Joanna SZELĄGOWSKA

Akademia Morska w Gdyni, Wydział Elektryczny, Katedra Elektroniki Morskiej

doi:10.15199/48.2018.08.20

Charakterystyki i parametry tranzystora mocy SiC SJT

Streszczenie. *W pracy przedstawiono charakterystyki i parametry robocze tranzystora mocy SJT, wykonanego z węglika krzemu typu 2N7635-GA firmy GeneSiC. Przedyskutowano przebiegi tych charakterystyk oraz wartości wybranych parametrów, ze szczególnym uwzględnieniem wpływu temperatury i punktu pracy rozważanego przyrządu. Dla porównania zaprezentowano również wybrane charakterystyki tego przyrządu półprzewodnikowego dostępne w jego karcie katalogowej.*

Abstract. *The paper presents the characteristics and operating parameters of the SJT power transistor 2N7635-GA manufactured by GeneSiC. The characteristics and values of selected operating parameters with special emphasis on the effect of temperature and operating point of considered device are discussed. For comparison, selected characteristics of the considered transistor available in the data sheet, are presented as well.* ***(Characteristics and parameters of power SiC SJT).***

Słowa kluczowe: tranzystor SJT, węglik krzemu, samonagrzewanie.
Keywords: SJT, silicon carbide, self-heating phenomenon.

Wprowadzenie

Węglik krzemu (SiC) to materiał półprzewodnikowy o szerokiej przerwie energetycznej przydatny do konstrukcji wysokonapięciowych i wysokotemperaturowych elementów półprzewodnikowych, który spełnia wciąż rosnące wymagania dotyczące materiałów półprzewodnikowych stosowanych do produkcji przyrządów półprzewodnikowych dużej mocy. W porównaniu z krzemem, charakteryzuje się około 2,5-krotnie większą wartością szerokości przerwy energetycznej, dużo mniejszą wartością koncentracji nośników samoistnych w temperaturze pokojowej, ponad 2-krotnie większą wartością przewodności cieplnej oraz 10-krotnie większą wartością krytycznego natężenia pola elektrycznego [5, 7]. Zalety węglika krzemu powodują, że elementy SiC, w porównaniu z elementami krzemowymi, legitymują się również korzystniejszymi wartościami parametrów eksploatacyjnych, np. większą wytrzymałością napięciową, wyższą wartością maksymalnej temperatury wnętrza oraz krótszymi czasami przełączania [6, 7].

Od 2011 r. rynek oferuje innowacyjne przyrządy półprzewodnikowe mocy nazywane w literaturze SJT (ang. Silicon Carbide Junction Transistor) [1]. SJT to wykonane z węglika krzemu tranzystory NPN BJT, o bardzo dużej wartości współczynnika wzmocnienia prądowego, które wymagają niewielkiego prądu sterującego. Charakteryzują się one relatywnie dużymi wartościami dopuszczalnego napięcia wyjściowego i dużymi gęstościami prądu, nawet w wysokiej temperaturze otoczenia, a dodatkowo dobrymi właściwościami dynamicznymi charakteryzowanymi poprzez bardzo krótkie czasy przełączania. Obecnie, wiodącym producentem rozważanych przyrządów jest firma GeneSiC [1, 9, 10, 11].

W pracy zaprezentowano wyniki pomiarów charakterystyk statycznych i dynamicznych oraz współczynnika wzmocnienia prądowego tranzystora 2N7635-GA, wyprodukowanego przez firmę GeneSiC. Oceniono wpływ temperatury otoczenia i prądu sterującego na wartość współczynnika wzmocnienia prądowego. Przedyskutowano także wpływ temperatury otoczenia i napięć zaciskowych na pojemność wejściową i przejściową rozważanego przyrządu. Dodatkowo, zbadano wpływ zjawiska samonagrzewania na prezentowane charakterystyki statyczne badanego tranzystora. Dla porównania zaprezentowano również wybrane charakterystyki katalogowe rozważanego elementu.

Badany tranzystor

Przedmiotem badań jest tranzystor SJT 2N7635-GA umieszczony w wysokotemperaturowej obudowie TO-257. Klasyfikacja tranzystorów SJT nie jest jednoznaczna, co potwierdza przedstawiony w karcie katalogowej symbol rozważanej klasy przyrządów, łączący w sobie standardowe oznaczenie tranzystora bipolarnego z wyprowadzeniami nazwanymi jak w przypadku tranzystorów unipolarnych. Producent pragnął zaznaczyć, że omawiany przyrząd łączy w sobie zalety obu klas tranzystorów. W tabeli 1 zaprezentowano wartości wybranych parametrów elektrycznych i termicznych rozważanego przyrządu półprzewodnikowego [1].

Tabela 1. Wartości parametrów elektrycznych i termicznych tranzystora 2N7635-GA [1]

Parametr	Wartość
Dopuszczalne napięcie U_{DS}	600 V
Maksymalny prąd I_D	10 A
Dopuszczalna temperatura wnętrza T_{jmax}	210 ºC
Współczynnik wzmocnienia prądowego β (przy I_D=5 A, U_{DS}=5 V, T_j=25°C)	110
Rezystancja termiczna złącze-obudowa R_{thj-c}	4,18 ºC/W
Pojemność wejściowa C_{iss} (U_{GS}=0 V, U_{DS}=600 V, f=1 MHz)	600 pF
Pojemność przejściowa C_{rss} (U_{DS}=600 V, f=1 MHz)	17 pF

W porównaniu z przyrządami półprzewodnikowymi wykonanymi w technologii krzemowej, których wartość maksymalnej temperatury wnętrza wynosi przeważnie około 150°C, rozważany tranzystor z węglika krzemu legitymuje się znacznie większą wartością tej temperatury równą 210°C. Z kolei, wartość pojemności wejściowej badanego tranzystora jest kilkakrotnie mniejsza niż wartość analogicznej pojemności tranzystorów unipolarnych wykonanych z węglika krzemu [2, 8].

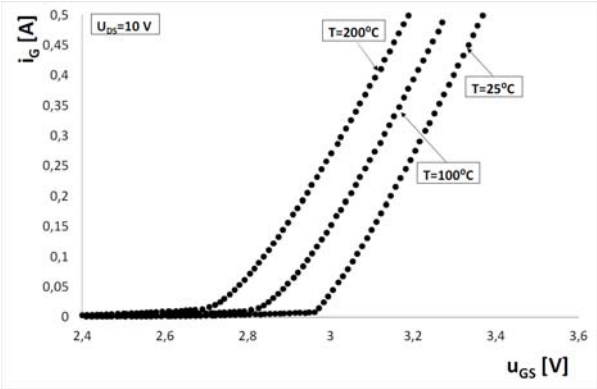
Wyniki badań

W pracy przedstawiono wyniki autorskich pomiarów charakterystyk i parametrów tranzystora SJT opisanego w rozdziale 2. Dla porównania przedstawiono również wybrane katalogowe charakterystyki izotermiczne badanego przyrządu półprzewodnikowego.

Pomiary w warunkach izotermicznych, tzn. gdy temperatura wnętrza tranzystora T_j jest w przybliżeniu równa temperaturze otoczenia, przeprowadzono za pomocą programowalnego źródła mierzącego 2602A firmy KEITHLEY [3] w szerokim zakresie zmian temperatury

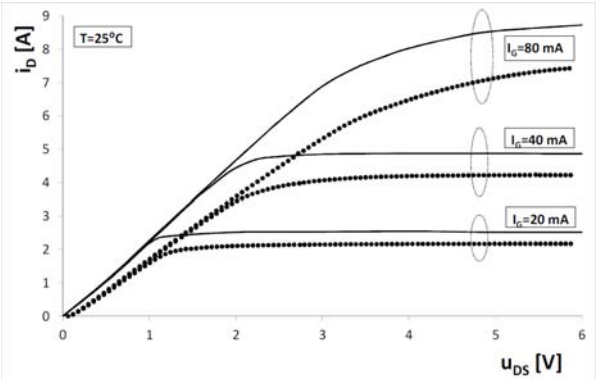
otoczenia. Z kolei, pomiary charakterystyk nieizotermicznych, wykonano metodą „punkt po punkcie" dla tranzystora bez radiatora w warunkach termicznie ustalonych, co znacznie wydłużyło procedurę pomiarową, a stan ustalony uzyskiwano nawet po 20 minutach. Dodatkowo mierzono temperaturę obudowy tranzystora T_c za pomocą miernika temperatury typu TM-2000 wyposażonego w czujnik PT-100. Czujnik został przymocowany do obudowy tranzystora za pomocą kleju termoprzewodzącego typu AG Termoglue 10G.

Na rys. 1 przedstawiono wyniki pomiarów izotermicznych statycznych charakterystyk wejściowych rozważanego tranzystora, przy ustalonej wartości napięcia wyjściowego U_{DS} równej 10 V i trzech wybranych wartościach temperatury otoczenia (25°C, 100°C i 200°C).

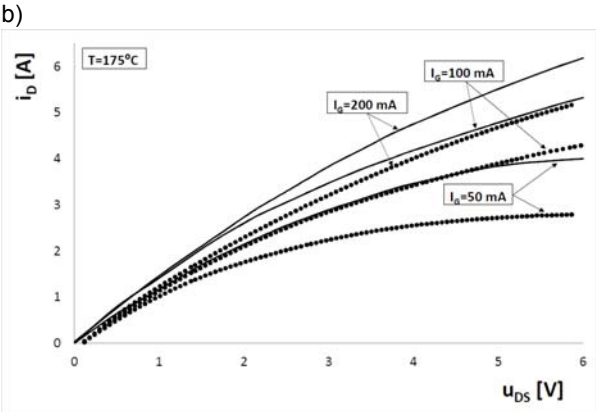


Rys.1. Izotermiczne statyczne charakterystyki wejściowe tranzystora 2N7635-GA

a)



b)



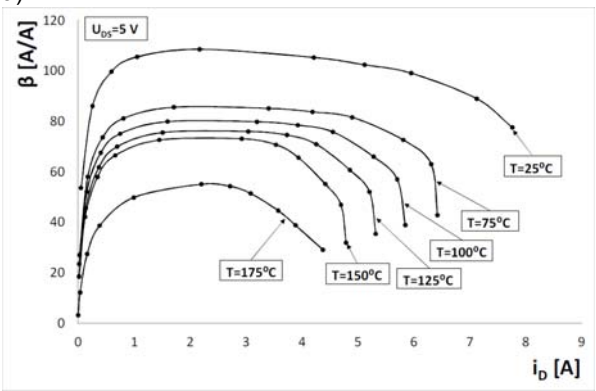
Rys.2. Izotermiczne statyczne charakterystyki wyjściowe tranzystora 2N7635-GA w temperaturze T=25°C a) oraz 175°C b)

Jak oczekiwano, wraz ze wzrostem temperatury otoczenia rozważane charakterystyki przesuwają się w lewo, a temperaturowy współczynnik zmian napięcia wejściowego, dla prądu wejściowego równego 0,2 A, wynosi około -1,1 mV/K.

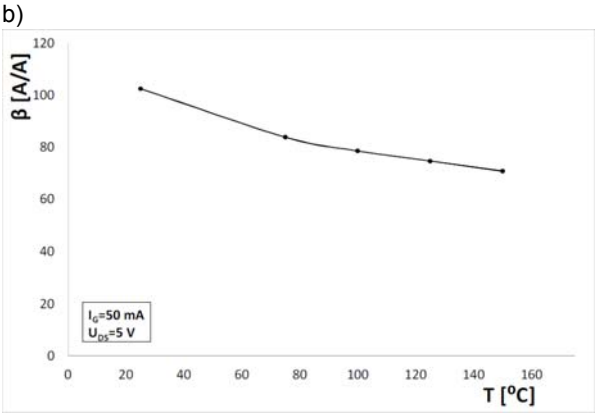
Na rys. 2 przedstawiono izotermiczne statyczne charakterystyki wyjściowe dla trzech różnych wartości prądu wejściowego w temperaturze otoczenia równej 25° C (rys. 2a) i 175° C (rys. 2b). Na rysunkach tych punkty oznaczają wyniki autorskich pomiarów, a linia ciągła - wyniki pomiarów zamieszczonych w karcie katalogowej badanego przyrządu. Jak wynika z rys. 2b, różnice między wynikami pomiarów autorskich a danymi katalogowymi sięgają nawet 42% w przypadku prezentowanych charakterystyk w temperaturze 175° C (dla prądu sterującego wynoszącego 50 mA i napięcia U_{DS} równego 5 V).

Rys. 3a prezentuje izotermiczną zależność współczynnika wzmocnienia prądowego β (wyrażonego przez stosunek prądu wyjściowego I_D do prądu wejściowego I_G) rozważanego tranzystora od prądu wyjściowego i_D, zmierzoną dla temperatury otoczenia z zakresu 25°C - 175°C (przy ustalonej wartości napięcia wyjściowego U_{DS} równej 5 V). Z kolei, rys. 3b ilustruje zależność omawianego parametru β w funkcji temperatury otoczenia T dla ustalonego napięcia wyjściowego U_{DS} równego 5 V i prądu sterującego I_G równego 50 mA. Jak pokazano na rys. 3a, w zakresie wartości prądu wyjściowego do około 1,5 A zależność $\beta(i_D)$ jest funkcją monotonicznie rosnącą, natomiast w zakresie wyższych wartości tego prądu (powyżej 4 A) wartość rozważanego współczynnika maleje wraz ze wzrostem prądu i_D. Ponadto, jak wynika z rys. 3b, zależność współczynnika wzmocnienia prądowego β(T), dla ustalonej wartości prądu sterującego, jest funkcją malejącą. Jest to cecha charakterystyczna dla bipolarnych tranzystorów mocy wykonanych w technologii węglika krzemu, co prezentowano m.in. w pracach [4,7].

a)

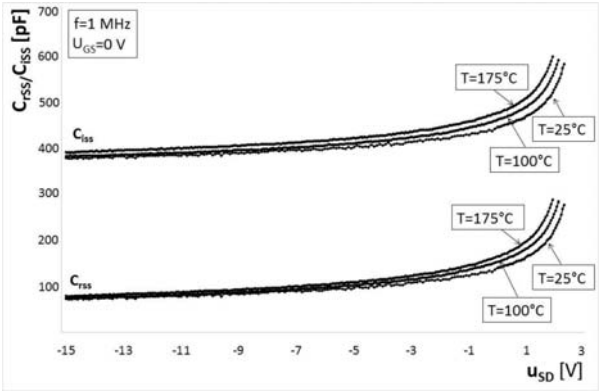


b)



Rys.3. Zależność $\beta(i_D)$ (a) oraz zależność β(T) (b) tranzystora 2N7635-GA

Z kolei, na rys. 4 pokazano wyniki pomiarów zależności pojemności wejściowej C_{iss} oraz przejściowej C_{rss} od napięcia u_{SD} badanego tranzystora SJT, przy napięciu U_{GS} równym 0 V, dla różnych wartości temperatury otoczenia T.



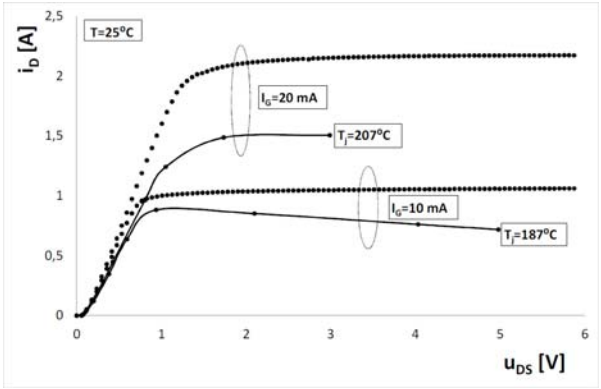
Rys.4. Charakterystyki $C_{iss}(u_{SD})$ i $C_{rss}(u_{SD})$ tranzystora 2N7635-GA

Jak widać, w przypadku prezentowanych zależności C(u) rozważanego przyrządu (rys. 4), niewielki wpływ temperatury otoczenia widoczny jest w całym rozważanym zakresie napięcia u_{SD}. Przykładowo, wraz ze wzrostem temperatury otoczenia o 150°C wartość pojemności C_{rss} i C_{iss} rośnie odpowiednio o 13% i 6% (przy ustalonej wartości napięcia U_{SD}=0 V).

Na rys. 5 przedstawiono wyniki pomiarów statycznych charakterystyk wyjściowych badanego tranzystora zmierzonych w warunkach izotermicznych (punkty) i nieizotermicznych (punkty połączone linią ciągłą) przy ustalonej wartości prądu sterującego równego 10 mA, w temperaturze pokojowej. Wartość temperatury wnętrza T_j badanego tranzystora, wyznaczono korzystając z zależności [5]:

$$T_j = T_c + \left(i_D \cdot u_{DS} + i_G \cdot u_{GS}\right) \cdot R_{thj-c} \tag{1}$$

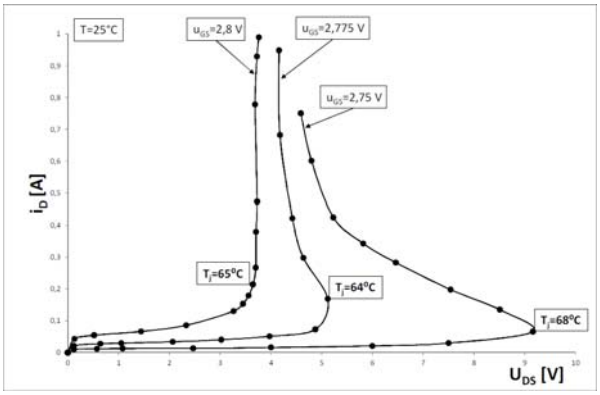
gdzie T_c oznacza wartość temperatury obudowy tranzystora zmierzoną za pomocą czujnika PT-100, $(i_D \cdot u_{DS} + i_G \cdot u_{GS})$ jest wartością mocy wydzielanej w tranzystorze, natomiast R_{thj-c} oznacza katalogową wartość rezystancji termicznej między wnętrzem a obudową tranzystora równą 4,18 °C/W.



Rys.5. Izotermiczne i nieizotermiczne statyczne charakterystyki wyjściowe tranzystora 2N7635-GA

Zatem temperatura wnętrza elementu mierzona wzdłuż rozważanych charakterystyk nieizotermicznych rośnie, gdyż rośnie wydzielana w elemencie moc. Jednakże z uwagi na malejącą zależność współczynnika wzmocnienia prądowego od temperatury, zilustrowaną na rys. 3b, charakterystyki nieizotermiczne leżą poniżej analogicznych charakterystyk izotermicznych (współczynnik wzmocnienia prądowego jest malejącą funkcją temperatury). Ponadto warto zwrócić uwagę na fakt, że nieizotermiczne charakterystyki wyjściowe tranzystora SJT, prezentowane na rys. 5, różnią się także jakościowo od swoich odpowiedników izotermicznych.

Na rys. 6 przedstawiono wyniki pomiarów nieizotermicznych charakterystyk wyjściowych badanego tranzystora SJT dla różnych wartości napięcia sterującego, w temperaturze otoczenia równej 25°C. Jak ilustruje rys. 6, wpływ zjawiska samonagrzewania powoduje zmianę znaku rezystancji dynamicznej w punktach przebicia elektrotermicznego, które występują w stałej temperaturze wnętrza badanego tranzystora równej około 65°C.



Rys.6. Nieizotermiczne statyczne charakterystyki wyjściowe tranzystora 2N7635-GA

Podsumowanie

W pracy dokonano oceny właściwości tranzystora mocy SiC SJT typu 2N7635-GA. Wykazano istotny wpływ temperatury otoczenia oraz zjawiska samonagrzewania na wartość współczynnika wzmocnienia prądowego β oraz charakterystyki statyczne badanego tranzystora. Z przedstawionych rezultatów badań wynika, że zależność napięcia wejściowego w funkcji temperatury (dla ustalonej wartości prądu wejściowego) ma charakter liniowy. Ponadto, wyniki przeprowadzonych badań pokazały, że temperatura w niewielkim stopniu wpływa na wartości prezentowanych pojemności rozważanego tranzystora. A zatem tranzystory SJT można z powodzeniem stosować w układach pracujących w wysokich temperaturach, przy zachowaniu termicznej stabilności ich właściwości dynamicznych. Wyniki badań przedstawione w pracy mogą posłużyć do sformułowania modelu tranzystora SJT z węglika krzemu.

Autorzy: *mgr inż. Joanna Szelągowska, Akademia Morska w Gdyni, Wydział Elektryczny, Katedra Elektroniki Morskiej, ul. Morska 81-87, 81-225 Gdynia.*

LITERATURA

[1] http://www.genesicsemi.com/commercial-sic/sic-junction-transistors/
[2] G. Li, H Li, A. Deshpande, X. Li, L. Xu, F. Luo, J. Wang, Comparison between 1.7 kV SiC SJT and MOSFET power modules, *IEEE 4th Workshop on Wide Bandgap Power Devices and Applications (WiPDA)*, DOI: 10.1109/WiPDA.2016.7799903, 2016
[3] http://tespol.com.pl/wp-content/uploads/2016/01/Keithley-4200-SCS-datasheet.pdf

[4] J. M. Niedra, G. E. Schwarze, Static and Switching Characteristics of a 4H-SiC Based BJT to 200°C, *Technical Report NASA/TM—2006-214345*, NASA Glenn Research Center; Cleveland, OH, 2006
[5] K. Górecki, W. J. Stepowicz,. J. Zarębski, Functional and catastrophic thermal failures in bipolar electronic circuits, *12th IEEE International Conference on Electronics, Circuits and Systems*, DOI: 10.1109/ICECS.2005.4633593, 2008
[6] R. Singh, S. Sundaresan, Fulfilling the Promise of High-Temperature Operation with Silicon Carbide Devices: Eliminating bulky thermal-management systems with SJTs, *IEEE Power Electronics Magazine*, Volume: 2, Issue: 1, pp. 27 – 35, DOI: 10.1109/MPEL.2014.2383328, March 2015
[7] J. Patrzyk, J. Zarębski and D. Bisewski, DC characteristics and parameters of silicon carbide high-voltage power BJTs, *39th International Microelectronics and Packaging Poland Conference*, Book Series: IOP Conference Series-Materials Science and Engineering ,Vol. 104, 2016
[8] Y. Cui, M. S. Chinthavali, F. Xu, L. M. Tolbert, Characterization and modeling of silicon carbide power devices and paralleling operation, *IEEE International Symposium on Industrial Electronics (ISIE),* DOI: 10.1109/ISIE.2012.6237089, 2012
[9] S.Sundaresan, R.Singh, R. W. Johnson, Silicon Carbide „Super" Junction Transistors operating at 500°C, *IMAPS High Temperature Electronics Conference*, 2012
[10] S. E. Brooks, Modeling and Simulation of 1700 V 8 A GeneSiC "Super" junction Transistor, *Theses and Dissertations*, University of Arkansas, USA, 2016
[11] R. Singh, S. Sundaresan, E. Lieser, M. Digangi, 1200 V SiC "Super" Junction Transistors operating at 250 °C with extremely low energy losses for power conversion applications, *Applied Power Electronics Conference and Exposition (APEC),* USA, Orlando, 2012