

Gliwice, 8.09.2021

Dr hab. inż. Wiesław Jakubik prof. PŚ  
Instytut Fizyki Centrum Naukowo – Dydaktyczne  
Politechnika Śląska w Gliwicach  
Zakład Fizyki Stosowanej

**Recenzja rozprawy doktorskiej**  
**dla Rady Dyscypliny Naukowej Automatyka, Elektronika i Elektrotechnika**  
**Politechniki Wrocławskiej**

Tytuł rozprawy: *“Efekty piezotroniczne w przyrządach AIIIN”*

Autor: *mgr inż. Bartłomiej Paszkiewicz*

Promotor: *prof.dr hab.inż. Andrzej Dziedzic*  
Promotor pomocniczy: *dr inż. Mateusz Wośko*

**1. Wstęp**

Przedstawiona do recenzji rozprawa doktorska Pana mgr inż. Bartłomieja Paszkiewicza zatytułowana „Efekty piezotroniczne w przyrządach AIIIN” poświęcona jest ważnemu, zarówno z punktu widzenia poznawczego jak i ze względu na aplikacje, zagadnieniu heterostruktur azotowych trzeciej grupy układu okresowego pierwiastków oraz działaniu wytwarzanych z nich przyrządów elektronicznych pod wpływem zadawanych statycznych i dynamicznych pól naprężeń.

Heterostruktury azotkowe, które były przedmiotem badań Autora rozprawy doktorskiej są obecnie stosowane do konstrukcji tranzystorów mikrofalowych, tranzystorów dużej mocy, czujników gazów a także przyrządów optoelektronicznych takich jak diody i lasery UV. Liczba publikacji poświęconych przyrządom wytwarzanych w oparciu o materiały AIIIN utrzymuje się od kilku lat na stałym poziomie, a duży udział w badaniach mają techniki wykorzystujące akustyczne fale powierzchniowe, które były stosowane w rozprawie doktorskiej do zadawania dynamicznych stanów naprężeń.

Celem badań było określenie związku pomiędzy statycznymi i dynamicznymi polami naprężeń w strukturach typu AIIIN oraz działaniem wytworzonych w nich przyrządów elektronicznych. Praca łączy w sobie podejście teoretyczne, tj. symulacji wykonanych

w środowiskach COMSOL Multiphysics oraz APSYS metodą elementów skończonych z wynikami uzyskanymi na drodze eksperymentalnej. Wnioski sformułowane na podstawie tych badań mogą mieć fundamentalne znaczenie dla rozwoju tej dziedziny nauki.

## 2. Ogólna charakterystyka pracy

Recenzowana praca doktorska liczy 151 stron, łącznie ze spisem 130 pozycji literaturowych. Publikacje, na które powołuje się Autor rozprawy są aktualne, prawidłowo dobrane i właściwie zacytowane w tekście.

Układ pracy jest tradycyjny i prawidłowy. Rozprawa doktorska składa się z 6 rozdziałów, w tym ze wstępu (Rozdział 1) oraz wniosków końcowych (Rozdział 6). Zawiera spis ważniejszych oznaczeń i akronimów co bardzo ułatwia czytanie pracy.

Rozdział pierwszy – *Wstęp* wprowadza w zagadnienie, którego dotyczy praca, precyzuje motywacje, które wskazały Autorowi podjęcie odpowiednich badań oraz podaje cel i zakres pracy. Rozdział drugi – *Metody technologiczne, symulacyjne i pomiarowe* opisuje stosowane w rozprawie testowe struktury epitaksjalne wykonane na podłożach szafirowych do badań zarówno zjawisk statycznych a także dynamicznych wykorzystujących przetworniki międzypalczaste. W rozdziale tym Autor opisał również metody symulacyjne z wykorzystaniem elementów skończonych oraz macierzowych, a także badania eksperymentalne wykorzystujące metody pomiarowe: stałoprądową, mikrofalową, fotoluminescencji oraz Halla. Rozdział trzeci – *Wpływ naprężeń statycznych na parametry heterostruktur AlGaIn/GaN* przedstawia przegląd literatury z zakresu tej tematyki, a także opis stanowiska do zadawania naprężeń mechanicznych wraz z wynikami badań. Rozdział czwarty pt. *Fale objętościowe* jest poświęcony wytwarzaniu naprężeń dynamicznych w całej objętości badanych materiałów wraz z wynikami uzyskanych symulacji. Natomiast rozdział piąty – *Fale powierzchniowe* dotyczy stosowania dynamicznych stanów naprężeń wytwarzanych za pomocą przetworników międzypalczastych wykonanych na warstwach azotków na podłożach szafirowych w celu analizy rodzajów generowanych fal powierzchniowych, przedstawiono również implementację numeryczną metod macierzowych do ich analizy. W *Podsumowaniu* – rozdział szósty, Autor rozprawy doktorskiej w zwięzły sposób opisał zrealizowane symulacje i badania oraz przedstawił najbardziej istotne osiągnięcia pracy.

### 3. Ocena recenzowanej rozprawy

Autor recenzowanej rozprawy postawił sobie ambitny cel, który został sformułowany w rozdziale 1, str.10 i 11, tj.:

- podjęcie kompleksowej i pogłębionej analizy zjawisk występujących w przyrządach elektronicznych wytwarzanych w piezoelektrycznych półprzewodnikach AlInN i ich heterostrukturach,
- zbadanie wpływu efektów piezotronicznych, związanych ze statycznymi i dynamicznymi stanami naprężeń, na właściwości przyrządów elektronicznych wytwarzanych w półprzewodnikowych heterostrukturach azotków trzeciej grupy układu okresowego.

Motywacją do podjęcia badań był brak w literaturze przedmiotu doniesień nt. uwzględnienia przy projektowaniu i badaniu właściwości przyrządów, takich jak tranzystory AlGaIn/GaN HEMT, oprócz typowych zjawisk wynikających z fizyki półprzewodników, również dynamicznych stanów naprężeń, ponieważ typowo uwzględniane są tylko wbudowane statyczne stany naprężeń powstające w czasie wzrostu wielowarstw epitaksjalnych i różnego rodzaju heterostruktur.

Doktorant realizował cel pracy przeprowadzając analizy wpływu statycznych oraz dynamicznych stanów naprężeń występujących w cienkich (mikrometrowych) warstwach azotków osadzanych na szafirze. Dynamiczne stany naprężeń analizował zarówno w postaci fal objętościowych jak i fal powierzchniowych.

Doktorant opracował i wykonał epitaksjalne struktury przyrządowe azotków i przyrządy testowe wytwarzane w dedykowanych wielowarstwowych układach GaInN/szafir lub AlGaIn/GaN/szafir, takich jak struktury van der Pauwa, diody Schottky'ego, przetworniki międzypalczaste, tranzystory AlGaIn/GaN HEMT oraz struktury symulujące bramkę tranzystora. Przeprowadził badania wykonanych przyrządów testowych, od pomiarów charakterystyk statycznych przez pomiary czasowe procesu transportu nośników w złączu do pomiarów mikrofalowych przetworników międzypalczastych. W celu wyjaśnienia zaobserwowanych efektów i optymalizacji procesu wytwarzania przyrządowych struktur epitaksjalnych Doktorant przeprowadził różne symulacje – tj. propagacji fal akustycznych oraz rozkładu naprężeń w próbkach metodą elementów skończonych, symulację propagacji fal powierzchniowych w układach wielowarstwowych oraz symulację struktury pasmowej i rozkładu ładunków.

Do najważniejszych osiągnięć recenzowanej pracy zaliczyć można:

1. Przeprowadzenie kompleksowej analizy i badań w zakresie wpływu naprężeń statycznych na parametry heterostruktur AlGaN/GaN:
  - a) wykazanie, że zmiany wprowadzane przez pola statyczne zmieniają się w czasie po przyłożeniu naprężeń,
  - b) wykazanie, że w wypadku naprężeń działających prostopadle do osi  $c$  indukowane ładunki polaryzacji piezoelektrycznej nie zależą od kierunku przykładanych naprężeń,
  - c) określenie wpływu naprężeń na parametry stałoprądowe złącza Schottky'ego - wielkość tego wpływu jest mniejsza od innych efektów (stresów termicznych oraz elektrycznych) powodowanych pomiarem,
  - d) wykazanie, że w procesie kompensacji ładunków piezoelektrycznych indukowanych w heterostrukturze AlInN biorą udział głębokie stany powierzchniowe,
  - e) wyznaczenie współczynnika piezoelektrycznego  $d_{31}$  heterostruktur epitaksjalnych – wynosił on  $1,56 \text{ pC/N}$  dla warstwy  $\text{Al}_{0,25}\text{Ga}_{0,75}\text{N}$  – a także wyznaczenie współczynnika zależności przerwy wzbronionej GaN od naprężeń, który wynosił  $k_{eV} = 3,8 \text{ } \mu\text{eV/MPa}$ .
2. Przeprowadzenie kompleksowej analizy i badań wpływu efektów dynamicznych na struktury AlInN w postaci fal objętościowych i powierzchniowych:
  - a) potwierdzenie występowania sprzężeń akustycznych między bramkami tranzystorów HEMT pracujących w częstotliwościach mikrofalowych przez mody akustyczne fal pseudoobjętościowych,
  - b) zaprojektowanie i wytworzenie struktur przetworników międzypalczastych o różnej liczbie elektrod (24, 48) oraz długościach fali ( $9 \text{ } \mu\text{m}$  i  $18 \text{ } \mu\text{m}$ ) i różnych układach elektrod (odbijające i nieodbijające) umieszczonych w różnych odległościach (1-5 mm), które wykonano w warstwach GaN na szafirze o różnej grubości (od  $2 \text{ } \mu\text{m}$  do  $6 \text{ } \mu\text{m}$ ),
  - c) przeprowadzenie pomiarów mikrofalowych macierzy parametrów  $S$  (transmitancji i reflektancji) wytworzonych przetworników w zakresie częstotliwości od 100 MHz do 10 GHz,

- d) wykonanie symulacji Metodą Elementów Skończonych wzbudzenia i propagacji fal powierzchniowych w przetwornikach międzypalczastych wytworzonych w warstwach GaN/szafir,
- e) przeprowadzenie analizy zjawiska dyspersji prędkości fal powierzchniowych w zależności od grubości warstw i długości fali przetwornika, które wykorzystano do analizy efektywnych parametrów materiałowych heterostruktur AlGaIn/GaN typu HEMT,
- f) zaprojektowanie i wykonanie własnego oprogramowania symulacyjnego, wykorzystującego Metodę Macierzową, do wyznaczania charakterystyki propagacji fal akustycznych w układach wielowarstwowych – rozszerzono zakres stosowania klasycznej Metody Macierzowej o metody skalowania równań w celu poprawienia ich stabilności numerycznej i możliwego zakresu zastosowania,
- g) wyznaczenie modów fal powierzchniowych oraz pseudoobjętościowych wraz z ich parametrami, propagujących się w warstwach stosowanych do wytwarzania tranzystorów AlGaIn/GaN HEMT - wykazano występowanie w nich modów Rayleigha, Sezawy, Love'a, pseudoobjętościowych oraz ich składowych harmonicznych.

Przeprowadzone prace symulacyjne, doświadczalne i projektowe pozwoliły na udowodnienie sformułowanej tezy rozprawy, że:

**Statyczne oraz dynamiczne oddziaływania mechaniczne, na skutek występowania efektu piezoelektrycznego w azotkach, wpływają na pracę wytwarzanych w nich przyrządów półprzewodnikowych oraz mogą być wykorzystane do konstrukcji urządzeń integrujących funkcję przyrządów półprzewodnikowych oraz przyrządów akustycznych.**

Wyniki pracy, jej zakres oraz sposób wykorzystania uzyskanych rezultatów wskazują na bardzo dobre przygotowanie Doktoranta do pracy naukowej. Autor tej pracy wykazał się dużą samodzielnością i umiejętnościami w dziedzinie symulacji teoretycznych i badań eksperymentalnych. Recenzowana praca nie jest jednak pozbawiona pewnych niedociągnięć, które nie umniejszają jej wartości naukowej.

Słabe strony tej pracy, których analiza dokonana przez Doktoranta powinna stanowić punkt wyjścia do dyskusji, to:

1. Wyjaśnienie w jaki sposób dokonano symulacji grubości GaN w warstwach epitaksjalnych stosowanych w rozprawie? – na str. 30 podane grubości 2  $\mu\text{m}$ , 4  $\mu\text{m}$  oraz 6  $\mu\text{m}$  nie są zgodne z wartościami przedstawionymi na rys.2.1b.
2. Dlaczego ruchliwości dla dwuwymiarowego gazu elektronowego (2DEG) heterostruktur AlGaN/GaN wyznaczone metodą Halla, mają wartości zaniżone w porównaniu do innych metod, np. pomiarów z wykorzystaniem charakterystyk C-V? – str.42.
3. Przedstawione charakterystyki I-V diody Schottky’ego na rys.3.12 w kolejnych cyklach naprężenia 20 MPa różnią się niezwykle mało od siebie tylko w niewielkim zakresie stosowanego napięcia 0 - 0,75 V, jak można to wyjaśnić?
4. Dla wzoru 3.6 brakuje opisu wielkości w nim występujących.
5. Na rys.3.13 wykres b) jest identyczny z wykresem c), który wg. opisu miał przedstawiać rezystancje szeregową diody – jaki jest faktyczny przebieg rezystancji szeregowej diody ? – w opisie pojawia się zdanie, że „zachowanie rezystancji szeregowej odbiega od pozostałych wartości” – str.63.
6. Na rys.3.17 i 3.18 należy domyślić się ich oznaczania a-d oraz a i b. W jaki sposób wyznaczono zmiany koncentracji ładunków na rys.3.18b i pod wpływem jakiego naprężenia ?
7. Jak powinien wyglądać wzór 5.30 na str.114 – brakuje znaku równości.
8. Widoczny jest brak porównań pomiędzy wykonanymi symulacjami a rzeczywistymi eksperymentami dla badań tego samego rodzaju – np. jak pokazano na rys. 5.24 (zależność prędkości fali Rayleigha od współczynnika KH – z symulacji i eksperymentu), który został jednak wykonany na podstawie literatury. Tego rodzaju porównania pozwalają na weryfikację zastosowanych modeli teoretycznych i znacznie zwiększają ich wartość naukową.

Należy zwrócić również uwagę, że uważne przeczytanie tekstu rozprawy pozwoliłoby usunąć pewne błędy edycyjne. Zdarzają się bowiem braki liter lub niewłaściwe formy gramatyczne, np.:

- str.9 „wytwarzania” zamiast „wytwarzanie”; oraz „występowanie” zamiast „występowania”
- str.10 „obecny” zamiast „obecnym”
- str.13 rys.1.3 prąd drenu w [V] zamiast w [mA] lub [ $\mu$ A]
- str.22 „niedopasowaniu” zamiast „niedopasowania”
- str.40 „Pomiaru” zamiast „Pomiary” – nazwa podrozdziału 2.3.3
- str 41 „powalała” zamiast „pozwalała”
- str.52 podpis rys.3.5 „stanowisko” zamiast „stanowiska”
- str.72 „objętościowa” zamiast objętościowe”
- str.81 „wektor falowy” zamiast „liczba falowa”
- str.84 „Voltomera” zamiast „Voltmera”
- str. 91 – jak na str.81
- str.106 „czujniki” zamiast „czujnikach”
- str.113 „postać” zamiast „postaci”
- str.115 „ macierz” zamiast „macierzą”
- str.122 „przyspieszenia chwilowe” zamiast „prędkości chwilowe”
- str.129 – jak na str.81

#### 4. Wnioski końcowe

Podsumowując, przedstawiona do recenzji rozprawa doktorska stanowi cenny i oryginalny wkład w rozwój dziedziny nauk technicznych w tym dyscypliny naukowej: Automatyka, Elektronika i Elektrotechnika. W szczególności, wyniki uzyskane w ramach tej pracy wpisują się w rozwijany obecnie na świecie nurt badań nad oddziaływaniami akustoelektrycznymi w różnego rodzaju nanostrukturach, w tym w materiałach typu AIIIN. Rozprawa spełnia wymagania określone Ustawą z dnia 14 marca 2003 r. o stopniach naukowych i tytule naukowym oraz stopniach i tytule w zakresie sztuki (Dz.U. Nr 65, poz.595, z późn. zm.). Wnoszę zatem o dopuszczenie mgr inż. Bartłomieja Paszkiewicza do dalszych etapów procedury doktorskiej.

