

Analitički model uticaja temperature na strujno-naponske karakteristike MESFET-a sa tri gejta

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

Sadržaj — U ovom radu je predložen analitički model uticaja temperature na strujno-naponske karakteristike MESFET-a sa tri gejta. Osnovu modela predstavlja matematički opis fizičkih pojava koje se odvijaju u ovoj napravi, posebno uzimajući u obzir uticaj temperature, ali i geometrijske zavisnosti pojedinih parametara. Model je univerzalan, odnosno može se primeniti na MESFET-ove sa različitim konfiguracijama sprežanja gejtova u fizičkom i električnom pogledu (mogu biti spojeni ili nezavisno polarisani različitim naponima). Uz odgovarajuće manje modifikacije, model se može koristiti za MESFET-ove sa različitim brojem gejtova. Predloženi model je relativno jednostavan, a daje rezultate koji se dobro slažu sa do sada poznatim.

Ključne reči — analitički model, MESFET, strujno-naponska karakteristika, temperaturna zavisnost.

I. UVOD

RAZVOJ telekomunikacionih naprava praćen je, i direktno uslovljen razvojem mikroelektronskih komponenti. Tendencija poboljšavanja karakteristika postojećih i stvaranje novih mikroelektronskih naprava sve više dobija na značaju.

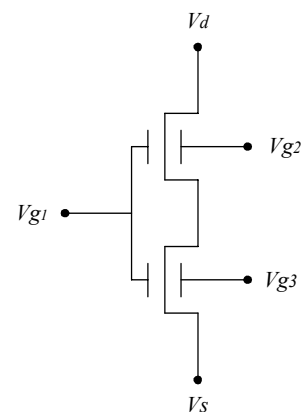
Jedan od osnovnih ciljeva u razvoju monolitnih integrisanih kola jeste smanjenje dimenzija naprava i smanjenje snage disipacije po elementu, uz popravku ili bar očuvanje željenih elektronskih karakteristika [1]. Standardne silicijumske poluprovodničke komponente, usled ograničenja koja potiču od fizičkih osobina silicijuma, polako gube trku sa sve složenijim zahtevima koji se pred njih postavljaju. Istraživanja u oblasti mikroelektronike, a danas i nanoelektronike, usmerena su ka traženju novih, boljih rešenja. Dimenzije naprava postaju toliko male da do izražaja dolaze kvantni efekti, koji se koriste u cilju dobijanja komponente odgovarajućih karakteristika (npr. velike brzine rada i sl.) [1, 2, 5 - 7].

Heterodimenzionalni tranzistori predstavljaju klasu novih mikroelektronskih komponenti. Njihov rad se zasniva na heterodimenzionalnoj sprezi između trodimenzionalnog (3-D) metalnog kontakta i dvodimenzionog elektronskog gasa (2DEG). Ove naprave se razvijaju u cilju obezbeđivanja znatno većih brzina rada i manje potrošnje [3, 4] u poređenju sa standardnim silicijumskim napravama.

Među heterodimenzionalne naprave koje dosta obećavaju spada višedimenzionalni MESFET. Istražuju se mogućnosti za primenu ovih tranzistora u digitalnoj elektronici i optoelektronici. Koristili bi se u logičkim kolima, čime bi se povećala logička funkcionalnost.

Za razliku od standardnog MESFET-a, višedimenzionalni MESFET može imati dve, tri ili više gejta elektroda. Gejt elektrode se mogu polarisati nezavisno, različitim naponima. Pomoću napona na gejt elektrodama moduliše se struja koja teče kroz kanal.

Kod dvogejtovskog MESFET-a, gejt elektrode, odnosno Šotki spojevi, nalaze se jedan naspram drugog. Trogejtovski MESFET se može predstaviti i analizirati kao dva serijski vezana dvogejtovska MESFET-a, kao što je prikazano na slici 1. Korišćenje više gejtova je konceptualno slično sa dvogejtovskim SOI napravama predstavljenim od IBM 1998., ali uz dodatnu prednost koja se ogleda u velikoj brzini heterodimenzionalnih Šotkijevih konatakata koji su ostvareni preko gejtova. Napravljeni su dvogejtovski i trogejtovski MESFET-ovi sa veoma dobrim električnim karakteristikama [4].



Sl. 1. Ekvivalentna električna šema trogejtovskog MESFET-a.

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

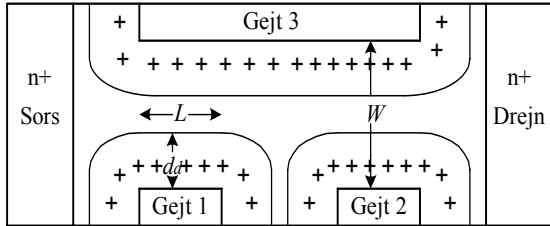
Vladan M. Lukić, Nokia Siemens Networks Srbija d.o.o. Beograd, Omladinskih brigada 21, 11070 Novi Beograd, Srbija; (e-mail: vladan.lukic@nsn.com).

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

U ovom radu predstavljen je model uticaja temperature na strujno – naponske karakteristike MESFET-a sa tri gejta, koji pored električnih i temperaturnih, u sebi sadrži i uticaje geometrijskih parametara na karakteristike tranzistora. Razvijeni model bolje od do sada postojećih opisuje prirodu pojava koje se odigravaju u MESFET-u.

II. MODEL

Princip rada MESFET-a bazira se na modulaciji širine oblasti osiromašenja, pomoću Šotkijevog spoja između 3-D metala i 2DEG [3, 4, 9]. Na taj način se menja širina 2DEG kanala i kontroliše struja između drejna i sorsa.



Sl. 2. Prikaz preseka MESFET-a sa tri gejta.

Na slici 2. prikazan je presek MESFET-a sa tri gejta. Najveća moguća širina kanala jednaka je rastojanju između gejtova, na slici 2. označena kao W . Neka je dužina prvog gejta L . Debljina 2DEG kanala ΔD je veoma mala, odnosno znatno je manja od širine oblasti prostornog tovara d_d ($\Delta D \ll d_d$), tako da se njen uticaj može zanemariti.

Polazeći od izraza za zavisnost širine oblasti prostornog tovara d_d od napona na gejtju, a na osnovu izraza za poduznu gustinu naelektrisanja q_c , za napon praga se dobija:

$$V_T = V_b - \frac{q_e \cdot n_s(T) \cdot W}{4\epsilon} \quad (1)$$

pri čemu je q_e naelektrisanje elektrona, n_s površinska gustina 2DEG, a ϵ dielektrična konstanta sredine. Izraz (1) važi u slučaju kada su na gejtovima isti naponi.

Ukoliko se na gejtove dovodu različiti naponi, širine oblasti prostornog tovara su različite sa različitih strana kanala. U tom slučaju je potrebno izvršiti korekciju napona praga:

$$\Delta V_T = \zeta \cdot (V_{GS1} - V_{GS3})^2 \quad (2)$$

U jednakosti (2) V_{GS1} i V_{GS3} su naponi između prvog, odnosno trećeg gejta i sorsa, dok je ζ koeficijent nelinearnog spreznja gejtova.

U modelu strujno – naponskih karakteristika MESFET-a koji se ovde predstavlja, koristi se model zavisnosti brzine nosilaca naelektrisanja v od intenziteta električnog polja E . Najjednostavniji analitički izraz koji vezuje ove dve veličine jeste linearna relacija ($v = \mu E$), sve dok intenzitet električnog polja ima vrednost manju od kritične E_c , pri čemu je koeficijent srazmernosti μ pokretljivost

nosilaca [1]. Koristeći ovakvu pretpostavku, struja MESFET-a u linearnom režimu se može opisati modelom:

$$I_{DS} = q_c \cdot \mu(T) \cdot E = q_c \cdot \mu(T) \cdot \frac{dV}{dx} \quad (3)$$

U izrazu (3) E je intenzitet lateralnog električnog polja, a V potencijal u kanalu. Za modelovanje električnog polja i pokretljivosti nosilaca u MESFET-u mogu se koristiti isti modeli kao i u slučaju HFET-a [2], [3], [7]. Za struju tranzistora u linearnom režimu rada se dobija:

$$I_{DS} = \frac{g_c \cdot V_{DS} \cdot (1 + \lambda \cdot V_{DS})}{\left(1 + \left(\frac{V_{DS} \cdot g_c}{I_{DSsat}}\right)^m\right)^{1/m}} \quad (4)$$

U jednakosti (4) V_{DS} je napon između drejna i sorsa, λ je parametar izlazne provodnosti koji opisuje efekat modulacije dužine kanala, I_{DSsat} je struja tranzistora u zasićenju, m je parametar kojim se podešava oblik kolena karakteristike, dok je g_c ukupna provodnost, koja obuhvata provodnosti sorsa i drejna:

$$g_c = \frac{g_{cch}}{1 + g_{cch} \cdot (R_S + R_D)} \quad (5)$$

U jednakosti (5) R_S je otpornost sorsa, R_D otpornost drejna, dok je g_{ci} provodnost samog kanala, koja je opisana relacijom:

$$g_{cch} = \frac{q_e \cdot Q' \cdot \mu(T)}{L} \quad (6)$$

U izrazu (6) Q' je poduzna gustina nosilaca u kanalu:

$$Q' = \frac{Q_i}{\left(1 + \left(\frac{Q_i}{Q'_{max}}\right)^\gamma\right)^{1/\gamma}} \quad (7)$$

U jednačini (7) Q'_{max} je maksimalna poduzna gustina nosilaca ($Q'_{max} = n_s W$), γ je parametar za podešavanje, a Q_i je definisano izrazom:

$$Q_i = \frac{8\epsilon \cdot \eta \cdot V_{te}(T)}{q_e} \cdot \log \left(1 + \frac{1}{2} \exp \left(\frac{V_{GS} - V_T}{\eta \cdot V_{te}(T)}\right)\right) \quad (8)$$

pri čemu je η faktor idealnosti, a $V_{te}(T) = kT/q_e$ je termički napon.

Struja tranzistora u režimu zasićenja je:

$$I_{DSsat} = \frac{g_{ci} \cdot V_{Ge} \cdot t_e}{(1 + t_c \cdot V_{Ge}) \cdot \left(1 + g_{cch} \cdot R_S + \sqrt{1 + 2g_{cch} \cdot R_S + \left(\frac{V_{Ge}}{V_L}\right)^2}\right)}$$

U prethodnoj jednakosti t_e je transkonduktanski faktor ekspanzije, t_c je transkonduktanski faktor kompresije, $V_L=E_cL$, dok je efektivni napon gejta:

$$V_{Ge} = \left(1 + \frac{V_{GS} - V_T}{2\eta \cdot V_{te}} + \sqrt{\delta^2 + \left(\frac{V_{GS} - V_T}{2\eta \cdot V_{te}} - 1 \right)^2} \right) \quad (10)$$

U jednakosti (10) parametar δ određuje širinu prelaza iz oblasti ispod napona praga u oblast iznad napona praga.

U slučaju tranzistora sa kratkim kanalom, mora se uzeti u obzir efektivno povećanje dužine kanala koje je proporcionalno širini oblasti osiromašenja d_d . Tada je efektivna dužina kanala $L_{eff}=L+\alpha d_d$, pri čemu je α parametar koji se podešava (u izrazu (6) je tada L_{eff} umesto L).

U cilju dobijanja modela koji opisuje temperaturnu zavisnost strujno - naponskih karakteristika MESFET-a, u prethodno prikazanim modelima (od jednakosti (3) i dalje) koristi se zavisnost pokretljivosti nosilaca naelektrisanja od temperature ([5], [7]):

$$\mu(T) = \frac{\mu_0(T_s) \cdot \left(\frac{T_s}{T} \right)^\beta + \frac{v_s}{E_c} \cdot \left(\frac{q_e \cdot 0.85n_s}{\epsilon_b E_c} \right)^3}{1 + \left(\frac{q_e \cdot 0.85n_s}{\epsilon_b E_c} \right)^4} \quad (11)$$

U izrazu (11) 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 2DEG.

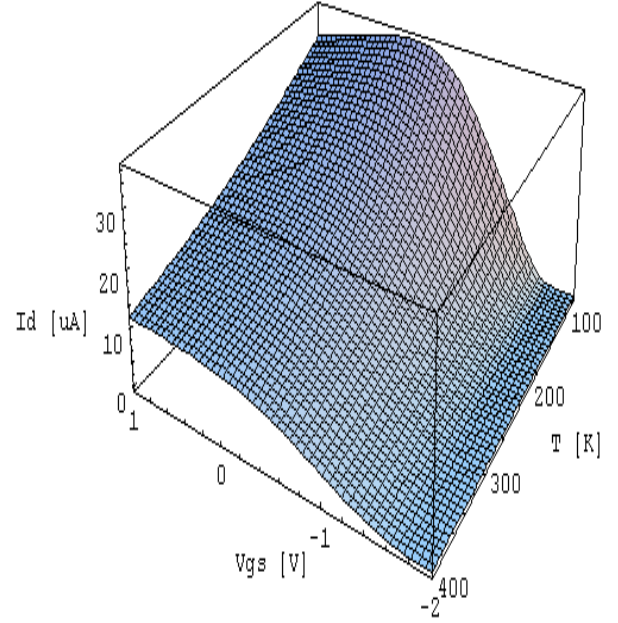
U režimu zasićenja, predlaže se korišćenje zavisnosti brzine saturacije od temperature [1]:

$$v_s = \frac{v_{s0}}{1 + 0,8 \exp\left(\frac{T}{T'}\right)} \quad (12)$$

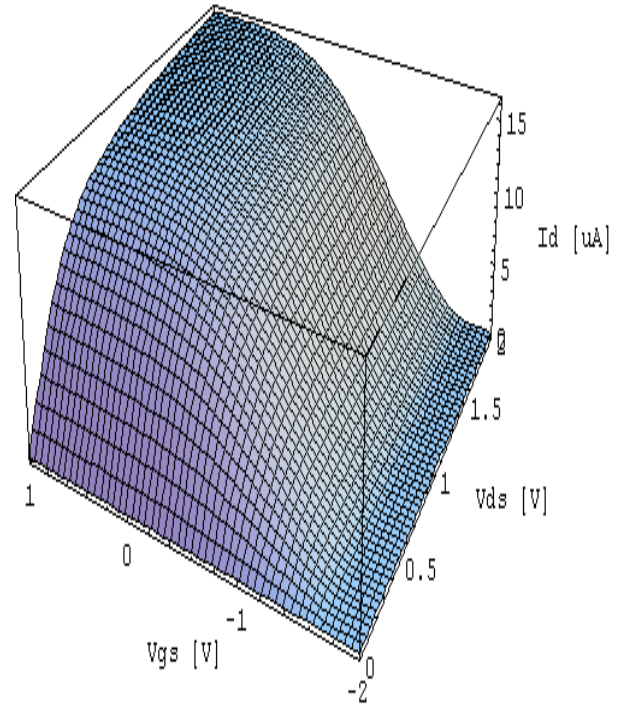
pri čemu je $T' \approx 600K$.

III. REZULTATI I DISKUSIJA

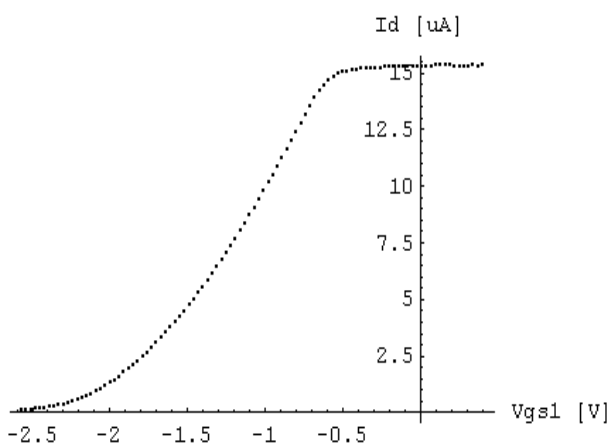
Korišćenjem predloženog modela izvršene su simulacije. Za vrednosti pojedinih parametara uzete su sledeće vrednosti: $\mu_0=0,5m^2/sV$; $V_T=-1,7V$; $W=1\mu m$; $\eta=1,73$; $R_S=600\Omega$; $R_D=600\Omega$; $\alpha=0,5$; $m=2,275$; $\lambda=0,045V^{-1}$; $t_c=0$; $\gamma=4,92$; $V_b=0,8V$; $\zeta=0,12V^{-1}$; $t_e=0,2$; $\delta=10$; $\beta=1,5$.



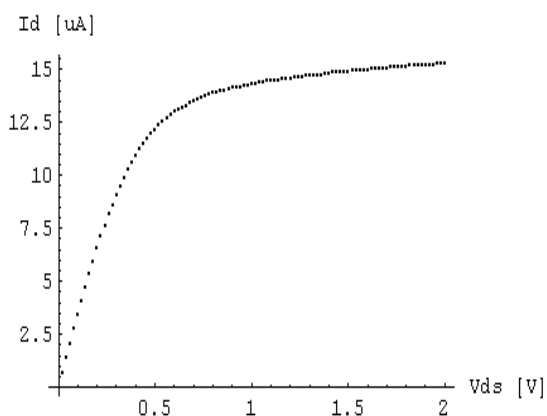
Sl. 3. Zavisnost struje jednogejtovskog tranzistora I_{DS} od napona V_{GS} i temperature T , za $L=3\mu m$ i $V_{DS}=2V$.



Sl. 4. Zavisnost struje jednogejtovskog tranzistora I_{DS} od napona V_{GS} i V_{DS} , za $L=3\mu m$ i $T=300K$.



Sl. 5. Zavisnost struje trogejtovskog tranzistora I_{DS} od napona V_{GS1} , za $L=2 \times 1 \mu\text{m}$; $T=300\text{K}$; $V_{GS2}=-0,6\text{V}$; $V_{GS3}=-1,3\text{V}$; $V_{DS}=2\text{V}$.



Sl. 6. Zavisnost struje trogejtovskog tranzistora I_{DS} od napona V_{DS} , za $L=2 \times 1 \mu\text{m}$; $T=300\text{K}$; $V_{GS1}=0\text{V}$; $V_{GS2}=-0,6\text{V}$; $V_{GS3}=-1,3\text{V}$.

Na slici 3. prikazana je zavisnost struje jednogejtovskog MESFET-a I_{DS} od napona između gejtja i sorsa V_{GS} , temperature T za $L=3 \mu\text{m}$ i $V_{DS}=2\text{V}$. Na slici 4. prikazana je zavisnost struje jednogejtovskog MESFET-a I_{DS} od napona između gejtja i sorsa V_{GS} i napona između drejna i sorsa V_{DS} , za $L=3 \mu\text{m}$ i $T=300\text{K}$. Na slikama 5. i 6. prikazane su strujno – naponska karakteristika trogejtovskog MESFET-a. Simulacije su rađene za konstantnu temperaturu, s obzirom da je model trogejtovskog MESFET-a u suštini isti kao i model dvogejtovskog, tako da se nije očekivala temperaturska zavisnost koja bi se razlikovala od rezultata prikazanih na slikama 3. i 4.

Može se uočiti da temperatura utiče na strujno – naponske karakteristike dominantno kroz uticaj na pokretljivost nosilaca naelektrisanja. Njen uticaj kroz površinsku gustinu nosilaca, koja zavisi od termalnog napona, može biti zanemaren.

Sa povećanjem temperature struja opada, kao i pokretljivost nosilaca. Sa smanjenjem temperature pojavljuje se maksimum u ulaznoj karakteristici.

Karakteristike trogejtovskog MESFET-a se kvalitativno ne razlikuju od karakteristika dvogejtovskog MESFET-a.

Međutim, da bi se naponom na jednom gejtju zatvorio kanal koji je otvoren na strani drugog gejtja, potrebne su vrednosti napona koje su manje od izračunatog napona praga.

IV. ZAKLJUČAK

U radu je prikazan analitički model uticaja temperature na strujno – naponskih karakteristika trogejtovskog MESFET-a. Najveći broj parametara u predloženom modelu ima svoju fizičku interpretaciju. Model je, uz neznatne izmene, primenljiv i na višegejtovske MESFET-ove, kao i na MESFET-ove sa različito električno spregnutim gejtovima. Prikazani model je relativno jednostavan. Rezultati dobijeni korišćenjem ovog modela su saglasni sa poznatim i do sada objavljenim.

LITERATURA

- [1] R. Ramović, R. Šašić, *Analiza i modelovanje unipolarnih tranzistora malih dimenzija*. DINEX, Beograd, 1999.
- [2] R. Ramović, P. Lukić, "Surface Density Analytical Model of Two-Dimensional Electron Gas in HEMT Structures", *Materials Science Forum*, vol. 453-454., pp. 27.-32., May 2004.
- [3] J. Q. Lu, M. Hurt, W. C. B. Peatman, M. S. Shur, "Heterodimensional field effect transistors for ultra low power applications", *Proc. IEEE GaAs IC Symp.*, Atlanta, GA, pp. 187.-190., 1998.
- [4] H. Wong, D. Frank, P. Solomon, "Device design considerations for double-gate, ground-plane and single-gated ultrathin SOI MOSFETs at the 25nm gate length generation", *Proc. IEDM 98*, pp. 407.-410., San Francisco, CA, December 1998.
- [5] P. M. Lukić, R. M. Ramović, R. M. Šašić, "HEMT Carrier Mobility Analytical Model", *Materials Science Forum*, vol. 494, pp. 43.-48., 2005., (<http://www.scientific.net>)
- [6] 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.
- [7] Petar M. Lukić, *Novi analitički modeli heterostrukturnih unipolarnih tranzistora*. Doktorska disertacija, Elektrotehnički fakultet Univerziteta u Beogradu, 2005.
- [8] 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.
- [9] Petar M. Lukić, Rifat M. Ramović, Rajko M. Šašić, "Analitički model strujno-naponskih karakteristika MESFETa sa tri gejtja u širokom temperaturskom opsegu", *Zbornik radova XLIV konferencije ETRAN*, jun 2005, str. 141. – 144.

ABSTRACT

In this paper current – voltage temperature dependence analytical model of the three – gate MESFET is presented. Proposed model is applicable to different gate configurations that are electrically tied together, or that are biased independently. The model is relatively simple and gives results which are in good agreement with already known ones.

ANALYTICAL MODEL OF TEMPERATURE IMPACT ON THREE – GATE MESFET CURRENT – VOLTAGE CHARACTERISTICS

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