

## Właściwości i zastosowania tranzystorów HEMT na bazie azotku galu

**Streszczenie.** Omówiono podstawowe właściwości i zastosowania tranzystorów HEMT wykonywanych na bazie azotku galu (GaN). Przedyskutowano specyfikę struktury heterozłączonej oraz główne cechy fizyczne azotku galu. Szczególną uwagę poświęcono mechanizmowi tworzenia dwuwymiarowego gazu elektronowego (2DEG) i jego znaczeniu dla właściwości tranzystorów. Przedstawiono niektóre efekty pasożytnicze występujące w tranzystorach GaN HEMT, znane jako „current collapse” oraz „DC-RF dispersion”. Omówiono także najważniejsze obecnie zastosowania tranzystorów GaN HEMT – w układach mikrofalowych oraz energoelektronice.

**Abstract:** The basic properties and applications of GaN HEMT transistors are reviewed. Fundamentals feature of gallium nitride (GaN) and specific properties of heterojunction are discussed with the special attention paid to the mechanism of two-dimensional electron gas (2DEG) formation, and resulting high mobility feature. The parasitic effects known as current collapse and DC-RF dispersion in GaN HEMT are discussed. The most important applications in microwave circuits and power electronics are described. **The basic properties and applications of GaN HEMT transistors**

**Słowa kluczowe:** azotek galu, GaN, HEMT, układy mikrofalowe, energoelektronika.

**Keywords:** gallium nitride, GaN, HEMT, microwave circuits, power electronics.

### Wstęp

Tranzystory HEMT (*High Electron Mobility Transistors*) wytwarzane na bazie azotku galu (GaN) są obecnie najlepszymi półprzewodnikowymi elementami aktywnymi do przetwarzania sygnałów wielkiej częstotliwości i dużej mocy. Pierwsze wykonanie laboratoryjne tranzystora HEMT GaN pojawiło się w roku 1993; produkcja przemysłowa tych tranzystorów trwa od około dziesięciu lat. Od momentu pojawienia się na rynku znajdują one zastosowania przede wszystkim w mikrofalowych urządzeniach nadawczych, a w ostatnich latach – także w impulsowych przekształtnikach mocy.

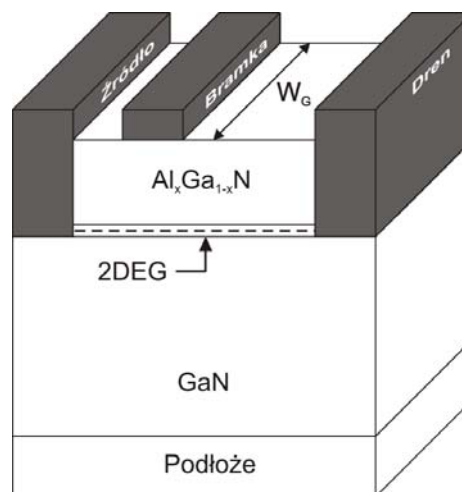
Potencjalne możliwości tych elementów ciągle nie są w pełni wykorzystane, głównie z powodu rozmaitych efektów pasożytniczych, a także w związku z wyjątkowo trudną technologią wytwarzania. Istnieje zatem szeroki margines możliwych ulepszeń, które stanowią cel bardzo intensywnych badań prowadzonych w wielu ośrodkach na całym świecie. Poważne prace badawczo-rozwojowe w zakresie technologii i właściwości tranzystorów HEMT są prowadzone także w Polsce, przede wszystkim w Instytucie Technologii Elektronowej, Instytucie Technologii Materiałów Elektronicznych oraz Politechnice Warszawskiej i Wrocławskiej.

Niniejsza praca stanowi pobieżny przegląd problematyki tranzystorów HEMT z GaN. Główne części artykułu dotyczą budowy i właściwości fizycznych oraz parametrów technicznych i zastosowań tych tranzystorów.

### Budowa i właściwości fizyczne

Podstawowe cechy fizyczne struktur HEMT z azotku galu

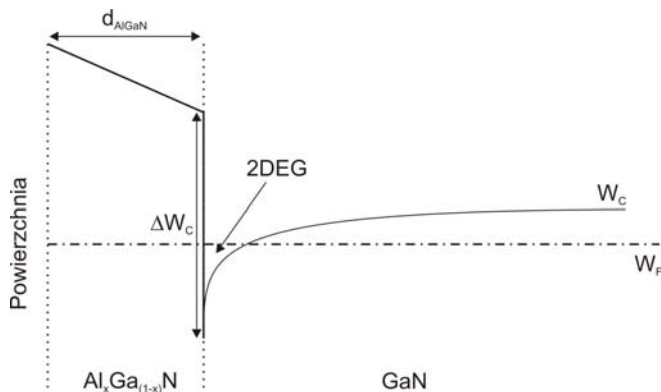
Tranzystory HEMT są tranzystorami polowymi złączowymi, należącymi do grupy tranzystorów „normalnie załączonych” z kanałem n. Specyfika budowy tranzystora HEMT polega na wykorzystaniu heterozłącza (stąd inna nazwa: HFET – *heterojunction field effect transistor*). Najczęściej jest to złącze AlGaIn-GaN. Poprzednia, szeroko stosowana wersja tranzystorów HEMT wykorzystywała arsenek galu jako materiał podstawowy. Zasadę konstrukcji struktury półprzewodnikowej tranzystora HEMT z heterozłączem AlGaIn-GaN, uwzględniającą tylko główne warstwy, pokazano na rysunku 1. Rzeczywiste układy warstw są bardziej złożone i mogą być zróżnicowane. Budowa i właściwości tranzystorów HEMT na bazie GaN są opisane w wielu źródłach literaturowych [1-18, 20, 72-77].



Rys. 1. Zasada konstrukcji tranzystora HEMT

Unikalne cechy tranzystorów HEMT wynikają stąd, że w zaporowo spolaryzowanym heterozłączu tworzy się bardzo wąska studnia potencjału dla elektronów, odpowiadająca położeniu dna pasma przewodnictwa w rejonie styku dwóch materiałów o różnych szerokościach pasma energii zabronionych (rys. 2). Możliwości ruchu elektronów o energiach odpowiadających tej studni są praktycznie ograniczone do dwóch wymiarów (z wyłączeniem wymiaru prostopadłego do powierzchni złącza), co jest efektem typowo kwantowym. W odniesieniu do tych elektronów używa się określenia „dwuwymiarowy gaz elektronowy” (*two-dimensional electron gas*, 2-DEG). Strukturę tranzystora HEMT wykonuje się tak, że rejon, w którym powstaje dwuwymiarowy gaz elektronowy jest bardzo słabo domieszkowany (lub niedomieszkowany), co znacznie redukuje efekt rozpraszania nośników i umożliwia uzyskiwanie bardzo dużych ruchliwości elektronów.

Atrakcyjność azotku galu, jako materiału do wytwarzania tranzystorów HEMT, wynika z jego podstawowych właściwości fizycznych, które w tabeli 1 porównano z właściwościami niektórych innych półprzewodników. W porównaniu z arsenkiem galu, azotek galu ma wyraźnie większą szerokość pasma energii zabronionych  $W_G$  i krytyczną wartość natężenia pola elektrycznego  $E_B$ , co pozwala na konstrukcję elementów o większych napięciach przebicia niż elementy z GaAs.



Rys. 2. Przebieg dna pasma przewodnictwa w rejonie heterozłącza

Tabela 1. Właściwości niektórych półprzewodników

	Si	GaAs	4H-SiC	GaN
Przerwa energetyczna $W_E$ (eV)	1.12	1.42	3.25	3.40
Pole krytyczne $E_B$ (MV/cm)	0.25	0.4	3.0	3.5
Ruchliwość elektronów $\mu$ (cm <sup>2</sup> /V s)	1350	8000	800	1300
Prędkość nasycenia $v_s$ (10 <sup>7</sup> cm/s)	1.0	2.0	2.0	3.0
Konduktywność cieplna $\chi$ (W/cm K)	1.5	0.5	4.9	1.3
Stała dielektryczna $\epsilon$	11.8	12.8	9.7	9.0

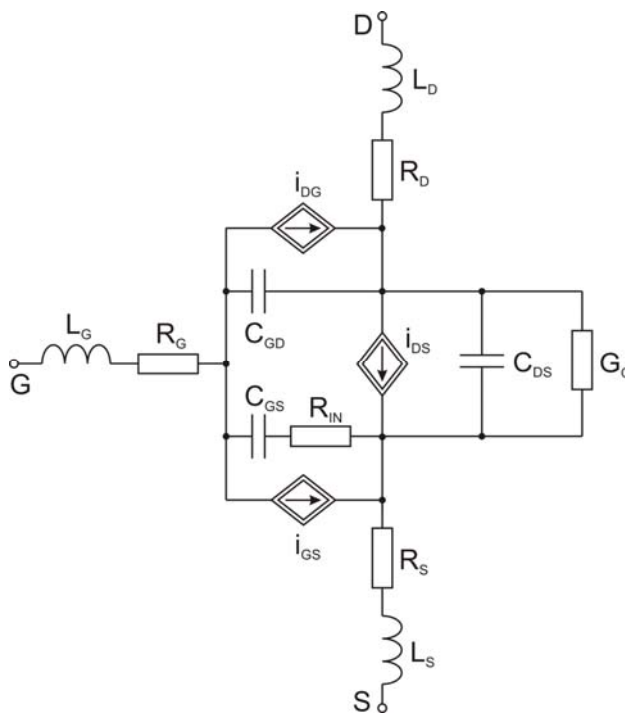
Inna, bardzo ważna zaleta azotku galu GaN i azotku glinowo-galowego AlGaIn wiąże się z polaryzacją spontaniczną i piezoelektryczną, która występuje w tych materiałach. W szczególności, składnik polaryzacji piezoelektrycznej występuje w wyniku naprężeń pojawiających się w heterozłączeniu na granicy GaN i AlGaIn. Powstająca dzięki temu warstwa swobodnych elektronów o koncentracji powierzchniowej  $n_s$ , stanowi dwuwymiarowy gaz elektronowy 2DEG i spełnia funkcję kanału przewodzącego w tranzystorze, nawet bez domieszkowania warstw przyłączowych. Koncentracja  $n_s$  jest powiązana z głębokością studni potencjału w heterozłączeniu, pokazanej na rysunku 2 i zależy od parametrów warstwy  $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}$ : jej grubości  $d$  oraz czynnika  $x$ . Według oszacowań literaturowych, dla odpowiednio dobranych  $d$  i  $x$  otrzymuje się wartości  $n_s$  przekraczające  $10^{13}\text{cm}^{-2}$ , kilkakrotnie większe niż możliwe do uzyskania w heterozłączeniu AlGaIn-GaAs [72, 74, 77, 83]. W związku z tym, osiągalne gęstości prądu w tranzystorach HEMT na bazie azotku galu są kilkakrotnie większe niż w tranzystorach z GaAs. W połączeniu z dużymi dopuszczalnymi natężeniami pola w GaN, gęstości mocy w tranzystorach z heterozłączeniem AlGaIn-GaN mogą być o rząd większe niż w tranzystorach na bazie GaAs. Ma to ogromne znaczenie zwłaszcza w zastosowaniach mikrofalowych. Pojemności w strukturze tranzystorów z GaN mogą mieć wartości podobne (lub nawet nieco mniejsze) jak pojemności w tranzystorach z GaAs o podobnych rozmiarach struktury półprzewodnikowej. Tranzystory z azotku galu, przy podobnych możliwych zakresach częstotliwości jak tranzystory z GaAs, pozwalają na przetwarzanie znacznie większych mocy. Możliwość uzyskiwania bardzo dużych gęstości prądu pozwala na otrzymywanie bardzo małych rezystancji w stanie przewodzenia (oznaczanych zwykle jako  $R_{DS(on)}$ ), co jest bardzo atrakcyjne z punktu widzenia zastosowań w impulsowych przekształtnikach mocy.

## Charakterystyki elektryczne

Do opisu właściwości elektrycznych tranzystora HEMT (podobnie jak innych tranzystorów polowych) można posłużyć się schematem zastępczym zawierającym źródło prądowe sterowane napięciami  $i_{DS} = f(v_{GS}, v_{DS})$  oraz pojemności związane ze strukturą tranzystora [10, 11, 13, 19, 48, 54]. Przykład takiego schematu pokazano na rysunku 3. Lokalna wartość prądu  $i_{DS}$  w punkcie odległym o  $y$  od brzegu obszaru źródła może być przedstawiona wzorem:

$$(1) \quad i_{DS}(y) = q \cdot W_G \cdot n_s(y) \cdot v(y)$$

gdzie  $q$  oznacza ładunek elementarny,  $W_G$  – szerokość bramki. Koncentracja powierzchniowa  $n_s$  i prędkość nośników  $v$  zależą od współrzędnej  $y$  ale zależności te muszą dać wynikowo wartość prądu niezależną od położenia.

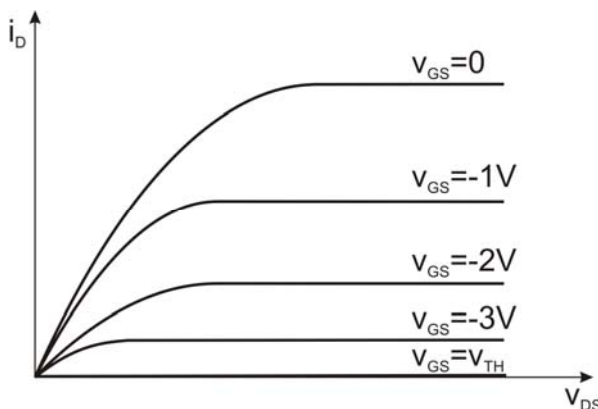


Rys. 3. Przykładowy schemat zastępczy tranzystora HEMT

Dokładne wyznaczenie rozkładu koncentracji swobodnych elektronów w kanale (czyli gęstości dwuwymiarowego „gazu elektronowego”)  $n_s$  potrzebne do znalezienia charakterystyk statycznych tranzystora jest skomplikowane. Lokalna prędkość nośników w danym punkcie kanału zależy od natężenia pola. Dla jednoczesnego wyznaczenia rozkładu pola elektrycznego i koncentracji elektronów w obszarze kanału należy rozwiązać numerycznie równania Poisson'a i Schrödingera, przy uwzględnieniu dodatkowych zależności szczegółowych opisujących zjawiska w strukturze [72, 76]. Może to być zrealizowane za pomocą odpowiednich programów symulacyjnych. W publikacjach poświęconych symulacji charakterystyk tranzystorów HEMT z GaN wymienia się najczęściej symulator ATLAS firmy SILVACO, a także symulatory Sentaurus i APSYS [3, 18, 24, 37, 45, 49, 50]. Publikacje prezentujące wyniki obliczeń uzyskiwane za pomocą tego samego symulatora, dla kolejnych kombinacji wartości napięć na zewnętrznych zaciskach, różnią się szczegółami uwzględnionych zjawisk, przyjętych zależności i wartościami współczynników w tych zależnościach. Szczególną rolę wśród zjawisk uwzględnianych w symulacjach odgrywają procesy pułapkowania nośników

oraz samonagrzewania wynikającego z zamiany energii elektrycznej na ciepło. Przyjmuje się zwykle, że są to efekty pasożytnicze i że nie występują one w strukturze tranzystora uznawanego za idealny.

W literaturze można spotkać wiele analitycznych przybliżeń charakterystyk tranzystora HEMT o różnym stopniu złożoności, opartych o wyniki symulacji lub pomiarów [10, 13, 19, 38, 45]. Kształt charakterystyk prądowo-napięciowych idealnego tranzystora HEMT odpowiada charakterystykom typowego tranzystora polowego normalnie załączonego, które zilustrowano na rysunku 4. W rodzinie charakterystyk wyjściowych,  $i_D = f(v_{DS})$ , przy parametrze  $v_{GS}$ , najwyżej położona charakterystyka odpowiada wartości  $v_{GS} = 0$ .



Rys. 4. Rodzina charakterystyk wyjściowych idealnego tranzystora polowego

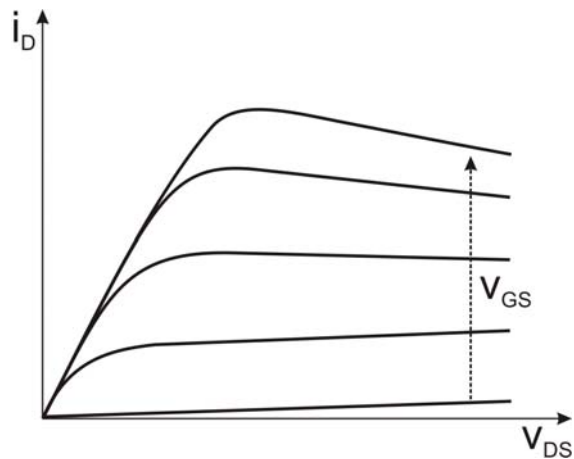
#### Ograniczenia właściwości użytkowych

Właściwości użytkowe współczesnych tranzystorów HEMT na bazie azotku galu, nie odpowiadają w pełni wynikom symulacji teoretycznych dla tranzystorów idealnych. W realnych tranzystorach obserwuje się zjawiska, które wpływają niekorzystnie na parametry użytkowe i niezawodność tych elementów. Wiąże się z tym szereg określeń spotykanych w literaturze. Często spotykanym określeniem jest „*current collapse*”, które odnosi się najczęściej do uzyskiwania mniejszych wartości prądu drenu mierzonego w konkretnych warunkach, niż wartości przewidywane teoretycznie lub na podstawie pomiarów w innych warunkach. Jako przypadki szczególne zjawiska „*current collapse*” wymienia się ujemne nachylenie charakterystyki wyjściowej („*negative differential resistance*” NDR) [6, 8, 22, 29, 39, 46-50], oraz zagęszczanie charakterystyk wyjściowych przy większych wartościach napięcia bramki („*current suppression*”) [39, 49-53]. Wiąże się z tym zmniejszanie transkonduktancji  $g_m$ , czyli pogarszanie właściwości wzmacniających tranzystora przy wzroście napięcia bramki w pewnym zakresie [11, 26, 37, 43-45, 49-50]. Sens zjawisk NDR i „*current suppression*” zilustrowano na rysunku 5.

Pewne rodzaje zmian kształtu charakterystyk wyjściowych określane są jako „*knee voltage walk-out*” oraz „*kink effect*” [5, 12, 21, 33, 36, 38, 49, 51, 53]. Oznaczają one przesunięcie początkowego odcinka charakterystyki wyjściowej w stronę większych napięć po uprzednim przyłożeniu dużego napięcia  $v_{DS}$ , oraz charakterystyczne zafalowanie charakterystyki wyjściowej. Są one zwykle związane z przesuwaniem napięcia prądowego („*V<sub>TH</sub> shift*”) w pewnych warunkach pracy [52, 55], a ich skutkiem jest m.in. niepożądane zwiększenie rezystancji  $R_{ON}$  tranzystora w stanie włączenia [10, 25, 33, 35, 40, 52].

Użytkowe parametry tranzystora HEMT obserwowane praktycznie w zakresie wielkich częstotliwości okazują się na ogół gorsze niż wynika z obliczeń na podstawie

charakterystyk statycznych. Ten efekt jest określany jako „*DC-RF dispersion*” [1, 2, 11, 29, 33, 38, 51, 54], a w szczególności  $g_m$  *dispersion* [13, 23]. Jako jeden z przejawów efektu *DC-RF dispersion* wymienia się nieraz różnice w przebiegu charakterystyk prądowo-napięciowych tranzystora otrzymywanych metodą impulsową i metodą w pełni statyczną. Warto podkreślić, że w literaturze nie ma jednolitej opinii co do kierunku tych różnic.

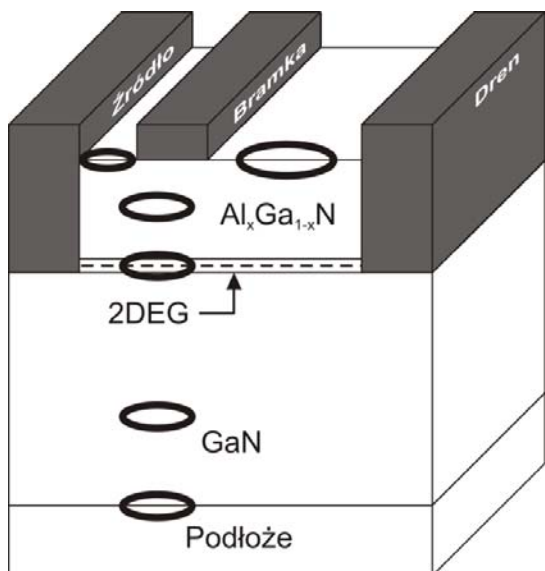


Rys. 5. Zjawiska NDR i „current suppression”

Jako niepożądane cechy tranzystorów HEMT wymienia się czasem zjawiska określane jako „*gate-lag*” [10, 15, 27, 30, 37, 751, 86] oraz „*drain-lag*” [86]. Oznaczają one powstawanie charakterystycznych opóźnień w przebiegu prądu drenu po skokowej zmianie napięcia bramka-źródło lub dren-źródło. Efekty „*gate-lag*” lub „*drain-lag*” są często generowane w ramach procedury pomiarowej prowadzącej do wyznaczenia parametrów pułapek stanowiących przyczynę niepożądanych cech tranzystorów.

W bardzo wielu pracach rozważa się przyczyny niepożądanych zjawisk ograniczających właściwości użytkowe tranzystorów HEMT. Najczęściej wymienia się procesy pułapkowania elektronów jako główną przyczynę tych zjawisk [4, 8, 17, 18, 29, 31, 36, 38, 54, 56, 57]. Można spotkać rozważania jakościowe i opisy analityczne oraz badania symulacyjne procesów pułapkowania [12, 23, 51, 59, 60-63]. Autorzy określają zazwyczaj charakterystyczne lokalizacje defektów stanowiących pułapki. Wyróżnia się „*surface trapping*”, czyli pułapkowanie na powierzchni półprzewodnika [1, 2, 9, 10-12, 15, 17, 20-23, 25, 26, 30-33, 40, 45, 51, 52, 58] oraz „*bulk trapping*”, czyli pułapkowanie objętościowe. Pułapkowanie objętościowe jest lokalizowane w płaszczyźnie heterozłącza, w warstwie bufora lub w podłożu. Lokalizacje pułapek, typowo wymieniane w literaturze, zilustrowano na rysunku 6. W kilku pracach objaśnia się oddziaływanie pułapek na transport nośników między obszarem pod bramką a elektrodą drenu używając pojęcia wirtualnej bramki (*virtual gate*) [12, 20, 32, 33, 38, 40].

Bardzo obszerne prace badawcze nastawione są na identyfikację parametrów pułapek: poziomu energetycznego, przekroju czynnego na chwytywanie elektronów oraz czasu życia elektronów w pułapkach. Autorzy stosują różne modyfikacje metody DLTS (np. *current DLTS*) oraz rejestracje czasowych przebiegów prądu drenu po skokowej zmianie napięcia dren-źródło lub bramka-źródło dla różnych kombinacji wartości spoczynkowych tych napięć. Publikowane wyniki badań, zwłaszcza charakterystycznych stałych czasowych wykazują duże zróżnicowanie [2, 13, 27, 34, 36, 37, 45, 71].



Rys. 6. Możliwe lokalizacje pułapek w strukturze HEMT

Innym mechanizmem odpowiedzialnym za niekorzystne cechy tranzystorów jest samonagrzewanie (*self-heating*) czyli wzrost temperatury wnętrza w wyniku strat mocy. W niektórych pracach przyjmuje się, że efekty „*self-heating*” i „*trapping*” występują łącznie, w innych zakłada się, że efekty samonagrzewania stanowią jedyną przyczynę degradacji charakterystyk tranzystorów. Analizy i numeryczne symulacje przebiegu i skutków procesów samonagrzewania przedstawiono między innymi w pracach [2, 8, 14, 16-18, 21, 29, 30, 32, 33, 39, 42, 47-50, 54, 56, 57, 63-67]. Pomiarów parametrów charakteryzujących proces samonagrzewania omówiono w pracach [29, 47].

#### Problemy konstrukcyjno-technologiczne

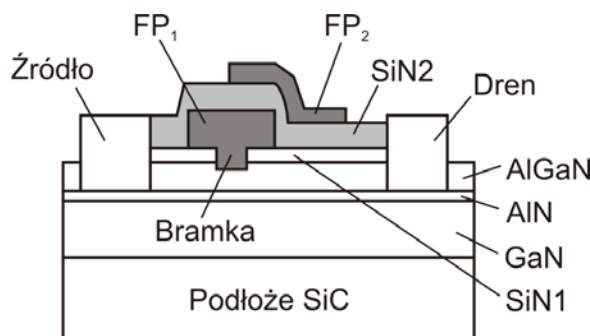
Chyba najważniejszym czynnikiem konstrukcyjnym tranzystorów HEMT GaN jest rodzaj podłoża półprzewodnikowego. W zdecydowanej większości konstrukcji opisywanych w literaturze stosowane są podłoża z materiałów innych niż GaN, mianowicie z szafiru, węgla krzemu lub krzemu. W tych przypadkach cienka, monokrystaliczna warstwa czysta GaN jest osadzana technikami heteroepitaksji. Między warstwą GaN i „obcym” podłożem występuje niedopasowanie sieci krystalicznych i niezgodność współczynników rozszerzalności cieplnej. Jest to przyczyną naprężeń, defektów i możliwości uszkodzeń. Potencjalnie najkorzystniejsze właściwości tranzystorów może zapewnić stosowanie płytek podłożowych z GaN. Zestawienie głównych cech warstw podłożowych dla tranzystorów HEMT przedstawiono w tabeli 2.

Tabela 2. Porównanie materiałów na płytce podłożowej [73]

Materiał	Niedopasowanie stałej sieci do GaN	Przewodność cieplna w 300K (W/cm K)	Niedopasowanie współczynników rozszerzalności cieplnej	Rozmiary (w calach) i koszt dostępnych płytek podłożowych
GaN	0%	1.3	0%	2 Bardzo drogie
Szafir	14%	0.3	34%	do 8 Średnie
6H-SiC	3.5%	4.9	25%	do 6 Drogi
Si	-17%	1.3	56%	do 12 Tanie

Otrzymywanie monokryształów azotku galu o odpowiednich rozmiarach jest niezwykle trudne technologicznie. Istnieje kilka metod wytwarzania takich monokryształów [84]. Jedną z nich jest metoda określana w literaturze jako „*ammonothermal growth*”. Opiera się ona na wykorzystaniu termicznego rozkładu amoniaku w stanie nadkrytycznym [85] i jest stosowana między innymi w polskiej firmie Ammono. Z danych literaturowych, podsumowanych w tabeli 2 wynika, że rozmiary płytek podłożowych z GaN, możliwych praktycznie do uzyskania, są mniejsze niż płytek podłożowych z szafiru, węgla krzemu lub krzemu, a oparcie konstrukcji struktur tranzystorów HEMT na wykorzystaniu płytek podłożowych z GaN jest rozwiązaniem najdroższym. Według rozeznania autorów, nie ma obecnie, dostępnymi komercyjnie, tranzystorów HEMT wykonywanych na podłożu GaN.

Niektóre szczegóły konstrukcyjne wprowadzono w ramach rozwoju tranzystorów HEMT GaN, w celu poprawy ich parametrów, a w szczególności – ograniczenia efektów pasożytniczych. Można tu wymienić stosowanie odpowiednich warstw półprzewodnikowych, jak np. niedomieszczona warstwa dystansowa (*spacer layer*) między warstwami AlGaIn i GaN tworzącymi heterozłącze, oraz warstwa określana jako *nucleation layer* między warstwą GaN i „obcym” podłożem. Inne elementy konstrukcji to pasywacja powierzchni półprzewodnika między elektrodami bramki i drenu oraz dodatkowe elektrody metalowe (tzw. *field plate*) stanowiące zabezpieczenie przed przebiciem [9, 11, 12, 13, 15, 17]. Ich przykładowe usytuowanie pokazano na rysunku 7 [74].



Rys. 7. Przykład modyfikacji struktury tranzystora HEMT GaN [74]

#### Zastosowania tranzystorów GaN HEMT

##### Mikrofalowe tranzystory i układy scalone z azotku galu

Ze względu na właściwości azotku galu mikrofalowe tranzystory i układy scalone wytwarzane w technologii GaN HEMT są przeznaczone przede wszystkim do budowy wzmacniaczy mocy, chociaż pojawiają się także aplikacje tranzystorów GaN HEMT we wzmacniaczach niskoszumnych. Obecny stan technologii GaN HEMT umożliwia produkcję elementów mikrofalowych w procesach 0,15 μm, 0,25 μm i 0,5 μm (długość bramki) na zakres częstotliwości odpowiednio do 40 GHz, 18 GHz i 10 GHz o mocach wyjściowych do ponad 100 W w warunkach pracy z falą ciągłą i 1 kW w impulsie. Do wiodących producentów mikrofalowych tranzystorów GaN HEMT należy zaliczyć Cree Inc., Qorvo (połączenie Triquint z RFMD) i Sumitomo, a także Mitsubishi, Toshiba, M/ACOM oraz Integra. Ostatnia z wymienionych firm, pomimo dość ograniczonego portfolio – głównie do impulsowych tranzystorów dużej mocy dla systemów radarowych – dobrze radzi sobie na rynku. Dla ilustracji stanu technologii mikrofalowych tranzystorów mocy GaN HEMT

przystosowanych do pracy zarówno z falą ciągłą (cw) jak i impulsowej, w tabelach odpowiednio 3 i 4 podano ważniejsze parametry elementów oferowanych przez głównych producentów. Jako kryterium wyboru przyjęto maksymalny poziom mocy wyjściowej w nasyceniu ( $P_{wysat}$ ) we wskazanym zakresie częstotliwości możliwy do uzyskania z pojedynczego tranzystora. Osiągnięte są większe poziomy mocy wyjściowej, ale ze struktur typu

push-pull zbudowanych z dwóch wewnętrznie niepołączonych chipów zamkniętych w jednej obudowie. Dodatkowo w tabelach 3 i 4 zamieszczono takie parametry jak wartość liniowego wzmacnienia ( $G_{Lin}$ ), sprawność dodaną (PAE) i punkt pracy ( $U_{DSQ}$ ,  $I_{DQ}$  dla RF off) oraz rodzaj i widok obudowy.

Tabela 3. Parametry wybranych tranzystorów GaN HEMT przeznaczonych do pracy z falą ciągłą











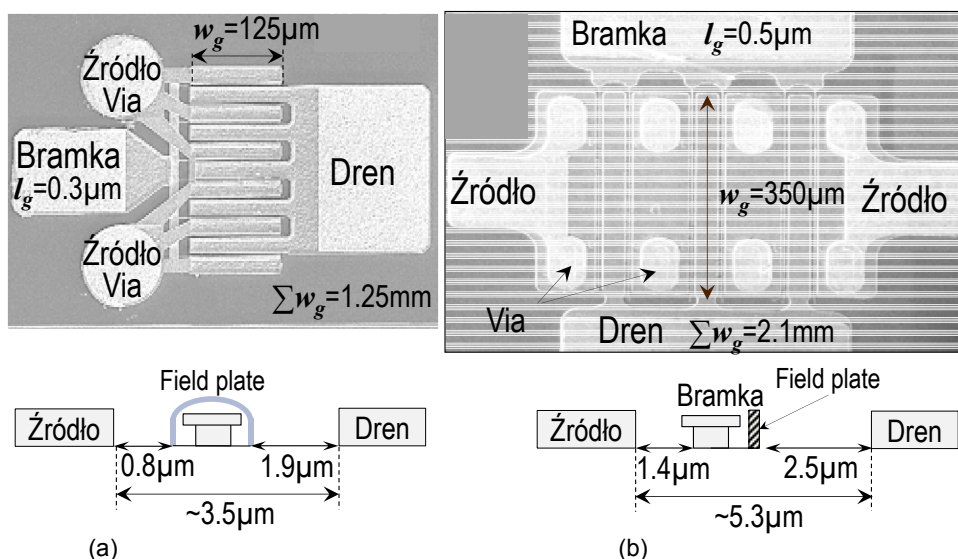
Producent	Oznaczenie	Pasma	$P_{wysat}$	$G_{Lin}$	PAE	$U_{DSQ}$ , $I_{DQ}$	Dane dla	Obudowa
Cree	CGHV1J025D	≤18GHz	25W	10dB	50%	40V, 0.18A	10GHz	chip
	CGH60120D	≤6GHz	120W	10dB	55%	28V, 0.8A	6GHz	chip
Triquint	TGF2023-2-20	≤18GHz	72W	8.4dB	46%	28V, 2A	10GHz	chip
	T2G6003028-FL	≤6GHz	26W	14dB	54%	28V, 0.2A	6GHz	
Sumitomo	SGNE030MK	≤4GHz	40W	15dB	55%	50V, 0.2A	2.7GHz	
	SGK7785-100A	7.7÷8.5GHz	100W	12dB	40%	24V, 4A	8GHz	

Tabela 4. Parametry impulsowych tranzystorów GaN HEMT wiodących producentów

Producent	Oznaczenie	Pasma	$P_{wysat}$	$G_{Lin}$	PAE	$U_{DSQ}$ , $I_{DQ}$	Impulsy	Obudowa
Cree	CGHV96100F2	8÷9.6GHz	130W	10dB	45%	40V, 1A	100μs, 10%	
	CGH35240F	3.1÷3.5GHz	220W	11 dB	50%	28V, 1A	300μs, 20%	
Triquint	T1G4012036-FL	≤3.5GHz	125W	16dB	52%	36V, 0.36A	100μs, 20%	
	T1G2028536-FL	≤2GHz	280W	19dB	56%	36V, 0.6A	300μs, 10%	
Sumitomo	SGK0910-120AR	9.2÷10GHz	120W	11dB	35%	24V, 5.3A	100μs, 10%	
	SGN2731-500HR	2.7÷3.1GHz	500W	12dB	55%	50V, 1.5A	300μs, 10%	
Integra	IGN2729M500	2.7÷2.9GHz	550W	13 dB	50%	50V, 0.1A	300μs, 10%	
	IGN1030L800	0.96÷1.2GHz	800W	14 dB	50%	50V, 0.15A	128μs, 2%	



Rys. 8. Topologia mikrofalowych tranzystorów mocy GaN HEMT na przykładzie chipów TGF2023-1 (TriQuint)  $P_{wysat} = 5$  W (a) i CGH60008D (Cree)  $P_{wysat} = 8$  W (b)

Topologia mikrofalowego tranzystora mocy GaN HEMT istotnie nie różni się od elementów typu GaAs power FET.

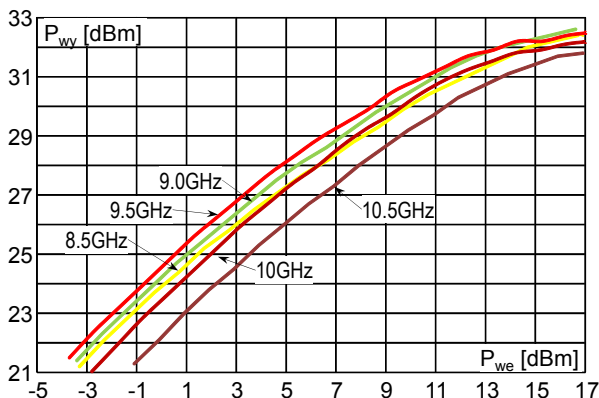
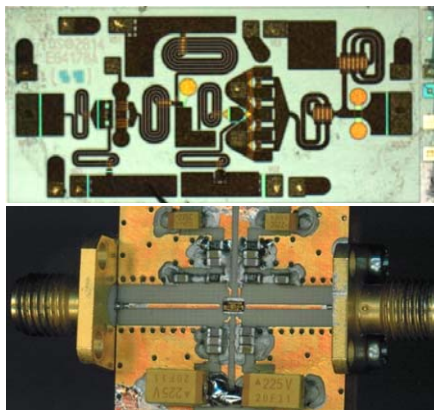
Powszechnie stosowane rozwiązania konstrukcyjne tranzystorów GaN HEMT przedstawiono na przykładzie

topologii struktur firmy Cree i Triquint na rysunku 8. Układowo i fizycznie każdy z tranzystorów stanowi równoległe połączenie kilku struktur elementarnych, których liczba zależy od wymaganej mocy wyjściowej. Taka topologia jest typowa również dla tranzystorów małej mocy np. niskoszumnych z tą różnicą, że dla skutecznego odprowadzania ciepła wykonuje się metalizowane przepusty (*via holes*) pomiędzy źródłami a spodem chipu pokrytym metalem (Au). Ponadto dla zwiększenia napięcia przebicia, poprawy charakterystyk DC  $I-V$  i redukcji efektu dyspersji bramki ekranuje się metalową warstwą tzw. *field plate* jak pokazano na rysunkach 7 i 8.

Wśród producentów mikrofalowych układów scalonych (MMIC) z azotku galu dominują firmy z kompleksu militarnego (Northrop Grumman, BAE Systems), których produkcja ukierunkowana jest przede wszystkim własne potrzeby. W komercyjnej ofercie takich producentów jak Cree, czy Qorvo znajdują się scalone wzmacniacze sterujące tzw. driver'y, wzmacniacze niskoszumne (LNA) i przełączniki. Krótki przegląd parametrów scalonych wzmacniaczy mocy wytwarzanych w technologii GaN HEMT zawarto w tabeli 5 [86].

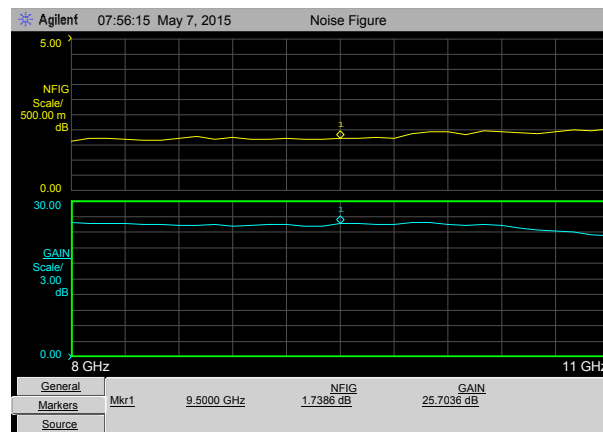
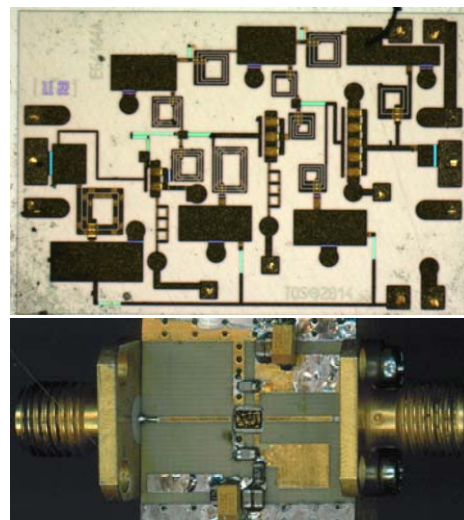
Tabela 5. Scalone wzmacniacze mocy GaN HEMT MMIC's

	$f$ [GHz]	$P_{wy}$ [W]	$G$ [dB]@ $P_{3dB}$	PAE [%]	$U_{DC}$ [V]
BAE Systems	0.5÷5	18÷25	13	40÷60	28
	2÷20	10÷22	8÷11	15÷35	30
	18÷40	9÷11	14÷17	10÷20	28
TriQuint	2÷19	10÷18	6÷10	24÷38	35
	3.1÷3.6	~100	22	55	30
	9÷10.5	40	27	45	28
Cree	2.7÷3.5	67÷100	22÷25	48÷60	28



Rys. 9. Widok chipu i płytki testowej oraz charakterystyki  $P_{wy} = f(P_{we})$  driver'a TGA2598 – warunki pomiaru:  $U_D = 25$  V,  $I_{DQ} = 100$  mA

Jako przykłady scalonych wzmacniaczy z azotku galu wybrano 2-stopniowy driver TGA2598 i 3-stopniowy wzmacniacz LNA TGA 2612 firmy TriQuint zastosowane przez zespół z Instytutu Radioelektroniki PW do realizacji demonstratora modułu N/O w projekcie „Wisła”. Widok chipów i układów testowych wraz charakterystykami pokazano na rysunkach 9 i 10.



Rys. 10. Fotografia chipu i płytki testowej wraz ze zmierzonymi charakterystykami wzmocnienia Gain[dB] i współczynnika szumów NFIG[dB] w pasmie 8÷11 GHz wzmacniacza LNA TGA2612 (TriQuint) – warunki pomiaru  $U_D = 12$  V,  $I_{DQ} = 100$  mA,  $U_G = -2,3$  V

Warto podkreślić bardzo dużą odporność układu niskoszumnego TGA2612 na przesterowanie sygnałem wejściowym, którego moc może osiągać poziom nawet 34 dBm i nie spowodować uszkodzenia stopnia wejściowego LNA. Taki poziom mocy wejściowej jest poza zasięgiem dla tranzystorów i wzmacniaczy niskoszumnych z arsenku galu. Dodatkowo zastosowanie tak odpornych stopni wejściowych w odbiornikach pozwala na wyeliminowanie standardowych układów zabezpieczających takich jak ograniczniki diodowe.

#### Tranzystory GaN HEMT dla energoelektroniki

W przypadku zastosowań w energoelektronice, tranzystory stosowane do budowy przekształtników energii i falowników muszą charakteryzować się wysokim napięciem przebicia i bardzo małą rezystancją włączenia  $R_{on}$ . Tranzystory GaN HEMT spełniają oba wymagania osiągając napięcia przebicia nawet 1 kV i rezystancje  $R_{on}$  rzędu kilku mΩ. W odróżnieniu od struktur mikrofalowych GaN HEMT normalnie załączonych z kanałem zubożonym (D-GaN HEMT), w energoelektronice niezbędne są

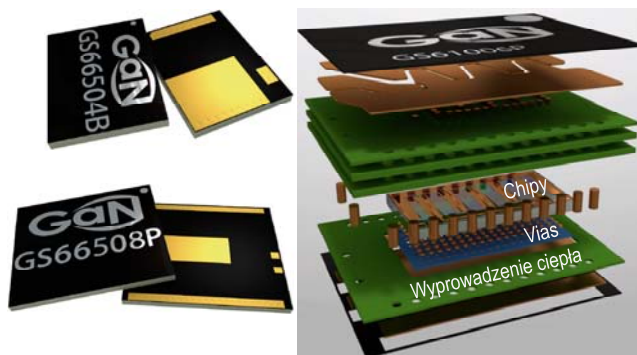
tranzystory normalnie wyłączone z kanałem wzbogacanym (E-GaN HEMT) [87]. Druga różnica jest natury technologicznej – tranzystory mikrofalowe GaN HEMT wytwarza się głównie na podłożu bazowym z węgla krzemu, podczas gdy materiałem podłożowym elementów dla energoelektroniki jest najczęściej krzem. Do wiodących producentów tranzystorów z azotku galu dla energoelektroniki należy zaliczyć EPC (*Efficient Power Conversion Corporation*) i GaN Systems, których kilka wybranych produktów zaprezentowano w tabeli 6.

Tabela 6. Parametry tranzystorów E-GaN HEMT firm EPC i GaN Systems

Firma	Typ	$U_{DS}$ [V]	$I_D$ [A]	$R_{DS}$ [mΩ]	$Q_G$ [nC]	$Q_{GS}$ [nC]	$Q_{GD}$ [nC]	$Q_{OSS}$ [nC]	Obudowa [mm <sup>2</sup> ]
EPC	EPC2027	450	5	400	1,7	0,6	0,25	19	1,95 X 1,95
	EPC2034	200	31	10	8,5	2,6	1,4	80	4,6 X 2,6
GaN Systems	GS66516T	650	60	27	13	2,8	5,6	114	9 x 7,6 x 0,45
	GS66508P	650	30	55	8,5	2,6	1,4	80	10 x 8,6 x 0,45
	GS61008P	100	90	7,4	1,7	0,4	0,7	15	7,5 x 4,5 x 0,45

\* - prąd ciągły

Tranzystory E-GaN HEMT doskonale nadają się do konstruowania przekształtników DC-DC obniżających napięcie o bardzo dużych częstotliwościach przetwarzania do ok. 2 MHz, a nawet 20 MHz nieosiągalnych dla odpowiedników z tranzystorami Si MOSFET. Podczas przełączania ze stanu włączenia do wyłączenia dla tranzystorów E-GaN HEMT ładunek, który musi być przeładowany zarówno w bramce jak i drenie, jest kilkakrotnie mniejszy niż w przypadku tradycyjnych tranzystorów Si MOSFET. Dla przetwornic DC-DC o mocach przetwarzania ok. 100 W sprawność układów krzemowych jest na poziomie 80%-90% przy częstotliwościach przetwarzania max. 100+500 kHz. Elementy E-GaN HEMT umożliwiają natomiast budowę przekształtników o sprawności powyżej 90% dla  $f = 1$  MHz. Podwyższona sprawność i wyższa częstotliwość pracy pozwala zmniejszyć wymiary urządzenia (mniejsze cewki, kondensatory i oczywiście rozmiary radiatora). Widok konstrukcji tranzystora E-GaN HEMT firmy GaN Systems przedstawiono na rysunku 11.



Rys. 11. Wygląd tranzystorów E-GaN HEMT firmy GaN Systems oraz zarys konstrukcji

#### Uwagi podsumowujące

SPECYFICZNE WŁAŚCIWOŚCI azotku galu jako materiału półprzewodnikowego oraz unikalne cechy konstrukcji heterozłączonej pozwalają na uzyskiwanie bardzo dobrych parametrów użytkowych tranzystorów GaN HEMT.

Tranzystory takie górują nad innymi typami tranzystorów, zwłaszcza w zastosowaniu do mikrofalowych układów nadawczych oraz do impulsowych przekształtników mocy elektrycznej. Tranzystory GaN HEMT są obecnie produkowane przez wiele firm komercyjnych. Z drugiej strony, technologia i właściwości tych tranzystorów są obiektem bardzo intensywnych prac badawczo-rozwojowych, gdyż ich możliwości nie są w pełni wykorzystane. Główną przyczyną są liczne efekty pasożytnicze występujące w pracy tych elementów, związane głównie z procesami pułpowania elektronów. Bardzo skomplikowana technologia tych elementów wymaga dalszych udoskonaleń. Wydaje się, że przez najbliższe lata tranzystory GaN HEMT będą najważniejszymi elementami aktywnymi w technice mikrofalowej i energoelektronice.

#### LITERATURA

- [1] Meneghini M. et al., Investigation of Trapping and Hot-Electron Effects in GaN HEMTs by Means of a Combined Electrooptical Method, *IEEE Trans. on Electron Devices*, vol. 58, N. 9, Sept. 2011, 2997-3003
- [2] Nakkala P. et al., Pulsed Characterisation of Trapping Dynamics in AlGaIn/GaN HEMTs, *Electronic Letters*, 24<sup>th</sup> October 2013, Vol. 49, N. 22, 1406-1407
- [3] Faramehr S., Kalna K. and Igić P., Simulation of Current Collapse in the 0.25 μm Gate Length Al<sub>0,28</sub>Ga<sub>0,72</sub>N/GaN HEMT, *Proc. 28<sup>th</sup> Intern. Conf. on Microelectronics*, Niš, Serbia, 13-16 May 2012, 233-236
- [4] Tartarin J.G. et al., I-LDTS, Electrical Lag and Low Frequency Noise Measurements of Trapping Effects in AlGaIn/GaN HEMT for Reliability Studies, *Proc. of the European Microwave Integrated Circuits Conference*, Manchester, 10-11 Oct. 2011, 438-441
- [5] Fathallah O. et al., Parasitic Effects and Traps in AlGaIn/GaN HEMT on Sapphire Substrate, *The European Physical J. Applied Physics*, Vol. 51, 10304, 2010
- [6] Mishra U.K., Parikh P. and Wu Y., AlGaIn/GaN HEMTs - An Overview of Device Operation and Applications, *Proc. IEEE*, vol. 90, N. 6, June 2002, 1022-1031
- [7] Borges R., Gallium Nitride Electronic Devices for High-Power Wireless Applications, *RF Semiconductors*, Sept. 2001, 72-82
- [8] Wang X.D., Hu W.D., Chen X.S. and Lu W., The Study of Self-Heating and Hot-Electron Effects for AlGaIn/GaN Double-Channel HEMTs, *IEEE Trans. on El. Dev.*, vol. 59, NO. 5, May 2012, 1393-1401
- [9] Gassoumi M. et al., Evidence of Surface States for AlGaIn/GaN/SiC HEMTs Passivated Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub> by CLDTS, *Fizika i Tehnika Poluprovodnikov*, 2012, Tom 46, Wyp. 3, 396-399
- [10] Jin D. and del Alamo J.A., Mechanisms Responsible for Dynamic ON-Resistance in GaN High-Voltage HEMT's, *Proc. of the 2012 24<sup>th</sup> Intern. Symp. on Power Semiconductor Devices and IC's*, June 3-7, 2012, Bruges, Belgium, 333-336
- [11] Lee B.H. et al., High RF Performance Improvement Using Surface Passivation Technique of AlGaIn/GaN HEMT at K-band Application, *Electronic Letters*, 1<sup>st</sup> August 2013, vol. 49, N. 16
- [12] Kaushik J.K. et al., On the Origin of Kink Effect in Current-Voltage Characteristics of AlGaIn/GaN High Electron Mobility Transistors, *IEEE Trans. on Electron Devices*, Vol. 60, N. 10, Oct. 2013, 3351-3357
- [13] Angelov I. et al., On the Large-Signal modeling of AlGaIn/GaN HEMTs and SiC MESFETs, *13<sup>th</sup> GaAs Symposium – Paris 2005*, 309-312
- [14] Lu B. and Palacios T., High Breakdown (> 1500 V)) AlGaIn/GaN HEMTs by Substrate-Transfer Technology, *IEEE Electron Device Letters*, Vol. 31, N. 9, Sept. 2010, 951-953
- [15] Lin Y.S. et al., Square-Gate AlGaIn/GaN HEMT with Improved Trap-Related Characteristics, *IEEE Tr. on Electron Dev.*, Vol. 56, N. 12, Dec. 2009, 3207-3210.
- [16] Cho J. et al., Improved Thermal Interfaces of GaN-Diamond Composite Substrates for HEMT Applications, *IEEE Trans. on Comp. Pack. And Manuf. Technology*, Vol.3, 2013, 79-84
- [17] Mosbahi H. et al., Electrical Characterization of AlGaIn/GaN HEMTs on Si Substrate, *Journal of Electron Devices*, vol.15, 2012, 1225-1231

- [18] Miccoli C. et al., Trapping and Thermal Effects Analysis for AlGaIn/GaN HEMTs by Means of TCAD Simulations, *IEEE Electron Device Letters*, Vol. 34, N. 9, Sept. 2013, 1121-1381
- [19] Mimouni A. et al., Gate Leakage Current in GaN HEMT's: A Degradation Modeling Approach, *Electrical and Electronic Engineering*, 2 (6), 2012, 397-402
- [20] Yu C.H., Luo O.Z. and Liu P.S., Donor-Like Surface Traps on Two-Dimensional Electron Gas and Current Collapse of AlGaIn/GaN HEMTs, *The Scientific World Journal*, Vol. 2013, Article ID 931980
- [21] Doo S.J. et al., Effective Suppression of IV Knee Walk-Out in AlGaIn/GaN HEMTs for Pulsed-IV Pulsed-RF With a Large Signal Network Analyzer, *IEEE Microwave and Wireless Components Letters*, Vol. 16, N. 12, Dec. 2006, 681-683
- [22] Charbonniaud C. et al., Electrothermal and Trapping Effects Characterisation of AlGaIn/GaN HEMTs, *11-th GaAs Symposium* – Munich, 2003, 201-204
- [23] Mitrofanov O., Manfra M., Mechanisms of Gate Lag in GaN/AlGaIn/GaN High Electron Mobility Transistors, *Superlattices and Microstructures* 34 (2003) 33-53
- [24] Tapajna M. et al., Non-Arrhenius Degradation of AlGaIn/GaN HEMTs Grown on Bulk GaN Substrates, *IEEE Electron Device Letters*, Vol. 33, N. 8, Aug. 2012, 1126-1128
- [25] Wakejima A. et al., Evaluation of Electron Trapping Speed of AlGaIn/GaN HEMT With Real-Time Electroluminescence and Pulsed I-V Measurements, *IEEE Trans. on Electron Devices*, Vol. 60, N. 10, Oct. 2013, 3183-3189
- [26] Mitrofanov O. and Manfra M.J., Charge Trapping on Defects in AlGaIn/GaN Field Effect Transistors, *Proc. of SPIE*, Vol. 6473, 2007
- [27] Meneghesso G. et al., Trapping Phenomena in AlGaIn/GaN HEMTs: A Study Based on Pulsed and Transient Measurements, *Semiconductor Sci. Technol.*, Vol. 28, 2013, 074021
- [28] Sönmez E. et al., Gallium Nitride for 600V Operation, *Power Electronics Europe*, Is. 4, 2011, 25-28
- [29] Santarelli A. et al. Nonlinear Thermal Resistance Characterization for Compact Electrothermal GaN HEMT Modelling, *Proc. 5-th Europ. Microwave Integrated Circuits Conf.* 27 – 28 Sept. 2010, Paris France, 82-85
- [30] Chaibi M. et al., Nonlinear Modeling of Trapping and Thermal Effects on GaAs and GaN MESFET/HEMT Devices, *Progress in Electromagnetics Research*, Vol. 124, 163-186, 2012
- [31] Chen H. et al., Charge Trapping at Surface in GaN HEMTs, *CS Mantech Conference*, Apr. 14 – 17, 2008, Chicago, USA
- [32] Zhao Z. et al., Impact of Surface Traps on the Breakdown Voltage of Passivated AlGaIn/GaN HEMTs Under High-Field Stress, *Micro & Nano Letters*, Vol. 7, Iss. 11, 2012, 1140-1142
- [33] Uren M.J., Moroke J. and Kuball M., Buffer Design to Minimize Current Collapse in GaN/AlGaIn HFETs, *IEEE Trans. on Electron Devices*, Vol. 59, N. 12, Dec. 2012, 3327-3333
- [34] Charfeddine M. et al., Electrical Characterization of Traps in AlGaIn/GaN FAT-HEMT on Silicon Substrate by C-V and DLTS Measurements, *Journal of Modern Physics*, 2011, 2, 1229-1234
- [35] Hasan M. et al., Current Collapse Suppression by Gate Field-Plate in AlGaIn/GaN HEMTs, *IEEE Electron Device Letters*, Vol. 34, N. 11, Nov. 2013, 1379-1381
- [36] Mosbahi H. et al., Electron Traps Studied in AlGaIn/GaN HEMT on Si Substrate Using Capacitance Deep Level Transient Spectroscopy, *J. of Optoelectronics and Advanced Materials*, Vol.11, Nov. 2010, 2190-2193
- [37] Tirado J.M., Sanchez-Rojas J.L. and Izpura J.I., Trapping Effects in the Transient Response of AlGaIn/GaN HEMT Devices, *A Journal for Process and Device Engineers*, vol. 17, N. 3, Aug. 2007, 1-8
- [38] Binari S.C., Klein P.B. and Kazior T.E., Trapping Effects in GaN and SiC Microwave FETs, *Proc. IEEE*, vol. 90, N. 6, June 2002, 1048-1058
- [39] Dumka D.C. and Saunier P., GaN on Si HEMT with 65% power added efficiency at 10 GHz, *Electronics Letters*, 24<sup>th</sup> June 2010, vol. 46, No. 13, 946-947
- [40] Jin D., del Alamo J., Methodology for the study of Dynamic ON-Resistance in High-Voltage GaN Field-Effect Transistors, *IEEE Trans. on Electron Devices*, Vol. 60, N. 10, Oct. 2013, 3190-3196
- [41] Young C.D., et al., Pulsed  $I_D$ - $V_G$  Methodology and Its Application to Electron Trapping Characterization and Defect Density Profiling, *IEEE Tr. on Electron Dev.*, Vol. 56, N. 6, June 2009, 1322-1329
- [42] Bertulozza F. et al., Lumped Element Thermal Modeling of GaN-Based HEMTs, *Microwave Symposium Digest, IEEE MTT'09*, 7-12 June, 2009, 973-976
- [43] Wakejima A. et al., Frequency Dispersion of Drain Conductance in AlGaIn/GaN HEMT Evaluated Using Sinusoidal Wave Signal Input, *IEEE Compound Semiconductor Integrated Circuit Symp.*, Monterey, 13-16 Oct. 2013, 1-4
- [44] Caesar M. et al., Generation of Traps in AlGaIn/GaN HEMT During RF and DC Stress Test, *IEEE Intern. Reliability Physics Symp.*, Anaheim, 15-19 April 2012, pp. CD. 6.1-CD.6.5
- [45] Bisi D. et al., Deep-Level Characterization in GaN HEMTs – Part I: Advantages and Limitations of Drain Current Transient Measurements, *IEEE Trans. on Electron Devices*, Vol. 60, N. 10, Oct. 2013, 3166-3175
- [46] Tan W.S. et al., High Temperature Performance of AlGaIn/GaN HEMT's on Si Substrates, *Solid-State Electronics*, 50 (2006) 511-513
- [47] Dahmani S., Mengistu E.S. and Kompka G., Thermal Model Extraction of GaN HEMTs for Large-Signal Modeling, *3-rd European Microwave Integrated Circuits Conference*, 2008, 226-229
- [48] Berroth M. et al., Nonlinear GaN HEMT Modeling Including Thermal Effects, *2-nd Joint Symposium on Opto- and Microelectronic Devices and Circuits*, Stuttgart, March 10 – 16, 2002, 236-239
- [49] Taube A., Sochacki M., Szmidt J., Symulacje i Modelowanie Tranzystorów HEMT AlGaIn/GaN – Wpływ Przewodności Ciepłej Podłoża, *Elektronika*, Nr 9/2012, 34-37
- [50] Taube A., Sochacki M., Szmidt J., Symulacje i Modelowanie Zaawansowanych Struktur Tranzystorów HEMT AlGaIn/GaN, *Elektronika*, Nr 9/2012, 38-41
- [51] Albahrani S.A. and Parker A.E., Characterization of Trapping and Thermal Dispersion in GaN HEMTs, *IEEE MTT-S Intern. Microwave Symp.*, 23-28 May 2010, 413-416
- [52] Kikkawa T. et al., Trap Analysis of GaN-Insulated-Gate-HEMT for High Reliability, *CS MANTECH Conference*, May 14-17, 2007, Austin, Texas, 91-94
- [53] Kumar N. et al., Electrostatic Mechanisms Responsible for Device Degradation in AlGaIn/GaN HEMTs, *Intern. J. of Wireless Communication and Networking Technologies*, Vol. 2, N. 3, April 2013, 28-31
- [54] Liu Y., Reese E., AlGaIn/GaN HEMT Large Signal Nonlinear Compact Model Accounting for Thermal Effects and Trapping Dispersion, *IEEE Compound Semiconductor Integrated Circuit Symposium*, Monterey, 13-16 Oct. 2013, 1-5
- [55] Lagger P. et al., Very Fast Dynamics of Threshold Voltage Drifts in GaN-Based MIS-HEMTs, *IEEE Electron Device Letters*, Vol. 34, N. 9, Sept. 2013, 1112-1114
- [56] Defrance N. et al., Thermal resistance of AlGaIn/GaN HEMTs on SopSiC composite substrate, *Electronics Letters*, 24<sup>th</sup> June 2010, vol. 46, No. 13, 949-950
- [57] Soci F., Chini A., Influence of Device Self-Heating on Trap Activation Energy Extraction, *IEEE International Reliability Physics Symposium*, 14-18 April 2013, 3C.6.1-3C.6.6
- [58] Albahrani S., Rathmel J.G. and Parker A.E., Characterizing Drain Current Dispersion in GaN HEMT's with a New Trap Model, *Proc. of 39<sup>th</sup> European Microwave Conference*, Rome, 30 Sept. – 1 Oct. 2009, 1692-1695
- [59] Rathmel J., Parker A.E., Circuit Implementation of a Theoretical Model of Trap Centers in GaAs and GaN Devices, *Proc. of SPIE*, Vol. 6798 (2007)
- [60] Rathmel J.G., Parker A.E., Characterization and Modeling of Substrate Trapping in HEMTs, *2-nd European Microwave Integrated Circuits Conference*, 2007, 64-67
- [61] Faqir M. et al., Characterization and Analysis of Trap-Related Effects in AlGaIn/GaN HEMT, *Microelectronics Reliability*, 47 (2007) 1639-1642
- [62] Zhang W. et al., Influence of the Interface Acceptor-Like Traps on the Transient Response of AlGaIn/GaN HEMTs, *IEEE Electron Device Letters*, Vol. 34, N. 1, Jan. 2013, 45-47
- [63] Jarndal A., Bunz B. and Kompka G., Accurate Large-Signal Modeling of AlGaIn-GaN HEMT Including Trapping and Self-Heating Induced Dispersion, *Proc. 18<sup>th</sup> Int. Symposium on Power Semiconductor Devices & IC's*, June 4–8, 2006, Naples, Italy
- [64] Oprins H. et al., Thermal Modeling of Multi-Finger AlGaIn/GaN HEMT, *Therminic Conf.*, Belgirate, Italy, Sept. 28 – 30, 2005



- [65] Anderson T.J. et al., Profiling the Temperature Distribution in AlGaIn/GaN HEMT with Nanocrystalline Diamond Heat Spreading Layers, *CS MANTECH Conference*, Apr. 23 – 26, 2012, Boston, USA
- [66] Bernardoni M., Delmonte N., Menozzi R., Empirical and Physical Modeling of Self-Heating in Power AlGaIn/GaN HEMT, *CS MANTECH Conference*, Apr. 23 – 26, 2012, Boston, USA
- [67] Nochetto H.C., Jankowski N.R., A. Bar-Cohen, The Impact of GaN/Substrate Thermal Boundary Resistance on a HEMT Device, *Proc. ASME IMECE 2011*, Nov. 11 -17, 2011, Denver, USA
- [68] Vitanov S. et al., High-Temperature Modeling of AlGaIn/GaN HEMTs, *Solid-State Electronics*, vol.54 (2010), 1105-1112
- [69] Stuchlikova L. et al., Electrical Characterization of the InAlN/GaN Heterostructures by Capacitance Methods, *The 9<sup>th</sup> Intern. Conf. on Advanced Semiconductor Devices and Microsystems*, Nov. 11-15, 2012, Smolenice, 51-54
- [70] Joh J. and del Alamo J.A., Impact of Electrical Degradation on Trapping Characteristics of GaN High Electron Mobility Transistors, *IEEE Intern. Electron Devices Meeting*, San Francisco, 15-17 Dec. 2008, 1-4
- [71] Joh J. and del Alamo J.A., A Current-Transient Methodology for Trap Analysis for GaN High Electron Mobility Transistors, *IEEE Trans. on Electron Devices*, vol. 58, N. 1, Jan. 2011, 132-140
- [72] Fieger M., Technology and Characterization of GaN-based Heterostructure Field Effect Transistors (HFETs), PhD Dissertation, Technischen Hochschule Aachen, 2010
- [73] Macfarlane D.J., Design and fabrication of AlGaIn/GaN HEMTs with high breakdown voltages, PhD Dissertation, School of Engineering, University of Glasgow, 2014
- [74] Dahmani S., Large-Size AlGaIn/GaN HEMT Large-Signal Electrothermal Characterization and Modeling for Wireless Digital Communications, PhD Dissertation, University of Kassel, 2011
- [75] Lenka T.R. and Panda A.K., Effect of Structural parameters on 2DEG density and C-V characteristics of Al<sub>x</sub>Ga<sub>1-x</sub>N/AlN/GaN-based HEMT, *Indian Journal of Pure and Applied Physics*, vol. 49, June 2011, 416-422
- [76] Kalavagunta A., Understanding the Impact of Bulk Traps on GaN HEMT DC and RF Characteristics, PhD Dissertation, Vanderbilt University, 2009
- [77] Fornetti F., Characterisation and Performance Optimisation of GaN HEMTs and Amplifiers for Radar Applications, PhD Dissertation, University of Bristol, 2010
- [78] Jarndal A., Bunz B. and Kompa G., Accurate Large-Signal Modeling of AlGaIn-GaN HEMT Including Trapping and Self-Heating Induced Dispersion, *Proc. of the 18<sup>th</sup> Int. Symp. on Power Semiconductor Devices & IC's* June 4-8, 2006 Naples, Italy
- [79] Jardel O. et al., A new nonlinear HEMT model for AlGaIn/GaN switch applications, *Proc. of the 4<sup>th</sup> European Microwave Integrated Circuits Conference*, Sept. 2009, Roma, Italy, 73-76
- [80] Zhang N., High voltage GaN HEMTs with low on-resistance for switching applications, PhD. Dissertation, University of California, Santa Barbara, 2002
- [81] Meyer D.J., Surface Passivation Studies of AlGaIn/GaN High Electron Mobility Transistors, PhD. Dissertation, The Pennsylvania State University, 2008
- [82] Visalli D., Optimization of GaN-on-Si HEMTs for High Voltage Applications, PhD. Dissertation, Katholieke Universiteit Leuven, 2011
- [83] Perez J.A.F., Thermal Study of a GaN-Based HEMT, PhD. Dissertation, University of Notre Dame Indiana, 2012
- [84] Paskova T., Hanser D.A. and Evans K.R., GaN Substrates for III-Nitride Devices, *Proc. of IEEE*, vol. 98, N. 7, July 2010, 1324-1338
- [85] Hashimoto T., Letts E. and Hoff S., Current Status and Future Prospects of Ammonothermal Bulk GaN Growth, *Sensors and Materials*, vol. 25, N.3 (2013), 155-164
- [86] Komiak J.J., GaN HEMT, *IEEE Microwave Magazin*, April 2015, 97-105
- [87] GaN Transistors for Efficient Power Conversion, WILEY, 2015

---

**Autorzy:** prof. dr hab. inż. Włodzimierz Janke, Politechnika Koszalińska, Wydział Elektroniki i Informatyki, ul. Śniadeckich 2, 75-453 Koszalin, E-mail: [Wlodzimierz.Janke@tu.koszalin.pl](mailto:Wlodzimierz.Janke@tu.koszalin.pl); dr hab. inż. Wojciech Wojtasiak, Politechnika Warszawska, Instytut Radioelektroniki, ul. Nowowiejska 15/19, 00-665 Warszawa, [wojtas@ire.pw.edu.pl](mailto:wojtas@ire.pw.edu.pl).