Joanna Patrzyk Akademia Morska w Gdyni

MODELOWANIE TRANZYSTORÓW MOCY SIC BJT W PROGRAMIE PSPICE

Artykuł dotyczy problematyki modelowania bipolarnych tranzystorów mocy, wykonanych z węglika krzemu, w programie PSPICE. Przedstawiono wyniki eksperymentalnej weryfikacji dokładności symulacji wyjściowych charakterystyk statycznych tranzystora BT1206AC firmy TranSiC oraz tranzystora 2N7635-GA firmy GeneSiC, wykonanych z węglika krzemu, z wykorzystaniem modelu tranzystora bipolarnego, wbudowanego w program PSPICE.

Słowa kluczowe: modelowanie, SiC BJT, węglik krzemu, tranzystor bipolarny.

WSTĘP

Kluczową rolę w rozwoju elektroniki i energoelektroniki pełnią przyrządy półprzewodnikowe, w tym przyrządy mocy o coraz lepszych parametrach. Materiały półprzewodnikowe stanowią podstawowy materiał w konstrukcji tych przyrządów. Na przestrzeni ostatnich kilkudziesięciu lat nastąpił gwałtowny rozwój i postęp technologiczny, pozwalający na wykorzystanie w tym celu materiałów półprzewodnikowych o coraz doskonalszych właściwościach. Oprócz powszechnie już stosowanych w przemyśle elektronicznym materiałów półprzewodnikowych, takich jak krzem i arsenek galu, pojawiają się nowe materiały [17]. Do tej grupy należą w szczególności materiały o szerokiej przerwie energetycznej (ang. *wide band-gap*), do których zalicza się węglik krzemu (SiC – *Silicon Carbide*).

Bipolarne tranzystory mocy z węglika krzemu oferowane są przez firmę TranSiC od 2008 r., a następnie od 2011 r. przez firmę GeneSiC. Tranzystory te charakteryzują się możliwością pracy jednocześnie w wysokich temperaturach, przy dużych wartościach napięcia oraz dużych gęstościach prądu.

W procesie projektowania i analizy układów elektronicznych coraz częściej stosowane są specjalistyczne programy komputerowe wspomagające ten proces. Wśród tej klasy programów na wyróżnienie zasługuje program PSPICE. Producenci przyrządów półprzewodnikowych udostępniają w wielu przypadkach wartości parametrów dla modeli wbudowanych w programach z rodziny SPICE [19]. Istnieje także wiele prac poświęconych modelowaniu bipolarnych tranzystorów mocy, wykonanych z węglika krzemu, np. [1, 2, 12–14, 19], a proponowane modele pozwalają na uzyskanie symulacji charakterystyk rozważanego tranzystora, które

charakteryzują się, zgodnie z deklaracją ich autorów, dużą dokładnością potwierdzoną wynikami pomiarów.

Jak wykazały badania przeprowadzone przez autorkę, wyniki symulacji charakterystyk statycznych tranzystorów SiC BJT (z wykorzystaniem modelu tranzystora bipolarnego wbudowanego w program PSPICE) są rozbieżne z wynikami pomiarów tych przyrządów.

W pracy przedstawiono postać modelu tranzystora bipolarnego wbudowanego w program PSPICE oraz dokonano oceny dokładności tego modelu przy wyznaczaniu charakterystyk statycznych tranzystorów SiC BJT. Wyniki symulacji przeprowadzonych przez autorkę i przedstawionych w literaturze przedmiotu porównano z wynikami pomiarów, zamieszczonymi w karcie katalogowej oraz wykonanymi przez autorkę.

Badania przeprowadzono dla dwóch arbitralnie wybranych tranzystorów wykonanych w różnych technologiach: klasycznego tranzystora BT1206AC oraz tranzystora 2N7635-GA wykonanego w nowej technologii SJT, tzw. supertranzystorów złączowych o bardzo wysokiej wartości współczynnika wzmocnienia prądowego. Klasyfikacja tranzystorów SJT nie jest jednoznaczna. Na potrzeby artykułu przyjęto, iż jest to tranzystor bipolarny zgodnie z zapewnieniem producentów oraz autorów licznych prac, zaliczających tranzystory SJT do grupy bipolarnych przyrządów półprzewodnikowych [6, 7, 10, 15]. Wartości parametrów modelu, wykorzystane w przeprowadzonych przez autorkę symulacjach, zaczerpnięto z pracy [14] oraz bezpośrednio ze strony producenta [19].

1. MODEL TRANZYSTORA BIPOLARNEGO W PROGRAMIE PSPICE

Przy analizach komputerowych układów elektronicznych często wykorzystuje się różne modele elementów półprzewodnikowych, w tym modele wbudowane. Model wbudowany opisany jest zestawem wartości parametrów, używanych przez program w obliczeniach, mający na celu zapewnienie jak najlepszej zgodności wykonywanych symulacji charakterystyk z rzeczywistym zachowaniem badanego przyrządu półprzewodnikowego. W programie PSPICE dostępny jest wbudowany model dyskretnego tranzystora bipolarnego, którego uproszczoną postać przedstawiono na rysunku 1.

Najważniejszym elementem rozważanego modelu jest sterowane źródło prądowe, modelujące prąd główny 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. Modelowane są również zjawiska związane z wysokim poziomem wstrzykiwania nośników do obszaru bazy. Natomiast nieliniowe pojemności (kondensatory Cbc i Cbe) reprezentują pojemności złączowe i dyfuzyjne obydwu złączy tranzystora. Zjawisko quasi-nasycenia tranzystora opisuje sterowane źródło prądowe *Iepi* wraz z dwiema pojemnościami opisanymi ładunkiem *Qw* i *Qo*.

Wartości rezystancji R_E , R_C i R_B reprezentują odpowiednio rezystancje omowe obszarów emitera, kolektora i bazy. Należy podkreślić, że wiele domyślnych wartości parametrów modelu ma wartość równą zeru lub nieskończoność, co oznacza, że w obliczeniach pewne zjawiska fizyczne nie są modelowane. Przykładowo, dla parametru RCO = 0 (wartość domyślna) zjawisko quasi-nasycenia nie jest uwzględniane w symulacjach.



Rys. 1. Model tranzystora bipolarnego wbudowany w program PSPICE *Fig. 1.* Network form of the PSPICE built-in model of a bipolar transistor

Program PSPICE (wersja MicroSim) posiada modele wbudowane głównie krzemowych przyrządów półprzewodnikowych, z wyjątkiem tranzystora GaAsFET, wykonanego z arsenku galu. W przypadku zatem symulacji charakterystyk przyrządów półprzewodnikowych, wykonanych z nowoczesnych materiałów konstrukcyjnych, do jakich należy węglik krzemu, specyficzne zjawiska fizyczne zachodzące w tych materiałach mogą być pominięte lub niewłaściwie modelowane. Ponadto szereg wartości parametrów domyślnych odnosi się do przyrządów krzemowych. Program PSPICE umożliwia jednak użytkownikowi zmianę wartości parametrów modelu w celu uzyskania pożądanej dokładności obliczeń.

W tabeli 1 przedstawiono odpowiednio wartości parametrów modelu tranzystora bipolarnego, zaczerpnięte z prac [14, 19], dedykowane dla dwóch bipolarnych tranzystorów mocy, wykonanych z węglika krzemu: BT1206AC oraz 2N7635-GA.

W przypadku parametrów, występujących w opisie modelu wbudowanego, których nie wymieniono poniżej w tabeli 1 lub nie podano wartości parametru, program PSPICE przyjmuje wartości domyślne. W związku z tym brak zamieszczenia w tabeli 1 parametrów ISC, VAF, VAR, TRE1, TRE2, TRB1, TRB2, TRM1 oraz TRM2 (w przypadku tranzystora 2N7635-GA) skutkuje nieuwzględnieniem składowej idealnej złącza baza-kolektor, zjawiska Early'ego, temperaturowej zależności rezystancji RE i RB, jak również temperaturowej zależności rezystancji RB od punktu pracy tranzystora. Tabela 1. Wartości parametrów modelu tranzystora bipolarnego dedykowane dla dwóch tranzystorów mocy, wykonanych z węglika krzemu: BT1206AC oraz 2N7635-GA

Wartości parametrów modelu tranzystora bipolarnego w programie PSPICE	
Tranzystor 2N7635-GA [6]	Tranzystor BT1206AC [1]
IS = 9,8338E-48	IS= 15E-48
BF = 130	BF= 20
NF = 1	NF= 1
ISE = 1,0733E-26	ISE= 2,2E-26
NE = 2	NE= 2
BR = 0,55	BR= 0,55
RB = 14,5	RB= 0,26
RC = 0,16	RC= 0,06
XTI = 3	XTI= 3
XTB = -0,45	XTB = -1,1
EG = 3,23	EG = 3,2
TRC1 = 1,50E-02	TRC1 = 4E-3
CJE = 297E-12	CJE = 1233E-12
CJC = 137E-12	CJC = 425E-12
VJE = 2,901930244	VJE = 2,9
VJC = 3,150960833	VJC = 2,9
MJE = 0,475141754	MJE = 0,5
MJC = 0,43821105	MJC = 0,5
IKF = 200	
IRB = 0,002	
RBM = 0,37	
RE = 0,231	
VCEO = 600	
ICRATING = 10	

 Table 1. Parameters values of the bipolar transistor model, dedicated to the two bipolar power transistors made of silicon carbide: BT1206AC and 2N7635-GA

Podobnie, przedstawione w tabeli 1 wartości parametrów modelu dedykowane do analizy tranzystora BT1206AC, wskazują na pominięcie w symulacjach zjawiska Early'ego, rezystancji omowej obszaru emitera, składowej idealnej prądu złącza baza-kolektor oraz zależności temperaturowej rezystancji obszaru bazy oraz jej temperaturowej zależności względem punktu pracy tranzystora.

2. EKSPERYMENTALNA WERYFIKACJA MODELU TRANZYSTORA BIPOLARNEGO, WBUDOWANEGO W PROGRAM PSPICE DLA TRANZYSTORÓW BIPOLARNYCH Z WĘGLIKA KRZEMU

W celu oceny dokładności modelu tranzystora bipolarnego, wbudowanego w program PSPICE, w przypadku symulacji charakterystyk tranzystorów bipolarnych, wykonanych z węglika krzemu, porównano wyniki symulacji wybranych charakterystyk tranzystorów SiC BJT z wynikami pomiarów podanymi w karcie katalogowej oraz wykonanymi przez autorkę. Porównania dokonano dla tranzystora BT1206AC (którego maksymalne napięcie oraz temperatura wnętrza wynoszą odpowiednio $U_{max} = 1600$ V i $T_{jmax} = 175$ °C) oraz tranzystora 2N7635-GA (którego maksymalne napięcie oraz temperatura wnętrza wynoszą odpowiednio $U_{max} = 600$ V i $T_{jmax} = 210$ °C).

W symulacjach wykorzystano wartości parametrów modelu, które dla rozważanych tranzystorów zostały przedstawione w tabeli 1. Wyniki symulacji własnych porównano zarówno z wynikami symulacji, zamieszczonymi w pracy [14], jak i z danymi katalogowymi (dla tranzystora 2N7635-GA) oraz autorskimi wynikami pomiarów (dla tranzystora BT1206AC).

Wyniki symulacji (linie ciągłe) oraz wyniki pomiarów (kropki połączone linią ciągłą) zilustrowano na rysunkach 2–4. Temperatura otoczenia porównywanych charakterystyk izotermicznych została określona względem temperatury otoczenia w analogicznych charakterystykach, występujących zarówno w karcie katalogowej producenta, jak i w wymienianych publikacjach.

Jak przedstawia rysunek 2, w przypadku tranzystora 2N7635-GA wzrost prądu bazy przyczynia się do wzrostu różnicy między wynikami symulacji a danymi katalogowymi, która wynosi nawet 85% (dla prądu bazy równego 150 mA w temperaturze otoczenia T = 175°C). Występowanie indeksów charakterystycznych dla tranzystorów polowych w przypadku prądów i napięć wynika z chęci podkreślenia przez producenta faktu, iż szybkość przełączania i wytrzymałość napięciowa tego tranzystora są równoważne z działaniem tranzystorów JFET o tych samych parametrach.



Rys. 2. Wyjściowe charakterystyki statyczne tranzystora 2N7635-GA w temperaturze otoczenia $T = 175^{\circ}$ C

Fig. 2. Output static characteristics of the transistor 2N7635-GA in ambient temperature $T = 175^{\circ}C$

Wyniki symulacji wyjściowych charakterystyk statycznych tranzystora BT1206AC, zamieszczonych w pracy [14], znacząco odbiegają od wykonanych przez autorkę symulacji z wykorzystaniem przedstawionych w tej pracy wartości parametrów. Różnią się one również od analogicznych charakterystyk przedstawionych w karcie katalogowej badanego przyrządu, także pomierzonych przez autorkę.

Jak prezentuje rysunek 3, różnice dotyczące rozpatrywanych charakterystyk sięgają nawet ponad 60% (dla prądu bazy $i_B = 200$ mA w temperaturze otoczenia T = 25°C).



Rys. 3. Wyjściowe charakterystyki statyczne tranzystora BT1206AC w temperaturze otoczenia $T = 25^{\circ}$ C

Fig. 3. Output static characteristics of the transistor BT1206AC in ambient temperature $T = 25^{\circ}C$



Rys. 4. Wyjściowe charakterystyki statyczne tranzystora BT1206AC w temperaturze otoczenia $T = 150^{\circ}$ C

Fig. 4. Output static characteristics of the transistor BT1206AC in ambient temperature $T = 150^{\circ}C$ Jak ilustrują rysunki 3 i 4, wzrost temperatury otoczenia skutkuje zmniejszeniem rozbieżności między wynikami symulacji tranzystora BT1206AC a wynikami podanymi w karcie katalogowej tego przyrządu (różnice te sięgają blisko 55% dla prądu bazy $i_B = 200$ mA w temperaturze otoczenia $T = 25^{\circ}$ C).

Jak można wnioskować, dokładność symulacji z użyciem modelu tranzystora bipolarnego, wbudowanego w program PSPICE, w przypadku symulacji charakterystyk statycznych tranzystorów SiC BJT jest bardzo niska. Przyczyną tego faktu może być pominięcie w omawianym modelu pewnych zjawisk fizycznych, ważnych dla rozważanej klasy przyrządów czy materiału konstrukcyjnego.

POSUMOWANIE

Z przeprowadzonych badań można zauważyć, że dla obu rozważanych tranzystorów rozbieżności pomiędzy wynikami symulacji przy wykorzystaniu wartości parametrów modelu z prac [14] i [19] a danymi katalogowymi oraz pomiarami autorskimi rosną ze wzrostem prądu bazy. Dodatkowo, w przypadku tranzystora 2N7635-GA obserwuje się, że wyniki symulacji pozostają w dobrej zgodności z danymi katalogowymi w zakresie napięcia między kolektorem a emiterem od 0 do 3 V, a istotne rozbieżności wynoszące nawet 85% (dla prądu bazy równego 150 mA w temperaturze otoczenia $T = 175^{\circ}$ C) obserwuje się dla napięcia kolektoremiter, przekraczającego wartość 10 V. Z kolei wyniki symulacji tranzystora BT1206AC są zaniżone w stosunku do danych katalogowych o blisko 50% (dla *i_B* = 50 mA w temperaturze otoczenia $T = 150^{\circ}$ C) i prawie trzykrotnie dla *i_B* = 200 mA w obu rozważanych temperaturach otoczenia.

Przedstawione wyniki świadczą o istotnych rozbieżnościach między wynikami symulacji a danymi katalogowymi i pomiarami autorskimi, co może wynikać z faktu, że model wbudowany tranzystora bipolarnego nie uwzględnia specyficznych dla węglika krzemu zjawisk fizycznych.

LITERATURA

- 1. Andersson M., Haraldsson O., *A Silicon Carbide Inverter for a Hybrid Vehicle Application*, Master Thesis, Lund University Dept. of Industrial Electrical Engineering and Automation, Lund 2007.
- Balachandran S., Chow T.P., Agarwal A., Tipton W., Scozzie S., *Gummel-Poon model for 1.8 kV SiC high-voltage bipolar junction transistor*, Power Electronics Specialists Conference, PESC 04. 2004, IEEE 35th Annual, Vol.4, 2004, s. 2994–2998.
- 3. Bisewski D., *Modelowanie tranzystora MESFET w programie SPICE z uwzględnieniem samonagrzewania*, praca doktorska, Akademia Morska w Gdyni, Gdynia 2012.
- Buono B., Ghandi R., Domeij M., Malm B.G., *Modeling and Characterization of the on-Resistance in 4H-SiC Power BJTs*, IEEE Transactions on Electron Devices, Vol. 58, 2011, No. 7, s. 2081–2087.

- Buono B., Ghandi R., Domeij M., Malm B.G., Zetterling C-M., Ostling M., Modeling and Characterization of Current Gain Versus Temperature in 4H-SiC Power BJTs, IEEE Transactions on Electron Devices, Vol. 57, 2010, No. 3, s. 704–711.
- Cressler J.D., Mantooth H.A., *Extreme Environment Electronics*, CRC Press, Boca Raton, Florida, USA, 2012.
- Cui Y., Chinthavali M.S., Xu F., Tolbert L.M., *Characterization and Modeling of Silicon Carbide Power Devices and Paralleling Operation*, IEEE International Symposium on Industrial Electronics (ISIE), Hangzhou, China, 2012.
- Domeij M., Lee H-S., Zetterling C-M., Ostling M., Schoner A., SiC power bipolar junction transistors – modeling and improvement of the current gain, European Conference on Power Electronics and Applications, Dresden 2005.
- Gao Y., Huang A.Q., Agarwal A.K., Krishnaswami S., *Characterization and modeling of 4H-SiC power BJTs*, Industrial Electronics Society, 31st Annual Conference of IEEE, Sheraton Capital Center Raleigh, NC, USA, 2005.
- Górecki P., Nowoczesne tranzystory mocy, czyli długa droga do SiC i GaN, "Elektronika Praktyczna", 2014, nr 3, s. 46–61.
- 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), Colorado Convention Center, Denver, CO, USA, 2013, s. 934–939.
- Lanni L., Silicon Carbide Bipolar Integrated Circuits for High Temperature Applications, Licentiate Thesis, School of Information and Communication Technology (ICT), KTH, Royal Institute of Technology, Stockholm 2012.
- 13. Materiały firmy Fairchild Semiconductor.
- Seyezhai R., Modeling and Simulation of Silicon Carbide (SiC) Based Bipolar Junction Transistor, International Journal of Engineering Research and Applications (IJERA), Vol. 1, November 2011, No. 4, s.1652–1657.
- Singh R., Jeliazkov S., Lieser E., 1200 V class 4H-SiC "Super" Junction Transistors with Current Gains of 88 and Ultra-fast Switching capability, Materials Science Forum, Vol. 717–720, 2012, s. 1127–1130.
- Wei L., *Electro-Thermal Simulations and Measurements of Silicon Carbide Power Transistors*, Doctoral Thesis, Laboratory of Solid State Devices (SSD), Department of Microelectronics and Information Technology (IMIT), Royal Institute of Technology (KTH), Stockholm 2004.
- Zarębski J., Bisewski D., Dąbrowski J., Górecki K., Bargieł K., Patrzyk J., Przyrządy półprzewodnikowe z węglika krzemu – pomiary, modelowanie i aplikacje, "Elektronika", Vol. 55, 2014, nr 8.
- Zhang Q., Zhang Y., Wang Y., Modeling of current gain versus recombination in double base epilayer 4H-SiC BJTs, Electron Devices and Solid-State Circuits (EDSSC), IEEE International Conference, Hong Kong 2010, s. 1–3.

Źródła internetowe

19. http://www.genesicsemi.com.

MODELING OF POWER SIC BIPOLAR TRANSISTORS IN PSPICE

Summary

This paper deals with the problem of modeling bipolar power transistors made of silicon carbide in PSPICE. The accuracy of built-in PSPICE model of a bipolar transistor was verified experimentally for two silicon carbide power transistors: BT1206AC (produced by TranSiC) and the 2N7635-GA (produced by GeneSiC) The results of simulations and measurements of the output static characteristics of the considered devices are given as well.

Keywords: modeling, SiC BJT, silicon carbide, bipolar transistor.