jonów na właściwości azotku galu i materiałów pochodnych”

Rozprawa doktorska mgr. Macieja Kozubala wykonana została w Zakładzie Mikro- i Nanotechnologii Półprzewodników Szerokopasmowych Instytutu Technologii Elektronowej pod kierunkiem promotora prof. dr hab. Adama Barcza. Praca dotyczy modyfikacji właściwości GaN metodą implantacji jonowej dla uzyskania warstw o określonych parametrach elektrycznych oraz strukturalnych. Tematyka pracy jest bardzo aktualna i ważna dla technologii przyrządów półprzewodnikowych. Do ważnych zastosowań implantacji w przypadku półprzewodników należy formowanie silnie domieszkowanych warstw dla kontaktów omowych oraz wytwarzanie obszarów wysokooporowych w celu izolacji elektrycznej. Zaletą implantacji jonów jest jej powtarzalność i bardzo dobra kontrola koncentracji oraz miejsca wprowadzanych domieszek, poprzez wybór odpowiedniej dawki i energii wiązki jonów wprowadzanych do materiału.

Recenzowana rozprawa doktorska liczy 132 strony. Składa się na nią: 8 rozdziałów, dodatek, bibliografia oraz opis dorobku autora. Na początku rozprawy podany jest wykaz oznaczeń, skrótów i symboli. W rozdziale 1 autor wprowadził czytelników w tematykę rozprawy oraz postawił tezę, że **”możliwe jest modyfikowanie własności azotku galu metodą implantacji jonów w celu kontroli parametrów strukturalnych i elektrycznych w szerokim zakresie, od wytwarzania warstw wysokooporowych do wysokoprzewodzących”**.

Rozdział 2 przedstawia problematykę badawczą rozprawy doktorskiej, w tym: charakterystykę właściwości GaN, jego domieszkowanie, formowanie izolacji elektrycznej poziomej i pionowej. Różnorakie procesy technologiczne zastosowane w wytwarzaniu próbek oraz metody ich badania, ze szczególnym uwzględnieniem oddziaływania energetycznych jonów z materiałem – zjawisk leżących u podstaw zarówno implantacji jonów jak i metody RBS/C opisane są w rozdz. 3. Łącznie zastosowano w pracy imponującą liczbę 15 metod doświadczalnych do pomiarów przede wszystkim właściwości strukturalnych i elektrycznych,

a także optycznych implantowanego GaN. Przeprowadzono więc wszechstronną charakteryzację badanych próbek. Największa część wyników dotyczyła badań stopnia zdefektowania warstw metodą RBS/C oraz pomiarów elektrycznych. Sądzę więc, że w tych przede wszystkim technikach wyspecjalizował się doktorant.

Rozdział 4 jest najbardziej obszerną częścią pracy doktorskiej mgr. Macieja Kozubala. Badano epitaksjalne warstwy GaN na podłożach z szafiru, zaimplantowane jonami  $\text{Si}^+$  i  $\text{Ge}^+$  o energii 250 keV, w zakresie dawek od  $0,33 \times 10^{16} \text{ cm}^{-2}$  do  $2 \times 10^{16} \text{ cm}^{-2}$  a następnie wygrzane. Aby uzyskać maksimum koncentracji domieszek donorowych w obszarze bliskim powierzchni GaN, implantację wykonywano przez nałożoną wcześniej na GaN warstwę spowalniającą  $\text{SiO}_2$  o odpowiedniej grubości. Celem było otrzymanie wysokoprzewodzących obszarów typu  $n$  o dobrej jakości strukturalnej. Zaprojektowano cykl sekwencyjnych implantacji mniejszymi dawkami (tzw. domieszkowanie dzielone), czyli przeprowadzenie trzech implantacji z dawką równą 1/3 dawki sumarycznej i wygrzaniem próbki po każdej z tych implantacji, celem bardziej efektywnej eliminacji defektów. W wcześniejszych pracach pokazano, że obserwowany metodą RBS/C stopień rekrytalizacji GaN zaimplantowanego jonami  $\text{Ar}^+$  i wygrzanego jest wyższy, gdy nie jest przekroczona określona dawka progowa. Przeprowadzone w recenzowanej rozprawie badania potwierdziły, że stosując sekwencyjny proces implantacji na przemian z wygrzewaniem rekrytalizacyjnym oraz wygrzewanie aktywacyjne w temperaturze do  $1100^\circ\text{C}$  uzyskać można lepsze właściwości elektryczne i strukturalne implantowanego azotku galu niż dla procesu jednokrotnej implantacji i wygrzewania. Efekt ten jest znacznie silniejszy dla implantacji jonami krzemu niż germanu. Porównywano morfologię powierzchni oraz parametry elektryczne dla różnych typów warstw hermetyzujących, które zabezpieczały powierzchnię GaN zaimplantowanego jonami  $\text{Si}^+$  przed degradacją. Dla warstwy  $\text{AlN/SiO}_2$  uzyskano najlepszą morfologię powierzchni oraz parametry elektryczne uformowanych warstw GaN. Wyżej wymienione rezultaty mogą znaleźć znaczenie praktyczne.

Równie ważne z punktu widzenia zastosowań wyniki badań izolacji poziomej wytworzonej w heterostrukturze  $\text{AlGaIn/GaN}$  tranzystora HEMT poprzez implantację jonów glinu lub węgla opisane są w rozdziale 5. W obu przypadkach zastosowano implantacje jonami o 2 różnych energiach i dawkach, których wartości wyznaczono programem TRIM w celu otrzymania quasi-prostokątnego rozkładu wakansów. Powstałe w półprzewodniku defekty wprowadzają poziomy wewnątrz przerwy energetycznej, działając jako centra pułapkujące elektrony, co prowadzi do powstania izolacji elektrycznej w obszarze

zaimplantowanym. Otrzymano prostopadłe do powierzchni obszary izolacyjne i wyznaczono ich oporności powierzchniowe, które wzrosły po implantacji o ponad 8 rzędów wielkości, co jest bardzo dobrym wynikiem. Zbadano także stabilność temperaturową izolacji. Z wykresów Arrheniusa otrzymano energie aktywacji. Na podkreślenie zasługuje obszerna dyskusja wyników tych badań w części 2 rozdziału 5, z odwołaniami do literatury przedmiotu.

Rozdział 6 opisuje formowanie pionowej warstwy izolacyjnej w GaN poprzez implantację protonów o energii 250 keV, z wysoką dawką  $1,75 \times 10^{17} \text{ cm}^{-2}$  i wygrzewanie. Dla dawki tej nie dochodzi jeszcze w GaN do eksfoliacji. Otrzymano silnie zdefektowaną, z mikrownękami, stosunkowo wąską warstwę zagrzebaną z maksimum na głębokości 1340 nm od powierzchni oraz słabo zdefektowany, szeroki obszar przypowierzchniowy. Opór skrośny tej warstwy był o 4 rzędy wielkości większy niż dla referencyjnego GaN.

W krótkim rozdziale 7 przedstawiono wyniki modelowania 2-wymiarowych map koncentracji wakansów w strukturach lasera kaskadowego QCL AlGaAs/GaAs naświetlanych protonami. Autor posłużył się opracowanym przez siebie algorytmem używając danych z programu TRIM. Następnie przeprowadzono implantację protonami o energii 640 keV do próbek testowych GaAs:Si/GaAs(Si) w pewnym zakresie dawek. Zmierzono oporność powierzchniową na wykonanych strukturach i znaleziono dawkę progową dla optymalnej izolacji oraz określono temperaturę stabilności tak wykonanych obszarów wysokooporowych. Powyższe prace są ściśle powiązane z aplikacjami.

Autor przedstawił w rozprawie doktorskiej bogaty materiał związany z modyfikacją na drodze implantacji jonowej warstw epitaksjalnych GaN, heterostruktur  $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}/\text{GaN}$  tranzystorów HEMT oraz warstw GaAs. Praca ma charakter technologiczno-eksperymentalny. Z tego powodu wymagała bez wątpienia ekspertyzy i współudziału sporej grupy techników i naukowców, co potwierdzają wieloautorskie publikacje. Nie umniejsza to jednak w żaden sposób osiągnięć autora. Stwierdzić należy, że wykorzystał on należycie nowoczesną bazę technologiczną i aparaturę pomiarową w Instytucie. Sposób prezentacji wyników, ich analiza i wyciągnięte wnioski wskazują na to, że autor dobrze opanował problematykę badawczą rozprawy. Dodajmy, że doktorant, który jest fizykiem nie stroni od obliczeń numerycznych, co udowodnił na łamach rozprawy. Recenzent pragnie zwrócić też uwagę na staranną i estetyczną redakcję graficzną pracy doktorskiej z ujednoliconym stylem bardzo licznie występujących w niej wykresów. Tekst rozprawy napisany jest przejrzysto, nie jest jednak całkiem wolny od błędów oraz pewnej liczby tzw. literówek. Ich listę

przekazałem autorowi. Czytając rozdziały pracy zawierające wyniki badań doktoranta, poza rozdziałem 5, brakuje mi w nich jednak (szczególnie przy dyskusji wyników) odniesień literaturowych, chociaż bibliografia zawiera 175 pozycji. Jedynie 25 % z nich, włączając w to prace własne autora zostało opublikowanych po roku 2010.

Do głównych osiągnięć autora rozprawy można zaliczyć:

1. Wytworzenie kontaktów omowych do GaN o bardzo dobrych parametrach elektrycznych i niskiej koncentracji defektów poprzez implantację jonową i wygrzewanie aktywacyjne.
2. Udowodnienie, że w przypadku sekwencyjnego procesu implantacji GaN jonami krzemu i germanu na przemian z wygrzewaniem, uzyskać można lepsze właściwości elektryczne i strukturalne niż w przypadku pojedynczego procesu.
3. Ważne aplikacyjnie wykonanie izolacji poziomych w heterostrukturze AlGaIn/GaN tranzystora HEMT poprzez implantację jonów  $Al^+$  i  $C^+$  i ich charakteryzacja.
4. Analiza właściwości elektrycznych zaimplantowanych warstw w powiązaniu z wynikami badań strukturalnych.

Większość przedstawionych w rozprawie wyników badań ukazała się w czasopismach o światowym zasięgu. Doktorant jest także współautorem patentu. Lista publikacji wraz ze spisem wystąpień konferencyjnych oraz listą projektów z udziałem mgr. Kozubala jest rozległa. Obrazuje to szeroką aktywność badawczą doktoranta w ciągu ostatnich kilku lat

Reasumując uważam, że autor rozprawy w pełni potwierdził postawioną tezę o możliwości modyfikowania własności GaN metodą implantacji jonów w celu kontroli parametrów strukturalnych i elektrycznych w szerokim zakresie, od wytwarzania warstw wysokooporowych do wysokoprzewodzących. Recenzowana praca doktorska ma duże walory poznawcze i aplikacyjne. Rozprawa spełnia wszelkie wymagania stawiane pracom doktorskim. Wniosuję o dopuszczenie mgr. Macieja Kozubala do publicznej obrony.

*Terzy Zuk*