

3D SIMULACIJA SPLIT-DREJN MAGFET-a

Elva Jovanović, Danijela Pantić, Biljana Pešić, Dragan Pantić, *Elektronski fakultet u Nišu.*

Sadržaj – U ovom radu je prikazan postupak 3D simulacije tehnološkog niza za proizvodnju i električnih karakteristika split-drejn MAGFET-a korišćenjem ISE TCAD softverskog sistema. Konzistentan 3D profil MAGFET strukture u standardnoj 10 μ m CMOS tehnologiji generisan je metodom interpolacije, uz pomoć šest 2D profila primesa dobijenih procesnom simulacijom u karakterističnim presecima strukture. Kao rezultat 3D električne simulacije MAGFET-a, dobijene su 3D raspodele potencijala, električnog polja, gustine struja, pokretljivosti u prisustvu magnetnog polja, kao i njegove I/V karakteristike. Rezultati su upoređeni sa eksperimentalno određenim vrednostima i dobijeno je veoma dobro slaganje.

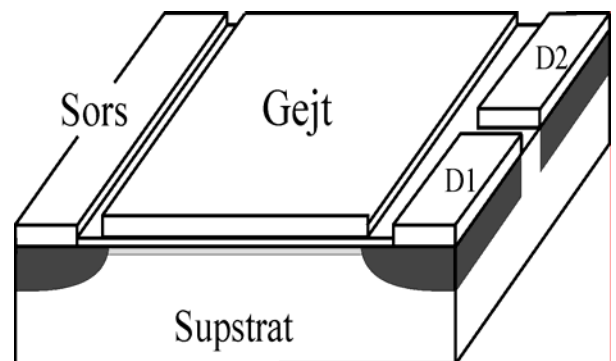
1. UVOD

Efekat skretanja struje u inverznom sloju MOS tranzistora u prisustvu magnetnog polja je predmet istraživanja već više od 40 godina [1-4]. Dobro je poznato da se prisustvo magnetnog polja može detektovati merenjem Holovog napona ili skretanja nosilaca u inverznom sloju MOS tranzistora. Za razliku od većine magnetnih senzora, koji rade u Holovom naponskom režimu, split-drejn MAGFET je magnetni senzor čiji je princip rada zasnovan na efektu skretanja struje, tj. radi u Holovom strujnom režimu. S obzirom da je još ranije pokazano da je osetljivost MAGFET-a ograničena 1/f šumom MOS tranzistora [5,6], ova komponenta je pogodna za detekciju slabih magnetnih polja (nekoliko mT na sobnoj temperaturi), tako da se najčešće primenjuje za merenje struje, očitavanje magnetnih memorija, kao beskontaktni prekidač, itd. Ono što je kod ovih komponenata bitno je i činjenica da se proizvode korišćenjem standardnih CMOS tehnologija, što pruža mogućnost njihove integracije na istom čipu sa ostalim komponentama, čime je oblast njihove primene značajno proširena.

Kada se struktura prikazana na slici 1 koristi kao senzor magnetnog polja, inverzni sloj MOS tranzistora preuzima ulogu klasične Holove pločice u kojoj pod dejstvom Lorentz-ove sile dolazi do prostorne preraspodele gustine struje. Naime, pored longitudinalne komponente struje koja teče od sorsa ka drejnu, pod dejstvom Lorentz-ove sile javiće se i transversalna struja. U zavisnosti od dizajna strukture MAGFET može meriti Holov napon, ili razliku između dve struje podeljenog drejna ("split-drain"), kao u slučaju strukture prikazane na slici 1, koja je predmet analize i 3D simulacije u ovom radu.

Poseban problem kod simulacije tehnološkog niza za proizvodnju magnetnih senzora, a posebno kod simulacije njihovih električnih karakteristika, predstavlja činjenica da je zbog njihove geometrije neophodna 3D simulacija. Ovo ne važi samo za vertikalne Holove strukture. Pored toga, dobijeni rezultati simulacije u značajnoj meri zavise od

izabranog domena simulacije i gustine diskretizacione mreže, koja mora biti pažljivo izabrana i definisana, korišćenjem odgovarajućih kriterijuma, kako bi simulirane izlazne karakteristike komponente bile oslobođene visokog numeričkog ofseta, a da se pri tome vodi računa i o potrebnom CPU vremenu simulacije i računarskim resursima. U ovom radu je, najpre, korišćenjem ISE TCAD softverskog paketa simuliran kompletan tehnološki niz za proizvodnju MAGFET-a u odgovarajućim, karakterističnim 2D presecima 3D simulacionog domena. Zatim je generisan konzistentan 3D profil primesa i adaptivna diskretizaciona mreža u definisanom domenu simulacije i simulirane su električne karakteristike MAGFET-a korišćenjem 3D simulatora DESSIS. Na osnovu dobijenih rezultata 3D električne simulacije analizirane su raspodele važnih fizičkih parametara sa tenzorskim osobinama, čime se pruža mogućnost projektantu da razume mehanizme, uoči najvažnije efekte i optimizuje geometriju komponente sa ciljem da dobije dobre električne osobine, pre svega što bolju osetljivosti, sa stanovišta njene vrednosti i linearnosti. Konačno, dobijeni rezultati simulacije su upoređeni sa eksperimentalnim rezultatima, i pri tome je dobijeno veoma dobro slaganje.



Sl.1. Šematski prikaz strukture split-drain MAGFET-a.

2. MOS TRANZISTOR SA DVOSTRUKIM DREJNOM

MOS tranzistor sa podeljenim drejnom je komponenta čija struktura u potpunosti odgovara strukturi MOSFET-a, osim u činjenici da je oblast drejna podeljena na dva međusobno identična dela. U odsustvu magnetnog polja struja drejna se ravnomerno raspodeljuje između dva kontakta drejna, tako da je: $I_{D1}(B=0)=I_{D2}(B=0)=I_D/2$. U prisustvu magnetnog polja, pod dejstvom Lorentz-ove sile, usled efekta skretanja struje jedna od struja $I_{D1}(B)$ će porasti na račun druge $I_{D2}(B)$, u zavisnosti od smera vektora magnetne indukcije.

Odstupanje pravca vektora gustine struje \mathbf{J} od pravca spoljašnjeg električnog polja \mathbf{E} , koje je definisano Holovim uglom Θ_H , proporcionalno je intenzitetu vektora magnetne indukcije \mathbf{B} . Prema tome, razlika struja na kontaktima drejna

ΔI_D će biti proporcionalna intenzitetu vektora magnetne indukcije \mathbf{B} , što znači da se njenim merenjem može utvrditi kvantitativna vrednost magnetnog polja. Najznačajniji parametar koji daje korelaciju između ΔI_D i \mathbf{B} je relativna osetljivost split-drejn MAGFET-a S_r , definisana je kao [7]:

$$S_r = \frac{|I_{D1} - I_{D2}|}{B(I_{D1} + I_{D2})} = \frac{\Delta I_D}{B I_D} \quad (1)$$

Split-drain MAGFET (šematski prikaz strukture je dat na slici 1) čije su električne karakteristike simulirane u ovom radu, proizveden je u standardnoj 10 μm CMOS tehnologiji i ima kanal dužine $L=125\mu\text{m}$ i širine $W=100\mu\text{m}$. Debljina oksida gejta iznosi $t_{OX}=60\text{nm}$, dok je koncentracija akceptorskih primesa u oblasti kanala 10^{15}cm^{-3} . Razlog za relativno nisku vrednost nivoa dopiranja u aktivnoj oblasti komponente je težnja da se dobije što veća vrednost Holove pokretljivosti u inverznom sloju, s obzirom da relativna osetljivost magnetnog senzora linearno raste sa porastom pokretljivosti. S obzirom na tako nisku vrednost dopiranja supstrata razumljivo je što je umesto polisilicijumskog korišćen metalni gejt. Dubine pn-spojeva oblasti sorsa i drejna su $1\mu\text{m}$, a nivo dopiranja u njima je $5 \cdot 10^{18}\text{cm}^{-3}$. Širine kontakata oblasti drejna su identične i iznose $45\mu\text{m}$, pri čemu je rastojanje između njih $10\mu\text{m}$. Ovakva struktura je napravljena i izmerene su njene električne karakteristike u prisustvu magnetnog polja, tako da je to bio jedan od osnovnih razloga što smo simulirali ovu strukturu, jer smo naše rezultate simulacije mogli da uporedimo sa eksperimentalnim rezultatima [7].

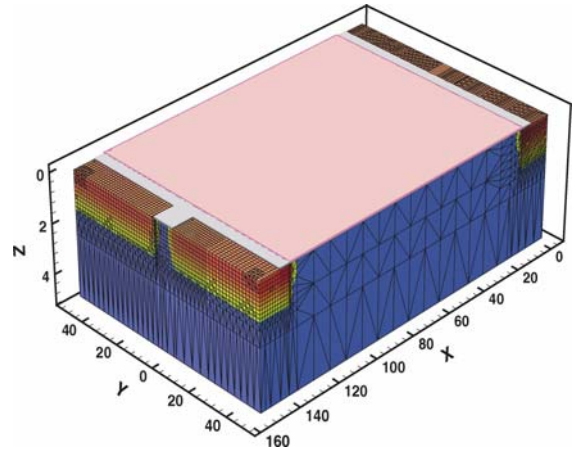
Geometrija predstavljene strukture MAGFET-a sa dva drejna je u svemu prilagodjena težnji da se ostvari što veća vrednost relativne osetljivosti. Naravno, treba ponovo napomenuti da je osetljivost MAGFET-ova daleko manja od vrednosti osetljivosti standardnih Holovih senzora, ali se oni i pored toga primenjuju zbog drugih pogodnosti o kojima smo već nešto govorili. Naime, prema [8] skretanje struje je proporcionalno dužini kanala L , pokretljivosti elektrona μ_n , i intenzitetu magnetne indukcije $|\mathbf{B}|$. S obzirom da bi povećanjem napona na gejt i drejnu MAGFET-a dobili samo veće vrednosti struja, ali ne i njihovu veću razliku, potpuno je jasno da se osetljivost MAGFET-a može povećati samo povećanjem gore spomenutih parametara. Prema tome, dužina kanala mora biti dovoljno velika da omogući veće skretanje, a samim tim i veću razliku struja, a pri tome se mora povećati pokretljivost nosilaca u inverznom sloju. U oba navedena slučaja vrednost osetljivosti raste, čime se omogućava detekcija slabijih magnetnih polja. Pogodnost predstavlja i činjenica da CMOS kola mogu da rade na kriogenim temperaturama (4.2K-77K) kada pokretljivost elektrona u inverznom sloju raste, a u ovom slučaju se drastično redukuje i $1/f$ šum, pa je moguće detektovati magnetna polja reda μT [9,10].

3. SIMULACIJA TEHNOLOŠKOG NIZA

Struktura split-drejn MAGFET-a koja je prikazana na slici 1, zahteva 3D domen simulacije, kako bi simulacija električnih karakteristika uopšte imala smisla. Imajući u vidu činjenicu da praktično još uvek ne postoji pravi komercijalni 3D procesni simulator, kao i brojne probleme koje realna 3D

simulacija kompletnog tehnološkog niza za proizvodnju nosi sa sobom (CPU vreme, značajni računarski resursi, itd.), u ovom radu je konzistentan 3D profil primesa generisan uz pomoć većeg broja simulacija u karakterističnim 2D presecima strukture MAGFET-a. Ovakav pristup garantuje daleko bolju korelaciju sa konkretnom tehnologijom i realnim profilom, negu u slučaju kada se 3D profil primesa generiše uz pomoć analitičkih funkcija i odgovarajućih transformacija kao u [7].

3D profil primesa u domenu simulacije MAGFET-a, koji je prikazan na slici 2, dobijen je interpolacijom vrednosti dopiranja u svakoj tački adaptivne diskretizacione mreže, pri čemu su za granične uslove inkorporacionih oblasti uzimaju poznate vrednosti koje su dobijene 2D simulacijom procesa. Za potpuno opisivanje strukture split-drejn MAGFET-a potrebno je minimalno šest 2D simulacija u 3 karakteristične uzdužne i 3 poprečne ravni strukture. Za 2D simulaciju tehnološkog niza u pomenutim ravnima korišćen je program DIOS, dok je program DIP koji je sastavni deo ISE TCAD sistema [11] iskorišćen za konstrukciju konzistentnog 3D profila primesa i adaptivne diskretizacione mreže, koja je takođe prikazana na slici 2.



Sli.2. 3D profil primesa i adaptivna diskretizaciona mreža u domenu simulacije MAGFET-a.

4. SIMULACIJA ELEKTRIČNIH KARAKTERISTIKA

Za simulaciju električnih karakteristika split-drejn MAGFET-a iskorišćen je program DESSIS [11] namenjenim za 2D i 3D simulaciju električnih, termičkih i optičkih karakteristika poluprovodničkih komponenata. Pored činjenice da su u ovaj program ugrađeni savremeni i precizni modeli transporta, generacije i rekombinacije nosilaca naelektrisanja, ovaj program ima jednu veliku prednost nad većinom simulatora električnih karakteristika, s obzirom da su u njega implementirani modeli za simulaciju uticaja magnetnog polja na električne karakteristike poluprovodničkih komponenata, tako da jednačina za gustinu struje elektrona ima oblik:

$$\vec{J}_n = -\sigma_n \nabla \phi_n - \sigma_n \frac{1}{1 + (\mu_n^* B)^2} [\mu_n^* \vec{B} \times \nabla \phi_n + \mu_n^* \vec{B} \times (\mu_n^* \vec{B} \times \nabla \phi_n)] \quad (3)$$

gde je σ_n električna provodnost elektrona, ϕ_n kvazi-Fermijev potencijal elektrona, μ_n^* Holova pokretljivost koja je sa driftovskom pokretljivošću elektrona povezana kao $\mu_n^* = r_n \mu_n$ pri čemu je r_n Holov faktor rasejavanja, i \mathbf{B} je vektor magnetne indukcije.

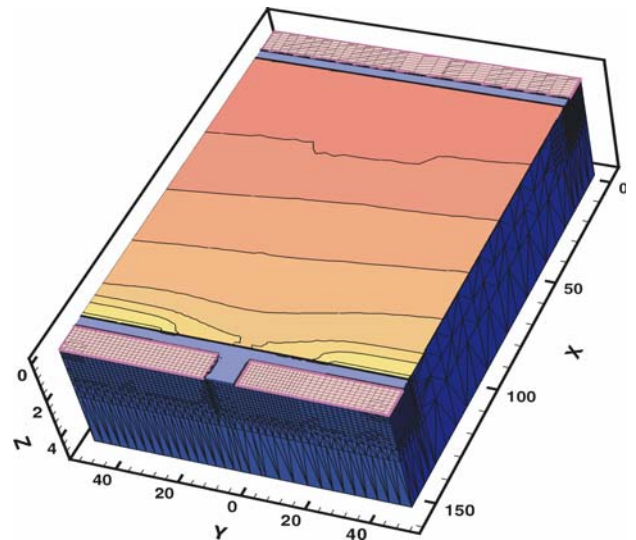
Za simulaciju transporta nosilaca naelektrisanja korišćen je drift-difuzioni model, pri čemu model pokretljivosti uključuje zavisnost od nivoa dopiranja, rasejavanja na nosiocima, kao i efekata zasićenja driftovske brzine pri visokim vrednostima električnog polja. Rekombinacioni procesi nosilaca uključeni su SRH i Auger-ovim modelom. Ovdje je važno napomenuti da je jedini parametar koji je korišćen u simulaciji za uklapanje sa eksperimentalnim rezultatima, a koji odstupa od uobičajenih usvojenih vrednosti u literaturi i simulatorima Holov faktor rasejavanja r_n , pri čemu se uzima da je njegova vrednost 0.34.

Pobudni naponi na drejnu i gejtu MAGFET-a simulirani su naponskim generatorima, pri čemu su izvršene simulacije u opsegu napona: $0 < V_G < 5V$ i $0 < V_D < 1V$. Ukupno jedanaest vrednosti magnetne indukcije za koje su simulirane električne karakteristike MAGFET-a kreću se u opsegu: $0.01 < B < 1T$. Treba napomenuti da je za sve simulacije uvek korišćena identična vrednost pobudnog napona na oba kontakta drejna. Vrednosti napona na drejnu su ograničene do 1V, s obzirom da pri većim naponima na drejnu dolazi do modulacije inverznog sloja, a takodje se povećava i longitudinalno električno polje. Oba ova efekta utiču da skretanje nosilaca bude manje izraženo, tako da je manja razlika struja I_{D1} i I_{D2} , a samim tim je manja i relativna osetljivost MAGFET-a. Sa povećanjem vrednosti napona na gejtu, razlika struja se povećava, ali u isto vreme se povećavaju i struje što dovodi do smanjenja relativne osetljivosti.

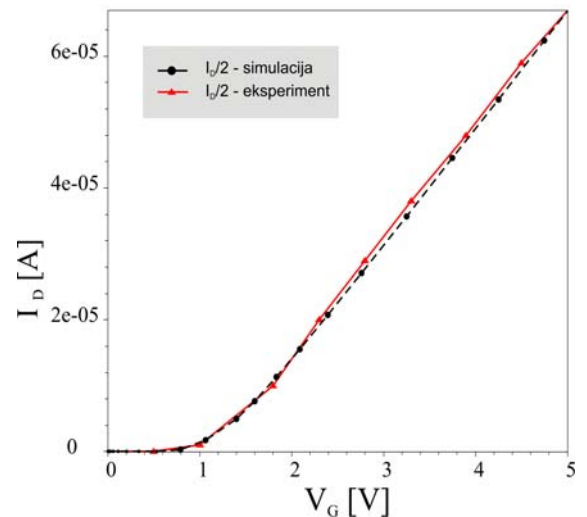
Na slici 3 prikazana je 3D raspodela električnog polja za $V_G=5V$, $V_D=1V$ i $B=-1T$. Jasno se može uočiti prisutna asimetrija koja je posledica skretanja nosilaca usled dejstva Lorentz-ove sile. Bez obzira na strujni režim rada ovog senzora na njegovim spoljnim, izolacionim granicama javlja se Holov napon. Iako je njegova vrednost mala on značajno utiče na raspodelu strujnica u inverznom sloju, pa je zbog toga veoma važno da diskretizaciona mreža na izolacionim granicama strukture bude dovoljno gusta, kako bi se ovaj efekat korektno simulirao.

5. POREĐENJE SA EKSPERIMENTOM

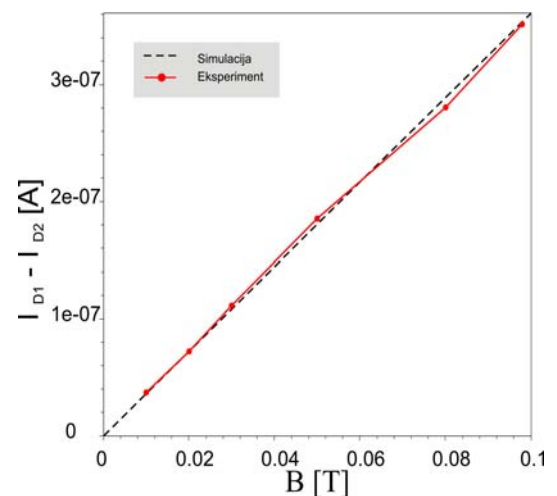
Dobijene simulirane vrednosti I/V karakteristika MAGFET-a su upoređene sa eksperimentalnim vrednostima [7]. Na slici 4 su upoređene simulirana i eksperimentalna prenosna karakteristika u odsustvu magnetnog polja za $V_D=1V$ i $V_S=V_{SUB}=0V$. Dobijeno je odlično slaganje kao posledica dobrog slaganja 3D profila sa realnom strukturom. U slučaju kada je $B=0$, obe struje drejna su identične i poklapaju se sa eksperimentalno izmerenim vrednostima. Na slici 6 dato je poredjenje simulirane i merene razlike $I_{D1}-I_{D2}$ u zavisnosti od B , u opsegu od 0 do 0.1T. Pored dobrog slaganja očigledna je linearnost ove zavisnosti u celom opsegu.



S1.3. 3D raspodela električnog polja u simulacionom domenu ($V_G=5V$, $V_D=1V$, $B=-1T$)



S1.4. Poredjenje simulirane i eksperimentalne prenosne karakteristike MAGFET-a za $B=0$ i $V_D=1V$.



S1.5. Poredjenje simuliranih i eksperimentalnih vrednosti diferencijalne struje u zavisnosti od magnetne indukcije B ($V_G=5V$, $V_D=1V$).

6. ZAKLJUČAK

U ovom radu prikazan je postupak 3D simulacije kompletnog tehnološkog niza i električnih karakteristika split-drejn MAGFET-a. Simulacije su realizovane korišćenjem ISE TCAD softverskog paketa. Konzistentan 3D profil primesa strukture u standardnoj 10 μ m CMOS tehnologiji generisan je metodom interpolacije na osnovu šest 2D profila primesa. Električnom simulacijom ovog senzora dobijene su 3D raspodele važnih fizičkih veličina u prisustvu magnetnog polja. Upoređivanjem rezultata simulacije električnih karakteristika sa eksperimentalno dobijenim vrednostima uočeno je odlično slaganje.

LITERATURA

- [1] A. C. Beer, "The Hall effect and related phenomena", *Solid State Electronics*, 9(5), pp. 339-351, May 1966.
- [2] R. C. Gallagher, W. S. Corak, "A metal-oxide-semiconductor (MOS) Hall element", *Solid State Electronics*, 9(5), pp. 571-580, May 1966.
- [3] Henry P. Baltes and Radivoje S. Popovic, "Integrated semiconductor magnetic field sensors", *Proceedings of the IEEE*, 74(8), pp. 1107-1132, August 1986.
- [4] S. M. Sze, *Semiconductor sensors*, Wiley, 1994
- [5] A. Nathan, A. Huzser, H. Baltes, "Two-dimensional numerical modeling of magnetic-field sensors in CMOS technology", *IEEE Trans. Electron Devices*, ED-32(8), pp. 1212-1219, August 1985.
- [6] J. Lau, P. K. Ko, P. Chan, "Modeling of split-drain magnetic field-effect transistor (MAGFET)", *Sensors and Actuators A*, 49(8), pp. 155-162, August 1995.
- [7] R. Rodrigues - Tores, E.A. Gutierrez - Domingues, R. Klima, and S. Selberherr, "Analysis of Split-Drain MAGFETs", *IEEE Transactions on Electron Devices*, 51(12), pp. 2237-2245, December 2004.
- [8] R. Rodrigues-Tores, E.A. Gutierrez-D., R. Klima, and S. Selberherr, "Three dimensional analysis of a MAGFET at 300K and 77K", *Proc. ESSDERC 2005*, G. Baccarani, E. Ganani, M. Rudan, Eds., pp. 151-154, September 2002.
- [9] E.A. Gutierrez-D., R. S. Murphy-A., A. Tores-J., M. Linares-A, P. J. Garsia-R, R. Rojas-H., V. Paez, "A sub-mT cryogenic silicon magnetic sensor", *Proc. ESSDERC 1998*, A. Touboul, Y. Danto, J. Klein, H. Grunbacherr, Eds., pp. 188-191, September 1998.
- [10] A. Chovet, Ch. S. Roumenin, G. Dimopoulos, and N. Mathieu, "Comparison of noise properties of different magnetic-field semiconductor integrated sensors", *Sensors and Actuators A*, A22(1-3), pp. 790-794, March 1990.
- [11] ISE TCAD – Users Manual, Release 7.0, Integrated System Engineering AG, Zurich, Switzerland.

Abstract - Complete technology process flow and electrical characteristic of split-drain MAGFET have been accurately simulated in 3D using ISE TCAD system. Several significant 2D profiles were simulated and incorporated in 3D structure in order to acquire consistent 3D doping profile. Incorporation was in accordance to certain rules, which determine the position and orientation of the simulated plane as well as interpolation conditions. Electrical simulations conducted with and without the presence of magnetic field gave an insight into 3D distribution of most important quantities. Comparison of simulated and measured results exhibits very good agreement.

3D SIMULATION OF SPLIT – DRAIN MAGFETs

Elva Jovanović, Danijela Pantić,
Biljana Pešić, Dragan Pantić