

Damian BISEWSKI*
Janusz ZARĘBSKI*

OCENA DOKŁADNOŚCI FIRMOWYCH MODELI DIOD SCHOTTKY'EGO Z WĘGLIKA KRZEMU

W pracy przedstawiono wyniki weryfikacji eksperymentalnej wybranych modeli diod Schottky'ego z węgliku krzemu, oferowanych przez producentów rozważanych przyrządów półprzewodnikowych. W tym celu modele diod zaimplementowano w programie SPICE i przeprowadzono symulacje wybranych charakterystyk statycznych oraz charakterystyk $C(u)$ tych przyrządów. Przeprowadzono ocenę dokładności modeli poprzez porównanie charakterystyk obliczonych tymi modelami z charakterystykami zmierzonymi diod, dostępnymi w ich kartach katalogowych. Do badań wybrano wykonane z węgliku krzemu diody Schottky'ego trzech producentów: ST Microelectronics, GeneSiC oraz Rohm.

SŁOWA KLUCZOWE: modelowanie, dioda Schottky'ego, SPICE, węgiel krzemu

1. WPROWADZENIE

Diody Schottky'ego są popularnymi przyrządami półprzewodnikowymi stosowanymi między innymi w impulsowych układach przetwarzania energii elektrycznej. W ciągu ostatnich kilkunastu lat na rynku pojawiła się stosunkowo liczna grupa rozważanych przyrządów półprzewodnikowych wykonanych z węgliku krzemu (SiC). Obecnie w sprzedaży dostępnych jest około 250 typów diod SiC-Schottky zróżnicowanych pod względem m. in. dopuszczalnego prądu przewodzenia oraz dopuszczalnego napięcia wstecznego. Diody Schottky'ego z węgliku krzemu są oferowane przez wielu producentów, np.: Cree Inc., Microsemi, GeneSiC, Rohm Semiconductors, Infineon Technologies, ST Microelectronics, United Silicon Carbide oraz Toshiba.

Ocena rzeczywistych właściwości i parametrów przyrządów półprzewodnikowych, a w tym przypadku – diod Schottky'ego może być przeprowadzona na podstawie wyników symulacji komputerowych z wykorzystaniem wiarygodnego modelu przyrządu półprzewodnikowego, którego wiarygodność można ocenić np. na podstawie wyników jego weryfikacji doświadczalnej.

* Akademia Morska w Gdyni.

Jednym z najpopularniejszych programów komputerowych umożliwiających analizę elementów i układów elektronicznych jest SPICE [3]. Producenci przyrządów półprzewodnikowych w wielu przypadkach oferują wartości parametrów wbudowanego w programie SPICE modelu diody lub udostępniają opracowane przez siebie modele tych elementów [4-6]. Należy podkreślić, że w programie SPICE wbudowany jest jeden uniwersalny model diody, przeznaczony do modelowania, zarówno diod p-n, jak i diod Schottky'ego.

Producenci diod Schottky'ego udostępniają własne modele tych przyrządów półprzewodnikowych, które można podzielić na dwa zasadnicze typy [2]:

1. modele hybrydowe, stanowiące połączenie wbudowanych w programie SPICE modeli diody, a także źródeł sterowanych oraz elementów biernych,
2. modele w pełni implementowane, w których nie występują odwołania do wbudowanych modeli diody, natomiast ich rolę przejmują źródła sterowane o wydajnościach opisanych dowolną zależnością analityczną, w której wybrany parametr może być traktowany jako zmienna niezależna.

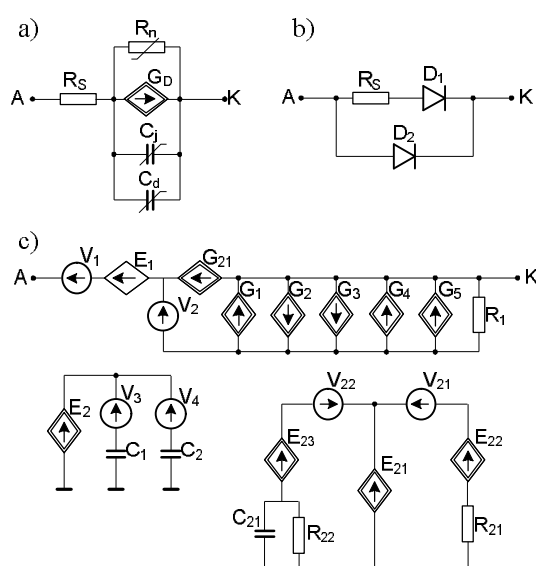
W pracy przeprowadzono weryfikację eksperymentalną modelu wbudowanego w programie SPICE przy zastosowaniu wartości parametrów tego modelu podanych przez producenta, a także modelu hybrydowego i w pełni implementowanego arbitralnie wybranych, dostępnych komercyjnie diod Schottky'ego wykonanych z węgla krzemu. W tym celu, modele firmowe diod zaimplementowano w programie SPICE, przy czym reprezentacje obwodowe tych modeli zostały udostępnione przez producentów w postaci tekstowej na stronach WWW [4-6]. Przeprowadzono symulacje wybranych charakterystyk statycznych oraz charakterystyk $C(u)$ rozważanych diod Schottky'ego i porównano z charakterystykami dostępnymi w kartach katalogowych tych przyrządów. Przeprowadzono porównawczą ocenę dokładności modelu wbudowanego w programie SPICE i poszczególnych modeli firmowych badanych diod.

Do badań wybrano diodę STPSC406 firmy ST Microelectronics [5], dla której producent udostępnił wartości parametrów modelu wbudowanego w programie SPICE, a także diody GAP3SLT33 firmy GeneSiC [4] oraz SCS140AE2 firmy Rohm Semiconductors [6], dla których producenci tych przyrządów zaproponowali model odpowiednio hybrydowy oraz w pełni implementowany.

2. POSTAĆ MODELI

Na rys. 1a przedstawiono reprezentację obwodową modelu diody wbudowanego w programie SPICE [3], natomiast na rys. 1b i 1c – reprezentacje obwodowe rozważanych w pracy makromodeli odpowiednio: hybrydowego firmy GeneSiC [4] oraz w pełni implementowanego firmy Rohm Semiconductors [5].

W modelu wbudowanym z rys. 1a głównym elementem jest źródło prądowe G_D , które modeluje składową idealną prądu diody w kierunku przewodzenia oraz zaporowym z pominięciem zakresu przebicia. Prąd diody w zakresie przebicia modeluje nieliniowy rezystor R_n o charakterystyce wykładniczej, natomiast liniowy rezystor R_s modeluje rezystancję szeregową diody. Nieliniowe kondensatory C_j i C_d reprezentują pojemności odpowiednio: złączową oraz dyfuzyjną. Szczegółowy opis analityczny wszystkich elementów z rys. 1a jest dostępny w literaturze [3].



Rys. 1. Reprezentacja obwodowa modelu wbudowanego w programie SPICE (a), makromodelu hybrydowego diody GAP3SLT33 firmy GeneSiC (b) oraz makromodelu w pełni implementowanego diody SCS140AE2 firmy Rohm Semiconductor (c)

Model hybrydowy z rys. 1b zawiera w swej strukturze rezystor szeregowy R_s , a także dwie diody (D_1 i D_2), przy czym każda z tych diod reprezentuje model wbudowany w programie SPICE (z rys. 1a) opisany odpowiednim zestawem parametrów. Zadaniem modelu wbudowanego D_1 jest wyznaczenie składowej idealnej prądu diody w kierunku przewodzenia oraz zaporowym, natomiast model wbudowany D_2 pozwala na obliczanie prądu diody w kierunku zaporowym w zakresie przebicia.

Z kolei, w przypadku modelu w pełni implementowanego z rys. 1c głównym elementem tego modelu jest obwód zbudowany ze sterowanych źródeł prądowych G_1 - G_5 , G_{21} oraz źródeł napięcia E_1 , V_1 i V_2 modelujących prąd diody w kierunku przewodzenia i zaporowym, jak również w zakresie przebicia. Dodatkowo model zawiera obwody pomocnicze zawierające źródła E_2 , E_{21} - E_{23} ,

które służą do modelowania właściwości dynamicznych diody. Postać wszystkich zależności analitycznych opisujących elementy aktywne oraz wartości elementów biernych w modelu z rys. 1c są zaprezentowane w materiałach udostępnionych przez producenta tego modelu na stronie WWW [6].

W tabeli 1 zebrano wartości parametrów modelu wbudowanego z rys. 1a dla diody STPSC406 [5], a także wartości parametrów modeli wbudowanych diod D_1 i D_2 występujących w strukturze modelu hybrydowego GAP3SLT33 [4] z rys. 2a.

Tabela 1. Wartości parametrów modelu wbudowanego diody STPSC406 [5] oraz modeli wbudowanych diod D_1 i D_2 w modelu hybrydowym GAP3SLT33 [4]

Parametr	Wartość		
	STPSC406	GAP3SLT33	
		D_1	D_2
IS	10^{-21} A	$1,39 \cdot 10^{-14}$ A	$178,99 \cdot 10^{-18}$ A
RS	0,18245 Ω	2,88 Ω	15 Ω
N	0,70243	1,0120127	5
TT	0 s	10^{-10} s	0 s
CJO	$190,97 \cdot 10^{-12}$ F	$6,01 \cdot 10^{-11}$ F	$190,97 \cdot 10^{-12}$ F
VJ	0,96959 V	0,924257443 V	0,96959 V
M	0,44869	0,3084545	0,44869
EG	3,26 eV	1,2 eV	3,23 eV
XTI	2	-3	50
IKF	185,81 A	36,05007504 A	185,81 A
ISR	$15,036 \cdot 10^{-9}$ A	-	-
FC	0,5	0,5	0,5
NR	4,9950	-	-
BV	-	3,0260 V	3300 V
IBV	-	10^{-3} A	10^{-3} A

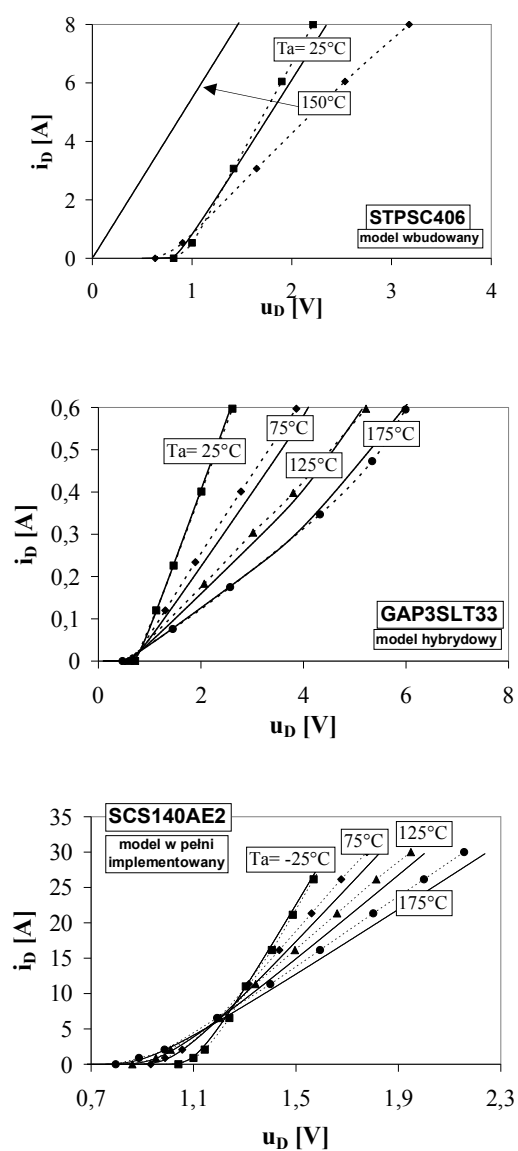
W przypadku parametrów występujących w opisie modelu wbudowanego, których nie wymieniono w tabeli 1 lub nie podano wartości parametru, program SPICE przyjmuje wartość domyślną. Wartości parametrów domyślnych wbudowanego modelu diody są zamieszczone w literaturze [3].

3. WYNIKI WERYFIKACJI EKSPERYMENTALNEJ

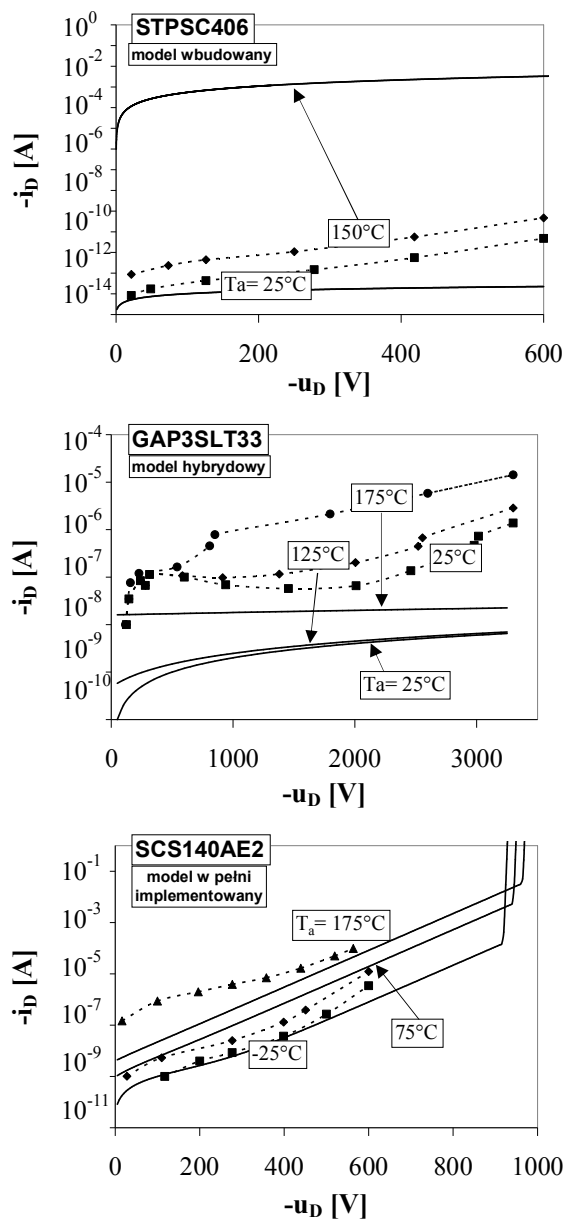
Przeprowadzono ocenę dokładności modeli opisanych w rozdziale 2. W tym celu modele diod z rys. 1b i 1c zaimplementowano w programie SPICE, a następnie wyniki obliczeń w wykorzystaniem modelu wbudowanego, modelu hybrydowego oraz modelu w pełni implementowanego porównano z wynikami pomiarów dostępnymi w kartach katalogowych poszczególnych diod. Na

rysunkach punkty połączone linią przerywaną oznaczają charakterystyki katalogowe, natomiast linie ciągłe – wyniki obliczeń.

Na rys. 2 i 3 pokazano charakterystyki badanych diod w kierunku przewodzenia (rys. 2) i zaporowym (rys. 3) w różnych temperaturach otoczenia.



Rys. 2. Charakterystyki diod STPSC406, GAP3SLT33 oraz SCS140AE2 w kierunku przewodzenia



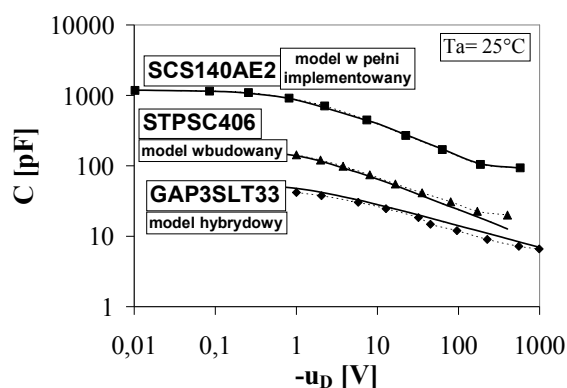
Rys. 3. Charakterystyki diod STPSC406, GAP3SLT33 oraz SCS140AE2 w kierunku zaporowym

Jak widać z rys. 2, zadowalającą zgodność wyników symulacji i pomiarów uzyskano w przypadku wszystkich rozważanych modeli wyłącznie w temperaturze 25°C . Natomiast w wyższych temperaturach otoczenia różnice

między wynikami symulacji i pomiarów dochodzą do około 10% zarówno w przypadku modelu hybrydowego (rys. 2b), jak i modelu w pełni implementowanego (rys. 2c). Z kolei, obliczone modelem wbudowanym wartości prądu przewodzenia diody w temperaturze 150°C (rys. 2a) są kilkakrotnie wyższe od zmierzonych wartości tego prądu przy takiej samej wartości napięcia przewodzenia, co świadczy o dużej niedokładności tego modelu w zakresie przewodzenia.

Jak widać z charakterystyk badanych diod uzyskanych w kierunku zaporowym (rys. 3), model wbudowany (rys. 3a) oraz makromodel hybrydowy (rys. 3b) są bardzo niedokładne w tym zakresie pracy diod. Różnice pomiędzy wynikami symulacji i pomiarów sięgają w tym przypadku nawet kilku rzędów wielkości. Jak wynika z literatury [2], najprawdopodobniej wynika to z faktu zastosowania w tych modelach opisu analitycznego przeznaczonego dla krzemowych diod p-n, zamiast dla złączy Schottky'ego wykonanych z węgla krzemu.

Na rys. 4 przedstawiono obliczone i zmierzone zależności pojemności złączonej w funkcji napięcia rozważanych diod.



Rys. 4. Charakterystyki $C(u)$ diod STPSC406, GAP3SLT33 oraz SCS140AE2

Jak widać, uzyskano bardzo dobrą zgodność wyników symulacji i pomiarów w przypadku wszystkich rozważanych typów modeli.

4. PODSUMOWANIE

W pracy oceniono dokładność modelu wbudowanego w programie SPICE oraz dwóch wybranych modeli diod Schottky'ego z węgla krzemu oferowanych przez dwóch producentów: GeneSiC oraz Rohm Semiconductors. Okazuje się, że największą dokładnością cechuje się firmowy model w pełni implementowany, sformułowany z wykorzystaniem źródeł sterowanych oraz

opisany zestawem równań zaproponowanym przez producenta tranzystora. Z kolei, w przypadku modelu wbudowanego oraz firmowego modelu hybrydowego zawierającego w swej strukturze model wbudowany, rozbieżności między wynikami symulacji i pomiarów są bardzo duże, szczególnie w przypadku charakterystyk uzyskanych w kierunku zaporowym, co świadczy o dużej niedokładności modelu wbudowanego w modelowaniu charakterystyk diod Schottky'ego w tym zakresie pracy.

LITERATURA

- [1] Zarębski J.: Tranzystory MOS mocy. Fundacja Rozwoju Akademii Morskiej w Gdyni, Gdynia, 2007.
- [2] Dąbrowski J., Modelowanie diod Schottky'ego mocy z uwzględnieniem efektów termicznych, Politechnika Łódzka, Łódź, 2007.
- [3] Izydorczyk J.: Komputerowa symulacja układów elektronicznych. Helion, Gliwice, 1993.
- [4] www.genesicsemi.com
- [5] www.st.com
- [6] www.rohm.com

EVALUATION OF MODELS ACCURACY OF SIC SCHOTTKY DIODES

The paper presents the results of experimental verification of selected models of the silicon carbide Schottky diodes offered by various manufacturers. Schottky diodes fabricated by ST Microelectronics, GeneSiC and Rohm, were chosen for investigations. Models were implemented in SPICE. Calculations of DC characteristics as well as C-V characteristics of the investigated Schottky diodes, were performed. Evaluation of the models accuracy by means of comparison of the calculated and measured characteristics, were performed.