

Włodzimierz Janke
Katedra Elektroniki
Politechnika Koszalińska

Zastosowanie tranzystorów HEMT z azotku galu w impulsowych przekształtnikach mocy

Słowa kluczowe: Azotek galu, GaN, Tranzystory HEMT,
Impulsowe przekształtniki mocy

1. Wstęp

Niniejsze opracowanie jest poświęcone perspektywom zastosowań heterozłączowych tranzystorów HEMT z azotku galu GaN w impulsowych układach do przetwarzania mocy elektrycznej. Tranzystory te są obecnie uważane za najlepsze półprzewodnikowe elementy aktywne do przetwarzania sygnałów wielkiej częstotliwości i dużej mocy. Pierwsze wykonanie laboratoryjne tranzystora HEMT GaN pojawiło się w roku 1993; produkcja przemysłowa tych tranzystorów trwa ponad dziesięć lat. Pierwszym i do dziś najważniejszym obszarem zastosowań tranzystorów HEMT są mikrofalowe urządzenia nadawcze, zwłaszcza wzmacniacze mocy o częstotliwościach pracy z zakresu gigaherców. W ostatnich latach, coraz ważniejszą grupą zastosowań tych elementów stają się impulsowe przekształtniki mocy. Wymagania stawiane elementom aktywnym w tych dwóch grupach zastosowań są nieco inne. Tranzystory w układach mikrofalowych są zwykle wykorzystywane do wzmacniania sygnałów o bardzo szerokim zakresie częstotliwości (gigaherce). Tranzystory w przekształtnikach mocy pracują jako przełączniki, muszą być zdolne do przewodzenia dużych prądów w stanie włączenia i wytrzymywania dużych napięć w stanie wyłączenia. Różne są też wymagania związane z charakterem rynku. Przekształtniki energoelektroniczne są stosowane masowo i ich elementy powinny być tanie; rynek urządzeń mikrofalowych jest o wiele węższy. Zasada pracy tranzystorów przeznaczonych do obu grup zastosowań jest ta sama ale szczegóły konstrukcji muszą być odmienne.

Optymistyczne prognozy dotyczące możliwych zastosowań tranzystorów GaN HEMT w przekształtnikach mocy pojawiają się w literaturze od blisko dziesięciu lat. Można też znaleźć coraz więcej doniesień o opracowaniach laboratoryjnych specjalnych modeli tranzystorów HEMT dla energoelektroniki i o wykonywaniu prototypowych układów przekształtników z takimi tranzystorami. W ciągu ostatnich

kilku lat, niektóre firmy wprowadziły na rynek pierwsze typy tranzystorów GaN HEMT dostosowane do przetwórców energoelektronicznych.

Literatura poświęcona problematyce tranzystorów HEMT jest niezwykle obfita. Prace przeglądowe [1]–[5] zawierają obszerne wykazy źródeł bibliograficznych. Niektóre publikacje poruszają ogólnie tematykę zastosowań tych tranzystorów w przetwórcach mocy [6], inne dotyczą na przykład modelowania tranzystorów HEMT dla potrzeb symulacji i projektowania układów energoelektronicznych [7].

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. Wiąże się to ze skomplikowaną budową tranzystorów HEMT oraz specyficznymi właściwościami monokrystalicznego azotku galu, materiału niezwykle odpornego na działanie czynników chemicznych, termicznych i mechanicznych. Istnieje zatem szeroki margines możliwych ulepszeń, które stanowią cel bardzo intensywnych badań prowadzonych w wielu ośrodkach. Jednym z czynników wspomagających rozwój trudnej technologii elementów azotkowych jest ogromny rynek na półprzewodnikowe elementy oświetleniowe i szybki wzrost produkcji diod świecących na bazie GaN, wyprzedzający nieco rozwój produkcji tranzystorów z tego materiału.

2. Wymagania stawiane elementom półprzewodnikowym w układach przetwórców mocy

Przetwórcy mocy elektrycznej oparte na elementach półprzewodnikowych stanowią ważną, obszerną i szybko rozwijającą się grupę urządzeń elektronicznych. Ciągłe rośnie liczba i zwiększa się zróżnicowanie właściwości urządzeń zasilanych energią elektryczną. Z drugiej strony, konieczność ograniczenia emisji gazów powstających w trakcie działania tradycyjnych elektrowni opartych na spalaniu węgla lub innych paliw prowadzi do szybkiego rozwoju alternatywnych źródeł energii (wiatraki, panele fotowoltaiczne, ogniwa paliwowe itp.). Z tych powodów ciągle rośnie zapotrzebowanie na różne typy przetwórców energoelektronicznych, których zadaniem jest dostosowanie wartości i kształtu przebiegów prądów i napięć otrzymywanych ze źródeł energii elektrycznej do wymagań odbiorników. Potrzeba przy tym aby przetwórcy mocy elektrycznej posiadały jak największą sprawność energetyczną (czyli minimalne straty własne) i miały możliwie małe rozmiary i ciężar.

Najważniejsze grupy współczesnych przetwórców mocy stanowią przetwórcy AC-DC czyli prostowniki (z reguły wyposażone w korektory współczynnika mocy PFC), przetwórcy DC-AC nazywane najczęściej inwerterami lub falownikami oraz przetwornice napięcia stałego (przetwórcy DC-DC). Zdecydowana większość współczesnych przetwórców pracuje w trybie impulsowym, najczęściej z modulacją szerokości impulsów (pulse-width

modulation – PWM). Odrębną grupę układów stanowią wzmacniacze mocy, w szczególności wzmacniacze klas D, E i F. Elementy półprzewodnikowe stosowane w takich przekształtnikach spełniają funkcje przełączników, czyli zmieniają swój stan między przewodzeniem (stan bliski zwarcia, określony zwykle jako stan ON) i nieprzewodzeniem (stan bliski rozwarcia określany zwykle jako stan OFF) z dużą częstotliwością. Stosowane częstotliwości przełączeń mają związek z wymaganymi parametrami elementów inercyjnych (cewki indukcyjne, transformatory, kondensatory). Stosując większe częstotliwości przełączania można używać cewek o mniejszych indukcyjnościach i kondensatorów o mniejszych pojemnościach, a w konsekwencji – o mniejszej masie i mniejszych gabarytach.

Od elementów półprzewodnikowych w układach przekształtników wymaga się zatem aby charakteryzowały się możliwie małym spadkiem napięcia (lub małą rezystancją) w stanie ON, wytrzymywaniem dużych napięć w stanie OFF i małymi wartościami czasów przełączania przy przejściach ON-OFF i OFF-ON. Najważniejszą grupę elementów półprzewodnikowych w układach przekształtników mocy stanowią tranzystory; współcześnie są to tranzystory polowe MOSFET (rzadziej JFET), a także tranzystory IGBT. Oprócz tego stosuje się szeroko diody ze złączem p-n lub m-s (metal-półprzewodnik), chociaż w wielu zastosowaniach są one zastępowane przez tranzystory. Na rynku dominują zdecydowanie tranzystory i diody wykonywane z krzemu. Od kilku lat rozwija się też produkcja tranzystorów i diod z węgla krzemu o lepszych parametrach i znacznie wyższych cenach. Do przetwarzania bardzo dużych mocy stosuje się także tyrystory. Dalsze rozważania tego rozdziału odnoszą się jedynie do tranzystorów polowych. Podstawowymi parametrami tranzystorów w układach przekształtników są: rezystancja w stanie włączenia $R_{DS(on)}$, napięcie przebicia V_{BR} między końcówkami drenu i źródła w stanie OFF oraz pojemności – wejściowa C_{GS} (między bramką i źródłem) oraz wyjściowa C_{DS} (między drenem i źródłem). Rezystancja $R_{DS(on)}$ decyduje o spadku napięcia przy danej wartości prądu płynącego między końcówkami głównymi tranzystora (czyli prądu drenu) i w konsekwencji – o stratach mocy w stanie przewodzenia. Pojemności C_{GS} i C_{DS} decydują o czasach przełączania tranzystora między stanami ON i OFF i w konsekwencji – o możliwej częstotliwości przełączania przekształtnika. Z napięciem V_{BR} wiąże się dopuszczalna wartość napięcia między drenem i źródłem. Napięcie V_{BR} powinno być jak największe a rezystancja $R_{DS(on)}$ i pojemności C_{GS} i C_{DS} – jak najmniejsze.

Wymienione wyżej parametry tranzystorów zależą od sposobu działania elementu, rozmiarów i kształtu poszczególnych warstw, rozkładów koncentracji domieszek, technologii wytwarzania oraz od parametrów fizycznych zastosowanych materiałów. Rezystancja $R_{DS(on)}$ jest tym mniejsza im większą gęstość prądu można uzyskać w obszarze przewodzenia przy danym napięciu między brzegami tego obszaru, a to wymaga dużych koncentracji i ruchliwości nośników większościowych. Koncentracja nośników w jednorodnej warstwie półprzewodnika w typowych

warunkach jest równa koncentracji odpowiednich domieszek. Napięcie przebicia struktury półprzewodnikowej zależy od krytycznej wartości E_B natężenia pola użytego półprzewodnika oraz rozmiarów struktury i koncentracji domieszek. Pojemności C_{GS} i C_{DS} są proporcjonalne do powierzchni odpowiednich złącz. Pogodzenie wymienionych wyżej wymagań przez dobór sposobu wykonania i rozmiarów struktury tranzystora możliwe jest tylko w części, gdyż przykładowo, stosowanie większej koncentracji domieszek (w typowym rozwiązaniu konstrukcyjnym) pozwala na zmniejszenie rezystancji R_{DSON} ale skutkuje także mniejszymi wartościami napięcia przebicia. W efekcie, w grupie tranzystorów o tej samej zasadzie działania, wykonywanych z tego samego materiału (np. krzemowe tranzystory MOSFET), tranzystory o większych napięciach przebicia mają także większe wartości rezystancji R_{DSON} . Związek rezystancji R_{DSON} z napięciem przebicia zależy przy tym od krytycznej wartości natężenia pola E_B danego półprzewodnika. Uproszczony opis związku rezystancji R_{DSON} warstwy półprzewodnika o grubości d i powierzchni przekroju S z napięciem przebicia V_{BR} tej warstwy i krytycznym polem E_B został podany w pracach Baligi [8],[9] i ma postać:

$$R_{ON} = \frac{4V_{BR}^2}{S \cdot \mu \cdot \epsilon_0 \cdot \epsilon_w \cdot E_B^3} \quad (1)$$

gdzie ϵ_0 i ϵ_w oznaczają stałą dielektryczną próżni oraz względną stałą dielektryczną danego półprzewodnika, μ – ruchliwość nośników. Wzór powyższy został wyprowadzony przy założeniu, że w stanie przewodzenia, koncentracja nośników w warstwie jest równa koncentracji domieszek zaś w stanie nieprzewodzenia ta sama koncentracja domieszek decyduje o gęstości ładunku w warstwie opróżnionej z nośników. Wzór ten wskazuje więc (choć tylko w sposób orientacyjny) na bardzo ważną rolę krytycznego natężenia pola E_B danego półprzewodnika. Zastosowanie elementu z materiału o większej wartości krytycznej E_B , daje możliwość uzyskania znacznie mniejszej rezystancji warstwy przewodzącej przy tym samym napięciu przebicia.

Jeden z możliwych podziałów tranzystorów polowych używanych w przekształtnikach mocy w charakterze przełączników sterowanych to podział na dwie grupy: tranzystory normalnie załączone (inne nazwy: pracujące ze zubożaniem, normally-ON, depletion mode, D-mode) oraz tranzystory normalnie wyłączone (pracujące ze wzbogacaniem, normally-OFF, enhancement mode, E-mode). Znacznie korzystniejsze jest stosowanie tranzystorów normalnie wyłączonych, gdyż w stanie „spoczynkowym” nie występują w nich (i w sąsiednich elementach) straty mocy, a układy sterowania bramki są prostsze niż w przypadku tranzystorów normalnie załączonych.

Poza podstawowymi właściwościami elektrycznymi tranzystorów stosowanych jako przełączniki w układach przetwarzania mocy, istotne są ich właściwości

cieplne i niezawodnościowe. Do właściwości cieplnych należy zaliczyć wpływ temperatury na parametry elektryczne na przykład na rezystancję $R_{\text{DS(on)}}$, dopuszczalną temperaturę pracy elementu a ponadto – zależność temperatury wnętrza elementu od traconej w nim mocy elektrycznej scharakteryzowaną przez jego rezystancję termiczną.

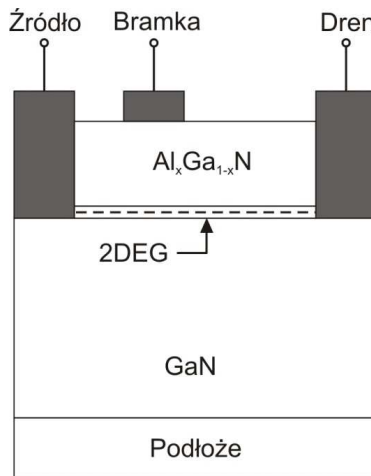
O dopuszczalnej temperaturze pracy elementu półprzewodnikowego decydują dwie grupy zjawisk. Jedną stanowią procesy generacji termicznej par elektron-dziura, z powodu których koncentracja nośników określana jako samoistna bardzo szybko rośnie z temperaturą. Temperatura przejścia warstwy półprzewodnikowej w stan samoistny, w którym koncentracja nośników generowanych termicznie zrównuje się z koncentracją domieszek ma sens temperatury granicznej, gdyż złącza półprzewodnikowe tracą wtedy właściwości prostujące. Ta temperatura graniczna silnie zależy od szerokości pasma energii zabronionych półprzewodnika i od koncentracji domieszek w poszczególnych warstwach struktury. Drugą grupę zjawisk stanowią różnego typu procesy degradacyjne związane głównie z defektami w strukturze elementu. Intensywność tych procesów, zgodnie z prawem Arrhenniusa zależy bardzo silnie od temperatury. Jako temperaturę graniczną przyjmuje się wartość temperatury, której przekroczenie powoduje, że intensywność uszkodzeń partii elementów danego typu staje się nieakceptowalnie duża. We współcześnie wytwarzanych elementach energoelektronicznych z krzemu, węgla krzemu i azotku galu, temperatura graniczna związana z procesami degradacyjnymi jest wyraźnie niższa od temperatury związanej z przejściem półprzewodnika w stan samoistny. Temperatura dopuszczalna podawana przez producentów wśród danych technicznych współczesnych tranzystorów jest więc uwarunkowana poziomem dopuszczalnej intensywności uszkodzeń. Z przytoczonych rozważań wynika ponadto, że jednym z istotnych kryteriów przy porównywaniu różnych odmian elementów półprzewodnikowych jest gęstość defektów w strukturze elementu decydująca o intensywności uszkodzeń danej partii elementów. Koncentracja defektów zależy od cech materiału, różnic w parametrach fizycznych między sąsiadującymi warstwami, a także od dojrzałości procesów wytwarzania danego typu elementu czyli od jakości stosowanych procesów i urządzeń technologicznych.

Całkowita rezystancja termiczna elementu, umieszczonego (zazwyczaj) na radiatorze, zależy od rezystancji termicznej własnej elementu, (określanej jako rezystancja $R_{\text{thj-c}}$ – junction-to-case) i od rezystancji termicznej zastosowanego radiatora. O rezystancji $R_{\text{thj-c}}$ decyduje konstrukcja obudowy i sposób połączenia z nią struktury półprzewodnikowej. Rozmiary i konduktywność cieplna zastosowanego materiału półprzewodnikowego wpływają nieznacznie na rezystancję termiczną, gdyż warstwa półprzewodnika stanowi niewielką część drogi, jaką przepływa ciepło od miejsca generacji do otoczenia.

3. Podstawowe właściwości tranzystorów HEMT z azotku galu

3.1. Specyfika tranzystorów HEMT

Tranzystory HEMT są tranzystorami polowymi złączowymi z kanałem n. Podstawową wersję konstrukcyjną tranzystorów HEMT stanowią tranzystory normalnie załączone umożliwiające przewodzenie prądu drenu przy braku polaryzacji bramki. Specyfika budowy tranzystora HEMT polega na wykorzystaniu heterozłącza (stąd inna nazwa: HFET – heterojunction field effect transistor). W tranzystorach HEMT omawianych w tym opracowaniu jest to złącze AlGa_xN-GaN. Poprzednia, szeroko stosowana wersja tranzystorów HEMT wykorzystywała arsenek galu GaAs jako materiał podstawowy. Zasadę konstrukcji struktury półprzewodnikowej tranzystora HEMT z heterozłączem AlGa_xN-GaN, uwzględniającą tylko główne warstwy, pokazano na rysunku 1.

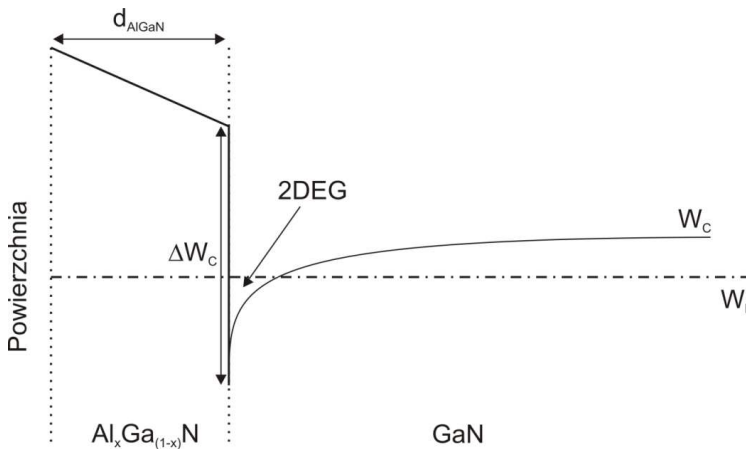


Rys. 1. Zasada konstrukcji tranzystora HEMT

Rzeczywiste układy warstw są bardziej złożone i mogą być zróżnicowane. Budowa i właściwości tranzystorów HEMT na bazie GaN są opisane w wielu źródłach literaturowych wymienionych między innymi w pracach przeglądowych [1] – [5].

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). Symbol W_C na rysunku oznacza poziom dna pasma przewodnictwa a W_F – poziom Fermiego. Możliwości ruchu elektronów o energiach odpowiadających tej studni, czyli leżących powyżej dna pasma przewodnictwa i poniżej poziomu Fermiego, 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). Kształt i głębokość studni potencjału w heterozłączu zależą w sposób skomplikowany od parametrów materiałowych i geometrycznych, między innymi od grubości warstw przyłączowych oraz od parametru x w związku $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}$. 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.



Rys. 2. Przebieg dna pasma przewodnictwa w rejonie heterozłącza

3.2. Właściwości azotku galu GaN

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 krzemem i arsenkiem galu, azotek galu ma wyraźnie większą szerokość pasma energii zabronionych (przerwę energetyczną) W_E i krytyczną wartość natężenia pola elektrycznego E_B , co pozwala na konstrukcję elementów o większych napięciach przebicia niż elementy z Si i GaAs.

Tab. 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 μ (cm ² /V s)	1350	8000	800	1300
Prędkość nasycenia v_s (10 ⁷ cm/s)	1.0	2.0	2.0	3.0
Konduktywność cieplna χ (W/cm K)	1.5	0.5	4.9	1.3
Stała dielektryczna ϵ	11.8	12.8	9.7	9.0

Inna, bardzo ważna zaleta azotku galu GaN i azotku glinowo-galowego AlGaN wiąże się z polaryzacją spontaniczną i piezoelektryczną, która występuje w tych materiałach. W szczególności, składnik polaryzacji piezoelektrycznej występuje w wyniku naprężeń pojawiających się w heterozłączu na granicy GaN i AlGaN. 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 przyłączeniowych. Koncentracja n_s jest powiązana z głębokością studni potencjału w heterozłączu, pokazanej na rysunku 2 i zależy od parametrów warstwy $Al_xGa_{1-x}N$: jej grubości d oraz czynnika x . Według oszacowań literaturowych, dla odpowiednio dobranych d i x otrzymuje się wartości n_s przekraczające 10^{13} cm⁻², kilkakrotnie większe niż możliwe do uzyskania na przykład w heterozłączu AlGaAs-GaAs [1]. W związku z tym, osiągalne gęstości prądu w tranzystorach HEMT na bazie azotku galu są kilkakrotnie większe niż w tranzystorach heterozłączowych z GaAs i większe niż w kanale tranzystorów MOSFET z krzemu lub węgliku krzemu. W połączeniu z dużymi dopuszczalnymi natężeniami pola w GaN, gęstości mocy w tranzystorach z heterozłączem AlGaN-GaN mogą być o rząd większe niż w tranzystorach na bazie krzemu czy arsenku galu. Ma to ogromne znaczenie zwłaszcza w zastosowaniach do szybkiego przetwarzania mocy. Pojemności w strukturze tranzystorów z GaN mogą mieć wartości podobne (lub nawet nieco mniejsze) jak pojemności w tranzystorach z innych typów materiałów (np. Si) o podobnych rozmiarach struktury półprzewodnikowej. Tranzystory z azotku galu, przy podobnych szybkościach pracy jak tranzystory krzemowe, pozwalają na

przetwarzanie znacznie większych mocy, lub mogą przetwarzać te same moce z kilkakrotnie większymi częstotliwościami przełączania.

Możliwość uzyskiwania bardzo dużych gęstości prądu pozwala na otrzymanie bardzo małych rezystancji w stanie przewodzenia $R_{\text{DS(on)}}$. Szacunkowe porównanie możliwych do uzyskania rezystancji $R_{\text{DS(on)}}$ tranzystorów z krzemu i azotku galu na podstawie wzoru (1), przy uwzględnieniu danych z tabeli 1 wskazywałoby, że wartości $R_{\text{DS(on)}}$ w elemencie z azotku galu mogą być ponad 2000 razy mniejsze niż w elemencie krzemowym o tych samych rozmiarach i napięciu przebicia. Należy jednak zauważyć, że ukształtowanie kanału przewodzącego zarówno w tranzystorze MOS (krzemowym) jak i HEMT, nie odpowiada warunkom, dla których wyprowadzono wzór (1), a koncentracja nośników w kanale przewodzącym obu typów tranzystorów nie jest równa koncentracji domieszek w obszarze przewodzenia.

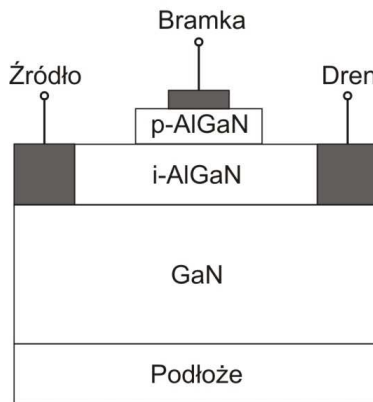
4. Specyfika budowy i właściwości tranzystorów GaN HEMT dla energoelektroniki

Próby zastosowań tranzystorów GaN HEMT w impulsowych przekształtnikach mocy zostały podjęte kilka lat później niż w układach mikrofalowych. Elementy te w obu grupach zastosowań stwarzają możliwość szybkiego przetwarzania dużych gęstości mocy, lecz szczegółowe wymagania związane z tymi dwiema grupami są odmienne. Konsekwencją wymagań, które dotyczą tranzystorów dla energoelektroniki, omówionych w rozdziale 2, jest opracowywanie specjalnych konstrukcji tranzystorów GaN HEMT do zastosowań w przekształtnikach mocy [10] – [18].

4.1. Wytwarzanie tranzystorów normalnie wyłączonych

Jak wspomniano w poprzednich rozdziałach, podstawową odmianę konstrukcyjną tranzystora HEMT na bazie azotku galu stanowi tranzystor normalnie załączony, co nie jest wygodne do zastosowań w przekształtnikach mocy. Układy przekształtników z tranzystorami normalnie załączonymi są spotykane rzadko. Opracowywane obecnie rozwiązania opierają się na wykorzystaniu odpowiednich modyfikacji tranzystorów HEMT pracujących jako tranzystory normalnie wyłączone i można je podzielić na dwie główne grupy. Pierwszą stanowią pojedyncze tranzystory z heterozłącem AlGaIn-GaN, które w wyniku specjalnych zabiegów technologicznych mają cechy tranzystorów normalnie wyłączonych. Drugą grupę stanowią elementy złożone, dwutranzystorowe, z których jeden jest „zwykłym” tranzystorem HEMT normalnie załączonym a drugi jest krzemowym tranzystorem MOS, normalnie wyłączonym. Obie grupy rozwiązań są rozwijane obecnie w laboratoriach firm elektronicznych (np. Panasonic, EPC, Transphorm, Rfmd) i wdrażane do produkcji. Trudno w tej chwili przewidzieć, czy któraś z tych grup ostatecznie zdominuje rynek, czy będą produkowane równolegle [19] – [24].

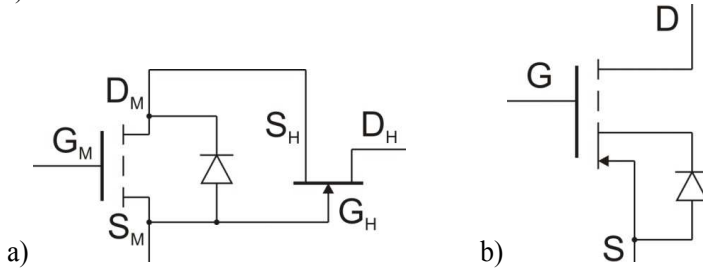
Najważniejszą odmianę w obrębie pierwszej grupy stanowią tranzystory określane jako GIT-GaN, gdzie skrót GIT oznacza gate injection transistor, czyli tranzystor w którym następuje wprowadzanie nośników z warstwy bramki do kanału [21], [23]. Zasadę budowy tranzystora GIT-GaN przedstawia rysunek 3. Podstawowa różnica między tym tranzystorem a typowym tranzystorem HEMT normalnie załączonym polega na tym, że w tranzystorze GIT-GaN, pod metalową elektrodą bramki wytwarza się warstwę azotku glinowo-galowego AlGaN o przewodnictwie typu p (czyli powstaje ona przez domieszkowanie akceptorami). Ta warstwa tworzy złącze p-n lub p-i z warstwą AlGaN typu n lub typu i. Przy braku polaryzacji bramki, po stronie i-AlGaN powstaje warstwa opróżniona z nośników swobodnych, czyli w tej sytuacji nie ma kanału przewodzącego. Dopiero dodatnie napięcie bramki o wartości przekraczającej napięcie progowe powoduje przewodzącą polaryzację złącza, wprowadzanie nośników i indukowanie kanału przewodzącego. Wadą tego rozwiązania jest przepływ prądu między bramką i kanałem przy dodatniej polaryzacji, jednak prąd ten może być wielokrotnie mniejszy niż prąd główny elementu, płynący między końcówkami drenu i źródła. W literaturze można znaleźć doniesienia o wykonaniach komercyjnych i praktycznych zastosowaniach tranzystorów GIT-GaN w układach przekształtników [19], [20].



Rys. 3. Zasada konstrukcji tranzystora GIT-GaN

Wśród innych rozwiązań heterozłączowych tranzystorów GaN normalnie wyłączonych można wymienić tranzystory z zagłębioną bramką (recess gate) lub rozwiązania z odpowiednio dobraną grubością lub domieszkowaniem warstwy AlGaN tak, aby dno studni potencjału pokazane na rysunku 2 znalazło się powyżej poziomu Fermiego. W takich rozwiązaniach, przy braku polaryzacji bramki nie tworzy się dwuwymiarowy gaz elektronowy, czyli nie powstaje kanał przewodzący.

Kanał może dopiero zostać zaindukowany po przyłożeniu do bramki odpowiedniego (dodatniego) napięcia. Wadą omówionych wyżej rozwiązań jest zazwyczaj mała wartość otrzymywanego napięcia progowego i znaczna wrażliwość tej wartości na szczegóły realizacji procesu technologicznego, a także mały zakres napięć bramka-źródło odpowiadający pracy w stanie przewodzenia (bez obawy przeciążenia elementu).



Rys. 4. Normalnie wyłączony tranzystor HEMT w formie połączenia kaskodowego SiMOS-DHEMT: a) połączenia wewnętrzne, b) symbol elementu złożonego

Wygodnym sposobem realizacji elementu o cechach tranzystora HEMT normalnie wyłączonego jest połączenie dwutranzystorowe przedstawione schematycznie na rysunku 4. W takim połączeniu, poza zwykłym tranzystorem HEMT z GaN, normalnie załączonym, występuje krzemowy tranzystor MOSFET normalnie wyłączony z kanałem n. Symbol zastępczy elementu pokazany na rysunku 4b) nie oddaje jego połączeń wewnętrznych, gdyż sugeruje, że dioda wsteczna występująca normalnie w tranzystorze MOS, ma zwarte końcówki. Rolę zewnętrznych końcówek bramki i źródła elementu złożonego odgrywają odpowiednie końcówki tranzystora MOS. Element przewodzi tylko wtedy, gdy napięcie między końcówkami bramki i źródła przekracza wartość progową (typowo 2 – 3 V). Możliwe jest przewodzenie w kierunku normalnym (gdy $V_{DS} > 0$) i odwrotnym (gdy $V_{DS} < 0$). W warunkach normalnego przewodzenia, prąd płynie od końcówki D (dren tranzystora HEMT) przez źródło tranzystora HEMT połączone z drenem tranzystora MOS, do źródła tranzystora MOS (końcówka zewnętrzna S). Wypadkowa rezystancja elementu złożonego w stanie ON wynosi:

$$R_{ON} = R_{ON}(MOS) + R_{ON}(HEMT) \quad (2)$$

Tranzystor MOS w tym połączeniu nie musi wytrzymywać dużych napięć, a to oznacza (w świetle uwag związanych z wzorem (1) w rozdziale 2), że składnik $R_{ON}(MOS)$ może być bardzo mały i ma niewielki wpływ na wypadkową rezystancję R_{ON} . Napięcie przebicia struktury złożonej jest napięciem przebicia tranzystora HEMT i może być bardzo duże. W strukturze elementu złożonego, poza tranzystorami GaN HEMT i Si MOS może być zastosowana dioda Schottky’ego

z węgliku krzemu włączona „antyrównoległe” [22]. Umożliwia ona skrócenie czasów przełączania elementu.

4.2. Wybrane problemy konstrukcyjno-technologiczne

Konstrukcja i technologia wytwarzania tranzystorów powinny zapewniać jak najlepsze parametry w danej grupie zastosowań, czyli eliminację lub ograniczenie rozmaitych efektów pasożytniczych. Wybór rozwiązań konstrukcyjno-technologicznych powinien też zapewnić możliwie niskie ceny elementów przy produkcji masowej. Należy rozważyć osobno konstrukcję samej struktury półprzewodnikowej oraz konstrukcję obudowy i połączeń struktury z wyprowadzeniami zewnętrznymi [25].

W strukturach tranzystorów HEMT występuje wiele zjawisk niepożądanych, z powodu których niektóre parametry użytkowe nie osiągają wartości przewidywanych teoretycznie na podstawie cech materiału i zasady działania elementu. Efektem niepożądanym w mikrofalowych tranzystorach HEMT z azotku galu jest poświęcona bardzo bogata literatura, część zawartych tam rozważań można odnieść także do tranzystorów HEMT przeznaczonych do przekształtników energoelektronicznych. Często wymienianym efektem pasożytniczym jest „current collapse” opisywany w wielu pozycjach wymienionych w przeglądzie [5]. W tranzystorach przeznaczonych do przekształtników energoelektronicznych przejawia się on w postaci dynamicznych zmian rezystancji R_{ON} po przełączeniu tranzystora ze stanu nieprzewodzenia (OFF) do przewodzenia (ON). Napięcie V_{DS} w stanie OFF może wynosić kilkaset woltów i w rejonie kanału występuje silne pole elektryczne, co powoduje zajmowanie przez elektrony poziomów pułapkowych (powstających w wyniku defektów). Ładunek tych elektronów zakłóca przepływ prądu po przełączeniu do stanu ON, co przejawia się w zwiększonej wartości chwilowej rezystancji R_{ON} . Stopniowe uwalnianie elektronów z pułapek powoduje dynamiczne zmniejszanie rezystancji R_{ON} w trakcie fazy ON, aż do następnego przełączenia. Minimalizacja zmian rezystancji R_{ON} związanych z efektem „current collapse” wymaga ograniczenia koncentracji defektów stanowiących pułapki dla elektronów [26], [27]. Zabiegi, które to zapewniają obejmują przede wszystkim pasywację powierzchni struktury półprzewodnikowej w rejonie między bramką i drenem. W opracowaniu firmy Panasonic [24] stwierdzono, że zastosowane przez firmę zabiegi technologiczne pozwoliły na eliminację efektu zmian rezystancji R_{ON} tranzystorach przeznaczonych do przekształtników mocy.

Specjalne zabiegi potrzebne są także dla zapewnienia dużych napięć przebicia między drenem i źródłem. Wiąże się to między innymi z faktem, że rozkład pola elektrycznego w złożonej strukturze tranzystora HEMT jest silnie nierównomierny. Oprócz tego, występowanie defektów powoduje lokalne zmniejszanie krytycznej wartości pola elektrycznego [28] – [31].

Istotnym czynnikiem konstrukcyjnym tranzystora HEMT jest dobór podłoża struktury półprzewodnikowej. Możliwe jest użycie czterech rodzajów monokrystalicznych warstw podłożowych, których główne cechy zestawiono w Tabeli 2. Podłoże z azotku galu mogłoby zapewnić najmniejszą gęstość defektów i potencjalnie najlepsze parametry ale takie rozwiązanie jest niezwykle trudne technologicznie, bardzo drogie i praktycznie nie ma szans na komercjalizację.

Tab. 2. Porównanie materiałów na płytki podłożowe [1]

Material	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 Drogie
Si	-17%	1.3	56%	do 12 Tanie

Z pozostałych rozwiązań, najlepszym (ale najbardziej kosztownym) jest użycie podłoża z węgla krzemu i jest ono chętnie stosowane do wytwarzania mikrofalowych tranzystorów HEMT. Dobór podłoża dla tranzystorów HEMT do przekształtników mocy podyktowany jest w większym stopniu przez czynniki ekonomiczne, ze względu na przewidywane rozmiary rynku – przekształtniki mocy są produkowane masowo. W efekcie dla takich tranzystorów wybiera się tanie podłoże krzemowe i jest to w tej chwili standard dla tranzystorów HEMT wytwarzanych komercyjnie [32]. Skutki znacznego niedopasowania warstw Si i GaN są kompensowane przez użycie warstwy pośredniej z azotku glinu AlN lub azotku glinowo galowego AlGaIn. Jednym z argumentów za używaniem podłoża krzemowego jest możliwość wykonania na wspólnym podłożu zarówno tranzystora HEMT jak i tranzystora MOS tworzących razem połączenie kaskodowe (omówione w podpunkcie 4.1.), a także układu sterującego tranzystorem MOS.

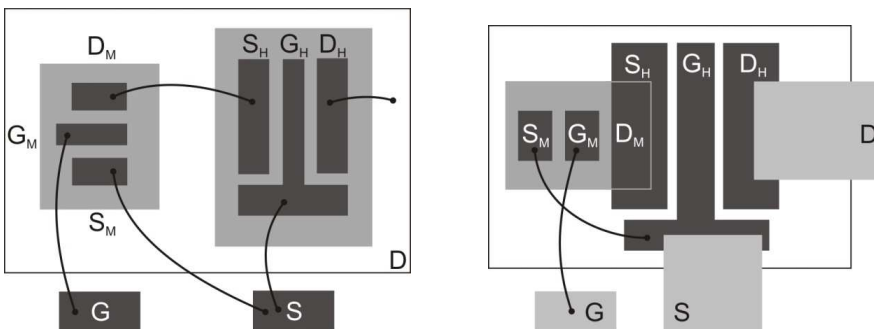
Najważniejsze wymagania dotyczące obudowy, wyprowadzeń i połączeń wewnętrznych mają na celu minimalizację pasożytniczych indukcyjności oraz optymalizację termiczną struktury. W tranzystorach przeznaczonych do przekształtników mocy następuje przełączanie dużych prądów (np. kilkanaście lub

kilkadziesiąt amperów) z dużymi częstotliwościami. Częstotliwości przełączeń w typowych przekształtnikach opartych na elementach krzemowych wynoszą od kilkudziesięciu kHz do kilku MHz. Istnieje duże zapotrzebowanie na przekształtniki pracujące z coraz większymi prądami i coraz większymi częstotliwościami. Z wprowadzaniem tranzystorów HEMT wiążą się oczekiwania na przekroczenie barier wynikających dotąd z ograniczonych możliwości krzemu. Pasożytnicze indukcyjności wprowadzają tutaj bardzo poważne ograniczenia, gdyż przy szybkim przełączaniu dużych prądów pojawiają się impulsy napięcia v_L o wartościach wynikających z wzoru:

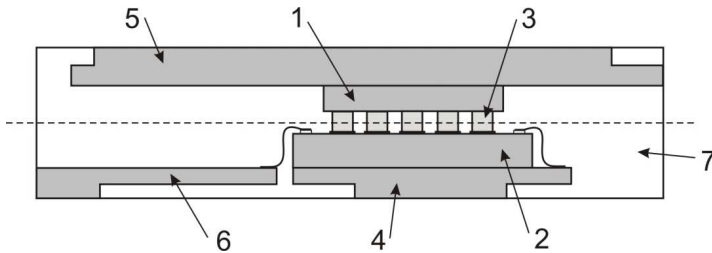
$$V_L = L \cdot \frac{di_L}{dt} \quad (3)$$

Gdyby przekształtnik pracował z częstotliwością 5 MHz, a czas przełączania prądu od zera (stan OFF) do wartości maksymalnej 20 A wynosił 5% okresu, czyli 10 ns to na pasożytniczej indukcyjności wyprowadzenia drenu równej 5 nH powstawałby impuls napięcia o wysokości 10 V. Takie impulsy dochodzące w wyniku sprzężeń do bramki tranzystora powodowałyby niepożądane przełączenia.

Konieczność minimalizacji pasożytniczych indukcyjności jest szczególnie istotna w tranzystorach złożonych: E-MOS (Si) – D-HEMT (GaN) ze względu na występowanie w nich ścieżek łączących poszczególne elektrody tranzystorów składowych. Porównanie dwóch wariantów połączenia struktur składowych w tranzystorze złożonym pokazano na rysunku 5 [33]. W wariacie b) zastosowano bezpośrednie połączenie metalizacji drenu tranzystora MOS i źródła tranzystora HEMT dzięki czemu łączna długość ścieżek, przez które płynie prąd główny elementu złożonego, jest mniejsza niż w wariacie a). Pociąga to jednak za sobą gorsze charakterystyki termiczne – obszary kanałów obu tranzystorów będące w czasie pracy źródłami ciepła, są w wariacie b) bliżej siebie niż w wariacie a). W wariacie b) występuje więc silniejszy efekt samonagrzewania (self-heating), a w szczególności – sprzężenia cieplne między tranzystorami składowymi.



Rys. 5. Dwa warianty rozmieszczenia struktur elementarnych w tranzystorze złożonym – opis w tekście



Rys. 6. Szkic przykładowego przekroju konstrukcji złożonego tranzystora HEMT. 1 – tranzystor HEMT z GaN, 2 – krzemowy tranzystor MOS i układ sterujący, 3 – bolce miedziane, 4, 5, 6 – miedziane wyprowadzenia drenu (GaN HEMT), źródła (MOS) i końcówki sterującej, 7 – izolator.

Problemy cieplne są szczególnie istotne w tranzystorach HEMT, które umożliwiają przetwarzanie dużo większych gęstości mocy niż w innych typach tranzystorów, dlatego aspektom cieplnym w projektowaniu konstrukcji tych tranzystorów poświęca się szczególną uwagę. Samonagrzewanie w tranzystorach HEMT jest drugą, obok pułapek, przyczyną efektu current collapse, a w tranzystorach do przekształtników mocy – zwiększania rezystancji R_{ON} w wyniku wzrostu temperatury wnętrza. Efekt ten ma cechy dodatniego sprzężenia zwrotnego (bo wzrost rezystancji powoduje zwiększenie strat mocy i dalszy wzrost temperatury wnętrza) i w tranzystorach mocy musi być minimalizowany. W literaturze można znaleźć opisy symulacji efektu samonagrzewania w oparciu o specjalnie do tego celu tworzone modele tranzystorów [34-37]. Odrębnym zagadnieniem jest opracowywanie specjalnych konstrukcji struktur i obudów tranzystorów zapewniających minimalizację efektu samonagrzewania [38-40]. Przykłady konstrukcji struktury tranzystora zapewniających małe indukcyjności pasożytnicze i dobre odprowadzanie ciepła, omówione w pracach [33],[41] pokazano na rysunkach 5b) i 6.

4.3. Przykłady parametrów użytkowych

Kilka firm półprzewodnikowych publikuje opisy wytwarzanych od niedawna tranzystorów HEMT określanych jako impulsowe tranzystory mocy (power switches). Porównania wybranych parametrów tranzystorów GaN HEMT i tradycyjnych krzemowych tranzystorów MOSFET w przykładowych układach aplikacyjnych można znaleźć w niektórych opracowaniach naukowych np. [19]. Należy zaznaczyć, że współczesna technologia tranzystorów MOS przeznaczonych do zastosowań w przekształtnikach jest bardzo zaawansowana, gdyż jest wynikiem kilkudziesięciu lat rozwoju. W szczególności, są obecnie na rynku dostępne tranzystory MOS nawet o napięciach dopuszczalnych powyżej 1000 V. Większe napięcia dopuszczalne są rzadko potrzebne w układach przekształtników. Tranzystory HEMT o podobnych napięciach przebicia jak tradycyjne tranzystory

MOSFET, mają zwykle mniejsze (lub zbliżone) wartości rezystancji R_{ON} w stanie włączenia, a przede wszystkim znacznie mniejsze wartości pojemności międzyelektrodowych i ładunków gromadzonych w tych pojemnościach. Główne korzyści z wprowadzania tranzystorów GaN HEMT polegają na możliwości wprowadzania przekształtników o zwiększonych częstotliwościach przełączania przy tym samym poziomie przetwarzanych mocy. Pozwala to na stosowanie mniejszych indukcyjności cewek i mniejszych pojemności kondensatorów, czyli pozwala na zmniejszanie gabarytów i ciężaru przekształtników. Mniejsze rezystancje w stanie włączenia pozwalają na poprawę sprawności energetycznej przekształtników.

Tranzystory HEMT do zastosowań w przekształtnikach, w formie pojedynczych elementów (GITaGaN) lub połączeń kaskodowych omówionych w poprzednim punkcie są obecnie wytwarzane przez kilka firm półprzewodnikowych, np. EPC, Transphorm, RFMD, Panasonic [42-44]. Dopuszczalne prądy wynoszą od kilku do kilkudziesięciu amperów (a nawet powyżej 100 A), dopuszczalne napięcia V_{DS} – od kilkudziesięciu do kilkuset woltów, a w paru przypadkach powyżej 1000 V. Przykładowe parametry kilku typów tranzystorów HEMT prezentowane przez firmę Transphorm zestawiono w tabeli 3 [43].

Tab. 3. Przykładowe parametry tranzystorów GaN HEMT

Typ	TPH3006	TPH3002	TPH3205
Obudowa	TO220 PQFN88	TO220 PQFN88	TO247
R_{DSON} [Ω]	0.15	0.29	0.063
I_D (25°C) [A]	17	9	34
C_o [pF]	56	36	170
Q_g [nC]	6.2	6.2	10
Q_{rr} [nC]	54	29	138

R_{DSON} oznacza rezystancje w stanie ON, a I_D – dopuszczalny prąd drenu w temperaturze pokojowej, C_o – pojemność wyjściową, Q_g – ładunek w pojemności bramka-źródło w stanie ON, Q_{rr} – ładunek usuwany przy wyłączeniu ze stanu przewodzenia wstecznego. Jak wynika z tabeli, tranzystory TPH3002 i TPH3006 są wykonywane w dwóch wersjach – w różnych typach obudów.

5. Przykłady zastosowań

Od momentu pojawienia się pierwszych laboratoryjnych opracowań tranzystorów HEMT przydatnych dla energoelektroniki zaczęto też opracowywać układy przekształtników z takimi tranzystorami. W niektórych przypadkach, układy miały służyć jedynie do oceny parametrów użytkowych tranzystorów HEMT, w innych – głównym celem jest opracowanie użytecznego układu przekształtnika, możliwego do zastosowań praktycznych. Zastosowania tranzystorów HEMT w układach przekształtników mocy wymaga stosowania nieco innych konstrukcji niż w przypadku zastosowań w charakterze elementów wzmacniających w układach mikrofalowych. Jako pośrednią grupę zastosowań można wymienić mikrofalowe wzmacniacze klas D, E i F, w których tranzystory pracują w trybie przełączania [45-48]. Te zastosowania nie będą tu dalej omawiane.

Przykłady zastosowania tranzystorów HEMT w impulsowych przekształtnikach mocy przedstawiono w wielu pozycjach literaturowych. Zakres zastosowań, głównie w układach stanowiących modele laboratoryjne lub prototypy jest już szeroki. Są to między innymi przekształtniki podwyższające napięcie (BOOST) [49-54], lub obniżające napięcie (BUCK) [55], [56], [57]. Autorzy cytowanych prac porównują zwykle właściwości opisywanych układów i układów analogicznych, opartych na tradycyjnych, krzemowych tranzystorach MOS. Wskazują przy tym na korzyści, jakie dało zastosowanie tranzystora HEMT – przede wszystkim poprawę sprawności energetycznej [49], [51], [57] lub zwiększenie zastosowanej częstotliwości przełączania [52], [55]. Poprawa sprawności jest osiągana dzięki temu, że tranzystory HEMT mają mniejsze rezystancje w stanie włączenia (R_{ON}) niż krzemowe odpowiedniki typu MOS. Możliwość zastosowania większych częstotliwości przełączania wynika z mniejszych pojemności tranzystorów HEMT niż tranzystorów MOS o porównywalnych innych parametrach.

Układ opisany w pracy [56] pozwala na obniżanie napięcia z 24 V do 1 V w jednym stopniu przekształtnika, co w związku z zasadą działania przetwornicy BUCK wymaga dokładnego kontrolowania czasu trwania krótkich impulsów napięcia. Realizacja tego w jednym stopniu przekształtnika, przy zastosowaniu dużej częstotliwości przełączeń jest możliwa dlatego, że użyte tranzystory HEMT są dostatecznie szybkie.

W innych publikacjach przedstawiono zastosowanie tranzystorów GaN HEMT w kwasi-rezonansowym przekształtniku Flyback [58], w trójfazowym układzie napędu silnika (realizującym przetwarzanie DC-AC) [59], w prostowniku z korekcją współczynnika mocy (PFC) [60] i w konwerterze rezonansowym typu LLC. Wymienione wyżej układy można zaliczyć do typowych impulsowych przekształtników mocy. Tranzystory GaN HEMT stosowano także w modelach nietypowych przekształtników jak na przykład układ prostujący przebiegi o częstotliwości radiowej (RF), przydatny do bloków zasilania w pojazdach

kosmicznych [62], czy nietypowe rozwiązanie trójfazowego układu prostowniczego [63]. Przykłady zastosowań tranzystorów HEMT w przekształtnikach impulsowych można znaleźć także w materiałach reklamowych producentów tych tranzystorów, np. [43].

6. Podsumowanie

Po udanych zastosowaniach tranzystorów HEMT z azotku galu w mikrofalowych układach nadawczych dość szybko pojawiło się zainteresowanie tym typem elementów ze strony producentów impulsowych przekształtników mocy. W związku z tym szereg firm półprzewodnikowych podjęło udane próby wytwarzania tranzystorów HEMT dostosowanych do pracy w przekształtnikach energoelektronicznych. W ciągu kilku lat opublikowano opisy wykonanych modeli takich tranzystorów, a w ostatnim czasie rozpoczęła się w paru firmach produkcja seryjna. Wykonywane dotychczas tranzystory HEMT z azotku galu górują już w tej chwili niektórymi parametrami nad najlepszymi krzemowymi tranzystorami MOS do zastosowań w przekształtnikach mocy. Technologia tranzystorów GaN HEMT jest nowa i stwarza nadal wiele trudności ale postępy są wyraźne i perspektywy poprawy parametrów bardzo realne. Prace nad udoskonalaniem technologii i konkurencja między producentami przynosi nie tylko poprawę parametrów użytkowych ale także obniżanie cen. Wszystko wskazuje na to, że tranzystory GaN HEMT będą tańsze od tranzystorów z węgla krzemu o porównywalnych parametrach. Argument cenowy jest bardzo istotny ze względu na rozmiary rynku przekształtników energoelektronicznych. Należy więc sądzić, że w ciągu kilku najbliższych lat tranzystory HEMT z azotku galu staną się najważniejszymi elementami spełniającymi funkcję przełączników sterowanych w energoelektronice.

Opracowanie wykonano w ramach Projektu NCBR PBS1/A3/5/2012

Bibliografia

1. W. Janke, W. Wojtasiak, Właściwości i zastosowania tranzystorów HEMT na bazie azotku galu, *Przegląd Elektrotechniczny*, R. 91, Nr 9/2015, pp. 65-73.
2. A. Lidow et al., *GaN Transistors for Efficient Power Conversion*, WILEY, 2015.
3. U.K. Mishra, P. Parikh and Y. Wu, AlGaIn/GaN HEMTs - An Overview of Device Operation and Applications, *Proc. IEEE*, vol. 90, N. 6, June 2002, pp. 1022-1031.
4. N.Z. Yahaya, M.B.K. Raethar and M. Awan, Review of Gallium Nitride HEMT Device Technology for High Frequency Converter Applications, *J. of Power Electronics*, V. 9, N. 1, Jan. 2009, pp. 36-42.

5. W. Janke, Ograniczenia właściwości użytkowych tranzystorów HEMT wykonywanych na bazie azotku galu, Raport niepublikowany, 2014.
6. Y.C. Liang et al., AlGaN/GaN Power HEMT Devices for Future Energy Conversion Applications, IEEE 2nd International Symposium on Next-Generation Electronics, Kaohsiung, Feb. 25-26, 2013, pp. 7-10.
7. A. Nakajima, K. Takao and H. Ohashi, GaN Power Transistor Modeling for High-Speed Converter Circuit Design, IEEE Trans. on Electron Devices, Vol. 60, N. 2, Feb. 2013, pp. 646-652.
8. J. Baliga, Advanced power rectifier concepts, Springer 2009, Ch. 2: Schottky rectifiers.
9. J. Baliga, The future of power semiconductor device technology, Proc. IEEE, Vol. 89, N. 6, June 2001, pp. 822-831.
10. E. Sönmez et al., Gallium Nitride for 600V Operation, Power Electronics Europe, Is. 4, 2011, pp. 25-28.
11. R. Mitova et al., Investigations of 600 V GaN HEMT and GaN Diode for Power Converter Applications, IEEE Trans. on Power Electronics, 2013.
12. N. Zhang, High voltage GaN HEMTs with low on-resistance for switching applications, PhD. Dissertation, University of California, Santa Barbara, 2002.
13. M. Su et al. Challenges in the Automotive of GaN Power Switching Devices, CS MANTECH Conference, April 23rd – 26th, 2012, Boston, Massachusetts, USA.
14. R. Fernandes, A Multi-Mode 1 MHz PFC Rectifier with Digital Peak Current Modulation. MSc. thesis, University of Toronto, 2015.
15. A. Bhalla, Market Penetration of Wide-Bandgap SiC and GaN technology in light of Silicon Superjunction and IGBT technology evolution. CS MANTECH Conference, May 2014, Denver, Colorado, USA, pp. 9-12.
16. E. Persson, How 600V GaN Transistors Improve Power Supply Efficiency and Density, Power Electronics Europe, Issue 2, 2015, pp. 22-25.
17. M. Cooke, Developing market for normally-off nitride power electronics, Semiconductor Today – Compounds & Advanced Silicon, vol.7, Issue 9, 2013, pp. 82-87.
18. G. Patterson, GaN Switching for Efficient Converters, Power Electronics Europe, Issue 5, 2013, pp. 18-21.
19. A. Tüysüz et al. Performance Comparison of a GaN GIT and a Si IGBT for High-Speed Drive Applications. The 2014 International Power Electronics Conference.
20. J. Rąbkowski and R. Barlik, Experimental evaluation of GaN Gate Injection Transistors. Przegląd Elektrotechniczny, Nr 3/2015, str. 9-12.
21. O. Hilt et al. Normally-off GaN Transistors for Power Applications. MicroTherm'2015, Conference Series 494 (2014).

22. S. Cheng and P.C. Chou. GaN-HEMTs Cascode Switch: Fabrication and Demonstration on Power Conditioning Applications. Proceedings of the 3rd International Conference on Industrial Application Engineering 2015, pp. 548-554.
23. S. Hamady, New concepts for normally-off power Gallium Nitride (GaN) High Electron Mobility Transistor, PhD Thesis, University of Toulouse, 2014.
24. H. Sin and S. Kaneko, Novel GIT Structure Solves Current Collapse in Power HEMT's, How2 Power Today, Sept. 2015, pp. 1-6.
25. J. Roberts et al. GaN Transistors – Drive Control, Thermal Management, Isolation. Power Electronics Technology, February 2013, pp. 24-28.
26. D. Jin and J.A. del Alamo, Mechanisms Responsible for Dynamic ON-Resistance in GaN High-Voltage HEMT's, Proc. of the 2012 24th Intern. Symp. on Power Semiconductor Devices and IC's, June 3-7, 2012, Bruges, Belgium, pp. 333-336.
27. D. Jin, J. del Alamo, 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, pp. 3190-3196.
28. B. Lu and T. Palacios High Breakdown (> 1500 V) AlGaIn/GaN HEMTs by Substrate-Transfer Technology, IEEE Electron Device Letters, Vol. 31, N. 9, Sept. 2010, pp. 951-953.
29. Z. Zhao 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, pp. 1140-1142.
30. D.J. Macfarlane, Design and fabrication of AlGaIn/GaN HEMTs with high breakdown voltages, PhD Dissertation, School of Engineering, University of Glasgow, 2014.
31. D. Visali, Optimization of GaN-on-Si HEMTs for High Voltage Application, PhD thesis, Katholieke Universiteit Leuven, 2011.
32. H. Mosbahi et al., Electrical Characterization of AlGaIn/GaN HEMTs on Si Substrate, Journal of Electron Devices, vol.15, 2012, pp. 1225-1231.
33. S. She et al. Thermal analysis and improvement of cascade GaN device package for totem-pole bridgeless PFC rectifier, Applied Thermal Engineering 90 (2015), pp. 413-423.
34. J.B. King, T.J. Bazil, Nonlinear Electrothermal GaN HEMT Model Applied to High-Efficiency Power Amplifier Design, IEEE Trans. on Microwave Theory and Techniques, vol. 61, N. 1, Jan. 2013, pp. 444-454.
35. X.D. Wang, W.D. Hu, X.S. Chen and W. Lu, 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, pp. 1393-1401.

36. A. Santarelli 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, pp. 82-85.
37. M. Bernardoni, N. Delmonte, R. Menozzi, Empirical and Physical Modeling of Self-Heating in Power AlGaIn/GaN HEMT, CS MANTECH Conference, Apr. 23 – 26, 2012, Boston, USA.
38. H.C. Nochetto, N.R. Jankowski, 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.
39. S. Dahmani, Large-Size AlGaIn/GaN HEMT Large-Signal Electrothermal Characterization and Modeling for Wireless Digital Communications, PhD Dissertation, University of Kassel, 2011.
40. J.A.F. Perez, Thermal Study of a GaN-Based HEMT, PhD thesis, University of Notre Dame, Indiana, 2012.
41. P.C. Chou and S. Cheng, Performance characterization of gallium nitride HEMT cascade switch for power conditioning applications, Materials Science and Engineering B 198 (2015) 43-50.
42. RFJS006F Technical Data, RFMD Inc. USA.
43. Transphorm – Establishing the New Power Conversion Platform, Materiały firmy Transphorm.
44. F. Recht et al., Characteristics of Transphorm GaN Power Switches, Appl. Note AN-0002, Transphorm Inc.
45. S. Lin and A.E. Fathy, A 20 W GaN HEMT VHF/UHF Class-D Power Amplifier, IEEE 12th Annual Wireless and Microwave Technology Conference (WAMICON), Clearwater Beach, 18-19 April 2011, pp. 1-4.
46. D. Kalim, D. Pozdniakov and R. Negra, A 3.37 GHz Class-F⁻¹ Power Amplifier with 77% PAE in GaN HEMT Technology, PRIME 2012, Aachen, Session FG2 – Transceivers, pp. 297-300.
47. J.A. Garcia, R. Marante and M.N.R. Lavin, GaN HEMT Class E² Resonant Topologies for UHF DC/DC Power Conversion, IEEE Trans. on Microwave Theory and Techniques, Vol. 60, N. 12, Dec. 2012, pp. 4220-4229.
48. R. Marante et al., A UHF Class E² DC/DC Converter Using GaN HEMTs, IEEE MTT-S 2012 Intern. Microwave Symposium, Montreal.
49. Y. Wu et al., A 97.9% Efficient GaN HEMT Boost Converter With 300-W Output Power at 1 MHz, IEEE Electron Device Letters, Vol. 29, Issue 8, Aug. 2008, pp. 824-826.
50. J. Everts et al. A Hard Switching VIENNA Boost Converter for Characterization of AlGaIn/AlGaIn Power DHFETs. Abstract for PCIM Europe 2010.

51. B. Hughes et al., A 95% Efficient Normally-Off GaN-on-Si HEMT Hybrid-IC Boost-Converter with 425-W Output Power at 1 MHz, IEEE Compound Semiconductor Integrated Circuit Symposium, (CSICS), Waikoloa, 16-19 Oct. 2011, pp. 1-3.
52. F. Gamand, M.D. Li and C. Gaquiere, A 10 MHz GaN HEMT DC/DC Boost Converter for Power Amplifier Applications, IEEE Trans. on Circuits and Systems – II: Express Briefs, Vol. 59, N. 11, Nov. 2012, pp. 776-779.
53. M. Kasper et al. PV Panel-Integrated High Step-up High Efficiency Isolated GaN DC-DC Boost Converter. INTELEC(r) 2013, October 2013, Hamburg, pp. 602-608.
54. Utilizing GaN HEMTs in All-in-One Workstation Power Supply, DN05067/D, ON Semiconductor, 2015.
55. F. Gamand, V.D. Giacomo and C. Gaquiere, 10 MHz DC/DC Converter Based on GaN HEMT for RF Applications, 33rd Intern. IEEE Telecommunications Energy Conference, Amsterdam, 9-13 Oct. 2011, pp. 1-4.
56. E. Abdoulin and A. Lidow, High Frequency 24 V – 1 V DC-DC Converters Using EPC's Gallium Nitride (GaN) Power Transistors, Appl. Note AN007, Efficient Power Corporation, 2011, pp. 1-4.
57. J. Delaine et al., Improvement of GaN Transistors Working Conditions to Increase Efficiency of a 100 W DC-DC Converter, Twenty Eighth Annual IEEE Applied Power Electronics Conference and Exposition (APEC), Long Beach, 17-21 March 2013, pp. 3232-3235.
58. S.L. Jeng et al. Quasi-Resonant Flyback DC/DC Converter Using GaN Power Transistors. World Electric Vehicle Journal Vol. 5 California, 2012, pp. 0567-0573.
59. Y-F. Wu et al., High-Frequency, GaN Diode-Free Motor Drive Inverter with Pure Sine Wave Output, Power Transmission Engineering, Oct. 2012, pp. 40-43.
60. H. Nakao et al., 2.5-kW Power Supply Unit with Semi-Bridgeless PFC Designed for GaN-HEMT, Twenty Eighth Annual IEEE Applied Power Electronics Conference and Exposition (APEC), Long Beach, 17-21 March 2013, pp. 656-663.
61. W. Zhang et al., Evaluation of 600V Cascode GaN HEMT in Device Characterization and All-GaN-Based LLC Resonant Converter, IEEE Energy Conversion Congress and Exposition, Denver, 15-19 Sept. 2013, pp. 3571-3578.
62. Y. Kobayashi et al., GaN HEMT Based Rectifier for Spacecraft Health Monitoring System Using Microwave Wireless Power Transfer, Proc. of APMC, Kaohsiung, Taiwan, Dec. 4-7, 2012, pp. 391-393.

63.Y. Hayashi et al. Design Consideration for High Power Density GaN Buck-Rectifier in ISOP-IPOS Converter based dc Distribution System. Journal of Energy and Power Engineering 9 (2015), pp. 574-584.

Streszczenie

Praca zawiera przegląd problematyki zastosowań tranzystorów HEMT (high electron mobility transistors) w wysokosprawnych układach przekształtników mocy. Wymieniono najważniejsze wymagania stawiane elementom półprzewodnikowym we współczesnych przekształtnikach energoelektronicznych. Przedstawiono główne cechy heterostruktur GaN-GaAlN i tranzystorów opartych na takich strukturach. Przedyskutowano różne rozwiązania konstrukcyjno-technologiczne struktur HEMT o cechach tranzystora normalnie wyłączonego (pracującego ze wzbogaceniem). Pokazano przykładowe parametry tranzystorów HEMT pracujących dla energoelektroniki. Omówiono także wybrane rozwiązania impulsowych przekształtników BUCK i BOOST oparte na tranzystorach HEMT i ich główne właściwości.

Abstract

The applications of gallium nitride (GaN) high electron mobility transistors (HEMT) in modern power converters are reviewed. Basic demands for semiconductor devices used in switch-mode high efficiency power converters are summarized. Specific features of GaN-GaAlN heterostructure and HEMT's are briefly described.

Different solutions of enhancement-mode HEMT applicable in power converters of resulting parameters of HEMT-based enhancement-mode transistors are given. The exemplary power converters based on GaN HEMT's, including BUCK and BOOST circuits are presented and their features discussed.