Damian Bisewski, Janusz Zarębski
Akademia Morska w Gdyni

MODELOWANIE ELEKTROTERMICZNYCH CHARAKTERYSTYK TRANZYSTORA MESFET W PROGRAMIE PSPICE

Praca dotyczy problematyki modelowania tranzystorów MESFET z uwzględnieniem zjawiska samonagrzewania. Omówiono tu postać autorskiego elektrotermicznego modelu rozważanego elementu półprzewodnikowego. Zaprezentowano wyniki weryfikacji eksperymentalnej modelu na przykładzie dwóch tranzystorów MESFET, tj. wykonanego z arsenku galu tranzystora NE650103M firmy California Eastern Laboratories oraz wykonanego z węglika krzemu tranzystora CRF24010 firmy Cree, Inc. Oceniono wpływ temperatury na wybrane charakterystyki statyczne wymienionych tranzystorów.

WPROWADZENIE

Tranzystory MESFET (*Metal-Semiconductor Field Effect Transistor*) należą do grupy unipolarnych elementów półprzewodnikowych ze złączem metal-półprzewodnik i są stosowane najczęściej w układach elektronicznych pracujących w zakresie częstotliwości mikrofalowych. Rozważane elementy są znane od 1966 roku [6] i ciągle udoskonalane, a ich struktury wykonuje się obecnie z różnych materiałów półprzewodnikowych, przy czym najliczniejszą grupę stanowią tranzystory wykonane z arsenku galu (GaAs). Pojawienie się w 2003 roku w sprzedaży tranzystorów MESFET wykonanych z węglika krzemu (SiC) [12] spowodowało wzrost zainteresowania badaniami naukowymi obejmującymi rozważane elementy półprzewodnikowe oraz układy elektroniczne z tymi elementami.

W rzeczywistym elemencie półprzewodnikowym, w tym również tranzystorze MESFET, dochodzi do wzrostu temperatury wnętrza elementu ponad temperaturę otoczenia na skutek zamiany energii elektrycznej wydzielanej w elemencie na ciepło, przy nieidealnych warunkach chłodzenia tego elementu, co w literaturze przedmiotu definiuje się jako tzw. zjawisko samonagrzewania [9].

W celu uwzględnienia wpływu zjawiska samonagrzewania na charakterystyki oraz parametry elementu półprzewodnikowego formułuje się tzw. elektrotermiczny model (ETM) tego elementu. ETM tranzystora MESFET zbudowany jest z trzech głównych bloków [9], tj.:

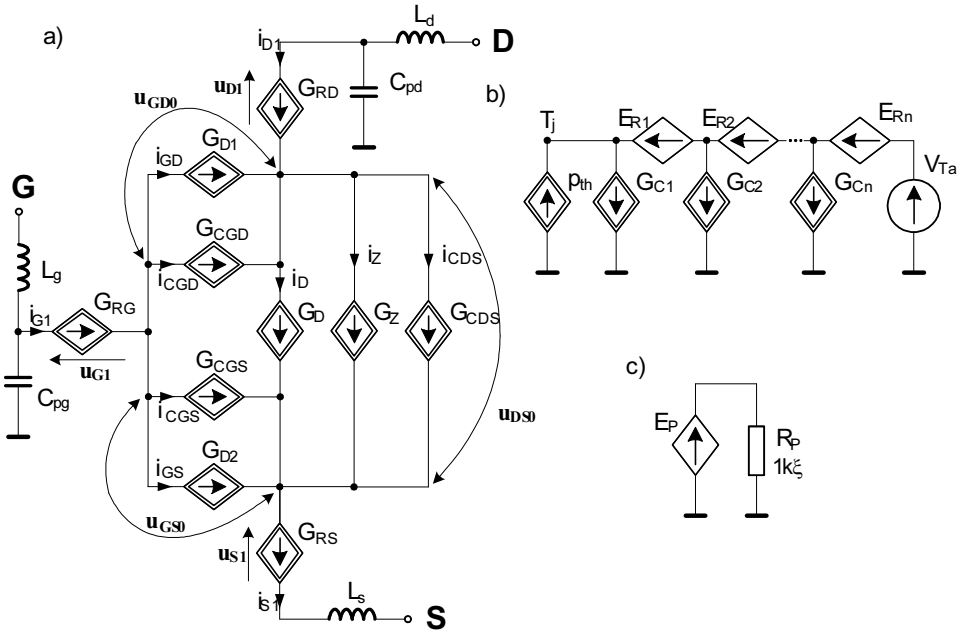
1) modelu elektrycznego, umożliwiającego wyznaczenie charakterystyk tranzystora np. typu $i(u)$, przy uwzględnieniu temperatury wnętrza elementu T_j,

2) modelu termicznego, określającego wartość temperatury wnętrza tranzystora w zależności od: temperatury otoczenia T_a, mocy cieplnej p_H wydzielanej w tym elemencie oraz warunków jego chłodzenia (np. tranzystor pracujący bez radiatora lub umieszczony na radiatorze),
3) modelu mocy cieplnej, uzależnionej od wartości prądów i napięć zaciskowych tranzystora.

W pracy omówiono postać modelu elektrotermicznego tranzystora MESFET dla elementów wykonanych z różnych materiałów półprzewodnikowych. Model został zaimplementowany w programie SPICE [7] w postaci podukładu. Przeprowadzono weryfikację eksperymentalną tego modelu poprzez porównanie wyników symulacji z wynikami pomiarów wybranych izotermicznych i nieizotermicznych charakterystyk statycznych tranzystora GaAs-MESFET o symbolu NE650103M (*California Eastern Laboratories*) [11] oraz tranzystora SiC-MESFET o symbolu CRF24010 (*Cree, Inc.)* [12].

1. POSTAĆ MODELU

Na rysunku 1 przedstawiono postać obwodową bloków składowych elektrotermicznego modelu tranzystora MESFET [2].



Rys. 1. Obwodowa postać elektrotermicznego modelu tranzystora MESFET: a) model elektryczny, b) model termiczny, c) model mocy

Fig. 1. *Network form of the electrothermal model of MESFET: a) the isothermal model, b) the thermal model, c) the power model*

Głównym elementem modelu elektrycznego z rysunku 1a), bazującego na wbudowanym w programie PSPICE modelu Raytheona-Statza [7, 8], jest sterowane źródło prądowe G_D, modelujące prąd kanału tranzystora w trzech zakresach pracy: odcięcia, liniowym oraz nasycenia. W zakresie odcięcia wydajność tego źródła wynosi zero, natomiast w zakresie liniowym i nasycenia wydajność opisano wzorem [7, 8]:

$$i_D = \beta \cdot 1{,}01^{\beta_{TC}\cdot(T_j - T_0)} \cdot (1 + \lambda \cdot u_{DS0}) \cdot (u_{GS0} - U_{\mathrm{TH}})^2 \cdot \frac{A}{1 + B \cdot (u_{GS0} - U_{\mathrm{TH}})} \tag{1}$$

gdzie:

u_{GS0}, u_{DS0} – napięcia zaznaczone na rysunku 1a),
β – parametr transkonduktancji w temperaturze T_j,
β_{TC} – temperaturowy współczynnik zmian parametru transkonduktancji,
λ – współczynnik modulacji długości kanału.

Współczynnik A opisano wzorem [7, 8]:

$$A = \begin{cases} 1 - \left(1 - u_{DS0} \cdot \dfrac{\alpha}{3}\right)^3 & \text{dla} \quad 0 < u_{DS0} < \dfrac{3}{\alpha} \\ 1 & \text{dla} \quad u_{DS0} \geq \dfrac{3}{\alpha} \end{cases} \tag{2}$$

gdzie α jest parametrem określającym granicę pomiędzy zakresem liniowym i nasycenia.

Występujące we wzorze (1) napięcie progowe uzależniono zarówno od temperatury, jak i napięcia dren-źródło, co opisano wzorem [2]:

$$U_{TH}(T_j, u_{DS}) = U_{TH0} + \gamma \cdot u_{DS0} + \left(A_1 - \frac{B_1}{exp(C_1 \cdot u_{DS0})}\right) \cdot (T_j - T_0) \tag{3}$$

gdzie:

U_{TH0} – napięcie progowe w temperaturze odniesienia T_0 przy $U_{DS} = 0$ V,
γ, A_1, B_1, C_1 – parametry modelu.

Źródła G_{D1} oraz G_{D2} z rysunku 1a) modelują prądy płynące przez złącza metal-półprzewodnik (złącza Schottky'ego) włączone odpowiednio między bramką i drenem oraz bramką i źródłem tranzystora. Wydajności tych źródeł wyrażono wzorami [2]:

$$i_{GS} = S_S \cdot A_R \cdot T_j^{m_S} \cdot \exp\left(\frac{-B_{S0}}{T_j}\right) \cdot \left[\exp\left(\frac{u_{GS0}}{h \cdot N_S(T_j) \cdot T_j}\right) - 1\right] \cdot \exp\left(\frac{L_{S0} \cdot \sqrt[4]{u_{GS}^{C_S}}}{T_j}\right) \tag{4}$$

$$i_{GD} = S_D \cdot A_R \cdot T_j^{m_D} \cdot \exp\left(\frac{-B_{D0}}{T_j}\right) \cdot \left[\exp\left(\frac{u_{GD0}}{h \cdot N_D(T_j) \cdot T_j}\right) - 1\right] \cdot \exp\left(\frac{L_{D0} \cdot \sqrt[4]{u_{GD}^{C_D}}}{T_j}\right) \tag{5}$$

gdzie:

S_S, S_D – powierzchnie złączy Schottky'ego,
A_R – stała Richardsona,
B_{S0}, B_{D0} – wysokości bariery potencjału złączy,
h – stosunek stałej Boltzmanna k do ładunku elementarnego q,
L_{S0}, L_{D0}, C_S, C_D, m_S, m_D – pozostałe parametry modelu.

Wielkości $N_S(T_j)$ i $N_D(T_j)$ wyrażono następująco [2]:

$$N_S(T) = N_{S0} \cdot \left(1 - \alpha_{SN1} \cdot \left(T_j - T_0\right)\right) \tag{6}$$

$$N_D(T) = N_{D0} \cdot \left(1 - \alpha_{DN1} \cdot \left(T_j - T_0\right)\right) \tag{7}$$

gdzie:

N_{S0}, N_{D0} – współczynniki emisji złączy,
α_{S0}, α_{D0} – temperaturowe współczynniki zmian parametrów N_{S0}, N_{D0}.

Wartość stałej Richardsona dla arsenku galu oraz węglika krzemu wynosi odpowiednio 4,4 oraz 146 A/cm^2·K^2 [2].

Prądy płynące przez rezystancje szeregowe obszarów drenu, źródła oraz bramki tranzystora są modelowane za pomocą źródeł odpowiednio: G_{RD}, G_{RS} oraz G_{RG}. Np. wydajność źródła G_{RD} opisano wzorem [2] (analogicznie opisano źródło G_{RS} oraz G_{RG}):

$$i_{D1} = \frac{u_{D1}}{R_{D0} \cdot \left[1 - \alpha_{RD} \cdot \left(T_j - T_0\right)\right]} \tag{8}$$

gdzie:

u_{D1} – napięcie zaznaczone na rysunku 1a),
R_{D0} – rezystancja szeregowa drenu w temperaturze odniesienia,
α_{RD} – temperaturowy współczynnik zmian tej rezystancji szeregowej.

W modelu uwzględniono również zjawisko przebicia struktury tranzystora MESFET, wynikające z efektu powielania lawinowego (przebicia lawinowego) złącza Schottky'ego, włączonego w strukturze tranzystora między bramką i drenem. Zjawisko przebicia jest reprezentowane za pomocą źródła G_Z na rysunku 1a), przy czym w opisie wydajności tego źródła zastosowano empiryczną zależność o postaci [2]:

$$i_Z = I_{BR0} \cdot \exp\left[\frac{\left(U_{BR0} + \gamma_{BR} \cdot u_{GS0}\right) \cdot \left(1 - \alpha_{BR} \cdot \left(T_j - T_0\right)\right) + u_{DS0}}{N_{BR0} \cdot \left(1 - \alpha_{NBR} \cdot \left(T_j - T_0\right)\right) \cdot h \cdot T_j}\right] \tag{9}$$

gdzie:

U_{BR0} – napięcie przebicia przy $U_{GS0} = 0$ V w temperaturze odniesienia,
α_{BR} – temperaturowy współczynnik zmian napięcia przebicia,
γ_{BR} – współczynnik uwzględniający wpływ napięcia bramka-źródło na napięcie przebicia,
h – stosunek stałej Boltzmanna do ładunku elementarnego,
I_{BR0}, N_{BR0}, α_{NBR} – pozostałe parametry modelu.

Nieliniowe pojemności tranzystora MESFET umieszczone między bramką i źródłem, bramką i drenem oraz drenem i źródłem uwzględniono w rozważanym modelu z wykorzystaniem sterowanych źródeł odpowiednio G_{CGS}, G_{CGD} oraz G_{CDS}. Opis analityczny wymienionych pojemności szczegółowo podano w pracy [2]. Z kolei elementy L_g, L_d, L_s, C_{pg} oraz C_{pd} (rys. 1a) reprezentują pasożytnicze indukcyjności oraz pojemności związane z wyprowadzeniami oraz obudową tranzystora.

W modelu termicznym o topologii z rysunku 1b) [4] wydajność sterowanego źródła prądowego p_{th} wyraża wartość mocy cieplnej wydzielonej w tranzystorze. Źródła G_{Ci} oraz E_{Ri} modelują odpowiednio: prądy płynące przez pojemności cieplne oraz spadki napięć na rezystancjach cieplnych, co opisano wzorami [2, 4]:

$$G_{Ci} = C_i \cdot \frac{du_i}{dt} \tag{10}$$

$$E_{Ri} = R_i \cdot i_{Ri} \tag{11}$$

gdzie:

u_i – wartość napięcia na źródle G_{Ci},
i_{Ri} – wartość prądu płynącego przez źródło E_{Ri}.

Parametry C_i oraz R_i wyrażono za pomocą zależności [2, 4]:

$$C_i = C_{i0} \cdot \left[1 + a_{i1} \cdot \exp\left(-\frac{p_{th} - p_{i1}}{b_{i1}} \right) + a_{i2} \cdot \exp\left(-\frac{p_{th} - p_{i2}}{b_{i2}} \right) \right] \tag{12}$$

$$R_i = R_{i0} \cdot \left[1 + d_{i1} \cdot \exp\left(-\frac{p_{th} - p_{i3}}{e_{i1}} \right) + d_{i2} \cdot \exp\left(-\frac{p_{th} - p_{i4}}{e_{i2}} \right) \right] \tag{13}$$

gdzie C_{i0}, a_{i1}, a_{i2}, b_{i1}, b_{i2}, d_{i1}, d_{i2}, e_{i1}, e_{i2}, R_{i0}, p_{i1}, p_{i2}, p_{i3}, p_{i4} są parametrami modelu.

Napięcie w węźle T_j z rysunku 1b) reprezentuje wartość nadwyżki temperatury wnętrza tranzystora ponad temperaturę otoczenia, natomiast wydajność niezależnego źródła V_{Ta} oznacza wartość temperatury otoczenia T_a.

Źródło E_P w modelu mocy z rysunku 1c) [2, 3, 7, 8] wyznacza wartość mocy cieplnej wydzielanej w tranzystorze, stanowiącej iloczyn wartości prądu drenu oraz napięcia dren-źródło.

2. WERYFIKACJA EKSPERYMENTALNA MODELU ORAZ UWAGI KOŃCOWE

Przeprowadzono ocenę dokładności omawianego w pracy modelu elektrotermicznego poprzez porównanie wyników symulacji i pomiarów wybranych charakterystyk tranzystora MESFET z arsenku galu oraz węglika krzemu.

W tabeli 1 zestawiono dopuszczalne wartości wybranych parametrów elektrycznych i termicznych zaczerpnięte z kart katalogowych obu badanych elementów półprzewodnikowych [11, 12].

Tabela 1. Dopuszczalne wartości wybranych parametrów elektrycznych i termicznych tranzystora NE650103M oraz CRF24010

Table 1. *Absolute maximum values of selected electrical and thermal parameters of NE650103M and CRF24010 MESFETs*

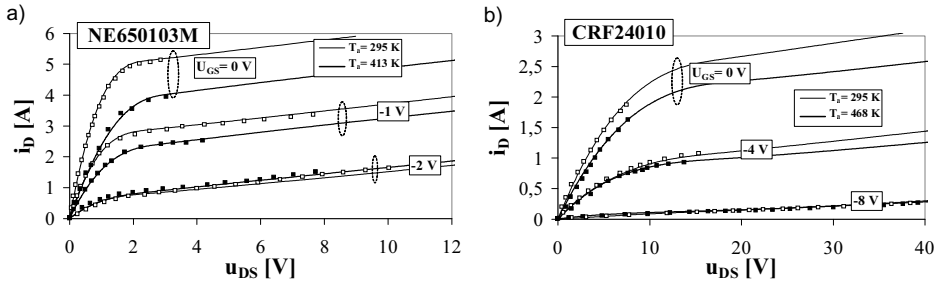
Nazwa parametru i symbol	Wartość	
	NE650103M	CRF24010
Napięcie dren-źródło U_{DS}	15 V	120 V
Napięcie bramka-źródło U_{GS}	-7 V	-20 V
Prąd dren-źródło I_{DS}	5 A	1,5 A
Rezystancja termiczna między złączem a obudową R_{thj-c}	5,6°C/W	4°C/W
Maksymalna temperatura wnętrza T_{CH}	175°C	255°C

Jak widać w tabeli 1, tranzystor wykonany z węglika krzemu charakteryzuje się przede wszystkim wyższą dopuszczalną wartością napięcia dren-źródło (około 8-krotnie), a także wyższą o 80°C dopuszczalną wartością temperatury wnętrza tranzystora.

Pomiary prądowo-napięciowych charakterystyk statycznych badanych tranzystorów zrealizowano z wykorzystaniem opracowanego w Katedrze Elektroniki Morskiej Akademii Morskiej w Gdyni sterowanego komputerowo systemu do pomiarów charakterystyk statycznych i dynamicznych oraz parametrów termicznych elementów półprzewodnikowych [3, 5]. Ponadto do realizacji pomiarów charakterystyk statycznych w szerokim zakresie temperatury otoczenia wykorzystano komorę badań cieplnych typu KBC-32W firmy Wamed.

Procedura estymacji parametrów elektrotermicznego modelu tranzystora MESFET złożona jest z dwóch etapów i obejmuje wyznaczanie wartości parametrów zarówno modelu elektrycznego (etap I), jak i modelu termicznego (etap II). Wartości parametrów modelu elektrycznego dla tranzystora NE650103M oraz CRF24010 wyznaczono z wykorzystaniem autorskiej metody estymacyjnej szczegółowo opisanej w pracy [1]. Natomiast w celu wyznaczenia wartości parametrów modelu termicznego zastosowano metodę przedstawioną w pracach [2, 5, 10].

Na rysunku 2 pokazano charakterystyki wyjściowe $i_D(u_{DS})$ rozważanych tranzystorów uzyskane w warunkach izotermicznych dla różnych wartości napięcia bramka-źródło w dwóch temperaturach otoczenia. Cienkie linie ciągłe oraz punkty niewypełnione na tym rysunku reprezentują odpowiednio wyniki obliczeń i pomiarów uzyskane w temperaturze pokojowej (T_a = 295 K), natomiast grube linie ciągłe oraz punkty wypełnione – wyniki w podwyższonej temperaturze otoczenia, tj. 413 K w przypadku tranzystora z arsenku galu oraz 468 K w tranzystorze z węglika krzemu.

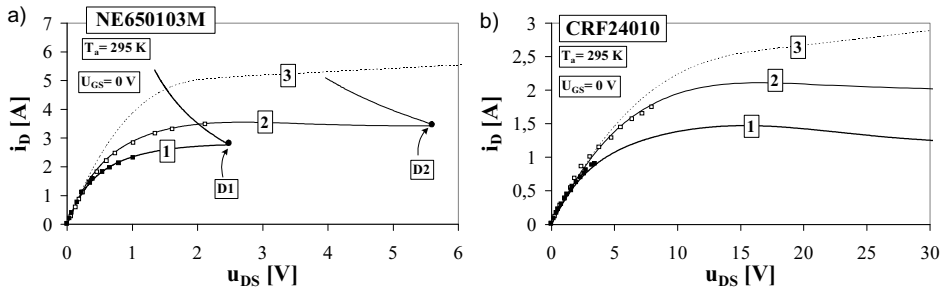


Rys. 2. Izotermiczne charakterystyki tranzystorów: a) GaAs MESFET, b) SiC MESFET
Fig. 2. *Isothermal characteristics of: a) GaAs MESFET, b) SiC MESFET*

Jak widać, uzyskano bardzo dobrą zgodność wyników pomiarów i symulacji omawianym w pracy modelem ETM. Temperatura otoczenia wpływa na kształt charakterystyk wyjściowych rozważanych tranzystorów, przy czym wzrost tej temperatury może powodować zarówno spadek prądu drenu przy ustalonej wartości napięcia dren-źródło (co widać na charakterystykach z rysunku 2a) przy U_{GS} = 0 oraz –1 V, a także charakterystykach z rysunku 2b) przy U_{GS} = 0 oraz –4 V), jak i nawet stosunkowo niewielki wzrost tego prądu dla relatywnie niskich wartości napięcia bramka-źródło (pozostałe charakterystyki z rysunku 2). Ponadto w tranzystorze wykonanym z arsenku galu przy arbitralnie wybranych wartościach napięć U_{GS} = 0 V oraz U_{DS} = 6 V (rys. 2a) wzrost temperatury otoczenia o 120 K powoduje spadek wartości prądu i_D w przybliżeniu o 25%, z kolei w tranzystorze wykonanym z węglika krzemu przy takich samych wartościach u_{GS} oraz u_{DS} (rys. 2b), wzrost temperatury nawet o 170 K powoduje spadek wartości i_D tylko o około 16%, a zatem tranzystor SiC MESFET charakteryzuje się mniejszą wrażliwością na zmiany temperatury otoczenia niż jego odpowiednik wykonany z arsenku galu.

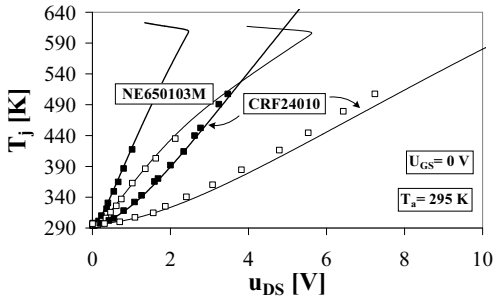
Z kolei na rysunku 3 przedstawiono obliczone oraz zmierzone charakterystyki wyjściowe badanych tranzystorów w warunkach nieizotermicznych. Wymienione charakterystyki dotyczą temperatury otoczenia 295 K, napięcia bramka-źródło U_{GS} = 0 V, jak również zróżnicowanych warunków chłodzenia tranzystorów, a mianowicie: grubą linią ciągłą oraz punktami wypełnionymi oznaczono charakterystyki nieizotermiczne tranzystorów pracujących bez radiatorów (krzywe nr 1 z rysunku 3), cienką linią ciągłą oraz punktami niewypełnionymi zaznaczono charakterystyki nieizotermiczne tranzystorów pracujących na radiatorach (krzywe nr 2). Dodatkowo, dla porównania na wymienionym rysunku linią przerywaną (krzywa nr 3) oznaczono charakterystyki uzyskane w warunkach izotermicznych. W badaniach wykorzystano radiator typu A4755/25 firmy Stonecold o powierzchni czynnej wynoszącej około 42 cm^2.

Ponadto na rysunku 4 przedstawiono obliczone (linie) i zmierzone (punkty) charakterystyki temperatury wnętrza tranzystorów w funkcji napięcia dren-źródło, odpowiadające charakterystykom nieizotermicznym z rysunku 3.



Rys. 3. Nieizotermiczne charakterystyki tranzystorów: a) GaAs, b) SiC MESFET

Fig. 3. *Nonisothermal characteristics of: a) GaAs MESFET, b) SiC MESFET*



Rys. 4. Przebiegi $T_j(u_{DS})$ tranzystora GaAs MESFET oraz SiC MESFET odpowiadające charakterystykom nieizotermicznym z rysunku 3

Fig. 4. *Characteristics $T_j(u_{DS})$ of: a) GaAs MESFET, b) SiC MESFET corresponding to nonisothermal characteristics from Fig. 3*

Jak widać z rysunku 3, charakterystyki obliczone w warunkach izotermicznych, a także w warunkach nieizotermicznych różnią się od siebie zarówno ilościowo, jak i jakościowo. Reasumując, widoczny na rysunku 4 wzrost temperatury wnętrza elementu T_j powyżej temperatury otoczenia, wywołany zjawiskiem samonagrzewania, powoduje, że wartości prądu drenu rozważanych tranzystorów w warunkach nieizotermicznych są niższe od odpowiednich wartości uzyskanych w warunkach izotermicznych, przy takich samych wartościach napięcia u_{GS} oraz u_{DS} (rys. 3). Np. obliczona w warunkach izotermicznych wartość prądu drenu tranzystora z węglika krzemu pracującego przy $U_{GS} = 0$ V oraz $U_{DS} = 30$ V (rys. 3b) jest około 74% wyższa niż w tranzystorze umieszczonym na radiatorze, a nawet ponad 2-krotnie wyższa niż w tranzystorze bez dołączonego radiatora.

Na charakterystykach tranzystora GaAs MESFET z rysunku 3a) zaznaczono charakterystyczne punkty D1 oraz D2, w których występuje tzw. zjawisko przebicia elektrotermicznego [9], skutkujące charakterystycznym „cofaniem się" charakterystyk wyjściowych tranzystora (spadek wartości napięcia dren-źródło wraz z dalszym wzrostem prądu drenu tranzystora). W przypadku tranzystora SiC MESFET nie zaobserwowano zjawiska przebicia elektrotermicznego ani na charakterystykach zmierzonych ani na charakterystykach obliczonych, nawet w znacznie szerszym niż zilustrowano to na rysunku 3b) zakresie napięć u_{DS}.

UWAGI KOŃCOWE

W pracy przedyskutowano szereg zagadnień związanych z problematyką elektrotermicznego modelowania tranzystora MESFET, w tym obejmujących formułowanie wszystkich elementów składowych elektrotermicznego modelu tego tranzystora. Zaprezentowany model uwzględnia wiele zjawisk elektrycznych i termicznych zachodzących w rzeczywistych tranzystorach MESFET i jest przeznaczony dla elementów wykonanych zarówno z arsenku galu, jak i węglika krzemu.

Wyniki weryfikacji eksperymentalnej modelu świadczą o istotnym wpływie temperatury otoczenia na charakterystyki statyczne tranzystora MESFET, szczególnie w przypadku najwyższych wartości napięcia sterującego bramka-źródło badanych tranzystorów.

Korzystanie z tego modelu pozwala nie tylko na uzyskanie szczegółowych informacji na temat właściwości termicznych rozważanych tranzystorów, ale również stwarza możliwość zbadania i określenia warunków ich bezpiecznej pracy w konkretnych rozwiązaniach aplikacyjnych.

Poza tym korzyści z zastosowania w układach elektronicznych tranzystora wykonanego z węglika krzemu przejawiają się głównie w postaci wyższej dopuszczalnej wartości temperatury wnętrza oraz zakresu napięć polaryzujących ten tranzystor.

LITERATURA

1. Bisewski D., *Estimation of parameters of GaAs and SiC MESFETs using genetic algorithm*, 45th International Conference on Microelectronics, Devices and Materials, MIDEM, Postojna, Slovenia, 2009, s. 81–84.
2. Bisewski D., *Modelowanie tranzystora MESFET w programie SPICE z uwzględnieniem samonagrzewania,* Politechnika Łódzka, Łódź 2012.
3. Bisewski D., Dąbrowski J., Zarębski J., *Computer Measuring Set of Transient Thermal Impedance of Power Semiconductor Devices with Schottky Junctions, Computer Applications in Electrical Engineering,* Gaudentium, Uniwersytet Przyrodniczy w Poznaniu, Poznań 2008, s. 224–234.
4. Górecki K., Zarębski J., *Nonlinear compact thermal model of power semiconductor devices*, IEEE Transactions on Components and Packaging Technologies, Vol. 33, 2010, No. 3, s. 643–647.
5. Górecki K., Zarębski J., *System mikrokomputerowy do pomiaru parametrów termicznych elementów półprzewodnikowych i układów scalonych*, Metrologia i Systemy Pomiarowe, 2001, nr 8(4), s. 379–395.
6. Mead C.A., *Schottky Barrier Gate Field Effect Transistor*, IEEE Proceedings, Vol. 54, 1966, s. 307.
7. PSPICE A/D *Reference Guide Version 15.7*, MicroSim Corporation, Irvine, California 2006.
8. Statz H. et al., *GaAs FET Device and Circuit Simulation in SPICE,* IEEE Transactions on Electron Devices, Vol. ED-34, 1987, No. 2, s. 160–169.

9. Zarębski J., *Modelowanie, symulacja i pomiary przebiegów elektrotermicznych w elementach półprzewodnikowych i układach elektronicznych*, Prace Naukowe Wyższej Szkoły Morskiej w Gdyni, Gdynia 1996.
10. Zarębski J., Bisewski D., Gimbut M., Liżewski Ł., *Wyniki pomiarów parametrów termicznych tranzystora GaAs oraz SiC MESFET,* Zeszyty Naukowe Akademii Morskiej w Gdyni, nr 59, Gdynia 2008, s. 26–38.

Strony internetowe:

11. http://www.cel.com/pdf/datasheets/ ne650103.pdf.
12. http://www.cree.com/products/pdf/ crf24010.pdf.

MODELLING OF ELECTROTHERMAL CHARACTERISTICS OF MESFET IN PSPICE

Summary

The paper deals with the problem of modelling of MESFETs including self-heating phenomenon. The form of electrothermal model of considered semiconductor device is presented. The model has been verified experimentally. The results of calculations and measurements of NE650103M (California Eastern Laboratories) gallium arsenide MESFET as well as CRF24010 (Cree, Inc.) silicon carbide MESFET are given as well. An influence of temperature on selected static characteristics of the devices was examined.