

Analitički model uticaja temperature na strujno-naponske karakteristike HFETa

Petar M. Lukić, Vladan M. Lukić, Rajko M. Šašić

Sadržaj — U radu je najpre istaknut uticaj istraživanja i razvoja savremenih mikroelektronskih komponenti na poboljšavanje karakteristika postojećih i stvaranje novih telekomunikacionih uređaja. Posebno je ukazano na nove koncepte koji se mogu realizovati korišćenjem heterostrukturalnih mikroelektronskih naprava. U najkraćim crtama je prikazana struktura heterostrukturalnog unipolarnog tranzistora (HFETa), princip rada i prednosti koje ima u odnosu na standardne Si tranzistore. Zatim je razvijen analitički model strujno-naponskih karakteristika HFETa. Uticaj temperature na strujno-naponske karakteristike, predstavljen je kroz model pokretljivosti nosilaca naelektrisanja. Na osnovu predloženog modela izvršene su simulacije. Dobijeni rezultati prikazani su grafički.

Ključne reči — analitički model, HFET, strujno-naponska karakteristika.

I. UVOD

RAZVOJ telekomunikacionih uređaja i opreme neraskidivo je povezan sa razvojem mikroelektronskih komponenti. Poboljšavanje karakteristika postojećih, i razvijanje novih mikroelektronskih naprava, obezbeđuje mogućnost realizacije telekomunikacionih struktura sa unapređenim, pa i novim, mogućnostima.

Elektronske komponente imaju sve bolje performanse i ispunjavaju sve oštrije zahteve. Permanentno se radi na smanjivanju dimenzija komponenti (mikroelektroniku polako zamenjuje nanoelektronika), čime se obezbeđuje povećanje gustine njihovog pakovanja u čipu. Takođe, istraživanja su usmerena ka povećanju brzine rada mikroelektronskih naprava, obezbeđivanju mogućnosti rada pri ekstremnim temperaturama, rad na visokim frekvencijama i sl.

Silicijumske elektronske naprave, i dalje dominantne i široko korišćene, pokazuju značajna ograničenja i nedostatke. Trend minijaturizacije silicijumskih integrisanih naprava i povećanje brzine rada, usporen je u

poslednjoj deceniji, usled različitih faktora. Dalja minijaturizacija može da ugrozi funkcionisanje samih komponenti. Naime, dimenzije aktivnih oblasti, kao što su dužina kanala unipolarnih MOS (Metal Oxide Semiconductor) tranzistora i širina baze bipolarnih tranzistora, ne mogu se značajno smanjiti a da se pri tome ne ugrozi funkcionisanje ovih komponenti. Takođe, minijaturizacija dimenzija komponenti dovodi do stvaranja problema vezanih za odvođenje toplote koja se oslobađa pri njihovom radu. Čak i frekvencije rada komponenti dostižu svoje prirodne limite [1, 2]. Zato su istraživanja usmerena prema traženju novih rešenja. Već se koriste novi materijali (SiC, GaAs, GaN, superprovodnici i sl.) i primenjuju novi koncepti (heterostrukture, nanostrukture, superrešetke, kvantne žice i sl.). Među veoma dobra nova rešenja spada korišćenje heterostrukturalnih komponenti, koje imaju bolje i čak nove karakteristike u odnosu na silicijumske [1, 2].

Strukturu heterostrukturalnih elektronskih komponenti čine veoma tanki slojevi različitih poluprovodničkih materijala. Ovi slojevi su toliko tanki da do izražaja dolaze kvantni efekti. Rad heterostrukturalnih elektronskih komponenti bazira se upravo na korišćenju kvantnih efekata [1].

Suština ideje o korišćenju heterostrukturalnih mikroelektronskih naprava jeste postizanje željenog rasporeda energetske zone i polja u heterostrukturi. Naime, spajanjem materijala sa različitim energetskim procepima, na heterospoju se javljaju diskontinuiteti na dnu provodne i vrhu valentne zone. Promene u energetskim zonama obezbeđuju mogućnost kontrolisanja raspodele i protoka nosilaca naelektrisanja kroz heterostrukturalne naprave. Zahvaljujući tome, ova vrsta komponenti ima ne samo bolje, već čak i nove osobine u poređenju sa silicijumskim [1].

Među najznačajnije i najviše korišćene elektronske komponente spadaju tranzistori. Oni predstavljaju osnovne aktivne i prekidačke komponente savremenih elektronskih kola. Zbog svoje jednostavnosti, tranzistori sa efektom polja – FETovi (Field Effect Transistor) dominiraju u elektronskim kolima visoke integracije [2]. Prvi heterostrukturalni unipolarni tranzistor – HFET (Heterostructural Field Effect Transistor) napravljen je 1980. godine u laboratorijama Fudicu u Japanu. Istraživanja i razvoj HFETova se nastavljaju sve do danas, s obzirom da je reč o savremenim komponentama koje su pogodno za upotrebu u najmodernijim telekomunikacionim i računarskim kolima.

Petar M. Lukić, Mašinski fakultet Univerziteta u Beogradu, Kraljice Marije 16, 11120 Beograd, Srbija; (e-mail: plukic@mas.bg.ac.yu).

Vladan M. Lukić, Nokia Siemens Networks Srbija d.o.o. Beograd, Omladinskih brigada 21, 11070 Novi Beograd, Srbija; (e-mail: vladan.lukic@nsn.com).

Rajko M. Šašić, Tehnološko-metalurški fakultet Univerziteta u Beogradu, Karnegijeva 4, 11120 Beograd, Srbija; (e-mail: plukic@mas.bg.ac.yu).

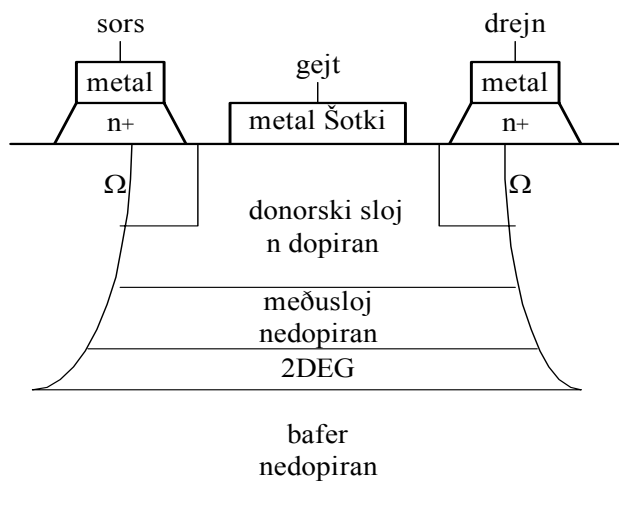
Toplotni fenomeni spadaju među najmanje razjašnjenje i najsloženije fenomene koji se sreću u elektronskim napravama i sistemima, i veoma često predstavljaju kritičnu tačku za rad mikroelektronske komponente. To je razlog zašto se istraživanju uticaja temperature, na karakteristike mikroelektronskih naprava, posvećuje posebna pažnja.

Strujno-naponske karakteristike neke elektronske komponente predstavljaju njenu osnovnu karakteristiku. Dobar model jeste zapravo dobro opisan rad elektronske komponente.

U ovom radu je najpre, u najkraćim crtama objašnjen princip rada HFETA, a zatim je dat analitički model uticaj temperature na strujno-naponske karakteristike HFETA.

II. STRUKTURA I PRINCIP RADA HFETA

HFET čini više poluprovodničkih slojeva, ali tri su osnovna: donorski sloj, baferski sloj i međusloj. Donorski sloj i međusloj su napravljeni od istog poluprovodničkog materijala, ali je donorski sloj super-dopiran dok je međusloj nedopiran. Baferski sloj je napravljen od drugog poluprovodničkog materijala i teorijski je nedopiran. Na slici 1. dat je šematski prikaz osnovnih slojeva HFETA



Sl. 1. Šematski prikaz strukture HFETA.

Donorski sloj, koji je jako dopiran, obezbeđuje nosioce koji će činiti struju tranzistora. U nominalnom režimu rada tranzistora, donori u donorskom sloju su jonizovani. Jasno je da veća koncentracija donorskih primesa obezbeđuje veći broj nosilaca. Međutim, postoje tehnološka ograničenja, odnosno gornja granica za koncentraciju primesa koje mogu biti unete u neki poluprovodnički materijal, a da se njegove karakteristike ne naruše [1].

Baferski sloj je sloj u kome se nosioci sakupljaju. Oni su, značajnim delom, konfinirani u kvantnoj jami koja se nalazi u ovom sloju, neposredno uz heterospoj. Razdvojeni su od matičnih jonizovanih atoma koji su ostali u donorskom sloju. Ovo direktno utiče na povećanje pokretljivosti elektrona (uopšte, pokretljivost se povećava s obzirom da se smanjuje rasejanje nosilaca na nečistoćama, unetim primesama, ostalim elektronima i optičkim fononima kristalne strukture). Treba imati u vidu da bez unetih primesa ne bi postojali ni nosioci, ali da je,

sa druge strane, rasejanje nosilaca na primesama veoma veliko. Fizičkim razdvajanjem nosilaca naelektrisanja, koji se nalaze u baferskom sloju, od primesa, koje se nalaze u donorskom sloju, dobija se tranzistor veoma dobrih karakteristika. One se ogledaju u velikoj pokretljivosti nosilaca. To je jedna od najznačajnijih prednosti HFETA koja je istaknuta i u jednom od imena koje se koriste za ovu vrstu tranzistora – tranzistor sa velikom pokretljivošću elektrona (HEMT – High Electron Mobility Transistor). Rasejanje na primesama je dominantno na nižim temperaturama. Već na sobnoj temperaturi počinje da dominira rasejanje na fononima. Ali i na sobnoj temperaturi HFETovi pokazuju karakteristike koje su za red veličine bolje od odgovarajućih tranzistora neke druge vrste. Ovo se tumači činjenicom da se širenje dislokacija zaustavlja epitaksijalnim rastom slojeva različitih materijala. Baferski sloj je u idealnom slučaju nedopiran. U realnim uslovima nije moguće izbeći unošenje određene količine nečistoća, tako da je ovaj sloj u praksi blago dopiran nenamerno unetim akceptorskim primesama [1].

Međusloj ima ulogu da dodatno razdvoji nosioce od matičnih jonizovanih atoma. Nalazi se između donorskog i baferskog sloja. Pravi se od istog materijala kao i donorski sloj, ali je nedopiran [1].

Inženjeringom zonalne strukture, koji se u suštini realizuje podešavanjem debljine i rasporeda različitih poluprovodničkih materijala, kao i odgovarajućim dopiranjem pojedinih slojeva, obezbeđuje se konfiniranje 2DEG na heteromeđupovršini HFETA [1].

Princip rada HFETA bazira se na činjenici da se gustina 2DEG, a time i struja ovog tranzistora može kontrolisati naponom na gejtju. Praktično, naponom na gejtju se kontroliše dubina kvantne jame a time i koncentracija nosilaca koji su u njoj konfinirani [1].

Aktivni kanal se nalazi u baferskom sloju, mada jedan mali deo može biti i u međusloju, s obzirom da deo elektrona ima dovoljnu energiju da savlada potencijalnu barijeru i vrati se u međusloj.

III. MODEL

Drift-difuzioni model transporta nosilaca naelektrisanja u elektronskim komponentama ostao je do danas najšire prihvaćen. Ovaj model se bazira na savremenom shvatanju i tumačenju fizike transportnih procesa koji se odvijaju u poluprovodničkim napravama, što direktno utiče na kvalitet odnosno preciznost modela. Istovremeno, drift-difuzioni model može predstavljati polaznu tačku za razvijanje čitavog niza novih modela koji su, pored preciznosti, relativno jednostavni [3, 4].

Izraz za elementarnu struju drejna može se napisati u obliku [4]:

$$dI_{ds} = q_e \cdot W \cdot n(T, x, y) \cdot dx \cdot E(x, y) \cdot \mu(T, x, y) \quad (1)$$

U jednakosti (1) I_{ds} je struja drejna, q_e naelektrisanje elektrona, W je širina kanala, n je koncentracija nosilaca naelektrisanja, x je vertikalna a y lateralna koordinata, T temperatura, E električno polje i μ pokretljivost nosilaca naelektrisanja.

Na osnovu definicione veze polja E i potencijala V , izraz (1) se može napisati u obliku:

$$dI_{ds} = q_e \cdot W \cdot n(T, x, y) \cdot dx \cdot \frac{dV}{dy} \cdot \mu(T, x, y) \quad (2)$$

Integracijom po vertikalnoj osi može se odrediti ukupna struja drejna:

$$I_d = q_e \cdot W \cdot \frac{dV}{dy} \cdot \int_0^{x_{\max}} \mu(T, x, y) \cdot n(T, x, y) \cdot dx \quad (3)$$

U zavisnosti od modela za pokretljivost $\mu(T, x, y)$ i koncentraciju $n(T, x, y)$ nosilaca naelektrisanja, dobija se integral odgovarajućeg stepena složenosti. U cilju pojednostavljenja problema, može se napraviti aproksimacija uvođenjem pretpostavke da pokretljivost nosilaca ne zavisi od njihovog trenutnog položaja (da pokretljivost ne zavisi od koordinate). Takođe, može se smatrati da je i koncentracija nosilaca naelektrisanja konstantna u svim tačkama. Uvođenjem prethodnih aproksimacija znatno se olakšava rešavanje integrala iz jednakosti (3), tako da se za struju tranzistora dobija:

$$I_{ds} = q_e \cdot W \cdot \frac{dV}{dy} \cdot \mu(T) \cdot n(T) \quad (4)$$

odnosno:

$$I_{ds} \cdot dy = q_e \cdot W \cdot dV \cdot \mu(T) \cdot n(T) \quad (5)$$

Integracijom (5) duž kanala, dobija se:

$$I_{ds} \cdot L = q_e \cdot W \cdot \mu(T) \cdot n(T) \cdot \int_{V_s}^{V_d} dV \quad (6)$$

U izrazu (6) L je dužina kanala, V_s potencijal sorsa a V_d potencijal drejna. Elementarnim transformacijama, slično kao u [5] - [7] može se odrediti izraz za struju drejna.

- U linearnom režimu rada, struja drejna je:

$$I_{ds} = \mu(T) \cdot \frac{W}{L} \cdot C_G (V_{gs} - V_T - \frac{V_{ds}}{2}) \cdot V_{ds} \left(1 + \frac{\Delta L}{L}\right) \quad (7)$$

- U režimu zasićenja, struja drejna je:

$$I_{dss} = \frac{1}{2} \mu(T) \cdot \frac{W}{L} \cdot C_G (V_{gs} - V_T)^2 \cdot \left(1 + \frac{\Delta L}{L}\right) \quad (8)$$

U izrazima (7) i (8) V_{gs} je napon između gejta i sorsa, V_T napon praga, V_{ds} napon između drejna i sorsa. Izrazom:

$$\left(1 + \frac{\Delta L}{L}\right) \quad (9)$$

modelovana je modulacija dužine kanala tranzistora.

Pokretljivost nosilaca naelektrisanja modelovana je kao u [1]:

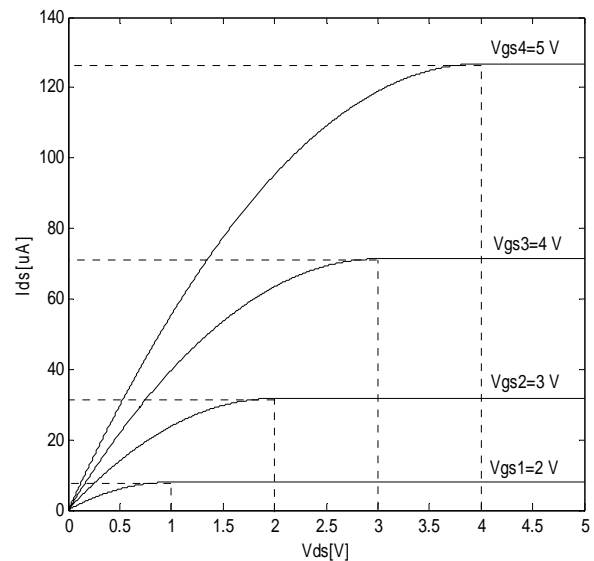
$$\mu(T) = \frac{\mu_0(T_s) \cdot \left(\frac{T_s}{T}\right)^\beta + \frac{v_s}{E_c} \cdot \left(\frac{q_e \frac{0.85n_s + n_b}{\epsilon_b}}{E_c}\right)^3}{1 + \left(\frac{q_e \frac{0.85n_s + n_b}{\epsilon_b}}{E_c}\right)^4} \quad (10)$$

U izrazu (10) μ_0 je pokretljivost nosilaca naelektrisanja pri malim poljima, T_s je sobna temperatura, T je temperatura, β temperaturni koeficijent, v_s je brzina nosilaca u zasićenju, E_c je kritično električno polje, n_s površinska koncentracija dvodimenzionog elektronskog gasa, n_b površinska koncentracija jonizovanih akceptora u baferskom sloju tranzistora i ϵ_b permitivnost bafera.

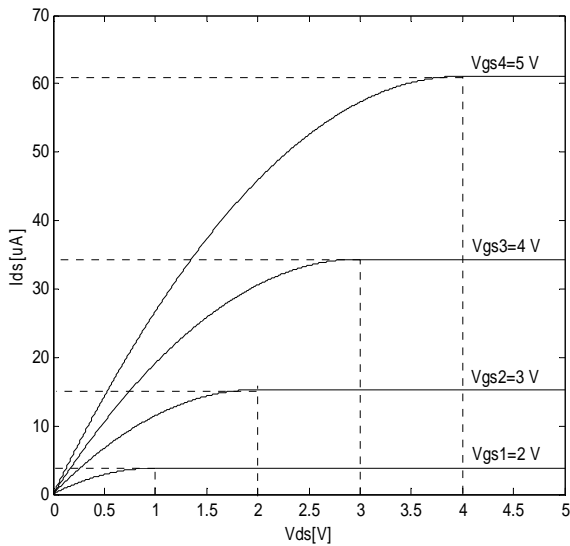
Kombinovanjem modela (7), (8) i (10) dobija se konačni model uticaja temperature na strujno naponske karakteristike HFET-a.

IV. REZULTATI I DISKUSIJA

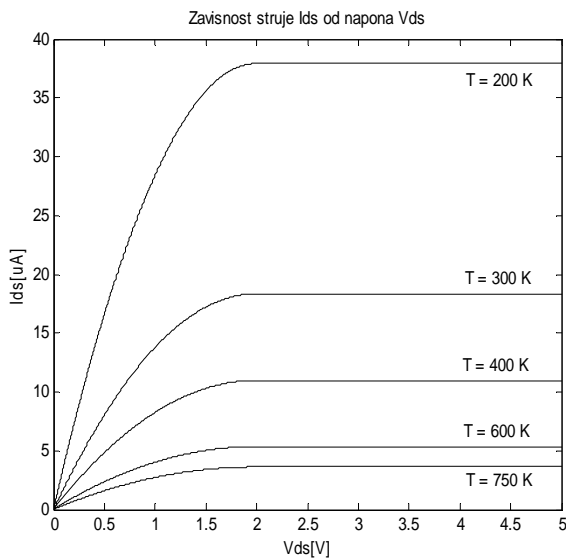
Korišćenjem predloženog modela izvršene su simulacije. Za pojedine parametre korišćene su sledeće vrednosti: naelektrisanje elektrona $q_e=1,602176462 \times 10^{-19}$ C, pokretljivost nosilaca naelektrisanja na sobnoj temperaturi $\mu(T_s)=9500 \text{ cm}^2/\text{Vs}$ (GaAs), sobna temperatura $T_s=300\text{K}$, koeficijent $\beta=1,8$, brzina nosilaca naelektrisanja u zasićenju $v_s=8,5 \times 10^6 \text{ cm/s}$, kritično polje $E_c=20 \text{ kV/cm}$, dielektrična permitivnost $\epsilon=\epsilon_r \epsilon_0=13,18 \times 8,854187817 \times 10^{-12} \text{ F/m}$ (GaAs), širina kanala $W=20 \text{ nm}$, dužina kanala $L=0,5 \mu\text{m} - 1 \mu\text{m}$, 2DEG kapacitivnost po jedinici dužine $C_G=0,7 \times 10^{-3} \text{ F/m}^2$, napon praga $V_T=1 \text{ V}$, površinska gustina 2DEG $n_s=1 \times 10^{15} - 2 \times 10^{16} \text{ m}^{-2}$, površinska gustina jonizovanih akceptora u bafetu $n_b=1,5 \times 10^{14} \text{ m}^{-2}$.



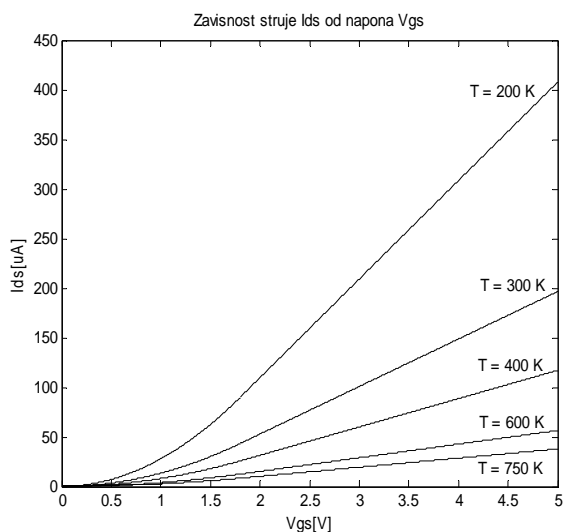
Sl. 2. Zavisnost $I_{ds}(V_{ds})$, za različite vrednosti V_{gs} , pri $T=400\text{K}$.



Sl. 3. Zavisnost $I_{ds}(V_{ds})$, za različite vrednosti V_{gs} , pri $T=600K$.



Sl. 4. Zavisnost $I_{ds}(V_{ds})$, za različite temperature T , $n_s=2 \times 10^{16} m^{-2}$.



Sl. 5. Zavisnost $I_{ds}(V_{gs})$, za različite temperature T , pri $n_s=10^{15} m^{-2}$.

Na slikama 2. i 3. prikazane su familije krivih koje predstavljaju zavisnosti struje HFETA I_{ds} od napona između drejna i sorsa V_{ds} . Na graficima se lako mogu uočiti linearna oblast rada HFETA kao i oblast kada HFET radi u zasićenju. Vidi se da struja HFETA raste sa porastom napona između drejna i sorsa (koji je uzet kao nezavisna promenljiva), sve do trenutka dok ne nastupi režim zasićenja. Sa slika se može videti da struja HFETA raste sa porastom napona između gejtja i sorsa V_{gs} (koji je uzet kao parametar), pri nekom fiksnom naponu između drejna i sorsa. Poređenjem rezultata sa slika 2. (temperatura $T=400K$) i 3. (temperatura $T=600K$), uočava se da struja HFETA opada sa porastom temperature.

Na slici 4. prikazane su familije krivih $I_{ds}(V_{ds})$, za različite temperature, pri $n_s=2 \times 10^{16} m^{-2}$. Opadanje struje tranzistora sa porastom temperature je lako uočljivo.

Na slici 5. prikazane su familije krivih koje predstavljaju zavisnost struje HFETA I_{ds} od napona između gejtja i sorsa V_{gs} , za različite vrednosti temperature T , u slučaju kada je površinska gustina 2DEG $n_s=1 \times 10^{16} m^{-2}$. Sa slike se može videti da struja HFETA raste sa porastom napona između gejtja i sorsa V_{gs} . Takođe, vidi se da struja drejna opada sa porastom temperature.

V. ZAKLJUČAK

Predloženi analitički model je relativno jednostavan, a daje rezultate koji su u visokom stepenu saglasni sa do sada poznatim. Predloženi model je modularan, tako da se lako može testirati, dograđivati i eventualno poboljšavati.

LITERATURA

- [1] Petar M. Lukić, *Novi analitički modeli heterostrukturalnih unipolarnih tranzistora*. Doktorska disertacija, Elektrotehnički fakultet Univerziteta u Beogradu, 2005.
- [2] R. Ramović, R. Šašić, *Analiza i modelovanje unipolarnih tranzistora malih dimenzija*. DINEX, Beograd, 1999.
- [3] Petar M. Lukić, Rifat M. Ramović, Rajko M. Šašić, Stanko M. Ostojić, Vladan M. Lukić, "Analitički modeli transkonduktanse i izlazne konduktanse SiC MOSFETA," *CD Zbornik radova XV Telekomunikacionog foruma TELFOR 2007*, Beograd 20., 21. i 22. novembar 2007., str. 496.-499.
- [4] Rajko M. Šašić, Petar M. Lukić, Rifat M. Ramović, "New Analytical HFET I-V Characteristics Model," *Journal of Optoelectronics and Advanced Materials*, vol. 8, no. 1, pp. 324-328, Feb. 2006.

ABSTRACT

In this paper, analytical model of temperature impact on HFET current-voltage characteristics, is proposed. Achieved model is relatively simple and, at the same time, results obtained by using proposed model are in very good agreement with already known ones. The model is modular, thus it can easily be tested and eventually improved.

ANALYTICAL MODEL OF TEMPERATURE IMPACT ON HFET CURRENT-VOLTAGE CHARACTERISTICS

Petar M. Lukić, Vladan M. Lukić, Rajko M. Šašić