

ANALITIČKI MODEL STRUJNO-NAPONSKIH KARAKTERISTIKA MESFET-a SA TRI GEJTA U ŠIROKOM TEMPERATURSKOM OPSEGU

Petar M. Lukić, *Mašinski fakultet Univerziteta u Beogradu*
Rifat M. Ramović, *Elektrotehnički fakultet Univerziteta u Beogradu*
Rajko M. Šašić, *Tehnološko-metalurški fakultet Univerziteta u Beogradu*

Sadržaj – U radu je prikazan analitički model strujno-naponskih karakteristika MESFET-a sa tri gejta. Model je zasnovan na opisu prirode pojava koje se dešavaju u ovoj napravi, uz uzimanje u obzir geometrijske zavisnosti pojedinih parametara, kao i uticaja temperature. Model se može primeniti na MESFET-ove sa različitim konfiguracijama sprežanja gejtova u električnom pogledu, koji mogu biti spojeni ili nezavisno polarisani različitim naponima. Uz male modifikacije, model se može koristiti za MESFET-ove sa različitim brojem gejtova. Prikazani model je relativno jednostavan, a daje rezultate koji se dobro slažu sa do sada poznatim.

1. UVOD

Osnovni cilj u razvoju monolitnih integrisanih kola bio je i ostao smanjenje dimenzija naprava i smanjenje snage disipacije po elementu, uz popravku ili bar očuvanje željenih električnih karakteristika [1]. Standardne silicijumske poluprovodničke komponente, zbog ograničenja koja potiču od fizičkih osobina silicijumskog materijala, ne mogu da odgovore na sve složenije zahteve. Istraživanja u oblasti mikroelektronike, odnosno danas već nanoelektronike, usmerena su ka traženju novih 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.) [2, 3].

Heterodimenzionalni tranzistori predstavljaju klasu novih mikroelektronskih komponenti. Njihov rad se bazira na heterodimenzionalnoj sprezi između trodimenzionalnog (3-D) metalnog kontakta i dvodimenzionog elektronskog gasa (2DEG). Ove naprave se razvijaju sa ciljem da obezbede znatno veće brzine rada i manju potrošnju [4] u odnosu na starije, standardno korišćene poluprovodničke strukture.

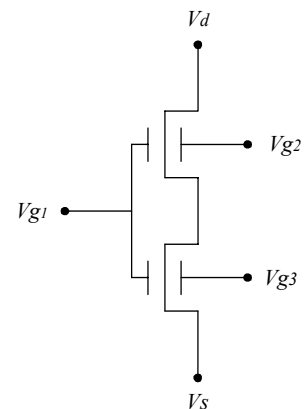
Među heterodimenzionalne naprave koje najviše obećavaju spada višedimenzionalni MESFET. Proučavaju se mogućnosti primene ovih tranzistora u digitalnoj elektronici i optoelektronici. Očekuje se korišćenje ovih komponenti u logičkim kolima, čime bi se povećala logička funkcionalnost.

Višedimenzionalni MESFET, za razliku od običnog 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.

U dvogejtovskom MESFET-u, 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. [5], ali uz dodatnu prednost koja se ogleda u velikoj brzini heterodimenzionalnih Šotkijevih kontakata koji su ostvareni preko gejtova. Napravljeni su dvogejtovski i trogejtovski MESFET-ovi sa odličnim električnim karakteristikama [6].

Model koji se koristio za opisivanje rada 2-D MESFET-a bio je sličan modelu koji se koristio za HFET. Jedinstven analitički izraz koji čini taj model, primenljiv je na sve režime rada tranzistora. Međutim, model nije uključivao geometrijsku zavisnost pojedinih parametara, tako da su se javljala neslaganja sa eksperimentalno dobijenim rezultatima.

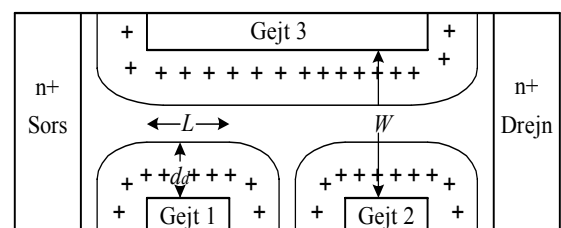


Sl. 1. Ekvivalentna električna šema trogejtovskog MESFET-a

U ovom radu je predstavljen model strujno – naponskih karakteristika MESFET-a sa tri gejta koji bolje od do sada postojećih opisuje prirodu pojava koje se odigravaju u tranzistoru uz uzimanje u obzir uticaja temperature, i koji u sebi sadrži geometrijsku zavisnost pojedinih parametara.

2. MODEL

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



Sl. 2. Presek MESFET-a sa tri gejta

Rastojanje između gejtova predstavlja najveću moguću širinu kanala. Neka je ono 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 gejtu, a na osnovu izraza za podužnu gustinu naelektrisanja q_c , za napon praga se dobija:

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

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:

$$\Delta V_t = \xi \cdot (V_{GS1} - V_{GS3})^2. \quad (2)$$

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

Model strujno – naponskih karakteristika oslanja se na model zavisnosti brzine nosilaca naelektrisanja v od intenziteta električnog polja K . Najjednostavniji opis ove dve veličine vezuje linearnom relacijom ($v = \mu K$), sve dok intenzitet električnog polja ima vrednost manju od kritične K_c , pri čemu je μ pokretljivost nosilaca [1]. Koristeći ovakvu postavku, struja tranzistora u linearnom režimu se može opisati jednakošću:

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

U izrazu (3) K 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:

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

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

$$g_{ci} = \frac{q_e \cdot n' \cdot \mu}{L}. \quad (6)$$

U izrazu (6) n' je podužna gustina nosilaca u kanalu:

$$n' = \frac{n_l}{\left(1 + \left(\frac{n_l}{n_{max}}\right)^\gamma\right)^{1/\gamma}}. \quad (7)$$

U jednačini (7) n_{max} je maksimalna podužna gustina nosilaca ($n_{max} = n_s W$), γ je parametar za podešavanje, a n_l je definisano izrazom:

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

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

Struja tranzistora u režimu zasićenja je:

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

U prethodnoj jednakosti ζ je transkonduktanski faktor ekspanzije, tc je transkonduktanski faktor kompresije, $V_L = K_c L$, 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, u prethodno prikazan model (u jednakost (3) i dalje) uvodi se zavisnost pokretljivosti nosilaca od temperature (npr. [1], [7]):

$$\mu = \mu_0 \cdot \left(\frac{T}{T_0} \right)^{-\beta} \quad (13)$$

pri čemu je μ_0 pokretljivost nosilaca na sobnoj temperaturi T_0 , a β je parametar čija je vrednost između 1,5 i 2.

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

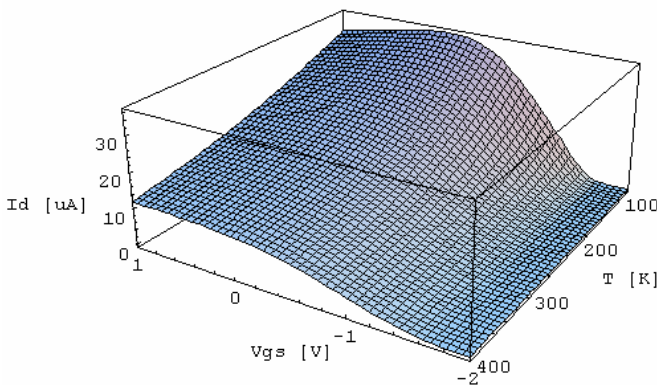
$$v_s = \frac{v_{s0}}{1 + 0,8 \exp\left(\frac{T}{T'}\right)} \quad (14)$$

pri čemu je $T' = 600\text{K}$.

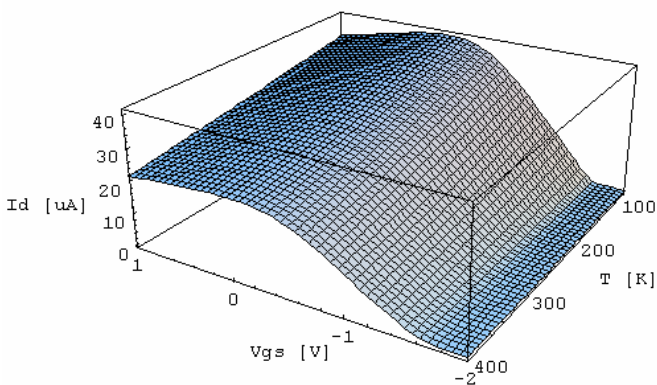
Zavisnost termalnog napona od temperature je očigledna.

3. REZULTATI I DISKUSIJA

Na osnovu prikazanog modela, izvršene su simulacije. Korišćene sledeće vrednosti: $\mu_0 = 0,5\text{m}^2/\text{sV}$; $V_i = -1,7\text{V}$; $W = 1\mu\text{m}$; $\eta = 1,73$; $R_s = 600\Omega$; $R_D = 600\Omega$; $\alpha = 0,5$; $m = 2,275$; $\lambda = 0,045\text{V}^{-1}$; $t_c = 0$; $\gamma = 4,92$; $V_b = 0,8\text{V}$; $\xi = 0,12\text{V}^{-1}$; $\zeta = 0,2$; $\delta = 10$; $\beta = 1,5$.

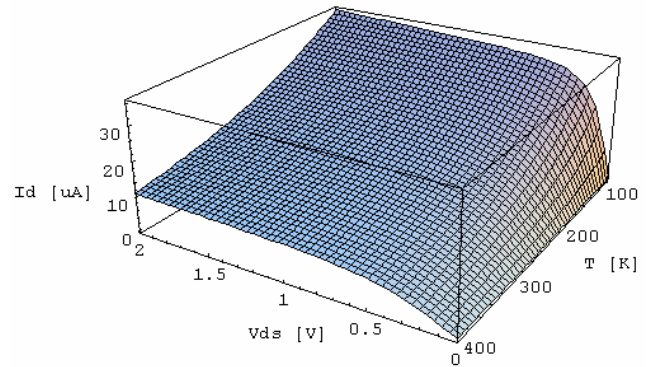


Sl. 3. Zavisnost struje jednogejtovskog tranzistora I_{DS} od napona V_{GS} i temperature T , za $L=3\mu\text{m}$ i $V_{DS}=2\text{V}$

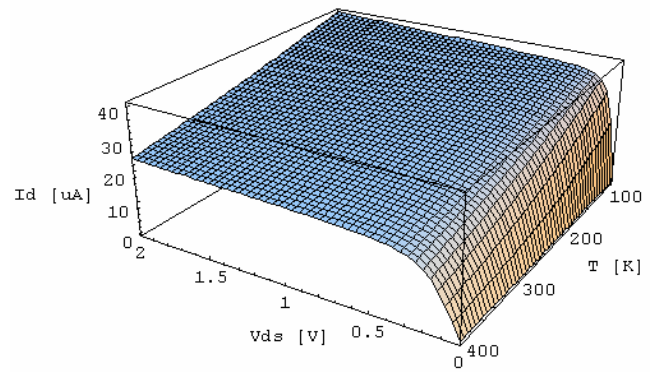


Sl. 4. Zavisnost struje jednogejtovskog tranzistora I_{DS} od napona V_{GS} i temperature T , za $L=0,5\mu\text{m}$ i $V_{DS}=2\text{V}$

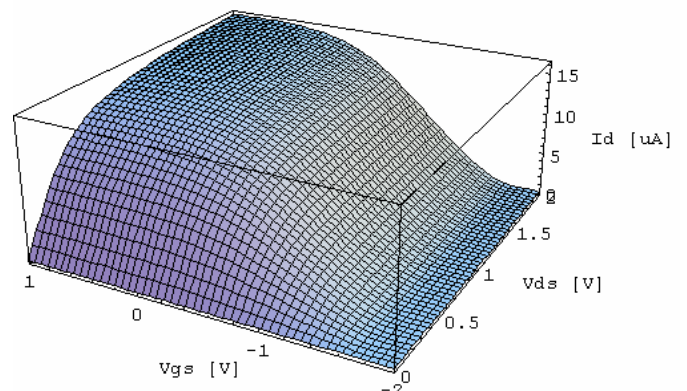
Na slikama 3. - 7. prikazane su zavisnosti struje jednogejtovskog MESFET-a I_{DS} od napona između gejta i sorsa V_{GS} , temperature T i drejna i sorsa V_{DS} , pri čemu su dve od tri poslednje veličine bile nezavisno promenljive dok je treća uzimana kao parametar. Simulacije su rađene za različite dužine kanala L .



Sl. 5. Zavisnost struje jednogejtovskog tranzistora I_{DS} od napona V_{GS} i temperature T , za $L=3\mu\text{m}$ i $V_{DS}=0\text{V}$

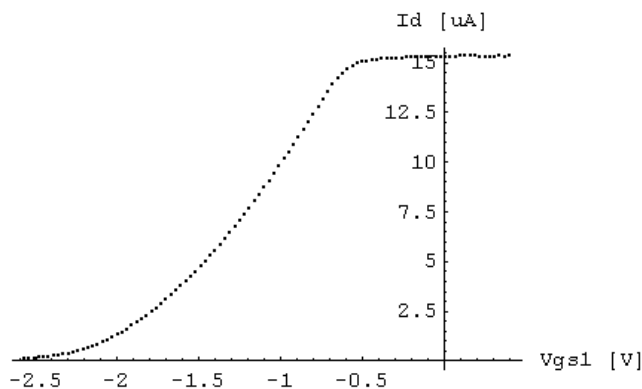


Sl. 6. Zavisnost struje jednogejtovskog tranzistora I_{DS} od napona V_{GS} i temperature T , za $L=0,5\mu\text{m}$ i $V_{DS}=2\text{V}$

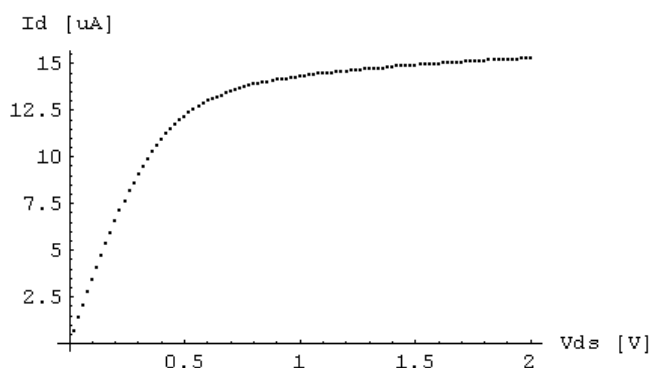


Sl. 7. Zavisnost struje jednogejtovskog tranzistora I_{DS} od napona V_{GS} i V_{DS} , za $L=3\mu\text{m}$ i $T=300\text{K}$

Na slikama 8. i 9. prikazane su strujno – naponske karakteristike trogejtovskog MESFET-a. Simulacije su rađene za konstantne temperature, 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 na bilo koji način razlikovala od rezultata prikazanih na slikama 3. – 7.



Sl. 8. 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. 9. Zavisnost struje trogejtovskog tranzistora I_{DS} od napona V_{DS} , za $L=2 \times 1 \mu\text{m}$; $T=300\text{K}$; $V_{GS1}=0\text{V}$; $V_{GS2}=-0,6\text{V}$; $V_{GS3}=-1,3\text{V}$;

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 gejta, potrebne su vrednosti napona koje su manje od izračunatog napona praga.

4. ZAKLJUČAK

U radu je prikazan analitički model strujno – naponskih karakteristika trogejtovskog MESFET-a u kome najveći broj upotrebljenih parametara ima svoju fizičku interpretaciju. Predloženi model uključuje temperaturnu zavisnost. Primenljiv je na višegejtvske MESFET-ove, kao i na MESFET-ove sa različito električno spregnutim gejtovima. Prikazani model obuhvata sve režime rada tranzistora. Relativno je 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] Petar M. Lukić: "Aproksimacioni model kvantnih efekata u HEMT strukturama", Vinča Institut nuklearnih nauka Bilten, vol. 8, No 1.-4. (1.-104.), str. 70.-76., Decembar 2003.

[3] 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.

[4] 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.

[5] 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.

[6] J. Robertson, T. Ytterdal, W. C. B. Peatman, R. Tsai, E. Brown, M. S. Shur: "RTD/2-D MESFET/RTD logic elements for compact, ultra-low-power electronics", IEEE Trans. Electron Devices, vol. 44, pp. 1033.-1039., July 1997.

[7] 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>)

Abstract – In this paper current - voltage analytical model of the three – gate MESFET is presented. Exposed model is based on the physics of the device. Transistor's parameters dependences on geometry of the device are taken into account, as well as temperature influence. 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 THREE – GATE MESFET CURRENT – VOLTAGE CHARACTERISTICS IN BROAD TEMPERATURE RANGE

Petar M. Lukić, Rifat M. Ramović, Rajko M. Šašić