

Współczesne tranzystory mocy w impulsowych przekształtnikach napięcia Flyback

Streszczenie. W pracy omówiono współczesne tranzystory mocy używane najczęściej w impulsowych przekształtnikach mocy i porównano ich przydatność. Najwięcej uwagi poświęcono tranzystorom HEMT z azotku galu. Zaprezentowano i porównano parametry techniczne różnych odmian tranzystorów dostępnych komercyjnie. Jako przykład zastosowań omawianych tranzystorów pokazano impulsowe przekształtniki Flyback i przedstawiono wybrane charakterystyki tych przekształtników.

Abstract. Modern power transistors used currently in switch mode power converters are described and compared. The special attention is devoted to HEMT transistors made of gallium nitride (GaN). The representative parameters of commercially available transistors are presented and discussed. The exemplary application of the discussed transistors in switch-mode Flyback converters is presented. (**Modern Power Transistors in DC-DC Flyback Converters.**)

Słowa kluczowe: Tranzystory mocy, HEMT, GaN, Flyback.

Keywords: Power transistors, HEMT, GaN, Flyback.

Wstęp

Przekształtniki napięcia stałego o działaniu impulsowym znajdują wiele zastosowań i są wciąż ulepszone. Poprawa właściwości kolejnych generacji przekształtników następuje przede wszystkim w wyniku postępów w technologii wytwarzania elementów stosowanych w przekształtnikach. Najszybsze postępy obserwuje się w zakresie technologii wytwarzania przełączników półprzewodnikowych: tranzystorów i diod. Zastosowanie diod w impulsowych przekształtnikach napięcia stałego jest stopniowo ograniczane, gdyż coraz częściej pojawiają się rozwiązania określane jako synchroniczne, w których przełącznikami są wyłącznie tranzystory przełączane przemiennie przez blok sterujący.

Ważną grupę impulsowych przekształtników napięcia stałego stanowią przekształtniki transformatorowe, których najpopularniejszym przedstawicielem jest przekształtnik Flyback. Głównymi zaletami tych przekształtników są: izolacja galwaniczna między wejściem i wyjściem, szeroki zakres możliwych do uzyskania przekładni napięciowych i łatwość zasilania kilku odbiorników. Wadą jest występowanie pasywnych oscylacji w momentach przełączania, o amplitudach większych niż w przekształtnikach beztransformatorowych. Dla stłumienia tych oscylacji stosuje się dodatkowe bloki znane jako snubbery.

W uproszczonych opisach przekształtników traktuje się przełączniki półprzewodnikowe jako idealne (zwarcie w stanie „ON”, rozwarcie w stanie „OFF”, brak opóźnienia przy przełączaniu). Rzeczywiste cechy przełączników różnią się od opisów idealnych. Opisy diod i tranzystorów stosowane w symulatorach układów jak np. Spice są złożone i zawierają po kilkadziesiąt parametrów. W projektowaniu układu przekształtnika bierze się pod uwagę tylko niektóre parametry przełączników mające największy wpływ na właściwości użytkowe przekształtnika. Dobór tych parametrów wiąże się z wymaganiami stawianymi układowi.

Do podstawowych wymagań stawianych układowi przekształtnika zalicza się wysoką sprawność energetyczną, która zależy od strat mocy w elementach. Często stawianym wymaganiem jest mały ciężar i małe rozmiary przekształtnika. Rozmiary elementów magnetycznych oraz kondensatorów a w konsekwencji rozmiary przekształtnika mogą być tym mniejsze im wyższa jest częstotliwość przełączania. Bardzo istotne są także możliwe do uzyskania zakresy przekształcanych napięć i prądów.

Z powyższych wymagań wynikają oczekiwania co do parametrów tranzystorów stosowanych w przekształtniku. Potrzebne są jak najmniejsze wartości rezystancji w stanie włączenia $R_{DS(on)}$, małe pojemności międzyelektrodowe i indukcyjności doprowadzeń oraz duże wartości dopuszczalnych prądów i napięć. W niniejszej pracy rozpatrujemy tranzystory MOSFET z krzemu i węgla krzemu oraz tranzystory HEMT z azotku galu. Są to współcześnie najważniejsze elementy w grupie przełączników o napięciach dopuszczalnych do 1 kV (lub niewiele powyżej) stosowane w przekształtnikach niewielkiej mocy (typowo poniżej 1 kW). Technologia krzemowych tranzystorów MOSFET jest ugruntowana od wielu lat. MOSFET-y z węgla krzemu wprowadzono na rynek około dziesięciu lat temu. Tranzystory HEMT z azotku galu stanowią najnowsze rozwiązanie w tej grupie i w niniejszej pracy poświęcono im najwięcej uwagi.

Wpływ doboru materiału na właściwości tranzystorów mocy

Rozpatrywane tranzystory są wykonywane z krzemu (Si), węgla krzemu (SiC) lub azotku galu (GaN). Właściwości tych materiałów mające istotny wpływ na parametry tranzystorów zestawiono w Tabeli 1.

Tabela 1. Wybrane parametry materiałowe krzemu, węgla krzemu i azotku galu

	Si	4H-SiC	GaN
Przerwa energetyczna W_E (eV)	1.12	3.25	3.40
Pole krytyczne E_B (MV/cm)	0.25	3.0	3.5
Ruchliwość elektronów μ ($\text{cm}^2/\text{V s}$)	1350	800	1300
Prędkość nasycenia v_s (10^7 cm/s)	1.0	2.0	3.0
Konduktywność cieplna χ (W/cm K)	1.5	4.9	1.3

Napięcie dopuszczalne V_{BR} między drenem i źródłem tranzystora wiąże się najczęściej ze zjawiskiem powielania lawinowego i zależy od krytycznej wartości natężenia pola w strukturze oraz od domieszkowania i rozmiarów obszaru przewodzenia, w którym może zachodzić przebicie. Dwa ostatnie czynniki wpływają też na rezystancję między

drenem i źródłem w stanie włączenia R_{DSON} . W efekcie, parametry V_{BR} i R_{DSON} tranzystora z danego materiału są ze sobą powiązane i w literaturze można nawet znaleźć wzory opisujące ten związek (np. [1], [2]) ale są one wyznaczone przy grubych uproszczeniach i mają jedynie charakter poglądowy. Faktem jest jednak, że wśród tranzystorów krzemowych najmniejsze wartości R_{DSON} mają tranzystory niskonapięciowe. Te rezystancje wiążą się z drugiej strony z wartościami dopuszczalnego prądu przewodzenia, gdyż oba te parametry zależą od powierzchni struktury półprzewodnikowej, która z kolei wpływa na pojemności międzyelektrodowe tranzystora.

Krzemowe tranzystory MOSFET przeznaczone do przekształtników energoelektronicznych występują w wielu wersjach technologicznych i mają zróżnicowane parametry. Głównym praktycznym rezultatem wprowadzenia tranzystorów MOSFET z węgla krzemu było to, że mają one większe napięcia dopuszczalne niż tranzystory krzemowe o podobnych parametrach (lub mniejsze R_{DSON} przy zbliżonych napięciach dopuszczalnych).

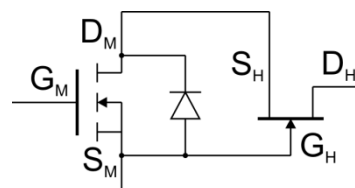
Specyfika tranzystorów HEMT z GaN

Wprowadzenie tranzystorów HEMT z azotku galu wymagało pokonania wielu trudności technologicznych, między innymi trudności wytwarzania monokrystalicznych płytek podłożowych z GaN. Rozwiązania mające znaczenie komercyjne opierają się na wykorzystaniu płytek podłożowych z innych materiałów (Al_2O_3 , Si, SiC) i heteroepitaksjalnym osadzeniu warstw GaN i AlGaIn. Najpierw opracowano tranzystory GaN HEMT dla potrzeb techniki mikrofalowej [3], wykorzystując głównie podłoże SiC. Szybko okazało się, że w tym obszarze mają one korzystniejsze parametry niż takie tranzystory jak krzemowe MOSFET, MESFET i HEMT z GaAs oraz HBT z SiGe. Po udanych zastosowaniach w technice mikrofalowej zaczęto opracowywać tranzystory z GaN dla energoelektroniki, najczęściej na podłożu krzemowym – tańsze niż tranzystory na podłożu SiC, o parametrach wystarczających dla energoelektroniki [4], [5], [6].

Tranzystory HEMT są tranzystorami polowymi złączowymi z kanałem n. Ich podstawową wersję stanowią tranzystory normalnie załączone (D-HEMT) umożliwiające przepływ prądu drenu przy braku polaryzacji bramki. Specyfika budowy tranzystora HEMT z GaN polega na wykorzystaniu heterozłącza AlGaIn-GaN. W zaporowo spolaryzowanym heterozłączu tworzy się wąska studnia potencjału dla elektronów. Możliwości ruchu elektronów o energiach odpowiadających tej studni, są ograniczone do dwóch wymiarów 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 od parametrów materiałowych i geometrycznych, między innymi od grubości warstw przyłączowych oraz od parametru x w związku $Al_xGa_{1-x}N$. Strukturę tranzystora HEMT wykonuje się tak, że rejon, w którym powstaje dwuwymiarowy gaz elektronowy jest bardzo słabo domieszkowany (lub niedomieszkowany), co redukuje efekt rozpraszania nośników i zapewnia bardzo duże ruchliwości elektronów. W rejonie 2-DEG uzyskuje się bardzo duże koncentracje elektronów i gęstości prądu, co w połączeniu z dużymi wartościami krytycznego natężenia pola pozwala na uzyskiwanie gęstości mocy nieosiągalnych w innych typach tranzystorów.

Najwygodniejszymi do zastosowań w przekształtnikach mocy są tranzystory normalnie wyłączone. Opracowywane obecnie rozwiązania opierają się na wykorzystaniu odpowiednich modyfikacji tranzystorów HEMT i można je podzielić na dwie grupy. Pierwszą stanowią pojedyncze

tranzystory z heterozłączem AlGaIn-GaN, które w wyniku specjalnych zabiegów technologicznych mają cechy tranzystorów normalnie wyłączonych (E-HEMT) [7], [8], [9]. Najczęściej zawierają one dodatkową warstwę p, która tworzy złącze p-n lub p-i z warstwą AlGaIn. Przy braku polaryzacji bramki, po stronie i-AlGaIn powstaje warstwa opróżniona z nośników, czyli nie ma kanału przewodzącego. Dopiero dodatnie napięcie bramki o wartości przekraczającej napięcie progowe powoduje przewodzącą polaryzację złącza, zmniejszenie szerokości warstwy opróżnionej i powstanie kanału przewodzącego. Wiąże się to z pewną wadą tych tranzystorów, mianowicie z przepływem 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. Inną wadą jest małe napięcie przebicia bramka-źródło i bardzo wąski zakres dozwolonych napięć bramki zapewniających pełne przewodzenie w kanale.



Rys. 1. Normalnie wyłączony tranzystor HEMT w formie połączenia kaskadowego SiMOS-DHEMT

Drugim rozwiązaniem jest dwutranzystorowe połączenie kaskadowe pokazane na rysunku 1. Poza tranzystorem D-HEMT z GaN, normalnie załączonym, występuje w nim krzemowy tranzystor MOSFET normalnie wyłączony z kanałem n [10]. Oba elementy mają wspólne podłoże krzemowe. 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 MOSFET-a. Możliwe jest przewodzenie w kierunku normalnym i odwrotnym (gdy $V_{DS} < 0$). W warunkach normalnego przewodzenia, prąd płynie od końcówki D_H (dren tranzystora HEMT) przez źródło tranzystora HEMT połączone z drenem tranzystora MOS, do źródła tranzystora MOS (końcówka S_M). Ta struktura ma od strony wejścia cechy zwykłego MOSFET-a, a od strony wyjścia – cechy HEMT-a normalnie wyłączonego. Wartości napięć progowych są ustalane technologicznie (typowo 2 – 3 V), regulacja stanu pracy jest łatwa, a dopuszczalny zakres napięć bramki jest szeroki. Wadą jest większa długość ścieżek realizujących połączenia wewnętrzne i większe indukcyjności pasożytnicze niż w pojedynczym tranzystorze E-HEMT, a także fakt, że wypadkowa rezystancja R_{DSON} jest sumą rezystancji tranzystorów składowych. Tranzystor MOS w tym połączeniu nie musi jednak wytrzymywać dużych napięć, zatem składnik $R_{ON}(MOS)$ może być bardzo mały i ma niewielki wpływ na rezystancję wypadkową.

Obie grupy rozwiązań są obecnie produkowane w firmach półprzewodnikowych. Trudno w tej chwili przewidzieć, czy któraś z tych grup ostatecznie zdominuje rynek, czy będą produkowane równolegle.

Mechanizm przebicia w tranzystorach HEMT jest bardziej złożony niż w MOSFET-ach gdyż występuje w nich kilka procesów fizycznych odpowiedzialnych za przebicie. W konsekwencji, dopuszczalne napięcia V_{DS} tranzystorów HEMT są już obecnie duże ale nie mają takich wartości, jakie wynikałyby z obliczeń uwzględniających jedynie mechanizm powielania lawinowego [11], [12], [13].

W literaturze technicznej można znaleźć bardzo wiele doniesień o zastosowaniach tranzystorów GaN HEMT w przekształtnikach energoelektronicznych. Jako przykłady można wymienić prace [14] – [22].

Przykłady parametrów technicznych

W tym punkcie przedstawiono przykładowe parametry techniczne tranzystorów różnych typów, które podzielono na tranzystory krzemowe MOSFET nisko- i wysokonapięciowe, krzemowe tranzystory „super-junction”, tranzystory MOSFET z węgla krzemu, pojedyncze tranzystory E-HEMT oraz tranzystory HEMT w połączeniu kaskodowym. Dwie ostatnie grupy to tranzystory na bazie azotku galu. Podano dopuszczalne napięcie dren-źródła V_{DSBR} , dopuszczalny prąd drenu I_D , rezystancję $R_{DS(on)}$, pojemności wejściową C_{iss} i wyjściową C_{oss} . Spośród wielu dostępnych opisów technicznych wybrano dane, które uznano za reprezentatywne.

Z porównania danych w Tabeli 2 wynikają prawidłowości częściowo zasygnalizowane wcześniej. Wśród krzemowych MOSFET-ów, tranzystory niskonapięciowe mają mniejsze wartości $R_{DS(on)}$ niż wysokonapięciowe. Tranzystory „superjunction” mają większe pojemności, przy innych parametrach porównywalnych z pozostałymi typami. Tranzystory z węgla krzemu mają największe napięcia dopuszczalne i najkorzystniejszą relację V_{DSBR} - $R_{DS(on)}$ wśród wszystkich MOSFET-ów. Tranzystory HEMT mają najmniejsze wartości pojemności wejściowych i wyjściowych przy innych parametrach porównywalnych z MOSFET-ami. Spośród omawianych odmian, tranzystory z SiC są obecnie najdroższe. Tranzystory HEMT stanowią grupę najmłodszą więc można oczekiwać, że ich parametry techniczne i cenowe ulegną w najbliższych latach największej poprawie.

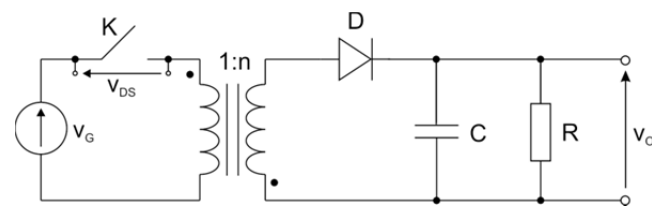
Tabela 2. Przykładowe parametry techniczne tranzystorów różnych typów

Typ tranzystora	Ozn.	V_{DSBR} [V]	I_D [A]	$R_{DS(on)}$ [mΩ]	C_{iss} [pF]	C_{oss} [pF]
MOSFET Si niskonapięciowy	T1a	60	22	39	675	68
	T1b	60	10	65	1100	90
MOSFET Si wysokonapięciowy	T2a	600	10	650	1370	156
	T2b	600	30	99	1960	93
MOSFET Si Super-Junction	T3a	900	36	100	7463	6827
	T3b	600	20	150	2370	1280
MOSFET SiC	T4a	1200	24	160	928	63
	T4b	1200	12	520	290	30
E-HEMT	T5a	650	7.5	200	65	17
	T5b	650	30	50	260	65
HEMT kaskoda	T6a	600	36	63	2200	115
	T6b	900	15	205	780	41

Modele laboratoryjne przekształtników Flyback z różnymi typami tranzystorów i ich wybrane charakterystyki

Badania omówione w tej części mają na celu zilustrowanie podanych wyżej rozważań. Wybrano przekształtnik Flyback o schemacie bloku głównego pokazanym na rys. 2, w którym stosowano różne tranzystory spośród odmian wymienionych w tabeli 2. Mierzono statyczną transmitancję napięciową $M_V = V_o/V_G$ i rejestrowano przebiegi napięć $V_{DS}(t)$ w trakcie przełączania. Do pomiarów użyto dwóch modeli

laboratoryjnych przetwornicy, w których zastosowano tę samą diodę (dioda Schottky’ego o napięciu przewodzenia 0,35V przy prądzie 1A) i ten sam kondensator ($C=470\mu F$, $ESR=70m\Omega$).



Rys. 2. Schemat bloku głównego badanej przetwornicy

W modelu 1 zastosowano transformator o indukcyjności uzwojenia pierwotnego $L_p=150\mu H$ i przekładni $n=0.2$ oraz przyjęto napięcie wejściowe $V_G=20V$, współczynnik wypełnienia sygnału sterującego $D_A=0.5$ i rezystancję obciążenia $R=3\Omega$, co pozwoliło na pracę przetwornicy w trybie CCM. Dla powyższych parametrów zostały pomierzone wartości transmitancji statycznej M_{VP} oraz porównywano je z wartościami M_{Vi} obliczonymi dla przekształtnika idealnego [23], [24] i wartościami M_{VO} obliczonymi z wzoru uwzględniającego efekty pasożytnicze [25].

$$(1) \quad M_{VO} = \frac{M_{Vi}}{1 + G \cdot R_{EQ} \cdot \frac{n^2}{(1 - D_A)^2}}$$

gdzie:

$$(2) \quad M_{Vi} = \frac{n \cdot D_A}{1 - D_A}$$

$$(3) \quad R_{EQ} = D_A \cdot R_{TL} + (1 - D_A) \cdot \frac{R_{DL}}{n^2}$$

$$(4) \quad R_{TL} = R_T + R_{L1}$$

$$(5) \quad R_{DL} = R_D + R_{L2}$$

R_T i R_D oznaczają pasożytnicze rezystancje tranzystora i diody w stanie przewodzenia, R_{L1} i R_{L2} - pasożytnicze rezystancje pierwotnego i wtórnego uzwojenia transformatora, G - konduktancję obciążenia, D_A - współczynnik wypełnienia przebiegu przełączającego. Wartości współczynnika D_A określane na podstawie przebiegu napięcia podawanego na bramkę tranzystora i na podstawie przebiegu prądu drenu różnią się nieznacznie z powodu inercji tranzystora. W przeprowadzonych obliczeniach wykorzystano pomierzone wartości R_{L1} i R_{L2} , natomiast rezystancje elementów półprzewodnikowych przyjęto na podstawie danych publikowanych przez producentów.

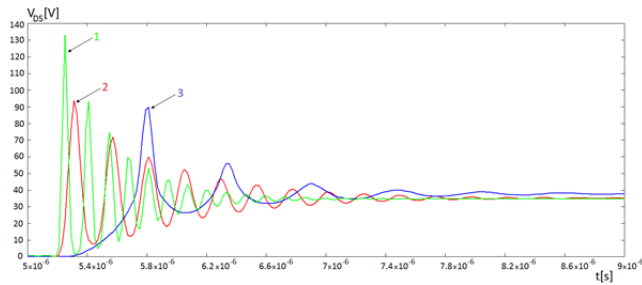
Tabela 3. Transmitancje napięciowe w trybie CCM

	T1a	T2a	T3a	T4a	T6a
M_{Vi}	0.212	0.216	0.2604	0.212	0.2151
M_{VP}	0.171	0.171	0.204	0.17	0.173
M_{VO}	0.1576	0.158	0.187	0.1572	0.1595

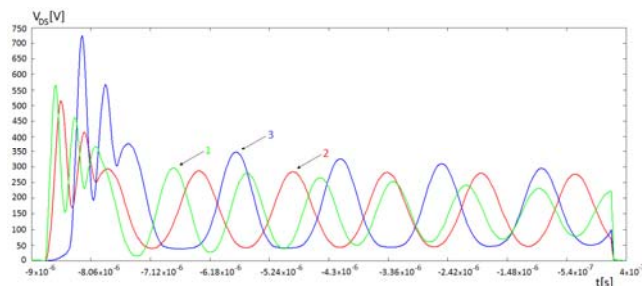
Jak widać z tabeli 3, pomierzone wartości statycznej transmitancji napięciowej (M_{VP}) różnią się wyraźnie od wartości M_{Vi} obliczonych z wzoru uproszczonego (2) i są zbliżone do wyników obliczeń uwzględniających efekty pasożytnicze.

Na rys. 3 przedstawiono przebiegi napięcia V_{DS} na tranzystorze zarejestrowane w modelu 1. W modelu 2 przetwornicy użyto transformatora o parametrach $L_p=167\mu H$, $n=0.05$ a napięcie wejściowe, współczynnik wypełnienia sygnału PWM oraz rezystancję obciążenia

ustalono na: $V_G=160V$, $D_A=0.1$, $R=50\Omega$, co zapewniło pracę w trybie DCM. Przykładowe oscylogramy stanów przejściowych (napięcie V_{DS}) dla tego modelu przedstawiono na rys. 4. Oznaczenia tranzystorów w podpisach pod rys. 3 i 4 odpowiadają symbolom użytym w tabeli 2.



Rys. 3. Napięcie V_{DS} (model 1): MOSFET Si wysokonapięciowy T2a (1), HEMT-kaskoda T6a (2), MOSFET Si Super Junction T3a (3)



Rys. 4. Napięcie V_{DS} (model 2): MOSFET Si wysokonapięciowy T2a (1), HEMT-kaskoda T6a (2), MOSFET Si Super Junction T3a (3)

Częstotliwość przełączania w obu modelach wynosiła $f_s=100kHz$. Nie stosowano układów tłumiących oscylacje (snubberów), aby zaobserwować różnice w przebiegu nietłumionych oscylacji, przy wykorzystaniu różnych tranzystorów.

Wnioski

W pracy porównano przydatność tranzystorów HEMT z azotku galu oraz stosowanych znacznie dłużej tranzystorów MOSFET krzemowych i z węgla krzemu do zastosowań w impulsowych przekształtnikach napięcia stałego przyjmując jako przykład przekształtniki Flyback. Przedstawiono reprezentatywne przykłady parametrów tranzystorów różnych typów na podstawie danych publikowanych przez producentów a następnie niektóre charakterystyki wykonanych modeli laboratoryjnych przekształtników z różnymi typami tranzystorów. Spośród krzemowych tranzystorów MOSFET mało atrakcyjne okazują się tranzystory opisywane jako „superjunction” gdyż mają duże pojemności międzyelektrodowe, co ogranicza ich przydatność do pracy w przekształtnikach z dużymi częstotliwościami przełączania. Tranzystory z węgla krzemu charakteryzują się najwyższymi wartościami napięć dopuszczalnych, przy zadowalających wartościach $R_{DS(on)}$, a ograniczenie ich szerszych zastosowań może wynikać z wysokich cen. Najnowsza grupa – tranzystory HEMT z GaN wydają się najatrakcyjniejsze, gdyż już obecnie mają bardzo dobre parametry i przy tym najlepsze perspektywy rozwoju.

Autorzy: prof. dr hab. inż. Włodzimierz Janke, Politechnika Koszalińska, Wydział Elektroniki i Informatyki, Katedra Elektroniki, ul. J.J. Śniadeckich 2, 75-453 Koszalin, E-mail: wlodzimierz.janke@tu.koszalin.pl; mgr inż. Maciej Bączek, Politechnika Koszalińska, Wydział Elektroniki i Informatyki, Katedra Elektroniki, ul. J.J. Śniadeckich 2, 75-453 Koszalin,

maciej.baczek@tu.koszalin.pl; dr inż. Jarosław Kraśniewski, Politechnika Koszalińska, Wydział Elektroniki i Informatyki, Katedra Elektroniki, ul. J.J. Śniadeckich 2, 75-453 Koszalin, jaroslaw.krasniewski@tu.koszalin.pl.

LITERATURA

- [1] J. Baliga, Advanced power rectifier concepts, Springer 2009, Ch. 2: Schottky rectifiers.
- [2] J. Baliga, The future of power semiconductor device technology, Proc. IEEE, Vol. 89, N. 6, June 2001, pp. 822-831.
- [3] W. Janke, W. Wojtasiak, Właściwości i zastosowania tranzystorów HEMT na bazie azotku galu, Przegląd Elektrotechniczny, R. 91, Nr 9/2015, pp. 65 – 73.
- [4] W. Janke, Zastosowanie tranzystorów HEMT z azotku galu w impulsowych przekształtnikach mocy, Zeszyty Naukowe Wydziału Elektroniki i Informatyki Nr 9, Politechnika Koszalińska, 2016, pp. 5-27
- [5] M. Cooke, Developing market for normally-off nitride power electronics, Semiconductor Today – Compounds & Advanced Silicon, vol.7, Issue 9, 2013, pp. 82 - 87
- [6] G. Patterson, GaN Switching for Efficient Converters, Power Electronics Europe, Issue 5, 2013, pp. 18 – 21.
- [7] 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.
- [8] J. Rąbkowski and R. Barlik, Experimental evaluation of GaN Gate Injection Transistors. Przegląd Elektrotechniczny, Nr 3/2015, str. 9-12.
- [9] M. Meneghini et al., Technology and Reliability of Normally-Off GaN HEMT with p-Type Gate, Energies, 2017, 10, 153.
- [10] N. Hari and F. Udrea, Investigation of Parasitics in Power Circuits Switched with Cascode GaN HEMTs, Int. Journ. of Research in Engineering and Technology, vol. 05, Issue 22, Oct. 2016.
- [11] M. Xiao-Hua et al., Breakdown mechanisms in AlGaIn/GaN high electron mobility transistors with different GaN channel thickness values, Chin. Phys. B, vol.24, N.2 (2015), (1-6).
- [12] W. Saito et al., Breakdown behaviour of high-voltage GaN-HEMTs, Microelectronics and Reliability, 2015.06.126.
- [13] Drain Voltage and Avalanche Ratings for GaN FETs, Application Note 0008, Transphorm Inc., January 13, 2017.
- [14] J. Rąbkowski, Tranzystory GaN w falowniku mostkowym o wysokiej częstotliwości przełączeń, Przegląd Elektrotechniczny, Nr 5/2016, str. 45-48.
- [15] 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..
- [16] T. Hirose et al., GaN HEMT Technology for Environmentally Friendly Power Electronics, Fujitsu Sci. Tech. J., vol. 53, N. 6, pp. 74-80 (Oct. 2017).
- [17] E. Persson, How 600V GaN Transistors Improve Power Supply Efficiency and Density, Power Electronics Europe, Issue 2, 2015, pp. 22 – 25.
- [18] E. Persson, Practical Application of 600V GaN HEMTs in Power Electronics, Appl. Power Electr. Conf. and Exposition APEC 2015, March 15-19, 2015.
- [19] S. Chellappan, Design Considerations of GaN devices for Improving Power-Converter Efficiency and Density, Texas Instruments Appl. Note Nov. 2017.
- [20] R. Miftakhudinov and J. Rice, Applying SiC and GaN to High-Frequency Power, Texas Instruments Appl. Note Sept. 2016.
- [21] GaN Systems GaN E-HEMT GS66508T Half Bridge Evaluation Board, ACPL-P346, Nov. 10, 2017.
- [22] P. Czyż, A. Cichowski, W. Śleszyński, Badania ewaluacyjne tranzystora 650 V E-HEMT GaN do zastosowań w wysokosprawnych przekształtnikach DC/DC, Zesz. Nauk. Wydziału Elektrotechniki i Automatyki PG, 2353-1290, Nr 47/201
- [23] R.W. Erickson, D Maksimovic, „Fundamentals of Power Electronics”, 2-nd Edition, Kluwer, 2002
- [24] M.K. Kazimierczuk, Pulse-Width Modulated DC–DC Power Converters, J. Wiley, 2008
- [25] W. Janke, M. Bączek, J. Kraśniewski, Wpływ efektów pasozytnicznych na wybrane właściwości przetwornicy Flyback, wysłane na XVII Krajową Konferencję Elektroniki