

Parametry tranzystorów GaN HEMT – wyniki I etapu projektu PoIHEMT

Streszczenie. Celem projektu PoIHEMT jest opracowanie nowego typu tranzystora mikrofalowego na pasmo S z wykorzystaniem struktur AlGaIn/GaN hodowanych na podłożach z półizolacyjnego monokrystalicznego GaN wytwarzanych metodą amonotermalną (Ammono). Referat stanowi krótkie podsumowanie pierwszego etapu projektu w formie zestawienia parametrów elektrycznych struktur GaN PoIHEMT i komercyjnych tranzystorów GaN HEMT produkowanych przez wiodące firmy.

Abstract. The aim of the PoIHEMT project is to develop a new type of microwave transistor for S-band using the structures of AlGaIn/GaN grown on a unique type of material – a semi-insulating monocrystalline GaN substrate manufactured by ammonothermal method (Ammono). The paper provides a brief summary of the first phase of the project. It presents a report on obtained electrical parameters of GaN structures and compares them against the parameters of commercial GaN HEMT transistors manufactured by leading companies. (**Electrical Parameters of GaN PoIHEMT transistors – the results of the I stage of the PoIHEMT project**).

Słowa kluczowe: mikrofałe, GaN, HEMT, tranzystor, modelowanie, układy aktywne.

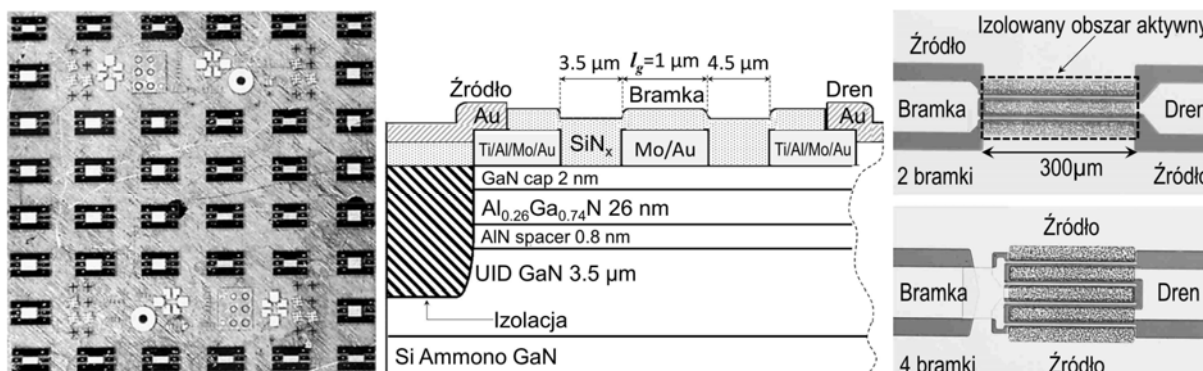
Keywords: microwaves, GaN, HEMT, transistor, modeling, active devices.

Wprowadzenie

Końcowym efektem projektu PoIHEMT jest opracowanie technologii i wykonanie demonstratora mikrofalowego tranzystora AlGaIn/GaN HEMT o mocy wyjściowej ponad 10 W na zakres częstotliwości do 4 GHz z przeznaczeniem dla krajowego przemysłu radiolokacyjnego. Innowacyjność projektu, w skali światowej, polega na hodowaniu struktur półprzewodnikowych AlGaIn/GaN na monokrystalicznym półizolacyjnym podłożu GaN wytwarzanym unikatową metodą amonotermalną przez firmę Ammono – konsorcjanta PoIHEMT. Do wzrostu heterostruktur o wysokiej koncentracji i ruchliwości dwuwymiarowego gazu elektronowego (2-DEG) i o zwiększonej perfekcji strukturalnej wykorzystano techniki MOVPE (IWC) i MBE (IF PAN) [1].

W pierwszym etapie projektu wytwarzano głównie struktury 2-bramkowe tzn. pojedyncze cele o nominalnej długości bramki $l_g = 1 \mu\text{m}$ i $2 \mu\text{m}$ i szerokości $w_g = 250 \mu\text{m}$ i $300 \mu\text{m}$. Rozwinięciem konstrukcji pojedynczej celi są tranzystory 4-bramkowe z połączeniami mostowymi pomiędzy źródłami. Widok płytki testowej na podłożu Ammono GaN o wymiarach ok. $10 \times 10 \times 0,4 \text{mm}^3$, przekrój poprzeczny struktury GaN PoIHEMT oraz zarys topologii tranzystora 2- i 4-bramkowego pokazano na rysunku 1. Układ i wymiary wprowadzeń struktury GaN PoIHEMT przystosowano do

pomiarów "on-wafer" – wprost na płytce testowej przy pomocy mikrofalowych sond ostrzowych typu GSG. W I etapie przeprowadzono 12 serii pomiarowych – średnio po 3 płytki testowe w danej serii. Każda płytka testowa zawierała 40 tranzystorów oraz kilka elementów do pomiarów C-V i efektu Halla. W sumie wytworzono i przebadano prawie 1500 struktur GaN HEMT. Tak szeroki zakres badań pozwolił na sformułowanie dokładnych wymagań zarówno dla poszczególnych procedur procesu technologicznego, jak i dla zaprojektowania docelowych masek tranzystora mocy. Badania struktur nie ograniczały się jedynie do pomiarów zaciskowych charakterystyk DC i RF, ale także obejmowały opracowanie modeli elektrycznych dla wyznaczania wartości m.in. takich parametrów jak rezystancje kontaktów ohmowych i bramki, pojemności na wejściu i wyjściu, dynamika zmian rezystancji kanału oraz przebieg transkonduktancji w funkcji napięcia bramka-źródło. Uzyskane informacje były niezwykle przydatne do bieżącej weryfikacji i korekcji procesu technologicznego. W artykule zamieszczono wyniki zaciskowej charakterystyki elektrycznej typowej struktury GaN PoIHEMT, które odniesiono do parametrów tranzystorów produkowanych przez wiodące firmy takie jak Cree i Triquint.



Rys. 1. Widok płytki testowej, przekrój poprzeczny i topologia 2- i 4-bramkowej struktury GaN PoIHEMT

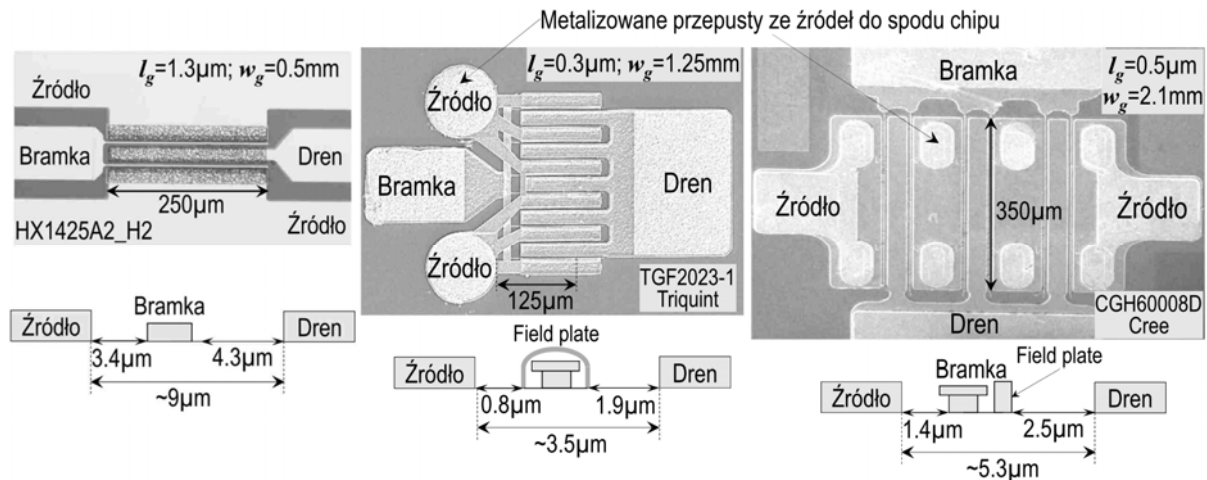
Testowe struktury GaN HeMT

Ze względu na brak tranzystorów komercyjnych o podobnej wartości mocy wyjściowej, jaką można uzyskać z

pojedynczej celi GaN PoIHEMT, wybrano elementy firmy Triquint i Cree oznaczone symbolami odpowiednio CGH60008D [2] i TGF2023-1 [3] o najniższym poziomie

mocy wyjściowej. Topologię użytych struktur wraz z istotnymi wymiarami zobrazowano na rysunku 2. Oba tranzystory zawierają heterozłącze AlGaIn/GaN wytworzone na podłożu SiC. Dla efektywnego odprowadzania ciepła zmniejszono grubość warstwy SiC do ok. 0,1 mm oraz wykonano metalizowane przepusty pomiędzy źródłami a spodem chipu, który został pokryty metalem. W efekcie brak indukcyjności połączeń drutowych ze źródeł do masy

zapobiega także pogorszeniu parametrów zależnych od częstotliwości. Tranzystory te przeznaczone są bowiem do pracy w konfiguracji wspólnego źródła w klasie AB. Na szczególne uznanie zasługują technologia firmy Cree wykonywania przepustów bezpośrednio w obszarze aktywnym. Na tym etapie projektu struktury GaN PoIHEMT nie posiadają metalizowanych przepustów, a grubość płytki testowej wynosi ponad 0,3 mm.

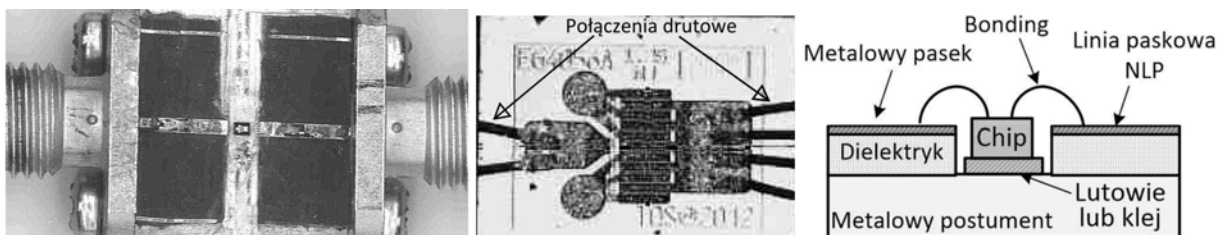


Rys. 2. Zarys konstrukcji wybranych tranzystorów od lewej struktura PoIHEMT, Triquint i Cree

Tranzystor TGF2023-1 jest specyfikowany aż do 18 GHz. Jednak moc wyjściowa, w głębokim nasyceniu, zmienia się od 6 W do 4 W odpowiednio w pasmie L i X. Producent tranzystora CGH60008D podaje parametry do 6 GHz deklarując moc wyjściową także w nasyceniu na poziomie 8 W. W przypadku struktury GaN PoIHEMT HX1425A2_H2 można spodziewać się mocy wyjściowej nieco mniejszej niż 2 W. Aby porównać parametry dość różnych tranzystorów należało przeskalować badane struktury względem wymiarów do pojedynczej celi o szerokości bramki 2x250 μm.

Pomiary tranzystorów

Tranzystor HX1425A2_H2 zmierzono "on-wafer" na stacji pomiarowej Cascade M150 przy użyciu wektorowego analizatora obwodów (PNA X Keysight) i sterowanego zasilacza DC (SMU B2912A Keysight). Konstrukcja chipów TGF2023-1 i CGH60008D nie jest przystosowana do pomiarów "on-wafer" przy pomocy standardowych, mikrofalowych sond ostrzowych. Dlatego tranzystory zamontowano w specjalnie przygotowanych płytkach z wyprowadzeniami w postaci odcinków niesymetrycznej linii paskowej (NLP). Płytkę pomiarową z zamontowanym chipem TGF2023-1 i sposób montażu pokazano na rys. 3.



Rys. 3. Tranzystory TGF2023-1 zamontowany w płytce pomiarowej i sposób montażu

W pomiarach tranzystorów TGF2023-1 i CGH60008D wykorzystano sterowany zasilacz SMU B2912A i analizator obwodów HP8720C, który skalibrowano metodą TRL dla ustalenia płaszczyzny odniesienia we wrotach wejściowych wyjściowych mierzonego chipu. Jednocześnie mierzono charakterystyki DC I-V i macierze rozproszenia [s] w odpowiednio dobranych punktach pracy i w szerokim zakresie częstotliwości do 16 GHz, aby można było skutecznie i dokładnie przeprowadzić ekstrakcję parametrów modeli tranzystorów. W trakcie modelowania nie tylko wyznaczono istotne dla technologii parametry, ale także przeskalowano badane tranzystory do struktur, które mogły być porównywane.

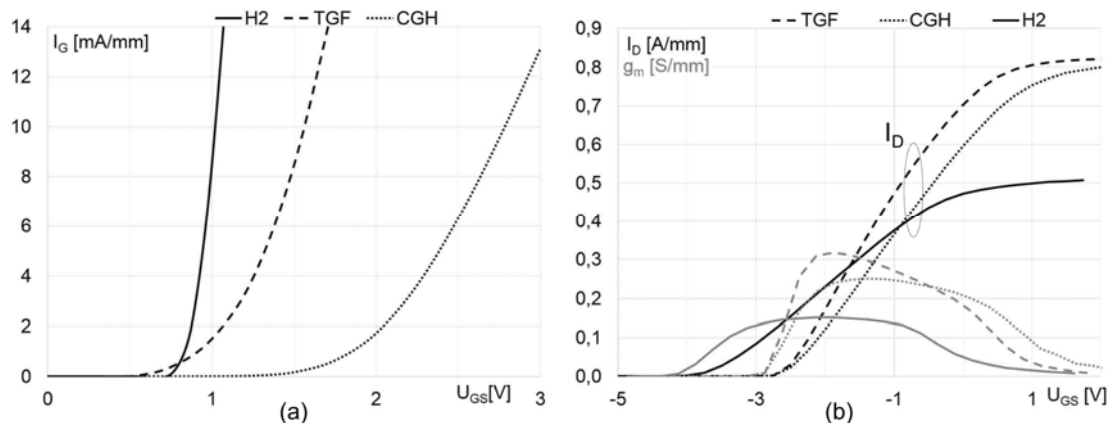
Charakterystyki DC I-V

Charakterystykach DC I-V unormowano do całkowitej szerokości bramki badanych tranzystorów oraz przyjęto

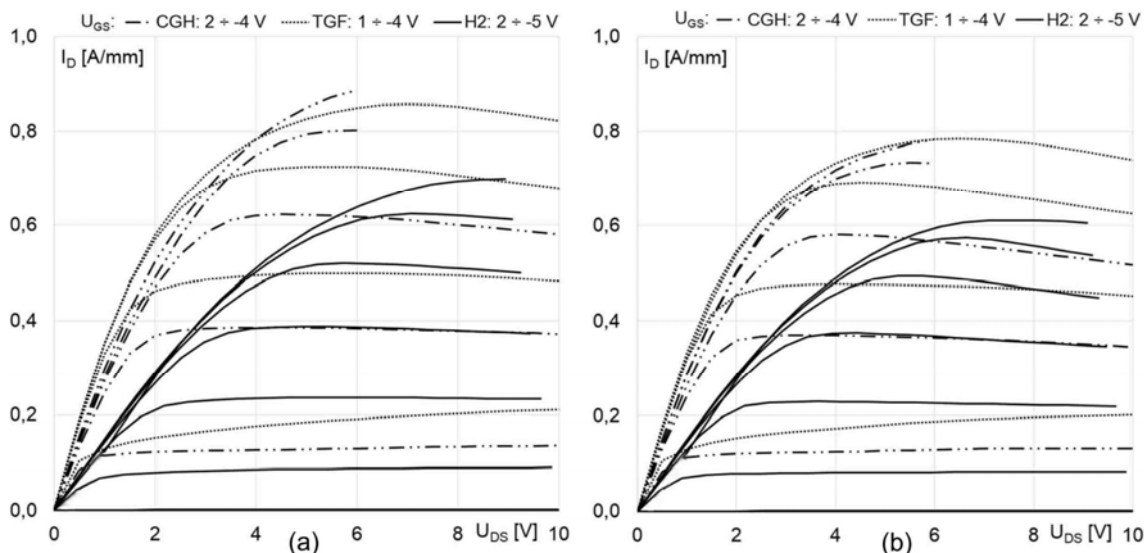
następujące oznaczenia: H2 – HX1425A2_H2, TGF – TGF2023-1, CGH – CGH60008D. Zmierzone przebiegi prądu bramki I_G w funkcji napięcia bramka-źródło U_{GS} przedstawiono na rysunku 4a, natomiast zależność prądu drenu I_D i transkonduktancji g_m od napięcia U_{GS} przy stałym napięciu dren-źródło $U_{DS} = 5$ V pokazano na rysunku 4b. Wyjściowe charakterystyki DC I-V tranzystorów zmierzono zarówno impulsowo – wypełnienie 10%, czas powtarzania 50 ms – jak i w warunkach zasilania ciągłego. Wyniki pomiarów charakterystyk wyjściowych tranzystorów zmierzonych impulsowo oraz w sposób ciągły zaprezentowano odpowiednio na rysunku 5a i rysunku 5b. Tranzystory komercyjne dysponują porównywalną gęstością prądu drenu ok. 0,8 A/mm. W przypadku struktury PoIHEMT parametr ten wynosi $0,6 \pm 0,7$ A/mm. Mniejsza gęstość prądu drenu przekłada się wprost na większą

rezystancję R_{on} , jak daje się zauważyć na rysunku 5. Wpływ efektu samonagrzewania się tranzystorów można oszacować na podstawie zmian gęstości prądu drenu w zależności od warunków zasilania DC. Spadek natężenia prądu drenu dla polaryzacji ciągłej w stosunku do zasilania

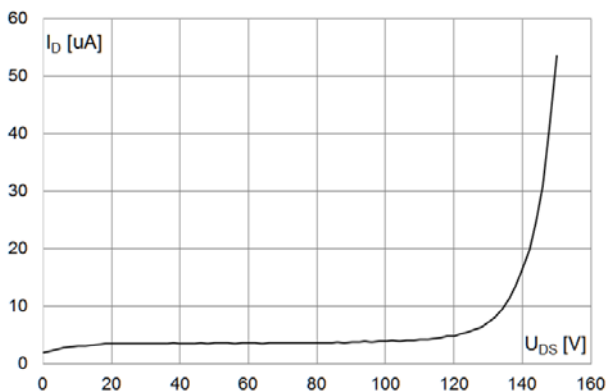
impulsowego mieści się w przedziale od 10% do 15% dla wszystkich struktur. Struktura GaN PoIHEMT okazała się równie odporna na przebicie jak tranzystory firm Cree ($U_{DSSR} = 120$ V dla $I_D = 2,1$ mA, $U_{GS} = -8$ V) i Triquint ($U_{DGBR} = 100$ V), jak pokazano na rysunku 6.



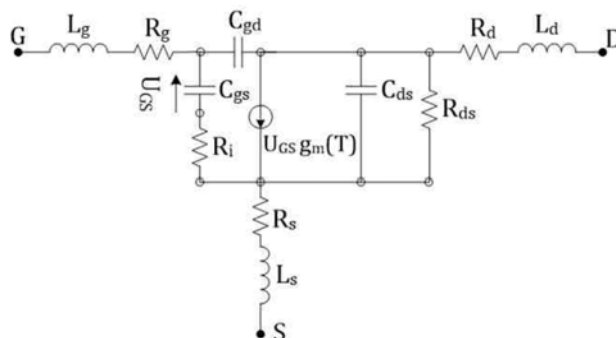
Rys. 4. Charakterystyka wejściowa (a) i przejściowa (b) wraz z przebiegiem transkonduktancji g_m tranzystorów HX1425A2_H2, TGF2023-1 i CGH60008D



Rys. 5. Unormowane charakterystyki wyjściowe tranzystorów HX1425A2_H2, TGF2023-1 i CGH60008D mierzone impulsowo (a) i dla polaryzacji ciągłej (b)



Rys. 6. Prąd drenu I_D w funkcji napięcia U_{DS} zatkanego tranzystora GaN PoIHEMT ($U_{GS} = -8$ V)



Rys. 7. Schemat zastępczy tranzystorów HX1425A2_H2, TGF2023-1 i CGH60008D przyjęty do obliczeń

Model małosygnalowy

Zmierzone macierze rozproszenia [s] tranzystorów w szerokim zakresie częstotliwości do 16 GHz i dla trzech punktów pracy tj. dla stanu: wyłączenia *Off* ($V_{GS} = V_{pinch-off}$, $V_{DS} = V_Q$), włączenia *On* ($V_{GS} = 0$ V, $V_{DS} = 0$ V) i w warunkach normalnej pracy *Nb* ($V_{DS} = V_Q$, $I_D = I_{DQ}$) stanowiły podstawę

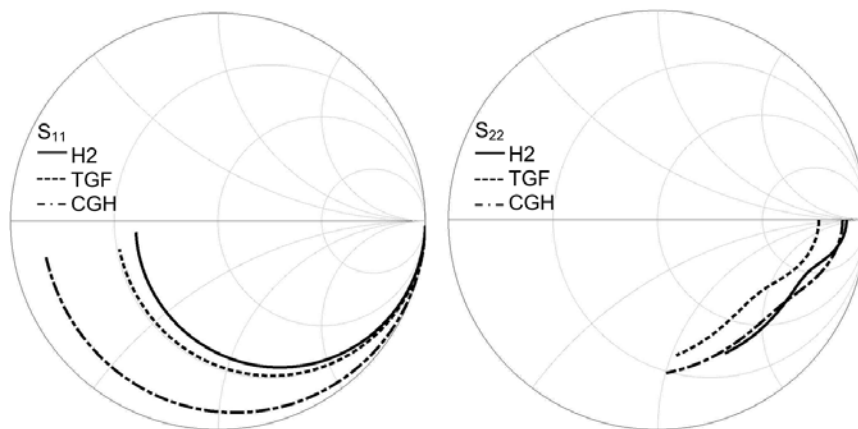
budowy modeli małosygnalowych. Do obliczeń przyjęto schemat zastępczy tranzystora, który pokazano na rysunku 7. Wartości parametrów modelu wyznacza się w procesie dopasowania zmierzonych i symulowanych przebiegów wyrazów macierzy [s] jednocześnie dla trzech stanów pracy tranzystora [4]. Podejście takie, przy założeniu, że pasożytnicze elementy takie jak indukcyjności i rezystancje szeregowe są niezależne od punktu pracy, prowadzi do uzyskania dużej dokładności obliczonych parametrów. W przypadku komercyjnych tranzystorów, dla bezpośredniego porównania badanych struktur, wyznaczone parametry skonstruowanych modeli przeskalowano względem wymiarów geometrycznych do rozmiarów pojedynczej celi

GaN PoIHEMT. Wyniki dopasowania wartości elementów schematu zastępczego tranzystorów po skalowaniu zawarto w tabeli 1.

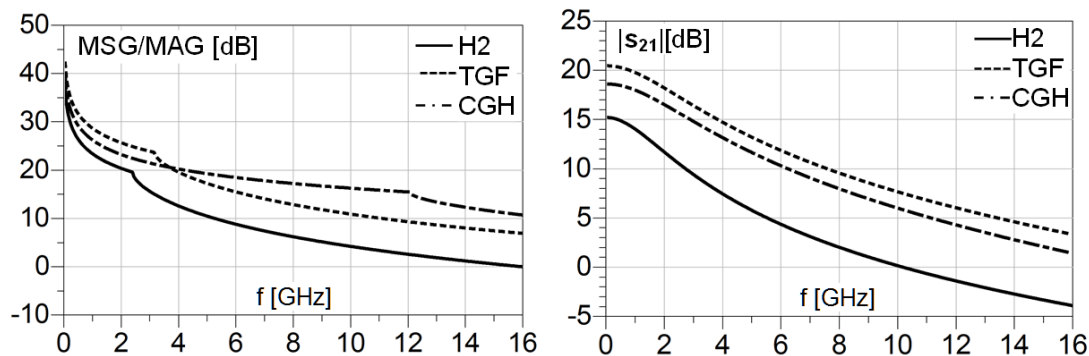
Przebiegi refleksyjności s_{11} i s_{22} w funkcji częstotliwości przeskalowanych struktur pokazano odpowiednio na rysunku 8. Częstotliwościowe charakterystyki wzmocnienia badanych tranzystorów przedstawiono na rysunku 9 MSG/MAG – maksymalne dostępne wzmocnienie i $|s_{21}|$ – transmisja tranzystora bez obwodów dopasowujących.

Tabela 1. Parametr modeli struktur skalowanych do 2x250 μm

Tranzystor	Elementy pasożytnicze						Elementy części wewnętrznej					
	L_s [pH]	L_g [pH]	L_d [pH]	R_g [Ω]	R_s [Ω]	R_d [Ω]	g_m [mS]	T [ps]	C_{gs} [pF]	C_{dg} [pF]	C_{ds} [pF]	R_{ds} [Ω]
HX1425A2_H2	0	43	48	19.1	3.4	5.3	77	5.5	1.3	0.040	0.087	775
TGA2023-1				16.0	0.8	1.8	133	3.9	0.87	0.022	0.133	345
CGH60008D				3.2	0.3	2.2	93	3.6	1.0	0.034	0.147	790



Rys. 8. Reflektancje s_{11} i s_{22} w zakresie częstotliwości do 16 GHz przeskalowanych struktur HX1425A2_H2, TGF2023-1 i CGH60008D

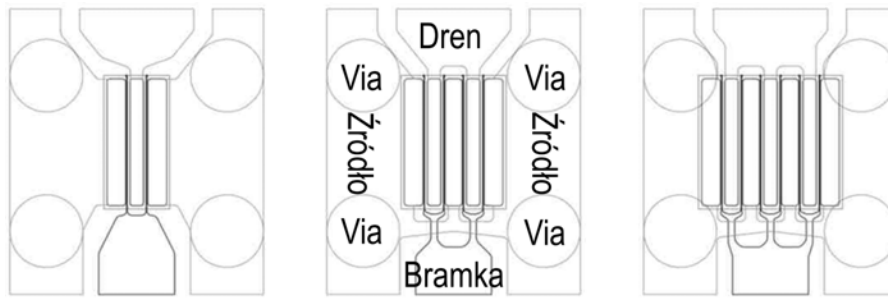


Rys. 9. Wzmocnienie MSG/MAG i transmisja $|s_{21}|$ tranzystorów HX1425A2_H2, TGF2023-1 i CGH60008D

Wnioski

Wyniki badań struktury GAN PoIHEMT nie odbiegają istotnie od parametrów tranzystorów komercyjnych, pomimo, że bramka jest realnie ponad 3 razy dłuższa i nie posiada charakterystycznego kształtu typu T. Ponadto brak metalizowanych przepustów zwiększa wartości rezystancji szeregowych i utrudnia odprowadzanie ciepła w szczególności, gdy chip PoIHEMT jest 3-krotnie grubszy niż standardowa grubość rynkowych tranzystorów i układów scalonych. Jednym z parametrów zaniżających ocenę struktur PoIHEMT jest poziom wzmocnienia – niższy o ok. 5 dB w porównaniu z tranzystorami Cree i Triquint.. Powodem

tego jest zbyt duża wartość rezystancji bramki. W związku z przedstawionymi wynikami dokonano modyfikacji procesu formowania bramki tak, aby w obecnie przygotowywanych strukturach rezystancję bramki znacznie zredukować. Do najważniejszych wniosków należy zaliczyć: potrzebę zmniejszenia odległości dren – źródło z 9 μm do 5 μm , długości i szerokości bramki odpowiednio do 0,6÷0,8 μm i 200 μm , grubości chipu z obecnie 350 μm do 100 μm oraz niezbędne jest wykonanie metalizowanych przepustów (*via holes*) ze źródła do pokrytego złotem spodu chipu. Zarys topologii nowych masek struktur GaN PoIHEMT z uwzględnieniem w/w sugestii pokazano na rysunku 10.



Rys. 10. Zarys topologii nowej wersji masek struktur GaN PoHEMT

Praca naukowa finansowana w ramach projektu PBS1/A3/1/2012 PoIHEMT z NCBiR.

LITERATURA

- [1] Taube A. i inni, Ion Implantation for Isolation of AlGaIn/GaN HEMTs Using C or Al., *Journal Physica Status Solidi A: Applications and Materials Science*. Phys. Status Solidi A, 1–8 (2015) / DOI 10.1002/pssa.201431724
- [2] <http://www.cree.com/RF/Products>
- [3] <http://www.triquint.com/products/all/discrete-transistors/gan-hemts>
- [4] Wojtasiak W., Gryglewski D., A 100 W SiC MESFET Amplifier for L-band T/R Module of APAR, *Int. Journal of Electronics and Telecommunications* 2011, no. 3, vol. 57, 135-140

Autorzy: dr hab. inż. Wojciech Wojtasiak, Politechnika Warszawska, Wydział Elektroniki i Technik Informacyjnych, ul. Nowowiejska 15/19, 00-665 Warszawa, E-mail: wwojtas@ire.pw.edu.pl; prof. dr hab. inż. Wojciech Gwarek, Politechnika Warszawska, Wydział Elektroniki i Technik Informacyjnych, ul. Nowowiejska 15/19, 00-665 Warszawa, E-mail: W.Gwarek@ire.pw.edu.pl; prof. dr hab. inż. Anna Piotrowska, Instytut Technologii Elektronowej, Al. Lotników 32/46, 02-668 Warszawa, E-mail: dyrektor@ite.waw.pl; dr hab. inż. Eliana Kamińska, Instytut Technologii Elektronowej, Al. Lotników 32/46, 02-668 Warszawa.