

Koszalin, 20.09.2021 r.

Prof. dr hab. inż. Zbigniew Suszyński  
Wydział Elektroniki i Informatyki  
Politechnika Koszalińska  
ul. Śniadeckich 2  
75-453 Koszalin

Recenzja  
rozprawy doktorskiej mgra inż. Bartłomieja Paszkiewicza  
pt. "Efekty piezotroniczne w przyrządach AIIIN"

## 1. Wstęp

Niniejsza recenzja została wykonana na podstawie pisma RDN AEE/104/2021 Przewodniczącego Rady Dyscypliny Naukowej Automatyka, Elektronika i Elektrotechnika, prof. dra hab. inż. Andrzeja Dziedzica, z dnia 16.07.2021 r.

Przedmiotem oceny jest rozprawa doktorska mgra inż. Bartłomieja Paszkiewicza pt. "Efekty piezotroniczne w przyrządach AIIIN", która została przygotowana pod kierunkiem promotora prof. dra hab. inż. Andrzeja Dziedzica oraz promotora pomocniczego dra inż. Mateusza Wośko na Wydziale Elektroniki Mikrosystemów i Fotoniki Politechniki Wrocławskiej.

Ocena rozprawy została opracowana zgodnie z wymogami ustawy z dnia 14 marca 2003 r. o stopniach naukowych i tytule naukowym oraz o stopniach i tytule w zakresie sztuki (Dz. U. 2003 Nr 65 poz. 595) z późniejszymi zmianami oraz zgodnie z ogólnymi zasadami oceny prac doktorskich przez recenzentów.

## 2. Ocena rozprawy doktorskiej

### 2.1. Ocena ogólna

Przedłożona do oceny dysertacja napisana jest w języku polskim, liczy 151 stron i zawiera 6 rozdziałów, spis literatury oraz wykaz akronimów i oznaczeń.

W pierwszym rozdziale opisano okoliczności związane z realizacją badań, motywację oraz sformułowano cel naukowy i tezę dysertacji. Omówiono tam również właściwości piezoelektryczne azotków III grupy układu okresowego oraz metody osadzania warstw metodą epitaksji.

Drugi rozdział zawiera opis metod technologicznych, symulacyjnych i pomiarowych odnoszących się do badań opisanych w dysertacji. Autor zamieścił w nim szczegółowy opis wykorzystanych materiałów, użytych technologii, wytworzonych heterostruktur i przyrządów. Znajduje się tu krótka charakterystyka narzędzi modelowania i metod pomiarowych zastosowanych do analizy oddziaływań elektro-mechanicznych i elektro-akustycznych w wytworzonych obiektach.

W trzecim rozdziale Autor opisuje wpływ naprężeń statycznych na parametry heterostruktur AlGaN/GaN i wykonanych w nich diod Schottky'ego. Zawiera on również analizę publikacji

odnoszących się do związku naprężeń statycznych i parametrów elektrycznych heterostruktur azotkowych oraz pierwsze wyniki badań przeprowadzonych przez Dysertanta wraz z ich interpretacją. Znajduje się tu opis oryginalnego stanowiska do wymuszania kontrolowanego, symetrycznego naprężenia metodą podciśnienia. Opis stanowiska ma charakter bardzo szczegółowy, pozwalający na odtworzenie warunków pomiaru. Jego konfiguracja ułatwiała wykonanie obliczeń rozkładu naprężeń oraz wynikającej z nich polaryzacji piezoelektrycznej w funkcji wartości podciśnienia. Symulacje rozkładu naprężeń wywołanych podciśnieniem wykonano metodą elementów skończonych (MES). Ze względu na niekorzystne proporcje grubości heterostruktury i podłoża szafirowego Autor wykonał obliczenia dla uproszczonej struktury - przyjął, że jej cechy są hybrydą cech heterostruktury i szafiru. Hybrydzie przypisano parametry sztywności i podatności szafiru oraz parametry piezoelektryczne warstwy AlGaIn/GaN. Takie podejście jest całkowicie uzasadnione, pozwala uprościć model bez strat jakości informacji.

Badania struktury AlGaIn/GaN wykonano w celu pomiaru zakresu i dynamiki zmian rezystancji powierzchniowej oraz ruchliwości nośników. Pobudzenie mechaniczne miało charakter zbliżony do uskoku Heaviside'a. Zmierzono zmiany rezystancji powierzchniowej i ruchliwości ładunków w dziedzinie czasu oraz wyznaczono odpowiadające im zmiany koncentracji nośników. Analiza dynamiki zmian tych parametrów była istotna z punktu widzenia dalszych badań i właściwej interpretacji ich wyników.

Badania luminescencyjne nie wykazały przy tym znaczącego wpływu naprężeń na szerokość pasma zabronionego. Eksperymentalne potwierdzenie i zdefiniowanie przyczyn zmian parametrów elektrycznych badanej struktury oraz normalizacja warunków pobudzenia struktury pozwoliły na ujednoczenie warunków pomiaru i sprzyjały poprawnej analizie wpływu naprężeń na pracę przyrządów na bazie AlGaIn/GaN.

Z tekstu rozprawy wynika, że niestabilność czasową parametrów, w badaniach diody Schottky'ego (rozd. 3.4), Autor starał się zneutralizować wykonując pomiary wielokrotnie ("Ze względu na występowanie .... procesów relaksacyjnych `pomiar ... powtórzone wielokrotnie" - str. 60). Ponieważ jednak każdy pomiar trwał kilkanaście sekund a opisana wcześniej niestabilność miała dużą dynamikę przez kilkaset sekund to nie jest jasne, czy wyniki w kolejnych pomiarach wykazywały zmienność. Autor nie wyjaśnia tego w tekście i dlatego możliwości interpretacji wyników prezentowanych na rys. 3.12 i 3.13 są ograniczone.

Jedną z konkluzji Autora, wynikającą z tego fragmentu badań jest, że "narażenia termiczne", oprócz oddziaływania elektrycznego, miały wpływ na mierzone parametry. Nie jest to jednak potwierdzone analizą ani pomiarami pola temperaturowego i pozostaje w sprzeczności z wnioskami z rozdz. 3.5, w którym Autor konkluduje, że oddziaływania termiczne w tego rodzaju strukturach "... nie będą miały wpływu na koncentrację nośników...".

Symulację zmian struktury pasmowej heterostruktur oraz rozkładu ładunków w heterostrukturach i diodzie Schottky'ego wykonano z użyciem metody elementów skończonych.

Rozdziały czwarty i piąty dotyczą zagadnień związanych z generacją i propagacją objętościowych (BAW) i powierzchniowych (SAW) fal akustycznych oraz ich wpływem na wybrane parametry badanych przyrządów. Opisano tam również metody modelowania, wyniki symulacji oraz przykłady zastosowań BAW i SAW, w wybranych technologiach i przyrządach elektronowych.

Początek rozdziału czwartego oraz podrozdziały 4.1 i 4.2 mają charakter przeglądowy. W rozdz. 4.3 przedstawiono przede wszystkim oryginalne osiągnięcia Dysertanta. Omówiono tu wyniki pomiarów charakterystyk częstotliwościowych parametrów rozproszenia S dla czwórnika utworzonego z dwóch bramek tranzystorów HEMT ze wspólną masą oraz czwórnika o takiej samej topologii metalizacji

wykonanej na czystym podłożu szafirowym. Na charakterystyce transmitancyjnej struktury na AlGa<sub>N</sub>/Ga<sub>N</sub>/szafir dla częstotliwości powyżej 1 GHz wystąpiły oscylacje będące wynikiem superpozycji sprzężeń piezoelektrycznych i elektrycznych (pojemnościowych). Taka interpretacja jest w pełni uzasadniona. Autor w dalszej części przedstawia propozycje modeli obu struktur czwórnikowych, które zaprezentowane są jednak w dość nietypowy sposób ponieważ znajduje się tam szereg oznaczeń do których nie ma odniesienia w tekście (np. P1-P4, X1) a jeden z czwórników bez oznaczono nazwą "plik".

Wyniki symulacji modelu czwórnikowego dla struktury AlGa<sub>N</sub>/Ga<sub>N</sub>/szafir potwierdzają wnioski dot. oscylacji na charakterystyce transmitancyjnej. W modelu brakuje jednak dyskusji n. t. przyjętej wartości admitancji źródła napięciowego a cytowane w tym miejscu publikacje [84. 85] nie mają ścisłego związku z prezentowanymi treściami.

W dalszej części rozdz. 4.3. autor przedstawił wyniki symulacji pola akustycznego wykonanych metodą elementów skończonych, w strukturze AlGa<sub>N</sub>/Ga<sub>N</sub>/szafir dla trzech częstotliwości pobudzenia. Autorowi udało się wykazać, że mimo nieukierunkowanego charakteru pobudzenia (bramka tranzystora HEMT) i niewielkiej różnicy impedancji akustycznych heterostruktur i szafiru, może, w pewnym zakresie częstotliwości, powstać fala powierzchniowa, która propaguje na duże odległości zakłócając pracę innych przyrządów.

Analiza tego opracowania byłaby łatwiejsza, gdyby autor zamieścił szkic topologii i schemat układu pomiarowego. Zdjęcia i opis topologii poszczególnych przyrządów znajdują się w rozdz. 2, ale w eksperymentach przyrządy te występują w określonych wzajemnych konfiguracjach i układzie geometrycznym, które warto było również zaprezentować w postaci graficznej. Ta uwaga odnosi się również do opisu pozostałych badań.

Rozdział piąty zawiera wstęp, opis wytwarzania i działania przetworników międzypalczastych służących do wzbudzenia i detekcji SAW oraz krótką analizę publikacji dotyczących badania filtrów SAW w Ga<sub>N</sub> na szafirze. Do badań zastosowano przetworniki międzypalczaste na heterostrukturach oraz dla porównania wykonano taką samą metalizację na czystym podłożu szafirowym. Dla przetwornika międzypalczastego na heterostrukturze uzyskano transmitancję istotnie wyższą niż dla struktury na szafirze. Dla częstotliwości rezonansu głównego ta różnica wynosi ok. 40 dB. Świadczy to o znaczącym wpływie sprzężenia akustycznego przyrządów znajdujących się na stosunkowo dużej odległości (prawdopodobnie w obu przypadkach odległość była taka sama i równa 5 mm - niestety opisy rysunków nie potwierdzają tego w jednoznaczny sposób). Charakterystyki częstotliwościowe parametrów S<sub>11</sub> i S<sub>22</sub> dla tych przetworników wykazują występowanie rezonansu i wysoką sprawność w stosunku do przetworników referencyjnych na szafirze, gdzie oddziaływania mają charakter czysto pojemnościowy.

W rozdz. 5.4 Dysertant analizuje właściwości propagacji poszczególnych modów w heterostrukturach. Autor wykonał badania pozwalające na wyznaczenie istniejących modów SAW i ich prędkości. Dokonał tego w oparciu o pomiary parametrów S struktur przetworników międzypalczastych w funkcji częstotliwości. Wykonana analiza propagacji poszczególnych modów jest ważna przy projektowaniu elementów akustycznych i akustoelektrycznych a także z punktu widzenia ekranowania sprzężeń akustycznych i ich niepożądanego wpływu na pracę innych przyrządów wykonanych na tej samej heterostrukturze. Autor wykazał również, że w oparciu o pomiary prędkości poszczególnych modów SAW można kontrolować niektóre parametry fizyczne warstw heterostruktur, co może być istotne dla właściwej parametryzacji procesów technologicznych towarzyszących ich wytwarzaniu.

W rozdz. 5.5 została opisana Metoda Macierzowa jako uzupełnienie Metody Elementów Skończonych zastosowana do modelowania propagacji fal akustycznych w układach warstwowych. Metoda została zaimplementowana w autorskim programie w języku Python. Zastosowano ją do wyznaczenia modów fali powierzchniowej w strukturze GaN/AlN osadzonej na podłożu szafirowym.

W kolejnym rozdziale (rozdz. 5.6) opisano perspektywiczne kierunki badań dot. azotkowych przyrządów SAW. Znajduje się tam m. in. przykład konstrukcji przetwornika niesymetrycznego, w którym możliwe jest przełączanie kierunku przepływu sygnału dzięki silnemu oddziaływaniu SAW z ładunkami w warstwie GaN, których koncentracja, kierunek i prędkość przepływu sterowane są przez zintegrowany z falowodem akustycznym tranzystor HEMT.

Ciekawym i perspektywicznym wydaje się również zastosowanie pomiarów akustycznych do kontroli i parametryzacji procesu wytwarzania warstw azotkowych w oparciu o wyniki badań Doktoranta, szczególnie, że technologie wytwarzania tranzystorów HEMT i przyrządów SAW mogą być spójne.

W podsumowaniu (rozdz. 6) Autor rzeczowo, w uporządkowany sposób, przedstawił najważniejsze wyniki swoich badań.

## 2.2. Oryginalne elementy rozprawy

Rozprawa doktorska zawiera rezultaty stanowiące oryginalny wkład Autora do dyscypliny Automatyka, Elektronika i Elektrotechnika zarówno w obszarze metod badawczych jak i rezultatów badań.

Za najważniejsze osiągnięcia Autora uważam:

- 1) wnikliwą i krytyczną analizę wiedzy w zakresie oddziaływań elektromechanicznych w strukturach i przyrządach na bazie AlN oraz jej systematyzację,
- 2) wysoki poziom zaawansowania prac związanych z wytwarzaniem badanych struktur, który jest świadectwem wysokich kwalifikacji technologicznych Autora,
- 3) skuteczne wykonanie trudnych badań parametrów macierzy rozproszenia z wykorzystaniem stanowiska ostrzowego dla częstotliwości do 10 GHz,
- 4) implementację programową Metody Macierzowej oraz zaprezentowane w rozprawie wyniki badań symulacyjnych,
- 5) wykazanie istotności oraz wkład do wyjaśnienia natury i zakresu oddziaływań odkształcających, naprężeń własnych i sprzężeń wynikających z emisji i propagacji fal akustycznych na parametry przyrządów wytworzonych w strukturach azotkowych.

## 2.3. Uwagi szczegółowe i ocena poziomu edytorskiego.

Tematyczny układ rozprawy jest przejrzysty i logiczny a treści prezentowane w kolejnych rozdziałach są dobrze powiązane. Autor nie ustrzegł się jednak błędów i nieścisłości w opisie przebiegu badań i ich wyników.

Uwagi o charakterze edycyjnym:

str. 56 - jest "Rys. 3.9. Symulacji naprężenia...", powinno być: " Rys. 3.9. Symulacja naprężenia.."

str. 62, Rys. 3.13 - zdublowany rys. b) i brak właściwego rys. c)

str. 64, ostatnie zdanie - jest (3.7), powinno być: (3.1)

str. 79 i str. 105 - stosowanie indywidualnych i niezrozumiałych kodów w legendach rysunków np. 425\_2 na rys. 4.5, 462\_3 na rys.5.12 itd. Brak jest również odniesień do tych oznaczeń w tekście dysertacji

str. 80 - w tekście jest odniesienie do rys. 4.6.a ale na rys. 4.6. brakuje oznaczeń literowych a, b ... itd., na ostatnim rysunku (wykresie) przedstawione są dwa wykresy transmitancji ale brakuje legendy  
str. 93, rys. 5.2 - jest "2um", prawdopodobnie zamiast "2 $\mu$ m" i nie wiadomo co reprezentuje ta wartość

str. 106 - jest " W czujniki wykorzystujących ..." zamiast "W czujnikach wykorzystujących ..."

str. 111, rys. 5.17 - w opisie rysunku lub legendzie powinno być wskazanie, które punkty wykresu odnoszą się do  $\lambda = 9$ , a które do  $\lambda = 18$

str. 114 - wyrażenie (5.30) nie jest równaniem

str. 129 i 133 - "prędkośćpropagacji" - połączenie słów

Pozostałe uwagi:

str. 43 - "... heterostrukturę, do której wytworzono kontakty omowe ..." - styl

str. 71 - "... pracujących w częstotliwościach ..." - styl

str. 72 - ostatni akapit " ... układy do zatrzymania pola akustycznego." - trudno zrozumieć co Autor miał na myśli

str. 81 - "... kulisty rozkład fali ze zmienną prędkością w zależności od zmieniającego się kierunku propagacji." - trudno zrozumieć co Autor miał na myśli

str. 81 - "... większość mocy akustycznej ucieka do podłoża ..." zamiast np. "...większość mocy akustycznej jest rozpraszana w podłożu..."

str. 104 - "...większość jej propagacji ..." - nie ma takiego pojęcia jak większość (mniejszość) propagacji str. 106, przedostatnie zdanie "... dla fali propagującej się w warstwach materiału ... następuje transmisja fali padającej na interfejs ..." - trudno zrozumieć co Autor miał na myśli

str. 109 - "... radiacja energii do podłoża ..." - taki termin w odniesieniu do energii fal akustycznych jest nieuzasadniony.

str. 149 - ref [102], błąd w spisie autorów publikacji.

### 3. Podsumowanie

Przedmiotem rozprawy były badania nad oddziaływaniem efektu piezoelektrycznego powstającego w heterostrukturach azotków glinu, galu i indu osadzanych na podłożu z szafiru na działanie aktywnych przyrządów półprzewodnikowych wykonanych z kompatybilnych struktur, zwłaszcza tranzystorów HEMT. Analizie poddano zarówno wpływ efektów statycznych występujących w azotkach jak i efektów dynamicznych związanych z propagacją akustycznych fal objętościowych i powierzchniowych. Przeprowadzenie badań pozwoliło na usystematyzowanie dotychczasowego stanu wiedzy w tym zakresie, a w wielu aspektach również na korektę dotychczasowej wiedzy i metod pomiarowych.

Przyrządy do badań wykonano w oparciu o trzy struktury bazowe opisane szczegółowo w rozdz. 2.1. Struktury te zostały zaprojektowane i wykonane w Katedrze Mikroelektroniki i Nanotechnologii WEMiF PWr. Do badania zjawisk statycznych wykonano dwa rodzaje próbek w oparciu o AlGaIn/GaN HEMT na podłożu szafirowym: struktury Van der Pauwa do badania efektu Halla oraz diody Schottky'ego. Do badań związanych z propagacją SAW wykonano przetworniki międzypalczaste w konfiguracji 01 i 0011 oraz okresie 9 i 18  $\mu$ m, z liczbą par od 12 do 49. Wytworzono również

siedem wariantów struktur symulujących bramki tranzystora HEMT. Zostały one użyte do badań zjawiska piezotronicznego.

Do symulacji procesów akustycznych zastosowano Metodę Elementów Skończonych oraz wariantowo Metodę Macierzową, do której Dysertant zaprojektował i wykonał oprogramowanie w języku Python.

W badaniach wykorzystano zróżnicowane i zaawansowane metody pomiarowe. Utrudnieniem tych pomiarów była konieczność stosowania techniki ostrzowej. Na wyróżnienie zasługują pomiary mikrofalowe. Były to badania trudne ze względu na charakter obiektów, niski stosunek sygnału do szumu oraz dużą wrażliwość na zewnętrzne oddziaływania mechaniczne i temperaturowe.

Badania były finansowane m. in. przez Narodowe Centrum Badań i Rozwoju w ramach projektu TECHMATSTRATEG, Narodową Agencję Wymiany Akademickiej oraz subwencje Politechniki Wrocławskiej.

Doktorant jest współautorem sześciu publikacji w okresie 2016-2021, w tym 4 artykułów w czasopismach (Journal of Physics: Conference Series, Advanced Engineering Materials, Crystal Research and Technology, Journal of Vacuum Science & Technology A) oraz dwóch opracowań zamieszczonych w materiałach konferencyjnych.

#### 4. Wniosek końcowy

Stwierdzam, że praca doktorska mgr inż. Bartłomieja Paszkiewicza pt. "Efekty piezotroniczne w przyrządach AIIIN" stanowi oryginalne rozwiązanie postawionego problemu naukowego oraz spełnia wymagania stawiane rozprawom doktorskim opisane w ustawie z dnia 14 marca 2003 r. o stopniach naukowych i tytule naukowym oraz o stopniach i tytule w zakresie sztuki (Dz. U. 2003 Nr 65 poz. 595) z późniejszymi zmianami.

W oparciu o lekturę pracy doktorskiej Pana mgr inż. Bartłomieja Paszkiewicza stwierdzam, że posiada on usystematyzowaną wiedzę ogólną z obszaru dyscypliny Automatyka, Elektronika i Elektrotechnika oraz kompetencje do prowadzenia badań naukowych.

Biorąc pod uwagę wartość naukową i walory praktyczne oraz uwzględniając niedostatki opisane w recenzji moja końcowa ocena rozprawy doktorskiej Pana mgr inż. Bartłomieja Paszkiewicza jest pozytywna.

Wnioskuje o przyjęcie rozprawy doktorskiej i dopuszczenie jej do publicznej obrony.

Prof. dr hab. inż. Zbigniew Suszyński

