

Joanna SZELAĞOWSKA*, Janusz ZARĘBSKI*

POMIARY I OBLICZENIA POJEMNOŚCI TRANZYSTORÓW MOCY BJT I SJT WYKONANYCH Z WĘGLIKA KRZEMU

W pracy zaprezentowano wyniki pomiarów charakterystyk pojemności $C(u)$ sterowanych prądowo tranzystorów BJT i SJT, które zrealizowano z wykorzystaniem programowalnego systemu mierzącego firmy Keithley. Wyniki pomiarów porównano z wynikami obliczeń przy zastosowaniu popularnego i często stosowanego modelu Gummela-Poona tranzystora bipolarnego. Dla porównania, przedstawiono również wyniki pomiarów zaprezentowane w literaturze oraz w kartach katalogowych badanych przyrządów. Ponadto, oceniono wpływ temperatury otoczenia na kształt rozważanych charakterystyk pojemności.

SŁOWA KLUCZOWE: BJT, modelowanie, pojemności, SJT.

1. WPROWADZENIE

Szybki rozwój technologii elektronicznej powoduje, że węgiel krzemu SiC (*Silicon Carbide*) jest obecnie jednym z najbardziej obiecujących materiałów do wytwarzania przyrządów półprzewodnikowych dużej mocy charakteryzujących się jednocześnie stosunkowo krótkimi czasami przełączania. Obecnie na rynku dostępne są różnego rodzaju przyrządy półprzewodnikowe wykonane z węgla krzemu stosowane w energoelektronicznych układach impulsowych. Do tej grupy zaliczają się między innymi klasyczne – sterowane prądowo tranzystory BJT (*Bipolar Junction Transistor*) oferowane od 2008 roku [6] przez firmę TranSiC oraz nowoczesne tranzystory SJT (*Silicon Carbide Junction Transistor*) o stosunkowo wysokiej wartości współczynnika wzmocnienia prądowego, oferowane od 2011 r. przez firmę GeneSiC [7]. Jak wynika z danych katalogowych [3, 8], rozważane tranzystory mogą pracować przy relatywnie dużych wartościach napięcia i dużych gęstościach prądu nawet w wysokich temperaturach otoczenia (nie przekraczających 210°C) oraz dodatkowo charakteryzują się dobrymi właściwościami dynamicznymi wyrażonymi poprzez bardzo krótkie czasy przełączania.

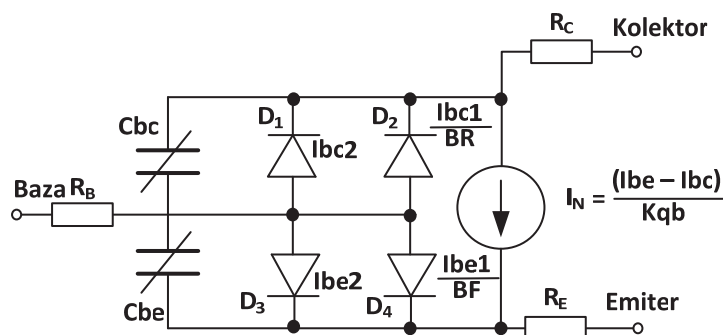
* Akademia Morska w Gdyni

W pracy przedstawiono postać modelu Gummela-Poona oraz dokonano oceny dokładności tego modelu przy wyznaczaniu charakterystyk pojemności arbitralnie wybranych tranzystorów BJT i SJT wykonanych z węgla krzemu. Wyniki obliczeń porównano z wynikami autorskich pomiarów oraz danymi zamieszczonymi w kartach katalogowych tych przyrządów półprzewodnikowych [3]. Zbadano także wpływ temperatury otoczenia na kształt charakterystyk pojemności rozważanych tranzystorów.

2. POSTAĆ MODELU

W praktyce, modelowanie charakterystyk tranzystorów sterowanych prądem, w tym głównie tranzystorów bipolarnych jest najczęściej realizowane z wykorzystaniem modelu Gummela-Poona [1, 2, 4]. O popularności tego modelu świadczy to, że został on zaimplementowany w wielu znanych programach komputerowych przeznaczonych do analizy układów elektronicznych – np. w programach z rodziny SPICE [2], a dodatkowo producenci przyrządów półprzewodnikowych chętnie udostępniają w dokumentacji technicznej oferowanych przez siebie przyrządów półprzewodnikowych wartości parametrów dla wymienionego modelu.

Topologię modelu Gummela-Poona przedstawiono na rysunku 1 [4].



Rys. 1. Topologia modelu Gummela-Poona

Najważniejszym elementem rozważanego modelu jest sterowane źródło prądowe I_N , modelujące prąd główny tranzystora. Diody D1 - D4 modelują zjawiska generacji i rekombinacji w warstwach ładunku przestrzennego złącza kolektor-baza oraz emiter-baza z uwzględnieniem składowej idealnej (D1 i D2) i nieidealnej (D3 i D4) prądów tych złączy. Wartości rezystancji R_E , R_C i R_B reprezentują odpowiednio rezystancje omowe obszarów emitera, kolektora i bazy. Szczegółowy opis zależności analitycznych rozważanego modelu jest dostępny na przykład w pracy [2].

Za modelowanie nieliniowych pojemności złączowych i dyfuzyjnych złącza baza-kolektor i baza-emiter tranzystora odpowiedzialne są widoczne w topologii z rys. 1 kondensatory Cbc i Cbe , które są opisane następująco [2]:

$$Cbe = Ctbe + area \cdot Cjbe \quad (1)$$

$$Cbc = Ctbc + area \cdot XCJC \cdot Cjbc \quad (2)$$

gdzie: $area$ - względna powierzchnia struktury przyrządu, natomiast parametry $Ctbe$, $Cjbe$, $Ctbc$, $Cjbc$ wyrażono wzorami [2]:

$$Ctbe = tf \cdot \frac{dI_{be}}{dV_b} \quad (3)$$

$$tf = TF \cdot \left(1 + XTF \cdot \left(I_{be1} / (I_{be1} + area \cdot ITF) \right)^2 \cdot e^{\left(\frac{V_{bc}}{1.44 \cdot VTF} \right)} \right) \quad (4)$$

$$Cjbe = \begin{cases} CJE \cdot \left(1 - \frac{V_{be}}{VJE} \right)^{-MJE} & \text{dla } V_{be} \leq FC \cdot VJE \\ CJE \cdot (1 - FC)^{-(1+MJE)} \cdot \left(1 - FC \cdot (1 + MJE) + MJE \cdot \frac{V_{be}}{VJE} \right) & \text{dla } V_{be} > FC \cdot VJE \end{cases} \quad (5)$$

$$Ctbc = TR \cdot \frac{dI_{bc}}{dV_{bc}} \quad (6)$$

$$Cjbc = \begin{cases} CJC \cdot \left(1 - \frac{V_{bc}}{VJC} \right)^{-MJC} & \text{dla } V_{bc} \leq FC \cdot VJC \\ CJC \cdot (1 - FC)^{-(1+MJC)} \cdot \left(1 - FC \cdot (1 + MJC) + MJC \cdot \frac{V_{bc}}{VJC} \right) & \text{dla } V_{bc} > FC \cdot VJC \end{cases} \quad (7)$$

przy czym: CJC , CJE , FC , ITF , MJC , MJE , TR , TF , VJC , VJE , VTF , $XCJC$, XTF - parametry modelu.

Zależności temperaturowe parametrów $CJE(T)$, $CJC(T)$, $VJE(T)$ i $VJC(T)$ opisane są wzorami [4]:

$$CJE(T) = CJE \cdot \left(1 + MJE \cdot \left(0.0004 \cdot (T - T_{nom}) + \left(1 - \frac{VJE(T)}{VJE} \right) \right) \right) \quad (8)$$

$$CJC(T) = CJC \cdot \left(1 + MJC \cdot \left(0.0004 \cdot (T - T_{nom}) + \left(1 - \frac{VJC(T)}{VJC} \right) \right) \right) \quad (9)$$

$$VJE(T) = VJE \cdot \frac{T}{T_{nom}} - 3 \cdot V_t \cdot \ln \left(\frac{T}{T_{nom}} \right) - Eg(T_{nom}) \cdot \frac{T}{T_{nom}} + Eg(T) \quad (10)$$

$$VJC(T) = VJC \cdot \frac{T}{T_{nom}} - 3 \cdot V_t \cdot \ln \left(\frac{T}{T_{nom}} \right) - Eg(T_{nom}) \cdot \frac{T}{T_{nom}} + Eg(T) \quad (11)$$

gdzie:

$$E_g(T) = 1.16 - 0.000702 \cdot \frac{T^2}{T + 1108} \quad (12)$$

W rozważanym modelu zastosowano opis pojemności słuszny dla polaryzacji złączy baza-emiter i baza-kolektor w obu kierunkach (wzory (5) i (7)), a także uwzględniono wpływ temperatury na wartości pojemności tranzystora (wzory (8-12)). Omawiany model pojemności jest opisany z wykorzystaniem w sumie 13 parametrów.

3. WYNIKI POMIARÓW I OBLICZEŃ

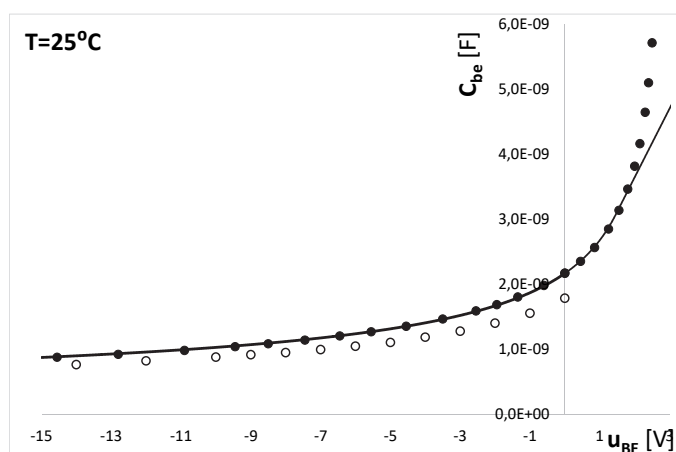
W pracy przedstawiono wyniki autorskich pomiarów charakterystyk $C(u)$ arbitralnie wybranego tranzystora BJT typu BT1206AC, którego maksymalne napięcie baza-kolektor U_{\max} wynosi aż 1600 V a dopuszczalna temperatura wnętrza $T_{j\max} = 175^\circ\text{C}$, a także tranzystora SJT typu 2N7635-GA o $U_{\max} = 600$ V i $T_{j\max} = 210^\circ\text{C}$. Pomiary przeprowadzono za pomocą programowalnego systemu mierzącego 4200-SCS firmy Keithley [9] w szerokim zakresie temperatury otoczenia. W obliczeniach wykorzystano wartości parametrów modelu, które zestawiono w tabeli 1. W przypadku tranzystora SJT zastosowano w obliczeniach zestaw wartości parametrów podany w dokumentacji technicznej tego przyrządu [3].

Tabela 1. Wartości parametrów modelu Gummela-Poona dla tranzystora BJT i SJT.

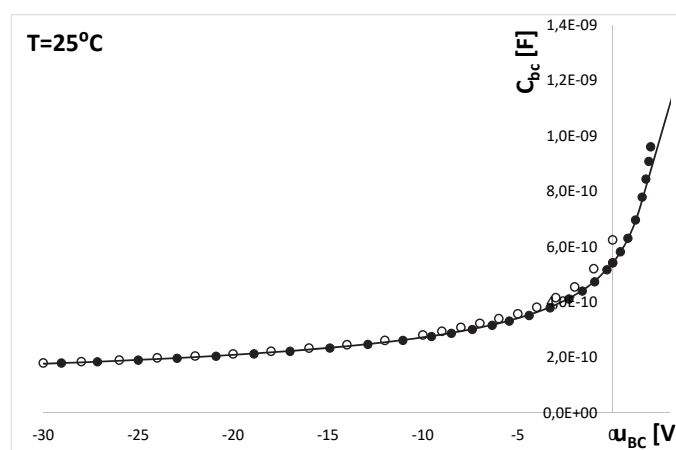
Nazwa parametru	Wartość parametru	
	BJT BT1206-AC	SJT 2N7635-GA
CJC [F]	5,41E-10	1,37E-10
CJE [F]	2,17E-9	3,05E-10
FC [-]	0,5	0,5
ITF [A]	0	0
MJC [-]	0,46	0,4382
MJE [-]	0,5	0,4751
TF [s]	0	0
VJC [V]	2,9	3,1509
VJE [V]	2,9	2,9019
VTF [V]	∞	∞
XCJC [-]	1	1
XTF [-]	0	0
TR [s]	0	0

3.1. Wyniki pomiarów i obliczeń charakterystyk pojemności tranzystora BJT

W celu scharakteryzowania właściwości dynamicznych rozważanego tranzystora SiC BJT, w literaturze na ogół definiuje się dwie charakterystyki pojemności w funkcji napięć zaciskowych, tzn. charakterystykę $C_{be}(u_{BE})$ oraz $C_{bc}(u_{BC})$. W charakterze przykładu na rysunkach 2 i 3 przedstawiono wymienione charakterystyki badanego tranzystora w temperaturze pokojowej, przy czym punktami wypełnionymi zaznaczono wyniki pomiarów autorskich, punktami niewypełnionymi – wyniki pomiarów zamieszczone w literaturze [1], natomiast liniami ciągłymi – wyniki obliczeń.



Rys. 2. Charakterystyki $C_{be}(u_{BE})$ tranzystora BT1206-AC



Rys. 3. Charakterystyki $C_{bc}(u_{BC})$ tranzystora BT1206-A

Jak widać (rys. 2 i 3), uzyskano zarówno jakościową, jak i ilościową zgodność wyników obliczeń i autorskich pomiarów obu rozważanych charakterystyk pojemności w zakresie napięcia poniżej 1,8 V, co świadczy o dużej dokładności modelu Gummela-Poona w tym zakresie pracy tranzystora. Natomiast, niewielkie rozbieżności między wynikami symulacji i pomiarów, rzędu kilkunastu procent, obserwuje się w przypadku wyników literaturowych (punkty niewypełnione).

3.2. Wyniki pomiarów i obliczeń charakterystyk pojemności tranzystora SJT

W przypadku rozważanego tranzystora SJT podano w katalogu charakterystyki pojemności wejściowej $C_{iss}(u_{DS})$, wyjściowej $C_{oss}(u_{DS})$ oraz przejściowej $C_{rss}(u_{DS})$. Wymienione pojemności stanowią odpowiednie zestawienie pojemności składowych występujących w strukturze tranzystora, zgodnie ze wzorami [10]:

$$C_{iss} = C_{gs} + C_{gd} \quad (13)$$

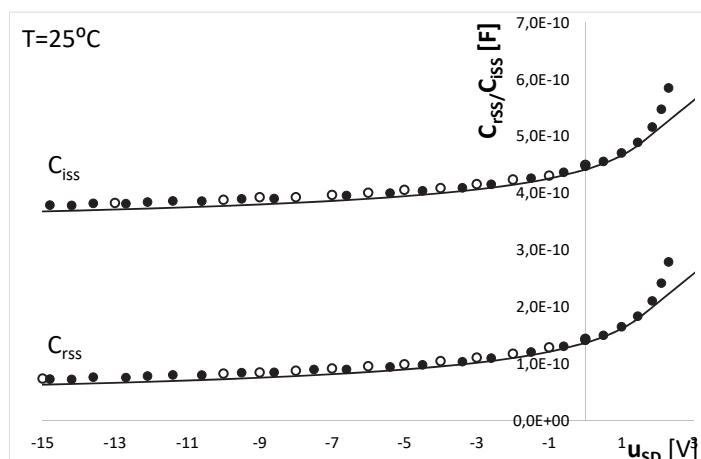
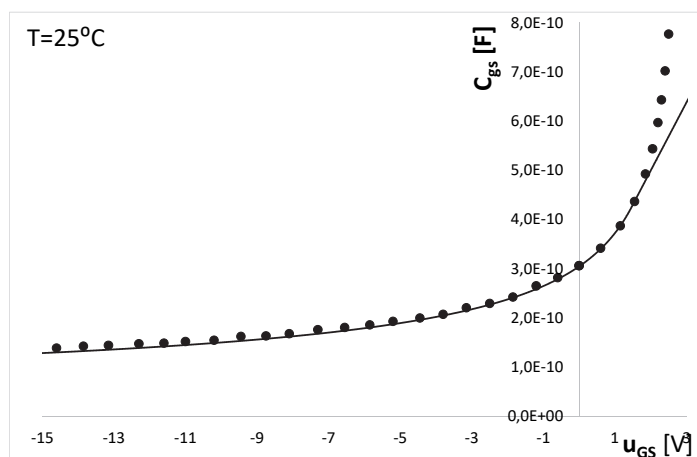
$$C_{oss} = C_{ds} + C_{gd} \quad (14)$$

$$C_{rss} = C_{gd} \quad (15)$$

gdzie: C_{gs} – pojemność między bazą a emiterem, C_{gd} – pojemność między bazą, a kolektorem, natomiast C_{ds} – pojemność między kolektorem a emiterem.

Na rysunku 4 przedstawiono charakterystyki $C_{iss}(u_{SD})$ i $C_{rss}(u_{SD})$, rozważanego tranzystora SJT w temperaturze otoczenia równej 25°C przy napięciu baza-emiter równym 0 V, natomiast na rysunku 5 - charakterystykę $C_{gs}(u_{GS})$, gdzie punktami wypełnionymi zaznaczono wyniki pomiarów autorskich, punktami niewypełnionymi zaznaczono wyniki pomiarów katalogowych badanego przyrządu [3], natomiast liniami ciągłymi – wyniki obliczeń modelem Gummela-Poona.

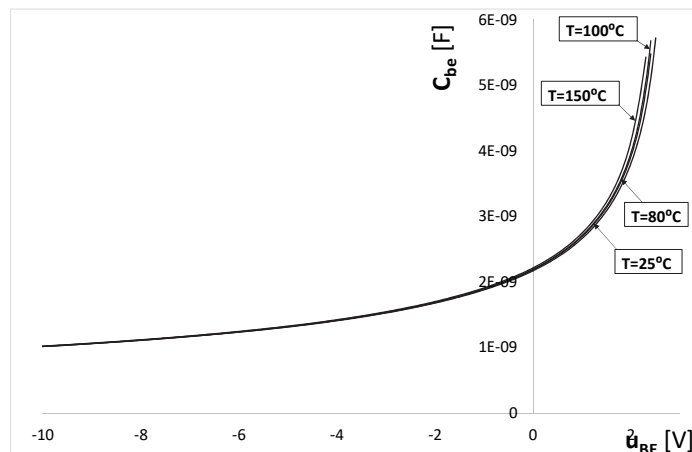
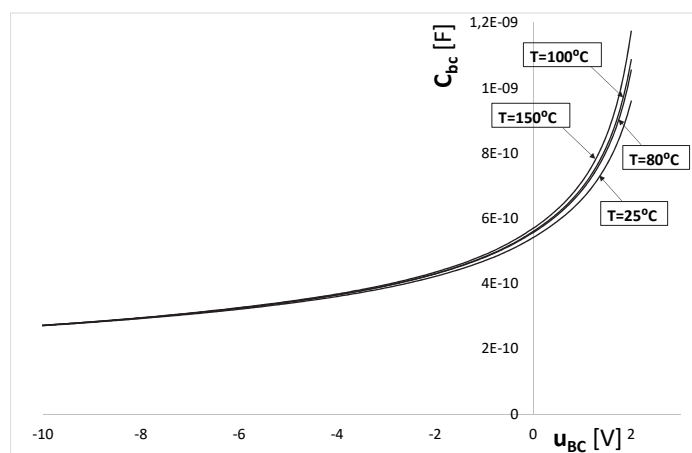
Jak widać, w przypadku prezentowanych charakterystyk $C_{iss}/C_{rss}(u_{SD})$ oraz $C_{gs}(u_{GS})$ obserwuje się bardzo dobrą zgodność wyników obliczeń z wynikami pomiarów w zakresie rozważanych napięć poniżej 1,6 V co potwierdza, że model Gummela-Poona może być z powodzeniem stosowany do modelowania charakterystyk pojemności sterowanych prądowo tranzystorów SJT.

Rys. 4. Charakterystyki $C_{iss}/C_{rss}(u_{SD})$ tranzystora 2N7635-GARys. 5. Charakterystyki $C_{gs}(u_{GS})$ tranzystora 2N7635-GA

3.3. Ocena wpływu temperatury otoczenia na charakterystyki pojemności

W celu określenia wpływu temperatury na wartości pojemności zaciskowych rozważanych w pracy tranzystorów przeprowadzono uzupełniające pomiary analogicznych charakterystyk pojemności w szerokim zakresie zmian temperatury otoczenia.

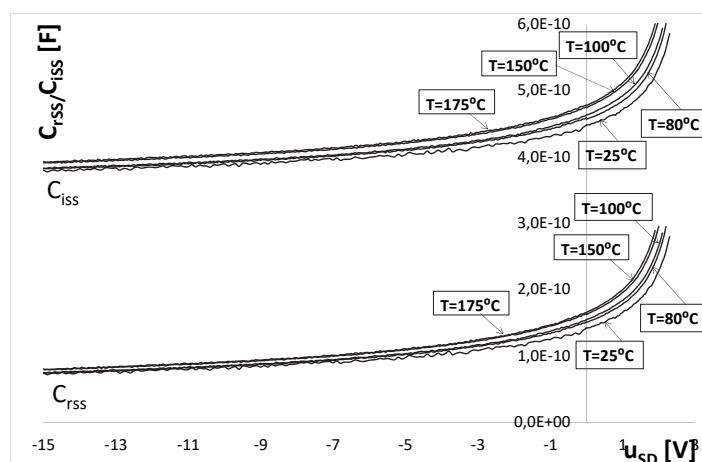
Na rys. 6 i 7 pokazano charakterystyki $C_{be}(u_{BE})$ i $C_{bc}(u_{BC})$ tranzystora BJT, natomiast na rys. 8 charakterystyki $C_{iss}(u_{SD})$ i $C_{rss}(u_{SD})$ tranzystora SJT dla kilku wartości temperatury otoczenia.

Rys. 6. Charakterystyki $C_{be}(u_{BE})$ tranzystora BT1206-AC w różnych temperaturach otoczeniaRys. 7. Charakterystyki $C_{bc}(u_{BC})$ tranzystora BT1206-AC w różnych temperaturach otoczenia

Okazuje się, że w przypadku tranzystora BJT (rys. 6 i 7), wpływ temperatury otoczenia na charakterystyki pojemności $C_{be}(u_{BE})$ i $C_{bc}(u_{BC})$ jest praktycznie niezauważalny dla polaryzacji w kierunku zaporowym złączy baza-emiter i baza-kolektor. Natomiast dla polaryzacji w kierunku przewodzenia wartości pojemności C_{be} i C_{bc} rosną ze wzrostem temperatury. Na przykład, przy wartości napięcia $u_{BE} = 2$ V wzrost temperatury otoczenia o 125°C powoduje wzrost wartości pojemności C_{be} o około $0,5$ nF.

Z kolei w przypadku charakterystyk pojemności $C_{iss}(u_{SD})$ i $C_{rss}(u_{SD})$ tranzystora SJT (rys. 8), niewielki wpływ temperatury otoczenia widoczny jest w całym rozważanym zakresie napięć emiter-kolektor. Przykładowo, wraz ze wzrostem temperatury otoczenia o 150°C wartość pojemności C_{rss} rośnie zaledwie

o około 20 pF dla polaryzacji złącza baza-kolektor w kierunku zaporowym oraz o około 50 pF dla polaryzacji tego złącza w kierunku przewodzenia.



Rys. 8. Charakterystyki $C_{iss}(u_{SD})$ i $C_{rss}(u_{SD})$ tranzystora 2N7635-GA w różnych temperaturach otoczenia

4. UWAGI KOŃCOWE

Przedstawione wyniki weryfikacji eksperymentalnej modelu Gummela-Poona świadczą o bardzo dobrej zgodności wyników pomiarów i obliczeń charakterystyk $C(u)$, co oznacza, że model może być z powodzeniem stosowany do modelowania tych charakterystyk dla obu rozważanych klas tranzystorów.

W przypadku charakterystyk $C(u)$ złącza spolaryzowanych w kierunku przewodzenia zaobserwowano niewielkie rozbieżności pomiędzy wynikami symulacji i pomiarów. Z drugiej strony, z punktu widzenia modelowania charakterystyk układów impulsowych z rozważanymi tranzystorami jako elementami kluczującymi, zaobserwowane niedokładności modelu mają drugorzędne znaczenie.

Ponadto, wyniki przeprowadzonych badań pokazały, że temperatura w niewielkim stopniu wpływa na charakterystyki pojemności tranzystorów BJT i SJT. A zatem te tranzystory można z powodzeniem stosować w układach energoelektronicznych, pracujących z dużymi gęstościami mocy i w wysokich temperaturach, przy zachowaniu termicznej stabilności ich właściwości dynamicznych. Poza tym, w przypadku modelowania charakterystyk dynamicznych omawianych rodzajów tranzystorów można zastosować uproszczenie modelu pojemności Gummela-Poona polegające na wyeliminowaniu zależności temperaturowych opisanych wzorami (8–12).

Z zaprezentowanych wyników pomiarów widać, że zmierzone wartości pojemności między bazą a emiterem oraz między bazą a kolektorem tranzystora

SJT, są nawet kilkukrotnie niższe niż w przypadku tranzystora BJT, co oznacza, że pierwszy wymieniony element może być potencjalnie zastosowany w układach pracujących na wyższych częstotliwościach.

LITERATURA

- [1] Huang Y., Cheng S., Zhou W., Sheng K., Modeling of a 1200 V 6 A SiC Bipolar Junction Transistor, Energy Conversion Congress and Exposition (ECCE), Wrzesień 2013.
- [2] PSPICE A/D Reference Guide Version 15.7, MicroSim Corporation, Irvine, California 2006.
- [3] http://www.genesicsemi.com/images/hit_sic/sjt/2N7635-GA.pdf.
- [4] Patrzyk J., Modelowanie tranzystorów mocy SiC BJT w programie PSPICE, Zeszyty Naukowe Akademii Morskiej w Gdyni, Nr 95, s. 168-176, Listopad 2016.
- [5] Seyezhai R., Modeling and Simulation of Silicon Carbide (SiC) Based Bipolar Junction Transistor, International Journal of Engineering Research and Applications (IJERA), Vol. 1, Nr 4, s.1652–1657, Listopad 2011.
- [6] Bargieł K., Zarębski J. and Bisewski D., SPICE-aided modeling of high-voltage silicon carbide JFETs, 39th International Microelectronics and Packaging Poland Conference (IMAPS Poland), Book Series: IOP Conference Series-Materials Science and Engineering, Vol. 104, 2016.
- [7] Sundaresan S., Singh R., Johnson R.W., Silicon Carbide „Super” Junction Transistors operating at 500°C, IMAPS High Temperature Electronics Conference (HiTEC), 2012.
- [8] <http://www.dacpol.eu/pl/elementy-polprzewodnikowe-z-weglika-krzemu/product/elementy-polprzewodnikowe-z-weglika-krzemu-1224>.
- [9] <http://tespol.com.pl/wp-content/uploads/2016/01/Keithley-4200-SCS-datasheet.pdf>.
- [10] Rashid M.H., Power Electronics Handbook Third Edition, Oxford, 2011.

MEASUREMENTS AND CALCULATIONS OF CAPACITANCES OF BJT AND SJT TRANSISTORS MADE OF SILICON CARBIDE

In the paper the results of measurements of capacitances $C(u)$ of the current controlled BJT and SJT transistors was presented, for which a programmable measuring system manufactured by Keithley was used. The results of measurements was compared with results of the calculations obtained by using the popular and commonly used Gummel-Poon model. For comparison, the results of the measurements found in the literature and in the datasheets of the considered devices was presented as well. In addition, the influence of ambient temperature on the shape of the considered characteristics was also investigated.

(Received: 01.02.2018, revised: 10.03.2018)