

Politechnika Warszawska
Wydział Elektroniki i Technik Informacyjnych

Warszawa, 13 marca 2018 r.

D z i e k a n a t

Uprzejmie informuję, że na Wydziale Elektroniki i Technik Informacyjnych Politechniki Warszawskiej odbędzie się w dniu 27 marca 2018 r. publiczna obrona rozprawy doktorskiej

mgr inż. Andrzeja Taube

temat: „Opracowanie wybranych elementów konstrukcji tranzystorów HEMT AlGaIn/GaN do zastosowań w elektronice wielkich częstotliwości, dużych mocy i wysokich temperatur”.

promotor – prof. dr hab. inż. Jan Szmidt z Politechniki Warszawskiej

recenzenci:

prof. dr hab. inż. Regina Paszkiewicz z Politechniki Wrocławskiej

prof. dr hab. inż. Janusz Zarębski z Akademii Morskiej w Gdyni

Obrona odbędzie się w dniu 27 marca 2018 r. w sali 116 na Wydziale Elektroniki i Technik Informacyjnych – Gmach im. Janusza Groszkowskiego, Warszawa, ul. Nowowiejska 15/19; początek godz. 12.00.

Po adresem: www.elka.pw.edu.pl/Wydzial/Rada-Wydzialu/Harmonogram-obron-doktorskich-streszczenia-i-recenzje zapewniony jest na stronie Wydziału dostęp do tekstów streszczenia rozprawy i recenzji, jak również do tekstu rozprawy umieszczonej w Bazie Wiedzy Politechniki Warszawskiej.

Dziekan



prof. dr hab. inż. Krzysztof Zaremba

Autor: mgr inż. Andrzej Taube

Promotor: prof. dr hab. inż. Jan Szmidt

Tytuł pracy: "Opracowanie wybranych elementów konstrukcji tranzystorów HEMT AlGaIn/GaN do zastosowań w elektronice wielkich częstotliwości, dużych mocy i wysokich temperatur"

Azotki z III grupy układu okresowego ze względu na połączenie unikalnych właściwości elektrofizycznych w postaci wysokiej wartości ruchliwości i prędkości unoszenia elektronów, wysokiej wartości krytycznego natężenia pola elektrycznego oraz możliwości inżynierii przerwy energetycznej i tworzenia heterostruktur pozwalają na konstrukcję przyrządów półprzewodnikowych o znacznie lepszych parametrach w porównaniu z krzemowymi przyrządami mocy dla energoelektroniki oraz przyrządami półprzewodnikowymi w technologii arsenku galu dla mikrofalowej elektroniki mocy przy zachowaniu konkurencyjnych kosztów ich wytwarzania.

Niniejsza praca poświęcona jest opracowaniu wybranych elementów konstrukcji tranzystorów HEMT AlGaIn/GaN na podłożu z azotku galu do zastosowań mikrofalowych oraz na podłożu krzemowym do zastosowań w energoelektronice. W przypadku technologii wytwarzania tranzystorów HEMT AlGaIn/GaN na podłożach z azotku galu, w związku ze znaczącą poprawą jakości monokrystalicznych podłoży azotku galu, natrafiono na kilka zasadniczych trudności związanych z realizacją struktur przyrządowych, w szczególności na problemy z uzyskaniem niskorezystywnych kontaktów omowych do materiałów o gęstości dyslokacji poniżej $1 \times 10^5 \text{ cm}^{-2}$. W celu wykorzystania pełnego potencjału niskodyslokacyjnych heterostruktur HEMT AlGaIn/GaN w pracy doktorskiej opracowano następujące elementy konstrukcji przyrządów: niskorezystywne i odporne termicznie kontakty omowe z wykorzystaniem wysokodomieszkowanych warstw n^+ -InGaIn:Si/ n^+ -GaIn:Si w obszarach podkontaktowych, odporne termicznie kontakty Schottky'ego do obszarów n-GaN z wykorzystaniem metalizacji Ru-Si-O oraz planarną izolację przyrządów wykonywaną techniką implantacji jonów glinu. W konstrukcji wysokonapięciowych tranzystorów HEMT AlGaIn/GaN na podłożach krzemowych kluczowe jest zawsze uzyskanie określonego napięcia przebicia (V_{BR}) przy zachowaniu małej wartości prądu zaporowego i możliwie niskiej rezystancji w stanie włączenia (R_{on}). W celu zwiększenia napięcia przebicia tranzystorów HEMT AlGaIn/GaN w pracy doktorskiej opracowano następujące elementy konstrukcji przyrządów: kontakty drenu w postaci złącza Schottky'ego oraz elektrody polowe bramki i drenu o zoptymalizowanej geometrii.

Opracowanie technologii niskorezystywnych kontaktów omowych i planarnej izolacji pozwoliło na realizację w ITE tranzystorów HEMT AlGaIn/GaN na monokrystalicznych podłożach GaN o niskiej gęstości dyslokacji (poniżej $1 \times 10^5 \text{ cm}^{-2}$), których parametry (gęstość prądu wyjściowego, częstotliwości pracy) nie ustępują parametrom komercyjnych tranzystorów HEMT AlGaIn/GaN wytwarzanych na podłożach SiC. Zastosowanie elektrody polowej w obszarze bramki i drenu pozwoliło na realizację w ITE tranzystorów HEMT AlGaIn/GaN na podłożach krzemowych o napięciu przebicia przekraczającym 1100V, przy czym wzajemna zależność ich parametrów V_{BR} i R_{on} nie odbiega od najlepszych wyników prezentowanych w literaturze. Wartość uzyskanego w ramach pracy eksperymentalnej współczynnika jakości, wiążącego oba wspomniane parametry i zdefiniowanego w dalszej części rozprawy, jest osiągnięta w przypadku struktur przyrządowych na podłożach krzemowych wytwarzanych przez najbardziej doświadczonych w tej tematyce zespoły badawcze, będące bez wątpienia liderami w rozwoju opisywanej technologii.

**KWESTIONARIUSZ - RECENZJA ROZPRAWY DOKTORSKIEJ DLA RADY
WYDZIAŁU ELEKTRONIKI I TECHNIK INFORMACYJNYCH
POLITECHNIKI WARSZAWSKIEJ**

Tytuł rozprawy: Opracowanie wybranych elementów konstrukcji tranzystorów HEMT AlGaIn/GaN do zastosowań w elektronice wielkich częstotliwości, dużych mocy i wysokich temperatur

Autor rozprawy: mgr inż. Andrzej Taube

1. **Jakie zagadnienie naukowe jest rozpatrzone w pracy /teza pracy/ i czy zostało ono dostatecznie jasno sformułowane przez autora? Jaki charakter ma rozprawa (teoretyczny, doświadczalny, inny)?**

Recenzowana praca doktorska dotyczy problematyki opracowania wybranych rozwiązań konstrukcyjnych heterozłączowych tranzystorów HEMT na podłożu krzemowym oraz na podłożu z azotku galu w celu polepszenia właściwości oraz parametrów elektrycznych tych tranzystorów. Autor sformułował następującą tezę pracy:

„Możliwe jest uzyskanie wyższego napięcia przebicia przyrządów, lepszej stabilności parametrów elektrycznych planarnej izolacji, kontaktów źródła, drenu i bramki w podwyższonych temperaturach w stosunku do prezentowanych obecnie rozwiązań i konstrukcji tranzystorów HEMT AlGaIn/GaN dla elektroniki mocy i elektroniki mikrofalowej w wyniku optymalizacji wybranych elementów ich konstrukcji.”

W ogólności teza pracy zawiera pewne nieścisłości, a mianowicie:

1. W pierwszej części tezy są wymienione potencjalne cechy i właściwości nowo opracowanych przyrządów, które można rozważać niezależnie. Teza pracy jest sformułowana w taki sposób, że przykładowo dopuszcza się skonstruowanie przyrządów o wyższej wartości napięcia przebicia nie zwracając uwagi na jednoczesne pogorszenie innych parametrów wymienionych w tej części tezy (np. pogorszenia wartości parametrów elektrycznych kontaktów źródła, drenu i bramki).
2. W treści tezy użyto sformułowania „lepszej stabilności parametrów elektrycznych planarnej izolacji, kontaktów źródła, drenu i bramki w podwyższonych temperaturach”, a zatem Autor wykluczył przesłankę dotyczącą polepszonej stabilności parametrów elektrycznych w zakresie niskich temperatur. Najprawdopodobniej Autorowi pracy zależało na opracowaniu takich modyfikacji struktur półprzewodnikowych, aby zapewnić stabilność parametrów elektrycznych tych struktur możliwie w szerokim zakresie zmian temperatury.
3. Użycie w treści tezy sformułowania „optymalizacja wybranych elementów” jest niejasne. Jak sądzę, Autor miał na myśli optymalizację wartości parametrów konstrukcyjnych wybranych elementów struktur tranzystorów.

W przeważającej części recenzowana praca ma charakter konstrukcyjny, przy czym w części poświęconej testowaniu opracowanych struktur półprzewodnikowych zawiera również elementy eksperymentu.

Autor przyjął sobie za cel (str. 13) dokonanie istotnego postępu w zakresie konstrukcji i technologii wytwarzania tranzystorów HEMT. Użycie określenia „istotny” może być dyskusyjne, gdyż ocena ważkości postępu ma charakter subiektywny.

2. **Czy w rozprawie przeprowadzono w sposób właściwy analizę źródeł / w tym literatury światowej, stanu wiedzy i zastosowań w przemyśle / świadczący o dostatecznej wiedzy autora? Czy wnioski z przeglądu źródeł sformulowano w sposób jasny i przekonujący?**

W spisie literatury znajduje się w sumie 148 cytowanych pozycji z czego 8 stanowią prace własne Autora. Dokonano skrupulatnego przeglądu literatury związanej z tematyką recenzowanej rozprawy. Głównie są to publikacje naukowe, które pojawiły się na przestrzeni ostatnich 20 lat, przy czym niektóre cytowane publikacje źródłowe (np. [30, 40, 97, 98]) pochodzą nawet z lat 70. i 80. XX wieku. Wybór źródeł literaturowych przeprowadzono prawidłowo, a wyniki analizy stanu wiedzy, zaprezentowane w rozdziale 2, zostały sformułowane w sposób jasny i przekonujący.

Pewne wątpliwości budzi sformułowane przez Autora na str. 31 maszynopisu stwierdzenie, że nie odnalazł on prac poświęconych ocenie wpływu temperatury na parametry i charakterystyki tranzystorów AlGaIn/GaN HEMT. Poniżej podaję przykłady takich prac:

1. Darwish A., Bayba A. J., Hung H. A., *IEEE Transactions on Electron Devices*, Vol. 62, No. 3, 2015, pp. 840–846
2. Chu K. K. et al. *Thermal Modeling of High Power GaN-on-Diamond HEMTs Fabricated by Low-Temperature Device Transfer Process*, 2013 IEEE Compound Semiconductor Integrated Circuit Symposium (CSICS)
3. Xiong A. et al., *A distributed electro-thermal model of AlGaIn/GaN HEMT power-bar derived from the elementary cell model*, 2012, 7th European Microwave Integrated Circuit Conference
4. Santarelli A. et al., *Nonlinear thermal resistance characterization for compact electrothermal GaN HEMT modelling*, The 5th European Microwave Integrated Circuits Conference, 2010
5. Crupi G. et al., *Temperature Influence on GaN HEMT Equivalent Circuit*, IEEE Microwave and Wireless Components Letters, Vol. 26, No. 10, 2016, pp. 813-815

3. **Czy autor rozwiązał postawione zagadnienia, czy użył właściwej do tego metody i czy przyjęte założenia są uzasadnione?**

W ogólności Autor prawidłowo rozwiązał zagadnienie sformułowane w tezie pracy. Zaproponował i zastosował rozwiązania konstrukcyjne wpływające na polepszenie wybranych parametrów elektrycznych struktur tranzystorów HEMT. Ocena właściwości nowo opracowanych struktur została potwierdzona odpowiednimi wynikami pomiarów parametrów elektrycznych tych struktur, a także zilustrowana wynikami symulacji charakterystyk wybranych parametrów fizycznych i elektrycznych struktur, przy czym wiele wyników symulacji nie zostało zweryfikowanych.

4. **Na czym polega oryginalność rozprawy, co stanowi samodzielny i oryginalny dorobek autora, jaka jest pozycja rozprawy w stosunku do stanu wiedzy czy poziomu techniki reprezentowanych przez literaturę światową?**

Do głównych oryginalnych osiągnięć Autora należy zaliczyć:

1. Wprowadzenie modyfikacji konstrukcji struktury HEMT AlGaIn/GaN na podłożu krzemowym w postaci odpowiednio dobranych parametrów geometrycznych elektrod połowych bramki i drenu tranzystora, a także zastosowanie kontaktu drenu w postaci złącza Schottky'ego, w celu zwiększenia wartości napięcia przebicia przyrządu.

2. Opracowanie technologii wytwarzania kontaktów omowych o stosunkowo niskiej wartości rezystancji na potrzeby przyrządów półprzewodnikowych wykorzystujących heterostruktury AlGaIn/GaN o niskiej gęstości dyslokacji.
 3. Opracowanie procesu implantacji jonów glinu dla technologii wytwarzania planarnych tranzystorów HEMT AlGaIn/GaN zapewniającego stosunkowo dużą wartość rezystancji izolacji.
 4. Opracowanie technologii wytwarzania stabilnych termicznie kontaktów Schottky'ego na bazie tlenku przewodzącego Ru-Si-O do n-GaN.
 5. Weryfikację poprawności opracowanych rozwiązań poprzez pomiary i symulacje wybranych parametrów i charakterystyk opracowanych struktur, potwierdzającą przydatność zastosowanych modyfikacji konstrukcyjnych.
- 5. Czy autor wykazał umiejętność poprawnego i przekonującego przedstawienia uzyskanych przez siebie wyników /zwięzłość, jasność, poprawność redakcyjna rozprawy/?**

Autor przedstawił uzyskane przez siebie rezultaty badań w sposób poprawny i przekonujący. Jednakże czytelnik pracy czasami może mieć wątpliwości, które fragmenty pracy, w tym opracowane: zagadnienia, zjawiska, metody, modele, struktury, procesy technologiczne, są osiągnięciem autorskim.

Na przykład, w rozdziale 6.4 podano informację o pracach zrealizowanych w ramach wieloosobowego projektu Pol-HEMT. Jaki był wkład Autora w realizację tych prac? Na str. 42 w punkcie 2. podano informację o realizacji wybranych procesów technologicznych w firmie Ammono oraz w ramach projektu Pol-HEMT. Co zatem stanowi oryginalny wkład Autora? Które modele wymienione w rozdziale 4 są autorskie?

W treści pracy zabrakło bardziej szczegółowych informacji dotyczących sposobu realizacji badań eksperymentalnych. Na przykład w rozdziale 3.3.1.3 podano, że pomiary charakterystyk wejściowych i wyjściowych tranzystorów HEMT wykonano z wykorzystaniem stacji ostrzowej Karl Suss PM-8 oraz systemu pomiarowego Keithley 4200A-SCS w zakresie temperatur od 25°C do 200°C. W jaki sposób Autor podgrzewał testowane struktury do temperatury 200°C? Czy używał komory badań cieplnych? Czy posiadał sprzęt pomiarowy, którego zaciski pomiarowe są odporne na działanie wysokich temperatur otoczenia?

W jaki sposób Autor wykonał pomiary charakterystyk częstotliwościowych pokazanych na rys. 6.18 i 6.20? Prawdopodobnie w pomiarach zastosowano analizator wektorowy, a badane próbki umieszczano w specjalnie przygotowanych głowicach pomiarowych. Jak wyglądał schemat ideowy układu testowego?

W rozdziałach 3 i 4 wymieniono nazwy kilku programów komputerowych, które wykorzystano na potrzeby realizacji symulacji charakterystyk opisujących procesy technologiczne oraz właściwości fizyczne i elektryczne rozwiązanych struktur półprzewodnikowych. Niestety nie uzasadniono, co stanowiło kryterium wyboru właśnie tych programów. Poza tym, informację o nazwach programów komputerowych Autor mógł dodatkowo umieścić w miejscu prezentacji wyników symulacji. Przykładowo, nazwa programu komputerowego, przy użyciu którego obliczono charakterystyki z rys. 2.8 wymaga lektury kolejnych rozdziałów pracy.

Dane pokazane na rys. 5.15b tylko pozornie świadczą o przewodze kontaktu Schottky'ego nad kontaktem omowym w aspekcie mniejszej wrażliwości względnych zmian wartości rezystancji R_{oe} w funkcji temperatury. W rzeczywistości, wartości bezwzględne tej rezystancji dla kontaktu Schottky'ego są wielokrotnie wyższe niż w przypadku kontaktu omowego, stąd prezentowanie danych w postaci jak na rys. 5.15b jest mylące. Brakuje komentarza lub opinii Autora na temat znaczenia i praktycznej przydatności rezultatów zaprezentowanych na rys. 5.15.

Autorowi zdarza się formułowanie wniosków dotyczących obserwowanych rezultatów badań, które są oczywiste i można je sformułować bez wykonywania tych badań. Na przykład, na podstawie danych zawartych na rys. 5.11 (str. 70) Autor stwierdza, że wzrost prądu upływu drenu rośnie ze wzrostem napięcia dren-źródło tranzystora.

W ogólności Autor wykazał umiejętność poprawnego i przekonującego przedstawienia uzyskanych przez siebie wyników, ale nie ustrzegł się błędów, na przykład:

1. Autor myli określenia i jednostki rezystancji i rezystywności wymienione w hipotezie nr 1 i hipotezie nr 3 (str. 13).
2. Na rys. 2.9 przedstawiono zależność gęstości prądu I_{DS} [A/mm] w funkcji napięć zaciskowych tranzystora, natomiast Autor w tekście pracy przywołuje dane z rys. 2.9 jako zależności prądu w funkcji napięć zaciskowych.
3. Użyte na str. 31 sformułowanie „...przesunięcie charakterystyk wyjściowych w stronę wyższych napięć...” jest nieprecyzyjne.
4. Autor używa jednocześnie oznaczenia (V) dla potencjałów i dla napięć. W przypadku oznaczeń napięć zaciskowych tranzystora należałoby użyć oznaczeń u_{GS} , u_{DS} zamiast angielskojęzycznych oznaczeń V_{GS} , V_{DS} .
5. Autor często używa sformułowania „wyznaczanie parametrów” zamiast „wyznaczanie wartości parametrów”.
6. Podpisy pod rysunkami 5.15 i 5.16 są niezgodne z informacjami podanymi na tych rysunkach. Na rysunku 5.15b podana jest zależność $\Delta R_{on}(T)$, natomiast na rys. 5.16b podana jest zależność $V_{onset}(T)$.

Podczas redakcji pracy popełniono błędy edycyjne i stylistyczne, jednak w ogólności, język przy użyciu którego napisano pracę należy uznać za zdecydowanie poprawny. Kilka wybranych przykładów błędów podano w tabeli 1:

Tabela 1. Przykładowe błędy w tekście pracy

Strona, wiersz	Jest	Powinno być
Str 12, wiersz 4 od góry	Ponad to	Ponadto
Str 12, wiersz 19 od dołu	$1 \times 10^5 \text{ cm}^2$	$1 \times 10^5 \text{ cm}^{-2}$
Str 12, wiersz 11 od dołu	napotkał	napotkała
Str 13, wiersz 4 od dołu	[]...badań, z, sformulowano...[]	[]...badań, sformulowano...[]
Str 28, wiersz 9 od dołu	...prostujący (złącze Schottky'ego)...	...prostującym (złączem Schottky'ego)...
Str 31, wiersz 8 od góry	pracował	pracować
Str 49, wiersz 1 od góry	Dwukrotnie słowo „również”	-
Str 52, wiersz 15 od góry	materiałowej	materiałowe
Str 75, wiersz 3 od dołu	elektroda połowa elektrody bramki	połową elektrody bramki

6. Jakie są słabe strony rozprawy i jej główne wady?

1. W przypadku prądowo-napięciowych charakterystyk wyjściowych badanych przyrządów półprzewodnikowych, w tym danych pokazanych przykładowo na rysunkach 2.9 i 5.8 Autor komentuje zaobserwowany efekt ujemnej rezystancji dynamicznej jako skutek zjawiska samonagrzewania. W treści pracy nie zdefiniowano tego zjawiska. Identyfikacja wpływu zjawiska samonagrzewania na charakterystyki przyrządu półprzewodnikowego jest możliwa na przykład na podstawie charakterystyk uzyskanych w warunkach nieizotermicznych. W jaki sposób Autor identyfikuje zjawisko samonagrzewania na charakterystykach z rys. 2.9 i 5.8, skoro zdaniem recenzenta na tych rysunkach zaprezentowano charakterystyki izotermiczne?
2. Jak wynika z literatury, np.:

1. Binari S. C., Klein P. B., Kazior T.E.: *Trapping Effects in GaN and SiC Microwave FETs*. Proceedings of the IEEE, Vol. 90, No. 6, 2002, pp. 1048-1058
2. Riley G.: *Accounting for Dynamic Behavior in FET Device Models*. Microwave Journal, No. 2, 2011, pp. 80-86
3. Cha H. Y. et al.: *Reduced Trapping Effects and Improved Electrical Performance in buried-gate 4H-SiC MESFETs*. IEEE Transactions on Electron Devices, Vol. 50, No. 7, 2003, pp. 1569-1573
4. Houny Y. M., Pearson G. L.: *Deep trapping effects at the GaAs - GaAs₂Cr interface in GaAs FET structures*. Journal of Applied Physics, Vol. 49, No. 6, 1978, pp. 3348-3352.

efekt ujemnej rezystancji dynamicznej na charakterystykach wyjściowych przyrządu półprzewodnikowego może być skutkiem zjawiska pułapkowania. Dodatkowo, w rozdziale 4.1 Autor wspomina, że zaimportował do programu Atlas opis struktur zawierający między innymi model rozkładu pułapek. Czy Autor w ramach realizacji pracy przeprowadził identyfikację wpływu zjawiska pułapkowania, w tym pomiary charakterystyk badanych struktur metodami impulsowymi z uwzględnieniem różnych czasów trwania impulsu pobudzającego, w szczególności w odniesieniu do zastosowanego modelu pułapek?

3. Czy Autor wybierając programy komputerowe na potrzeby niniejszej pracy rozważał problematykę dokładności i przydatności modeli zastosowanych w tych programach? Jednocześnie można odnieść wrażenie, że problem estymacji wartości parametrów modeli użytych w obliczeniach został potraktowany marginalnie. Autor często używa sformułowań „dopasowana zależność teoretyczna” (rys. 3.5), „dopasowane parametry modelu” (rys. 4.2), a niekiedy są to sformułowania niezrozumiałe, na przykład: „parametry poprawione” (rys. 4.2), „z wbudowanymi parametrami modelu” (rys. 4.2), „parametry modeli powinny być dopasowane do charakterystyk” (str. 51), „na podstawie dopasowania wyznaczono” (str. 85). Jakimi metodami posługiwał się Autor w celu estymacji wartości parametrów?

7. Jaka jest przydatność rozprawy dla nauk technicznych?

Wyniki badań zawarte w recenzowanej pracy mogą posłużyć opracowaniu nowych konstrukcji struktur półprzewodnikowych o polepszonych parametrach elektrycznych, a także optymalizacji parametrów procesów technologicznych wytwarzania tych struktur.

8. Do której z następujących kategorii Recenzent zalicza rozprawę:

- a) nie spełniająca wymagań stawianych rozprawom doktorskim przez obowiązujące przepisy
- b) wymagająca wprowadzenia poprawek i ponownego recenzowania
- c) spełniająca wymagania
- d) spełniająca z wyraźnym nadmiarem**
- e) wybitnie dobra, zasługująca na wyróżnienie

Stwierdzam, że praca pt.: *Opracowanie wybranych elementów konstrukcji tranzystorów HEMT AlGaIn/GaN do zastosowań w elektronice wielkich częstotliwości, dużych mocy i wysokich temperatur* spełnia z wyraźnym nadmiarem wymagania „Ustawy o stopniach naukowych i tytule naukowym...” (z dnia 14 marca 2003 z późniejszymi zmianami) stawiane rozprawom doktorskim. Wnoszę o dopuszczenie mgr inż. Andrzeja Taube do dalszych etapów przewodu doktorskiego.



Prof. dr hab. inż. Regina Paszkiewicz
Wydział Elektroniki Mikrosystemów i Fotoniki
Politechnika Wrocławska
50-370 Wrocław
ul. Janiszewskiego 11/17

Wrocław, 26. 01.2018

**KWESTIONARIUSZ - RECENZJA ROZPRAWY DOKTORSKIEJ DLA RADY WYDZIAŁU
ELEKTRONIKI I TECHNIK INFORMACYJNYCH
POLITECHNIKI WARSZAWSKIEJ**

Tytuł rozprawy:

**„Opracowanie wybranych elementów konstrukcji tranzystorów HEMT AlGaIn/GaN
do zastosowań w elektronice wielkich częstotliwości, dużych mocy i wysokich temperatur”**

Autor rozprawy: mgr inż. Andrzej Taube

- 1. Jakie zagadnienie naukowe jest rozpatrzone w pracy (teza rozprawy) i czy zostało ono dostatecznie jasno sformułowane przez autora? Jaki charakter ma rozprawa (teoretyczny, doświadczalny, inny)?**

Tranzystory AlGaIn/GaN typu HEMT (*ang. High Electron Mobility Transistors*) w chwili obecnej znajdują szereg zastosowań w elektronice mocy, elektronice wysokich częstotliwości and wysokich temperatur. Jest to związane z dużą nasyconą prędkością unoszenia elektronów 2DEG (*ang. two dimensional electron gas*) możliwą do uzyskania w kanale tranzystora ($\sim 2,5 \times 10^7$ cm/s), dużym maksymalnym napięciem przebicia ($\sim 3,3$ MV/cm) oraz odpornością materiału na działanie wysokiej temperatury. Parametry tranzystorów mocy na bazie AlGaIn/GaN HEMT są lepsze od parametrów tranzystorów wytwarzanych w krzemie i zbliżają się do parametrów tranzystorów z węglika krzemu. Niezależnie od ogromnego postępu, który dokonał się w ostatnich latach w badaniach nad doskonaleniem konstrukcji i technologii tych tranzystorów wciąż pozostaje wiele problemów, które muszą być rozwiązane aby w pełni wykorzystać możliwości azotków. Należą do nich: dobór rodzaju podłoża do osadzania heterostruktur AlGaIn/GaN i ich konstrukcja, dobór odpowiednich metalizacji: omowej i Schottky'ego, konstrukcja, topologia i procesy przyrządowe tranzystora dostosowane do wymagań konkretnej aplikacji.

Mgr inż. Andrzej Taube - Autor rozprawy, postawił sobie ambitny cel dokonania istotnego postępu w konstrukcji i technologii tranzystorów AlGaIn/GaN typu HEMT, przeznaczonych do zastosowań w energoelektronice i mikrofalowej elektronice mocy, umożliwiającego istotną poprawę ich parametrów elektrycznych. Sformułował tezę, że „możliwe jest uzyskanie wyższego napięcia przebicia przyrządów, lepszej stabilności parametrów elektrycznych izolacji planarnej, kontaktów źródła, drenu i bramki przy pracy w podwyższonych temperaturach, w stosunku do istniejących rozwiązań i konstrukcji tranzystorów HEMT AlGaIn/GaN przeznaczonych dla elektroniki mocy i elektroniki mikrofalowej, w wyniku optyma-

lizacji wybranych elementów konstrukcji tranzystorów”. W celu udowodnienia postawionej tezy określił pięć szczegółowych hipotez badawczych odnoszących się głównie do wybranych elementów technologii tranzystora.

Praca ma charakter doświadczalny. Teza pracy oraz sformułowane hipotezy szczegółowe zostały przez Autora określone w sposób prawidłowy. W pracy zawarto szereg oryginalnych wyników badań mgr inż. Andrzeja Taube a jej tematyka jest aktualna i istotna dla dalszego doskonalenia technologii i konstrukcji tranzystorów AlGaN/GaN typu HEMT.

2. Czy w rozprawie przeprowadzono w sposób właściwy analizę źródeł (w tym literatury światowej i stanu zagadnień w przemyśle) świadczącej o dostatecznej wiedzy autora. Czy wnioski z przeglądu źródeł sformułowano w sposób jasny i przekonujący?

Teza rozprawy została sformułowana przez Autor w oparciu o wyniki wcześniejszych prac, realizowanych w zespole badawczym, którego był członkiem, oraz przeglądu prawidłowo dobranej literatury przedmiotu liczącej 148 pozycji, w tym 5, w których mgr inż. Andrzeja Taube jest głównym autorem lub współautorem.

Wnioski z przeprowadzonej analizy publikacji sformułowano w sposób właściwy, świadczący o dobrej znajomości zagadnienia będącego przedmiotem badań. Praca składa się ze streszczenia (w języku polskim i angielskim), wprowadzenia, 5 rozdziałów merytorycznych, podsumowania, spisu literatury, spisu dorobku Autora, spisu rysunków i tabel. We wprowadzeniu stanowiącym pierwszy rozdział pracy przedstawiono motywację podjęcia badań, zaprezentowano cel i tezę pracy oraz omówiono układ rozprawy. W drugim rozdziale pracy wnikliwie przeanalizowano stan wiedzy, w dziedzinie badań, koncentrując się na podstawowych elementach procesu wytwarzania tranzystora. Rozdział podzielono na pięć podrozdziałów poświęconych zjawiskom fizycznym odpowiedzialnym za powstawanie dwuwymiarowego gazu elektronowego w heterostrukturach AlGaN/GaN HEMT, opisano zasadę działania tranzystorów oraz omówiono różne ich konstrukcje, przeanalizowano sposoby realizacji izolacji poszczególnych przyrządów, wytwarzanie kontaktów źródła i drenu oraz kontaktu bramki. W rozdziale tym omówiono też podłoża stosowane do osadzania azotku galu oraz ich wpływ na właściwości osadzanych heterostruktur. W rozdziale 3 przedstawiono metodykę badawczą zastosowaną w pracy, w której wyodrębniono cztery główne cele takie jak: opracowanie planarnej izolacji tranzystorów AlGaN/GaN HEMT z zastosowaniem implantacji jonowej jonami glinu, opracowanie niskorezystywnych kontaktów omowych do heterostruktur AlGaN/GaN osadzanych na objętościowych podłożach Ammono-GaN (Am-GaN), opracowanie elementów konstrukcji wysokonapięciowych tranzystorów AlGaN/GaN HEMT osadzanych na podłożu krzemowym (kontakty źródła i drenu, konstrukcja i technologia elektrody polowej) oraz opracowanie kontaktów Schottky’ego do warstw n-GaN na bazie przewodzących tlenków Ru-Si-O. W rozdziale tym opisano też możliwości linii technologicznej ITE przeznaczonej do wytwarzania przyrządów azotkowych.

W dalszej części rozdziału opisano zastosowane metody badawcze obejmujące wyznaczenie parametrów elektrycznych kontaktów omowych metodą TLM (*ang. Transmission Line Model*) i CTLM (*ang. Circular Transmission Line Model*) oraz przedstawiono sposób realizacji pomiarów wysokonapięciowych. W rozdziale 4 opisano modelowanie i symulacje tranzystorów AlGaIn/GaN HEMT przy zastosowaniu komercyjnego pakietu TCAD (*ang. Technology Computer Aided Design*) firmy Silvaco przeznaczonego do modelowania przyrządów półprzewodnikowych. W pracy stosowano dwa programy z pakietu TCAD Silvaco: pakiet Atlas z modułami Blaze, Quantum i Giga oraz pakiet Atena. Szczegółowo omówiono zaimplementowane w oprogramowaniu modele zjawisk fizycznych, przyjęte założenia oraz parametry materiałowe warstw GaN i AlGaIn. Rozdział 5 poświęcony jest opracowaniu elementów technologii i konstrukcji wysokonapięciowych tranzystorów HEMT wytwarzanych w heterostrukturach AlGaIn/GaN osadzanych na podłożach krzemowych. Przedstawiono wyniki badań nad wytwarzaniem kontaktów omowych przy zastosowaniu metalizacji na bazie Ti/Al, o różnej proporcji składników i grubości warstwy tytanu, do warstw AlGaIn oraz GaN. Zbadano wpływ składu kontaktu na proces jego formowania termicznego. W wyniku przeprowadzonych badań do dalszych prac wybrano metalizacje Ti/Al/Mo/Au (15/60/60/35 nm), osadzaną bezpośrednio na warstwę GaN po selektywnym usunięciu AlGaIn z obszarów pod kontaktowych poddawaną formowaniu termicznemu. Dla metalizacji tej uzyskano dobre parametry rezystancji (R_c) i rezystywności (ρ_c) kontaktu wynoszące odpowiednio 0,66 Ωmm i $1,19 \times 10^{-5} \Omega\text{cm}^2$. Przeprowadzono też badania nad opracowaniem technologii tranzystorów z kontaktami drenu typu Schottky'ego na bazie metalizacji Ni/Au. Porównano charakterystyki stałoprądowe tranzystorów z kontaktami drenu typu omowego i typu Schottky'ego oraz przeprowadzono pomiary ich napięć przebicia. Zrealizowano również badania nad zastosowaniem pojedynczych elektrod polowych bramki oraz podwójnymi elektrodami polowymi bramki i drenu stosowanymi w celu zwiększenia napięć przebicia tranzystorów AlGaIn/GaN/Si typu HEMT. Zaobserwowano, że zastosowanie elektrod polowych pozwala na zwiększenie napięć przebicia. Największe wartości napięć przebicia, wynoszące 1100 V uzyskano dla elektrod polowych bramki i drenu o długości odpowiednio 1 μm i 2 μm . Rozdział 6 zawiera opis badań Autora na opracowaniu elementów technologii i konstrukcji tranzystorów HEMT wytwarzanych w heterostrukturach AlGaIn/GaN osadzanych na objętościowych podłożach GaN. Przeprowadzono badania nad technologią kontaktów omowych do heterostruktur AlGaIn/GaN typu HEMT, wytwarzaniem kontaktów Schottky'ego na bazie Ru oraz izolacją planarną tranzystorów wykonywaną przy zastosowaniu implantacji jonami glinu. Zaprezentowano wyniki pomiarów stałoprądowych i wysokoczęstotliwościowych wytworzonych tranzystorów. W rozdziale 7, stanowiącym podsumowanie rozprawy, w sposób syntetyczny opisano najważniejsze osiągnięcia Autora w badaniach nad doskonaleniem technologii i konstrukcji tranzystorów HEMT wytwarzanych w heterostrukturach AlGaIn/GaN osadzanych na podłożach krzemowych i objętościowych podłożach Ammonio GaN (Am-GaN) oraz plany jego dalszych badań.

3. Czy autor rozwiązał postawione zagadnienia, czy użył właściwej do tego metody i czy przyjęte założenia są uzasadnione?

Analiza zawartości poszczególnych rozdziałów, a w szczególności rozdziału 5 i rozdziału 6, pozwala na stwierdzenie, że mgr Andrzej Taube przyjął właściwą metodykę badań a przeprowadzone symulacje (opisane w rozdziale 4), opracowana technologia, zaproponowane konstrukcje tranzystorów oraz ich pomiary pozwoliły na udowodnienie postawionej tezy. Autor zaprojektował technologie i konstrukcję tranzystorów polowych przeznaczonych do elektroenergetyki i techniki mikrofalowej i wykonała je w heterostrukturach AlGaIn/GaN typu HEMT osadzanych, odpowiednio do aplikacji, na podłożach krzemowych i objętościowych podłożach GaN oraz wykonał pomiary ich parametrów użytkowych, istotnych ze względu na obszary ich zastosowań. W wypadku tranzystorów AlGaIn/GaN/Si typu HEMT, przeznaczonych dla elektroenergetyki, mierzono charakterystyki stałoprądowe i napięcia przebicia oraz przeanalizowano wpływ temperatury na te parametry. W wypadku mikrofalowych tranzystorów AlGaIn/GaN/Am-GaN mierzono ich charakterystyki stałoprądowe i parametry b.w.cz. Dokonany przez Autora rozprawy wybór metod charakteryzacji właściwości kontaktów do heterostruktur AlGaIn/GaN i warstw GaN oraz metod charakteryzacji parametrów wytworzonych przyrządów uważam za prawidłowy. Mgr inż. Andrzej Taube mierzył głównie właściwości elektryczne kontaktów, struktur testowych i tranzystorów oraz prowadził obserwacje jakości wytworzonych przyrządów przy wykorzystaniu mikroskopu optycznego. Podstawowe parametry kontaktów i tranzystorów AlGaIn/GaN HEMT Autor wyznaczał z pomiarów stałoprądowych.

4. Na czym polega oryginalność rozprawy, co stanowi samodzielny i oryginalny dorobek autora, jaka jest pozycja rozprawy w stosunku do stanu wiedzy czy poziomu techniki reprezentowanych przez literaturę światową?

Praca jest oryginalna, a prezentowane wyniki badań stanowią samodzielny i oryginalny dorobek mgr inż. Andrzeja Taubego. Do najważniejszych jego osiągnięć można zaliczyć:

- dobór geometrii elektrod polowych bramki i drenu w tranzystorach AlGaIn/GaN/Si HEMT co umożliwiło zwiększenia napięcia przebicia do 1100 V,
- zastosowanie kontaktu drenu typu Schottky'ego w tranzystorach AlGaIn/GaN/Si HEMT, który umożliwił zwiększenie napięcia przebicia do poziomu 900 V i uzyskanie lepszej stabilności termicznej rezystancji w stanie włączenia,
- opracowanie procesu izolacji tranzystorów przy wykorzystaniu implantacji jonami glinu, stabilnej do temperatury jej wygrzewania (600°C)
- opracowanie technologii stabilnych termicznie (do 600°C) kontaktów Schottky'ego do n-GaN na bazie przewodzącego tlenku Ru-Si-O.

Wszystkie te opracowane rozwiązania Autor rozprawy zastosował do wytworzenia tranzystorów AlGaIn/GaN typu HEMT oraz przeanalizował wpływ technologii i konstrukcji na ich parametry elek-

tryczne istotne z punktu widzenia ich aplikacji w elektroenergetyce i elektronice mikrofalowej. Uzyskane rezultaty są potwierdzeniem jego dobrej intuicji badawczej i dojrzałości. Mają one duże znaczenie dla praktycznego wykorzystania tranzystorów AlGaIn/GaN typu HEMT w wielu dziedzinach przemysłu oraz stanowią istotny wkład w rozwój tej problematyki badawczej.

5. Czy autor wykazał umiejętność poprawnego i przekonującego przedstawienia uzyskanych przez siebie wyników (zwięzłość, jasność, poprawność redakcyjna rozprawy)?

Mgr inż. Andrzej Taube w sposób prawidłowy i przekonujący przedstawił przyjęte założenia badawcze, rezultaty przeprowadzonych badań oraz dokonał szczegółowej analizy uzyskanych wyników, na podstawie których sformułował szereg użytecznych rekomendacji dotyczących technologii i konstrukcji tranzystorów AlGaIn/GaN typu HEMT.

Rozprawa napisana jest w sposób staranny, jasny i logiczny, poprawny pod względem językowym i stylistycznym. Język użyty w pracy jest wolny od zapożyczeń anglojęzycznych. Autor używa prawidłowej terminologii. Praca ma prawidłowy układ oraz wyróżnia się dobrą jakością edytorską: rysunki są właściwej wielkości i mają prawidłowe, czytelne opisy.

6. Jakie są słabe strony rozprawy i jej główne wady?

Rozprawa nie ma istotnych wad i słabych stron. Zwraca uwagę ogrom prac konstrukcyjno-technologicznych zrealizowanych przez Autora rozprawy. Przeprowadzone prace eksperymentalne były skomplikowane i wymagały dużych nakładów czasu i środków. Pewien niedosyt Recenzenta budzi jednak brak szczegółowych informacji na temat parametrów heterostruktur AlGaIn/GaN typu HEMT stosowanych do wytwarzania tranzystorów oraz zasad ich doboru do wytwarzania tranzystorów przeznaczonych do danej aplikacji. Brak też informacji o liczności poszczególnych prób technologicznych. Nie ma to jednak wpływu na ogólnie pozytywną ocenę rozprawy i pozwala stwierdzić, że na podstawie przeprowadzonych przez mgr inż. Andrzeja Taube badań cele pracy zostały osiągnięte, a sformułowana teza udowodniona.

7. Jaka jest przydatność rozprawy dla nauk technicznych? Czy i jaka jest przydatność praktyczna rozprawy dla gospodarki narodowej?

Prezentowana praca ma duże walory poznawcze oraz stanowić ważny wkład Autora w badania nad opracowaniem technologii i konstrukcji tranzystorów AlGaIn/GaN HEMT do zastosowań w elektroenergetyce i technice mikrofalowej. Obserwacje poczynione przez mgr inż. Andrzeja Taube przyczynią się do lepszego zrozumienia zależności między konstrukcją, technologią i możliwymi do uzyskania parametrami użytkowymi tranzystorów AlGaIn/GaN HEMT.

Do której z następujących kategorii Recenzent zalicza rozprawę:

- a) *nie spełnia wymagań stawianych rozprawom doktorskim przez obowiązujące przepisy*
- b) *wymagająca poprawek i ponownego recenzowania*
- c) *spełniająca wymagania*
- d) *spełniająca wymagania z wyraźnym nadmiarem*
- e) *wybitnie dobra, zasługująca na wyróżnienie*

Recenzent stwierdza, że rozprawa mgr inż. Andrzeja Taube stanowi oryginalny i samodzielny dorobek Autora oraz spełnia z wyraźnym nadmiarem wymagania stawiane rozprawom doktorskim przez obowiązujące przepisy. Ma ona charakter pracy technologiczno-doświadczałnej.

Biorąc pod uwagę dorobek naukowy Andrzeja Taube i pozytywną ocenę Jego pracy doktorskiej uważam, że w myśl ustawy z 14 marca 2003 r (Dz. U. Nr 65, poz. 595, z późn. zm.) o stopniach naukowych i tytule naukowym oraz o stopniach i tytule w zakresie sztuki mgr inż. Andrzeja Taube spełnia wymagania stawiane kandydatom do stopnia naukowego doktora nauk technicznych i wnioskuję o dopuszczenie do publicznej obrony przedstawionej pracy.



Prof. dr hab. inż. Regina Paszkiewicz