

Charakterystyki i parametry tranzystora SiC BJT

Abstract: The paper presents the results of measurements of static characteristics and the values of the basic operating parameters of a BJT transistor made of silicon carbide. The shape of these characteristics was discussed and their simulations were performed using the bipolar transistor model built in the SPICE program. The program used in the simulations both parameter values taken from the manufacturer's website, and the parameter values obtained using the estimation procedure, respectively.

Streszczenie: W pracy przedstawiono wyniki pomiarów charakterystyk statycznych oraz wybranych na ich podstawie wartości podstawowych parametrów roboczych tranzystora bipolarnego wykonanego w technologii węgla krzemu. Przedyskutowano przebiegi tych charakterystyk oraz przeprowadzono ich symulacje za pomocą programu SPICE. W symulacjach wykorzystano zarówno wartości parametrów wbudowanego w programie SPICE modelu tranzystora bipolarnego, zaczerpnięte ze strony producenta, jak i autorskie wartości parametrów otrzymane z wykorzystaniem procedury estymacji. (**Characteristics and parameters of SiC BJT transistor**)

Keywords: BJT, silicon carbide, SPICE, modeling.

Słowa kluczowe: tranzystor bipolarny, węgiel krzemu, SPICE, modelowanie.

Wprowadzenie

Krzemowe bipolarnie tranzystory mocy są powszechnie wykorzystywane w elektronice od kilku dziesięcioleci. W roku 2008 pojawiły się komercyjnie dostępne bipolarnie tranzystory w technologii SiC [1].

Właściwości materiałowe SiC, takie jak: 2,5-krotnie większa wartość szerokości przerwy energetycznej, dużo mniejsza wartość koncentracji nośników samoistnych w temperaturze pokojowej, 3-krotnie większa wartość przewodności cieplnej oraz 10-krotnie większa wartość krytycznego natężenia pola elektrycznego, sprawiają, że przyrządy półprzewodnikowe wykonane z węgla krzemu, w porównaniu z ich krzemowymi odpowiednikami, legitymują się korzystniejszymi wartościami parametrów roboczych tj. większą wytrzymałością napięciową, wyższą wartością maksymalnej temperatury złącza oraz krótszymi czasami przełączania [2].

W 2023 roku firma GeneSiC posiadała w swojej ofercie sprzedaży 14 typów tych tranzystorów, różniących się między sobą zarówno typem obudowy jak również wartościami parametrów elektrycznych i termicznych, przeznaczonych głównie do: falowników do systemów fotowoltaicznych, zasilaczy awaryjnych, konwerterów energii elektrycznej, napędów silników elektrycznych, hybrydowych silników elektrycznych oraz turbin wiatrowych [3,9].

Producenci rozważanej klasy tranzystorów podają w notach katalogowych, oprócz wartości parametrów roboczych oraz wybranych charakterystyk, również wartości wybranych parametrów dedykowanych do modeli swoich produktów wbudowanych w programie SPICE [3].

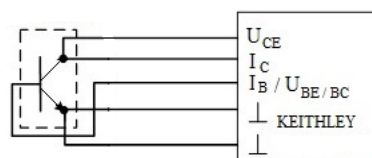
W pracy autorzy przedstawili wyniki własnych badań wybranego tranzystora bipolarnego o oznaczeniu GA05JT03-46, legitymującego się maksymalną wartością prądu kolektora równą 9 A, maksymalną wartością dopuszczalnego napięcia wyjściowego równą 300 V, maksymalną temperaturą złącza wynoszącą 210°C, współczynnikiem wzmocnienia prądowego β przekraczającym wartość 100 A/A oraz czasami narastania i opadania równymi kolejno 6,6 ns i 12,4 ns.

Prezentowano wyniki pomiarów charakterystyk statycznych oraz wybranych na ich podstawie wartości podstawowych parametrów eksploatacyjnych: współczynnika wzmocnienia prądowego β , prądu zerowego I_{CE0} , napięcia nasycenia U_{CEsat} , napięcia przebicia U_{BR} w funkcji temperatury oraz dodatkowo dla parametru β w funkcji prądu kolektora.

Wyznaczono także temperaturowe współczynniki charakteryzujące ilościowe zmiany położenia wybranych charakterystyk statycznych badanego przyrządu. Przeprowadzono również symulacje rozważanych charakterystyk za pomocą programu SPICE. W symulacjach wykorzystano zarówno wartości parametrów wbudowanego w programie SPICE modelu tranzystora bipolarnego, zaczerpnięte ze strony producenta, jak i autorskie wartości parametrów otrzymane z wykorzystaniem procedury estymacji opartej na algorytmie genetycznym [4].

Narzędzia pomiarowe i symulacyjne

Wyniki pomiarów zamieszczone w pracy uzyskano przy wykorzystaniu systemu programowalnego źródła mierzącego firmy KEITHLEY (rys. 1).



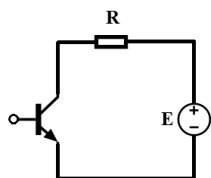
Rys. 1 Układ do pomiaru izotermicznych charakterystyk statycznych przy zastosowaniu programowalnego źródła mierzącego Keithley.

System ten umożliwia pomiary prądów w zakresie nie przekraczającym 50 A i napięć wyjściowych o wartościach do 200 V.

Badany tranzystor umieszczono w komorze badań cieplnych KBC-32W, umożliwiającą regulację temperatury otoczenia w zakresie od temperatury pokojowej do temperatury 250°C.

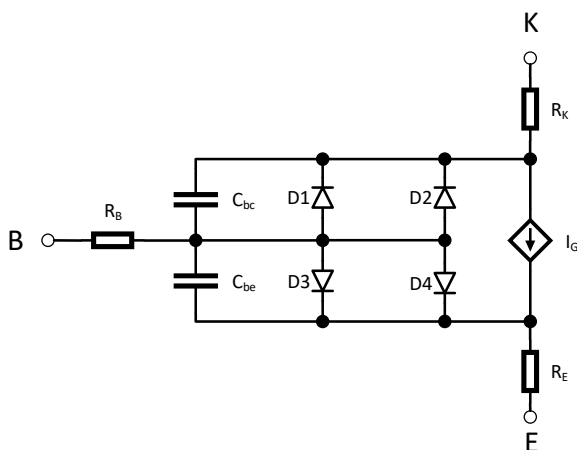
W celu wyeliminowania wpływu efektu samonagrzewania, pomiary przeprowadzono automatycznie metodą impulsową. Kształt i czas trwania impulsów pobudzających dobrano tak, aby w czasie pomiarów temperatura obudowy nie wzrosła ponad temperaturę otoczenia o więcej niż 1°C. W czasie pomiarów monitorowano temperaturę obudowy za pomocą czujnika temperatury PT100.

Pomiary wysokonapięciowe dla wartości napięć U_{CE} przekraczających 200 V, przy braku pobudzenia bazy, wykonano w prostym układzie pokazanym na rys. 2.



Rys. 2 Schemat pomiarowy do pomiarów charakterystyk wyjściowych przy zerowej polaryzacji bazy

Symulacje przeprowadzono w programie SPICE, wykorzystując do obliczeń uproszczony stałoprądowy model tranzystora bipolarnego przedstawiony na rys. 3 [6].



Rys. 3. Model BJT wbudowany w programie SPICE [6]

Najważniejszym elementem rozważanego modelu jest sterowane źródło prądowe, modelujące prąd główny I_G tranzystora. Diody D1 i D2 oraz D3 i D4 modelują zjawiska dla małych prądów, tj. zjawiska generacji i rekombinacji w warstwach ładunku przestrzennego poszczególnych złączy za pomocą składowej idealnej (diody D1 i D2) i nieidealnej (diody D3 i D4), prądów złącza kolektor-baza oraz złącza emiter-baza. Pojemności C_{bc} i C_{be} odpowiadają nieliniowej pojemności złączeniowej i dyfuzyjnej obydwu złączy tranzystora. Wartości rezystancji R_E , R_K i R_B reprezentują odpowiednio rezystancje omowe obszarów emitera, kolektora i bazy [6].

W tabeli 1 przedstawiono wartości parametrów modelu tranzystora bipolarnego zaczerpnięte z danych katalogowych producenta (PK) oraz otrzymane przez autorów przy wykorzystaniu algorytmu genetycznego (PA) [3,4].

Tabela 1. Wartości parametrów modelu wbudowanego w programie SPICE zaczerpnięte z danych katalogowych producenta (PK) oraz wyznaczone przez autorów (PA) [3,4].

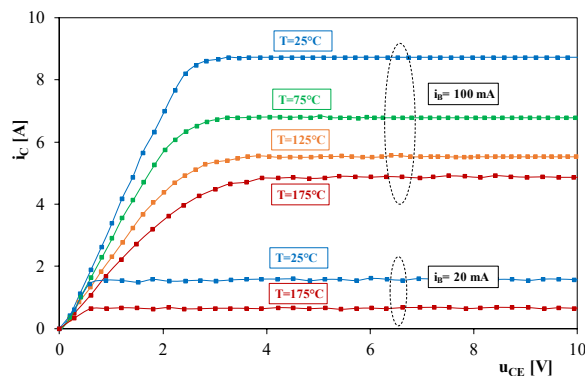
Parametr	Wartość PK	Wartość PA	Jednostka
IS	9,83E-48	1E-50	A
ISC	default	2,43E-49	A
ISE	1,07E-26	7,59E-47	A
EG	3,23	3,23	eV
BF	135	89	-
BR	0,55	0,5	-
IKF	200	default	A
NF	1	0,907	-
NE	2	7,199	-
RB	14,5	0,356	Ω
IRB	0,002	1E-16	A
RBM	0,37	default	Ω
RE	0,01	0,26	Ω
RC	0,23	3	Ω

CJC	2,16E-10	2,30E-10	F
VJC	3,65	2,78	V
MJC	0,47	0,425	-
CJE	5,021E-10	4,79E-10	F
VJE	2,95	2,95	V
MJE	0,48	0,49	-
XTI	3	9,156	-
XTB	-1	-1,194	-
TRC1	1,05E-2	0,0025	$^{\circ}\text{C}^{-1}$
FC	default	0,9	-

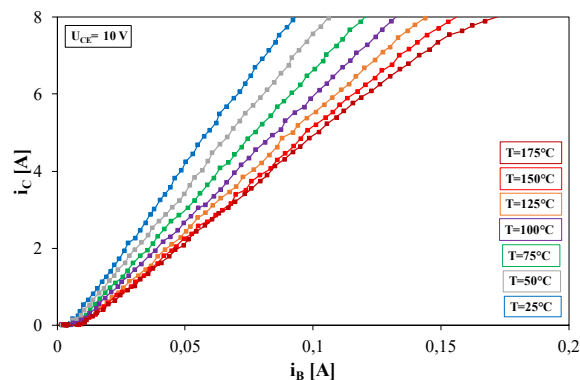
Wartość szerokości przerwy energetycznej EG nie była wyznaczana za pomocą procedury estymacji lecz została ona pobrana bezpośrednio z literatury dla politypii krystalicznej 4H-SiC, z której wykonane zostały badane tranzystory. Prądy nasycenia złącza baza-emiter ISE i baza-kolektor ISC zostały obliczone na podstawie autorskich wyników pomiarów charakterystyk $i_B(u_{BE})$ oraz $i_B(u_{BC})$. Wartość współczynnika wzmacnienia prądowego BF dla polaryzacji normalnej oraz współczynnika wzmacnienia prądowego BR dla polaryzacji inwersyjnej zostały wyznaczone z zależności $\beta(i_C)$ natomiast wartości pojemności złącza baza-emiter CJE i baza-kolektor CJC przy zerowej polaryzacji zostały wyznaczone z charakterystyk $C_{be}(u_{BE})$ i $C_{bc}(u_{BC})$. Wartości parametrów oznaczone jako „default” oznaczają wartości domyślne wbudowane dla tranzystora bipolarnego w programie SPICE. Wartości pozostałych parametrów, prezentowanych w Tabeli 1. wyznaczone za pomocą algorytmu genetycznego.

Wyniki badań

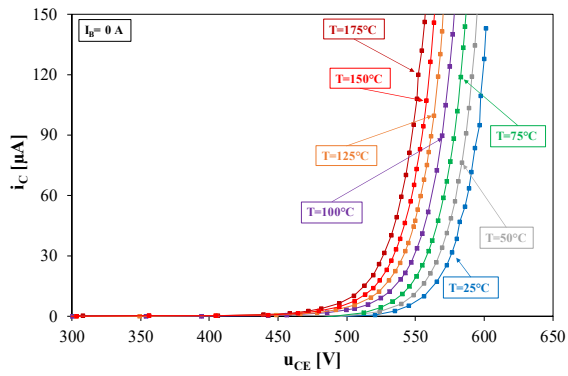
Uzyskane z pomiarów charakterystyki przedstawiono na rys. 4 – rys. 6, przy czym rysunki 4 i 5 dotyczą charakterystyk w zakresie napięć u_{CE} nie przekraczających 200 V, natomiast rys. 6 dotyczy charakterystyk wyjściowych w zakresie przebiecia tranzystora.



Rys. 4. Izotermiczne charakterystyki wyjściowe $i_C(u_{CE})$



Rys. 5. Izotermiczne charakterystyki przejściowe $i_C(i_B)$

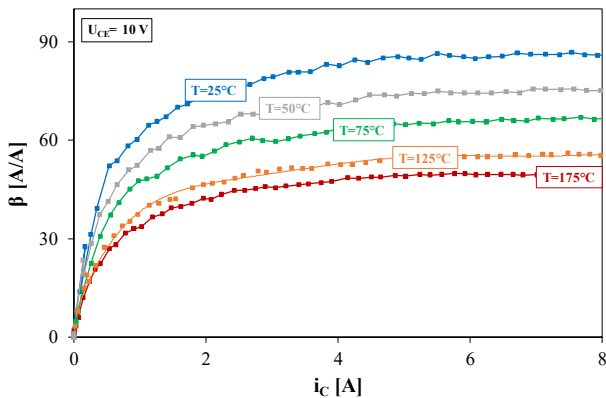


Rys. 6. Izotermiczne charakterystyki wyjściowe $i_c(u_{CE})$ przy zerowej polaryzacji bazy

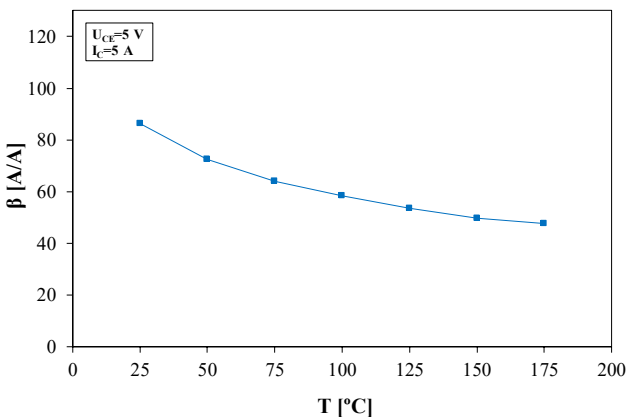
Z przedstawionych charakterystyk wynika szereg interesujących informacji, które skomentowano oraz zilustrowano graficznie w dalszej części niniejszego punktu. Z charakterystyk wyjściowych w zakresie aktywnym-normalnym (rys. 4) oraz z charakterystyk przejściowych (rys. 5) wynika, że wartość współczynnika wzmocnienia prądowego β :

- a) maleje ze wzrostem temperatury otoczenia,
- b) rośnie ze wzrostem prądu kolektora.

Na rys. 7 i 8 przedstawiono, wyznaczone z przejściowych charakterystyk statycznych $i_c(i_B)$, zależności $\beta(T)$ oraz $\beta(i_c)$.



Rys. 7. Zależność parametru β w funkcji prądu kolektora



Rys. 8. Zależność parametru β w funkcji temperatury otoczenia

Jak widać (rys. 7 i 8), wartość parametru β maleje wykładniczo ze wzrostem temperatury otoczenia. Jak wynika z prac [5,7,8] dla bipolarnych tranzystorów krzemowych wartość rozważanego parametru jest liniowo rosnącą funkcją temperatury i może być opisana za pomocą prostej zależności znanej z literatury o postaci:

$$(1) \quad \beta(T) = \beta(T_0) [1 + \alpha \cdot (T - T_0)]$$

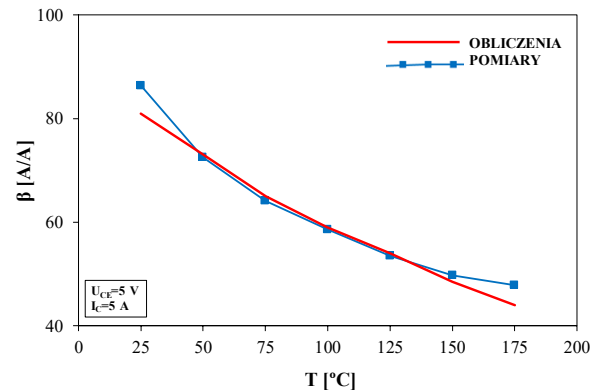
gdzie: T_0 - temperatura odniesienia; $\beta(T_0)$ - wartość współczynnika β w temperaturze odniesienia; α - temperaturowy współczynnik zmian współczynnika β

Jak wynika z charakterystyki przedstawionej na rys. 8, dla rozważanego tranzystora SiC BJT spadek wartości współczynnika wzmocnienia prądowego β jest zależnością wykładniczą, która może być opisana za pomocą wzoru analitycznego (2), wykorzystywanego m.in. w programie SPICE [6]:

$$(2) \quad \beta(T) = \beta(T_0) \left(\frac{T}{T_0} \right)^\chi$$

gdzie: T_0 - temperatura odniesienia; $\beta(T_0)$ - wartość parametru β w temperaturze odniesienia; χ - temperaturowy współczynnik zmian parametru β

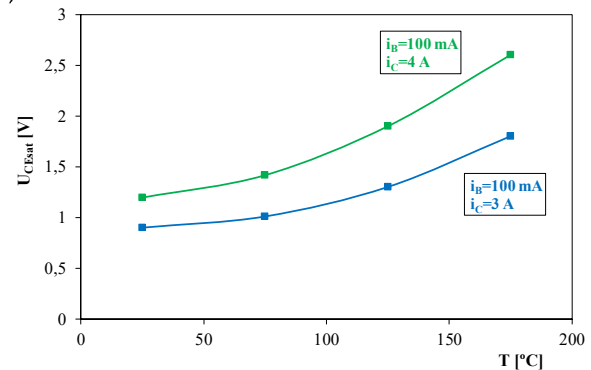
Na rys. 9 przedstawiono wyniki pomiarów współczynnika wzmocnienia prądowego w funkcji temperatury otoczenia oraz wyniki symulacji, przeprowadzonych przy użyciu obliczeń za pomocą wzoru (2).



Rys. 9. Zależność parametru β w funkcji temperatury otoczenia

Jak widać (rys. 9), zależność parametru β w funkcji temperatury otoczenia może być z dużą dokładnością obliczana za pomocą wzoru (2).

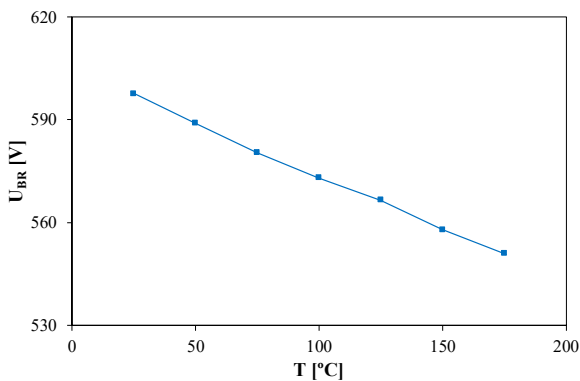
Ważne informacje o właściwościach tranzystora pracującego w zakresie nasycenia wynikają z rysunku 4. Na podstawie przedstawionych na nim charakterystyk, wyznaczono zależność napięcia nasycenia U_{CEsat} w funkcji temperatury otoczenia dla różnych wartości prądu kolektora i ustalonej arbitralnie wybranej wartości prądu bazy (rys. 10).



Rys. 10. Zależność napięcia nasycenia U_{CEsat} w funkcji temperatury otoczenia

Jak wynika z kształtu przebiegów zilustrowanych na rys. 10, wartość napięcia nasycenia rośnie zarówno ze wzrostem temperatury otoczenia jak i prądu kolektora. Wyznaczony z autorskich pomiarów temperaturowy współczynnik zmian tego napięcia przy ustalonej wartości napięcia prądu bazy i kolektora wynosi 0,43 V/°C.

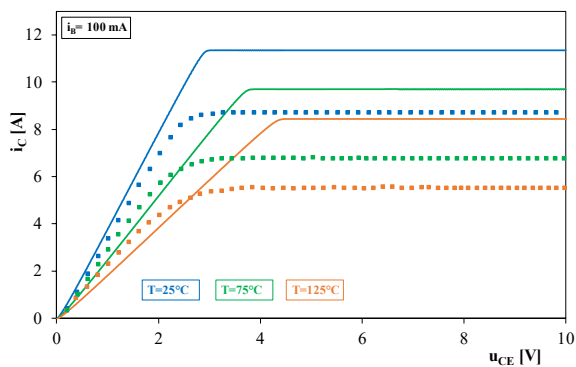
Wartość napięcia przebicia U_{BR} , przy ustalonej wartości prądu kolektora, którą określono arbitralnie na poziomie 0,1 mA, wyznaczono z charakterystyk przedstawionych na rys. 6. Na rys. 11 przedstawiono zależność napięcia przebicia rozważanego tranzystora w funkcji temperatury otoczenia. Z informacji zamieszczonych na rys. 6 wynika, że rzeczywiste napięcie przebicia tranzystora U_{BR} jest o 100% większe od deklarowanej przez producenta wytrzymałości napięciowej tego przyrządu w temperaturze otoczenia równej 25°C. Wartość napięcia U_{BR} w podanej przez producenta temperaturze pracy wynosi 300 V, co jest wartością niższą od wartości uzyskanej na drodze pomiarowej o niespełna 300 V.



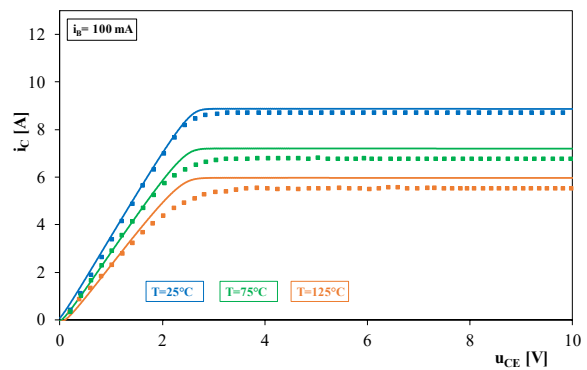
Rys. 11. Zależność napięcia przebicia U_{BR} w funkcji temperatury otoczenia

Jak widać (rys.11), ze wzrostem temperatury otoczenia wartość napięcia przebicia maleje liniowo zmniejszając tym samym wytrzymałość napięciową przyrządu. Wartość temperaturowego współczynnika zmian napięcia U_{BR} wynosi -0,3 V/°C co oznacza, że w zakresie zmian temperatury otoczenia o 150°C napięcie przebicia zmienia się o ponad 40 V.

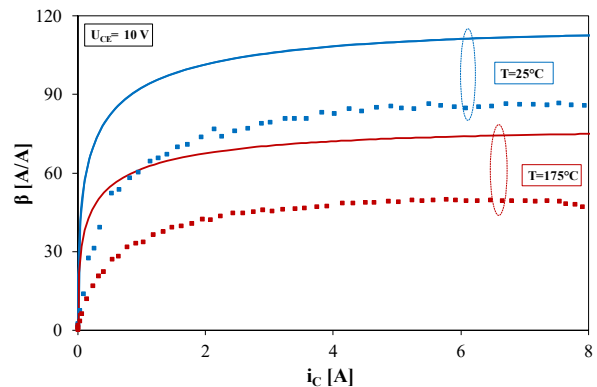
Pomierzone charakterystyki posłużyły do weryfikacji modelu rozważanego przyrządu wbudowanego w programie SPICE. Na rys. 12-15 dla wybranych charakterystyk, porównano wyniki pomiarów i obliczeń, w których wykorzystano zarówno katalogowe jak i autorskie wartości parametrów modelu zestawione w tabeli 1. Wyniki pomiarów oznaczono punktami, natomiast wyniki symulacji linią ciągłą.



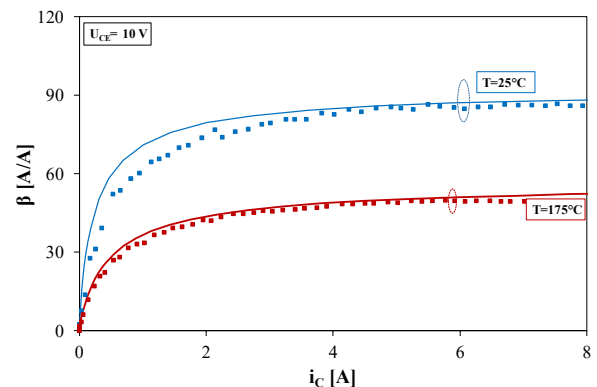
Rys. 12. Izotermiczna charakterystyka wyjściowa $i_c(u_{CE})$ – katalogowe wartości parametrów modelu BJT w SPICE



Rys. 13. Izotermiczna charakterystyka wyjściowa $i_c(u_{CE})$ – wartości parametrów modelu BJT w SPICE po estymacji



Rys. 14. Zależność parametru β w funkcji prądu kolektora – katalogowe wartości parametrów modelu BJT w SPICE



Rys. 15. Zależność parametru β w funkcji prądu kolektora – wartości parametrów modelu BJT wyznaczone za pomocą autorskiej estymacji

Jak widać (rys.12 i rys.14), zaobserwowano istotne rozbieżności pomiędzy wynikami symulacji i pomiarów, zarówno w przypadku wyjściowych charakterystyk prądowo napięciowych jak również w przypadku zależności współczynnika wzmocnienia prądowego w funkcji prądu wyjściowego. Zatem dokładność modelu BJT, wbudowanego w programie SPICE, z wartościami parametrów podanymi przez producenta dla rozważanych charakterystyk jest niezadowalająca.

Zauważalną poprawę zgodności wyników symulacji i pomiarów zaobserwowano natomiast w przypadku rozważanych charakterystyk przedstawionych na rysunkach 13 i 15, dla których wartości parametrów modelu wyznaczone były za pomocą procedury estymacji parametrów z wykorzystaniem algorytmu genetycznego.

Uwagi końcowe

W pracy przedstawiono wyniki pomiarów i symulacji izotermicznych charakterystyk statycznych oraz wybranych na ich podstawie wartości podstawowych parametrów roboczych. Zgromadzony materiał badawczy ilustruje właściwości tranzystora SiC BJT oraz przydatność modelu tranzystora bipolarnego wbudowanego w programie SPICE, zarówno w przypadku korzystania z wartości parametrów katalogowych jak również wartości parametrów uzyskanych za pomocą estymacji, co znacząco przyczyniło się do zwiększenia dokładności prezentowanych wyników symulacji.

Authors: mgr inż. Joanna Patrzyk, Gdynia Maritime University, Department of Marine Electronics, 83 Morska Str., 81-225 Gdynia, e-mail: j.patryk@we.umg.edu.pl; prof. dr hab. inż. Janusz Zarębski Gdynia Maritime University, Department of Marine Electronics, 83 Morska Str., 81-225 Gdynia, e-mail: j.zarebski@we.umg.edu.pl, dr inż. Damian Bisewski Gdynia Maritime University, Department of Marine Electronics, 83 Morska Str., 81-225 Gdynia, e-mail: d.bisewski@we.umg.edu.pl,

LITERATURA

- [1] Huang Y., Cheng S., Zhou W., Sheng K., "Modeling of a 1200 V 6 A SiC Bipolar Junction Transistor", IEEE Energy Conversion Congress and Exposition, Denver, CO, USA, 2013
- [2] Zarębski J., Górecki K. and Dąbrowski J., "Modeling of SiC MPS Diodes", INTERNATIONAL CONFERENCE ON MICROELECTRONICS, pp.192-195, 2008
- [3] <https://genesicsemi.com/pl/>
- [4] Bisewski D., "Zastosowanie algorytmu genetycznego w procesie estymacji parametrów modeli przyrządów półprzewodnikowych", Przegląd Elektrotechniczny, r. 98, nr 9/2022
- [5] Zhang Q., Zhang Y., Zhang Y., Wang Y., "Modeling of Current Gain versus Recombination in Double Base Epilayer 4H-SiC BJTs", 2010 IEEE International Conference of Electron Devices and Solid-State Circuits (EDSSC), China, 2010
- [6] PSPICE A/D Reference Guide Version 15.7, Cadence Design Systems, Inc., April 2006
- [7] Dong P., Yan X., Zhang L., Jin S., Dai F., Zhang Y., Cui Y., Yu X., Huang B., "Relating Gain Degradation to Defects Production in Neutron-Irradiated 4H-SiC Transistors", IEEE Transactions on Nuclear Science, Vol. 68, No. 3, pages 312 – 317, 2021
- [8] Sadik D.P., Colmenares J., Lim J., Bakowski M., Nee H.P., "Comparison of Thermal Stress During Short-Circuit in Different Types of 1.2-kV SiC Transistors Based on Experiments and Simulations", IEEE Transactions on Industrial Electronics, Vol. 68, No. 3, pages 2608-2616, 2021
- [9] Górecki K., Detka K., "SPICE-Aided Models of Magnetic Elements—A Critical Review", *Energies*, Vol. 16, No. 18, 2023