

1.5 TRANZISTOR SA EFEKTOM POLJA SA IZOLOVANIM GEJTMOM - IGFET

Za razliku od JFET-a kod koga je gejtm bio spregnut sa kanalom preko p-n spoja, druga kategorija tranzistora sa efektom polja ima izolovani gejtm. Pri tome se kao izolacija koristi oksid silicijuma (SiO_2). Otuda i naziv IGFET (*Insulated Gate Field Effect Transistor*). Lako je zaključiti da je struja gejtva ovakve komponente još manja nego kod JFET-a što predstavlja veliku prednost ove kategorije tranzistora. S obzirom da može da se napravi IGFET vrlo malih dimenzija i s obzirom da se ovakve komponente lako izoluju u integrisanim kolima oni se sve masovnije proizvode. Veoma masovno se nalaze kao elementi digitalnih integrisanih kola ali i kao elementi nekih analognih kola. U novije vreme sreću se kao diskretne komponente snage.

Kod ovih tranzistora gejtm je najpre bio izrađivan od metala (aluminijuma) tako da nastaje sendvič: metal-oksid-poluprovodnik. Tako je nastalo i alternativno ime ovih komponenata MOS što dolazi od Metal-Oxide-Semiconductor. U novije vreme za izradu gejtva koristi se jako dopiran polisilicijum ili jedinjenja silicijuma (silicidi). Naziv MOS tranzistor ostao je nezavisno od napretka tehnologije.

1.5.1 MOS struktura

MOS tranzistor, za razliku od bipolarnog i JFET-a, izrađuju se na površini silicijumskog kristala i njegov rad zavisi od prisustva granice između poluprovodnika i izolatora. Stoga će, u ovom odeljku, biti, najpre, razmotrene električne osobine površine poluprovodnika. To će omogućiti sticanje osnovnih saznanja za razumevanje rada i generisanje modela za MOSFET-a.

Za P-kanalni MOSFET poluprovodnički materijal osnove je silicijum N-tipa, a izolator na površini je silicijum dioksid (SiO_2). Ovakva struktura prikazana je na Sl. 1.5.1a. Pri tome, smatra se da je podloga N-tipa vezana za referentni potencijal (obično se kaže: najniži potencijal u kolu). Prema tome, za asada, svi naponi mere se u odnosu na potencijal podloge.

Duboko u osnovi slobodni nosioci naelektrisanja su elektroni. Električni uslovi silicijuma (poluprovodnika) blizu površine opisuju se terminima: nagomilavanje, osiromašenje i inverzija, zavisno da li je gustina prostornog naelektrisanja na površini (sa strane poluprovodnika) veća, manja ili suprotnog znaka od one u osnovi, respektivno. Sl. 1.5.1 ilustruje ove uslove prikazujući energijske opsege (b), raspodelu naelektrisanja (c) i električno polje (d).

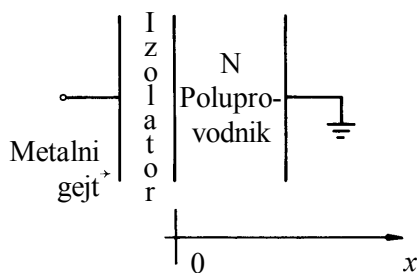
Razmotrimo sada uslove na površini poluprovodnika pojedinačno. Pri nagomilavanju koncentracija u silicijumu N-tipa, u uskoj oblasti blizu površine, istog je znaka kao i duboko u podlozi ali je uvećana. Formirano je pokretno postorno naelektrisanje čiju vrednost po jedinici površine obeležavamo sa Q'_1 (C/cm^2). To znači da će i specifična provodnost površine biti uvećana u odnosu na specifičnu provodnost podloge. Saglasno potrebi da Fermi-jev nivo bude konstantan, energijski opsezi na površini savijaju se na dole što je ekvivalentno pomeranju Fermi-jevog nivoa na više kao posledica povećanja koncentracije glavnih nosilaca. Posledica toga je električno polje koje je (za N-osnovu) usmereno ka površini. Plitka oblast u kojoj se pojavljuje ovo naelektrisanje naziva se oblast nagomilavanja. Ovaj uslov ilustrovan je na Sl. 1.5.6(1).

Nagomilano naelektrisanje na površini poluprovodnika može biti formirano ako se na pogodan način dovede spoljašnje električno polje koje će (za N-osnovu) privući elektrone ka površini. Drugim rečima, potrebno je da se gejtm dovede na pozitivan potencijal u odnosu na osnovu. Površina poluprovodnika, pod ovim uslovima, još uvek je istog tipa provodnosti kao i osnova, a njena provodnost je veća.

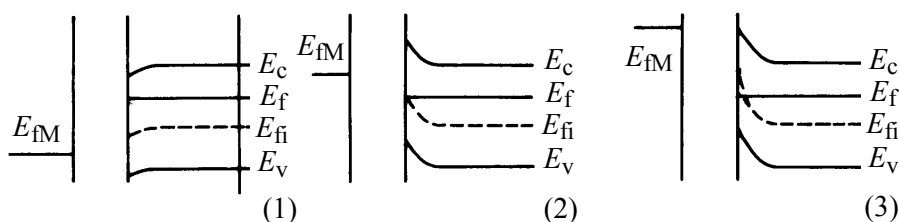
Osiromašenje nastaje kada se (za N-osnovu) gejtm dovede na negativan potencijal (ili električno polje) u odnosu na osnovu. To ima za posledicu udaljavanje glavnih nosilaca od površine odnosno osiromašenje površine.

U uslovima osiromašenja, koji su prikazani na Sl. 1.5.6(2), energijski opsezi se savijaju u umerenom iznosu prema gore. Stoga je koncentracija elektrona (glavnih nosilaca) na površini manja nego u osnovi. Zato nastaje nepokretno pozitivno naelektrisanje donorskih jona. Ovo poslednje naelektrisanje biće označeno sa Q'_B (C/cm^2).

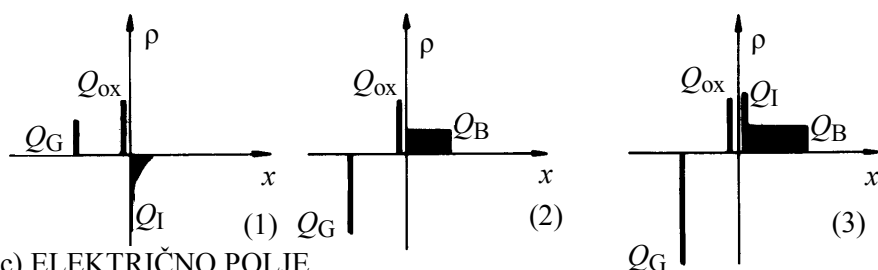
a) STRUKTURA



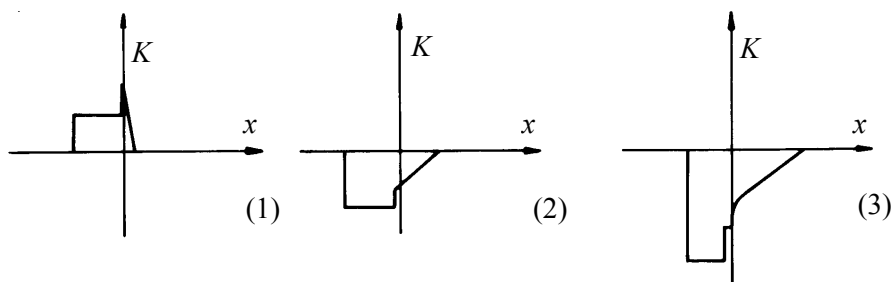
b) ENERGIJSKI OPSEZI



c) GUSTINA NAELEKTRISANJA



c) ELEKTRIČNO POLJE



Sl. 1.5.1 Uslovi na površini poluprovodnika (1) nagomilavanje, (2) osiromašenje i (3) inverzija

Karakteristike uslova osiromašenja se obično analiziraju upotrebom "aproksimacije osiromašenja" pri čemu se pretpostavlja da je osiromašena oblast uz površinu poluprovodnika potpuno osiromašena tj. da ne sadrži slobodne nosioce. Pretpostavlja se, takođe, da je fizička granica između ove oblasti i osnove oštra i jasna. Pod uslovima aproksimacije osiromašenja raspodela Q'_B je pravougaona kao na Sl. 1.5.6. c(2). Lako je utvrditi da je ovim uslovima električno polje na površini linearna funkcija rastojanja od površine. Elektrostatički potencijal je parabolična funkcija rastojanja.

Ukupno nepokretno površinsko naelektrisanje Q'_B koje se nalazi u osiromašenoj oblasti do dubine X_d je

$$(1.5.1) \quad Q'_B = qN_D X_d$$

Električno polje K_S na površini (sa unutrašnje strane) poluprovodnika dobija se iz Gauss-ovog zakona kao

$$(1.5.2) \quad K_S = -Q'_B / \epsilon_s$$

pri čemu se pretpostavlja da je polje u osnovi jednako nuli. ϵ_s je apsolutna dielektrična konstanta silicijuma (poluprovodnika). Znak minus potiče otuda što se vektor površine (orijentisan prema spolja) poklapa sa negativnom x osom.

Pri inverziji tip provodnosti površinskog sloja postaje suprotan od tipa provodnosti osnove. Ovaj uslov omogućava ispoljavanje osnovnih funkcija MOSFET-a i zato je od najvećeg interesa.

Ako se polje na površini kristala, koji je u stanju osiromašenja, povećava, ubrzo se dostiže ona tačka na kojoj je energijsko stanje E_{fi} jednako Fermi-jevom nivou E_f na površini. Površina se sada ponaša kao čist

poluprovodnik. Ako se energijski opsezi i dalje savijaju na gore, E_{fi} postaje veće od E_f blizu površine pa koncentracija šupljina postaje veća od koncentracije elektrona (Sl. 1.5.6(3)). Za površinu kažemo da je invertovana. Koncentracije elektrona i šupljina na površini su sada određene relacijama

$$(1.5.3) \quad n = n_i e^{(E_f - E_{fi})/kT}$$

i

$$(1.5.4) \quad p = n_i e^{-(E_f - E_{fi})/kT}$$

Do (1.5.3) se dolazi kombinacijom (A.3.24) i (A.3.33) uz $n=N_D$ i $E_f=E_{fm}$, a do (1.5.4) kombinacijom (A.3.25) i (A.3.36) uz $p=N_A$ i $E_f=E_{fp}$.

Mada se površina invertuje u trenutku kada E_{fi} postane veće od E_f , koncentracija šupljina ostaje mala sve dok E_{fi} neporaste znatno iznad E_f . Tek kada eksponent u (1.5.4) postane dosta veliki, biće na raspolaganju znatan broj šupljina. Stoga, u upotrebi je "aproksimacija inverzije" pri čemu se pretpostavlja da je formirana jako invertovana površina samo kada je E_{fi} znatno iznad E_f (onoliko znatno koliko je, duboko u osnovi, E_f iznad E_{fi}). Iz (1.5.3) i (1.5.4) vidi se da je površina jako invertovana kada koncentracija šupljina na površini postane jednaka koncentraciji elektrona duboko u osnovi, tj. kada je površina invertovana u odnosu na osnovu.

Kao i ranije, za električno polje sa unutrašnje strane površine, možemo pisati:

$$(1.5.5) \quad K_s = -(Q'_B + Q'_I) / \epsilon_s,$$

gde je Q'_I (C/cm^2) pokretno naelektrisanje po jedinici površine u invertovanom sloju, a Q'_B fiksno naelektrisanje od jonizovanih atoma nečistoća.

Elektrostatički potencijal Φ u poluprovodniku određen je pomoću potencijalne energije naelektrisanih čestica. Veza između elektrostatičkog potencijala i energije elektrona je, kao i do sada, $E = -q\Phi$. Pogodnosti radi, kao *referentni* energijski nivo može se izabrati Fermi-jev nivo. Potencijal koji odgovara energiji E bio bi

$$(1.5.6) \quad \Phi = -(E - E_f) / q$$

Dalje, ako je izabrani referentni nivo E_{fi} , duboko u poluprovodniku će biti

$$(1.5.7) \quad \Phi_f = -\frac{E_{fi} - E_f}{q} \Big|_{x > X_d} = \begin{cases} V_T \log(N_D / n_i) & \text{za N - podlogu} \\ V_T \log(N_A / n_i) & \text{za P - podlogu.} \end{cases}$$

Tako, Φ_f je pozitivno u poluprovodniku N-tipa, a negativno u poluprovodniku P-tipa.

Pod uslovom jake inverzije, ukupno savijanje energijskih opsega odgovara potencijalnoj barijeri (Φ_B) koja je jednaka dvostrukom fermijevom potencijalu i ima suprotan znak:

$$(1.5.8) \quad \Phi_B = -2\Phi_f.$$

Ovo savijanje energijskih opsega na površini poluprovodnika pod uticajem spoljašnjeg polja odgovara potpunom pomeranju energijskih opsega kod uobičajenog P-N spoja kao što je bilo reči u odeljku 1.1. Razlika je u tome što se sada spoj formira kao indukovani spoj pod dejstvom K_s . Vrednost Φ_B je negativna za invertovani sloj P-tipa na N-osnovi, a pozitivna za invertovani sloj N-tipa na P-osnovi.

Kada se dostigne uslov jake inverzije energijski opsezi se ne savijaju više u znatnom iznosu sa porastom "intenziteta" inverzije. Ovo se može sagledati ako se ima u vidu da eksponencijalni član u (1.5.4) sada ima dosta veliku vrednost pa mali porast argumenta omogućava znatan porast koncentracije slobodnih nosilaca. Stoga, sa porastom K_s , Q'_I raste, a Q'_B i X_d ostaju praktično konstantni.

Zanimljivo je uočiti da invertovani sloj koji se nalazi na površini silicijuma ispod oksida i poluprovodnička osnova sada čine p-n spoj. Između invertovanog sloja i osnove formira se osiromašena oblast tako da je invertovani sloj *izolovan* od osnove.

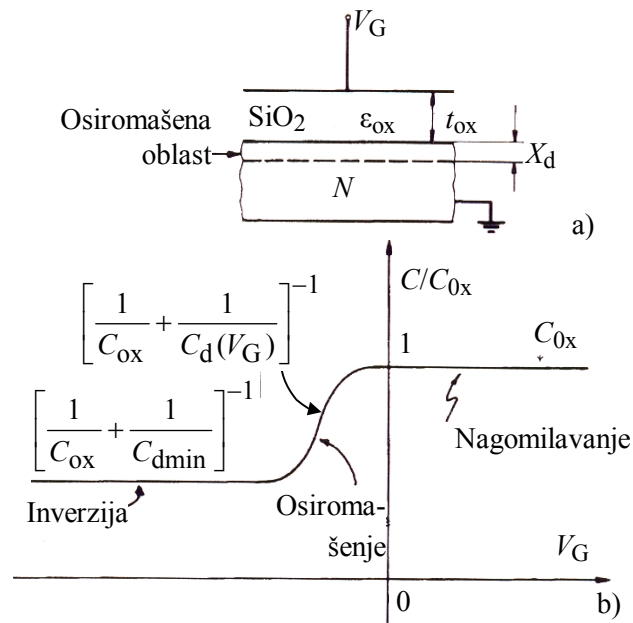
Time smo, u kratkim crtama, opisali uslove koji vladaju na površini poluprovodnika i okarakterisali električnu prirodu površine sa unutrašnje strane. Razmotrimo sada uslove koji se odnose na spoljnu stranu površine poluprovodnika u MOS strukturama.

1.5.1.1 MOS kapacitivnost

Pri proizvodnji MOS tranzistora, površina poluprovodnika pokrivena je **tankim** (obično $5 \cdot 10^{-8}$ do 10^{-7} m)

slojem dielektrika U sadašnjim komponentama ovaj sloj je obično silicijum dioksid (SiO_2). Ovaj izolirajući sloj se obično naziva oksidom. Iznad oksida je gejt koji je obično od aluminijuma. Ceo "sendvič" (metal-oksid-silicijum) formira MOS kondenzator koji je prikazan na Sl. 1.5.2a.

Električne karakteristike oksida su određene debljinom (t_{ox}), dielektričnom konstantom (ϵ_{ox}) i naelektrisanjem (Q_{ox}) koje se može naći unutar oksida. Ovo naelektrisanje ima značajan uticaj na karakteristike MOS tranzistora. Ono može nastati na više načina: to mogu biti joni nečistoća koji su ugrađeni u silicijum, naelektrisanje blizu granice silicijuma i oksida koja su posledica završetka regularne kristalne rešetke silicijuma ili, što je u najvećoj meri slučaj, jonizovani silicijumski atomi u oksidu. Pokazano je da se pogodnom pripremom površine može postići, nezavisno od porekla, da ovo naelektrisanje postane nepokretno i da se skoncentriše blizu površine silicijuma (sa strane izolatora). Stoga je pogodno da se pretpostavi da i ovo naelektrisanje ima površinsku prirodu i da se izražava sa Q'_{ox} (C/cm^2). Naelektrisanje Q_{ox} je prikazano na Sl. 1.5.1c. Na osnovu rečenog može se zaključiti da Q'_{ox} modifikuje električno polje kako u oksidu tako i u silicijumu. Napomenimo još da Q'_{ox} ne zavisi od tipa provodnosti osnove i da je obično pozitivno.



Sl. 1.5.2 MOS struktura (a) i zavisnost kapacitivnosti (b) od napona između gejta i osnove za N-osnovu

Ako se meri kapacitivnost između metalnog gejta i silicijumske osnove kao funkcija napona priključenog između gejta i osnove, dobija se zavisnost koja odgovara Sl. 1.5.2. Tri oblasti na ovoj krivoj odgovaraju trima uslovima na površini poluprovodnika. Kada se rasmatra osnova N-tipa, kada je gejt na pozitivnom potencijalu u odnosu na osnovu, površina je pod uslovom nagomilavanja i ponaša se kao provodnik što ima za posledicu da kapacitivnost odgovara kapacitivnosti između dveju provodnih ploča. Kapacitivnost po jedinici površine, u ovom slučaju, je

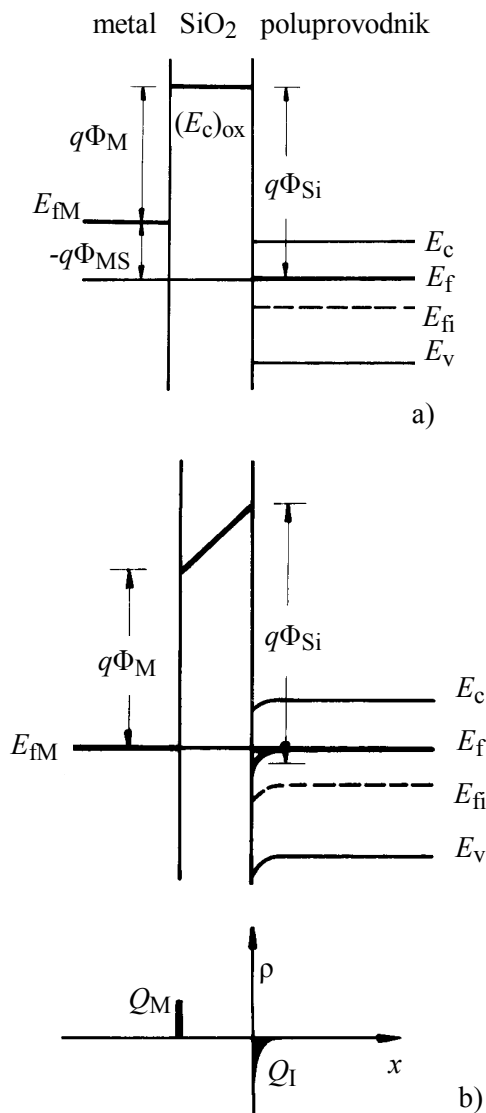
$$(1.5.9) \quad C' = C'_{\text{ox}} = \epsilon_{\text{ox}} / t_{\text{ox}}.$$

Pošto je $\epsilon_{\text{ox}} = 3.45 \cdot 10^{-5}$ pF/ μm , a tipična vrednost t_{ox} je $0.1 \mu\text{m}$, za C'_{ox} dobija se približno $C'_{\text{ox}} = 34.5 \cdot 10^{-5}$ pF/ $(\mu\text{m})^2$. Tako, komponenta čija je površina gejta $30 \cdot 50 (\mu\text{m})^2$ ima kapacitivnost od 0.52 pF.

Kada je napon na gejtu dovoljno negativan da bi se formirala osiromašena oblast u silicijumu, efekat je ekvivalentan kao da se povećala debljina oksida. Naime, izolacionom sloju (oksidu) sada se dodaje još jedan izolacioni sloj – osiromašena oblast. Stoga se ukupna kapacitivnost smanjuje. Međutim, da bi se efekat osiromašenja i efekat inverzije prikazali zajedno ukupna kapacitivnost se iskazuje kao redna veza kapacitivnosti oksida i kapacitivnosti osiromašene oblasti:

$$(1.5.10) \quad 1/C = 1/C_{\text{ox}} + 1/C_d$$

Kada se osiromašena oblast širi, smanjuje se i C_d pa se smanjuje i ukupna kapacitivnost.



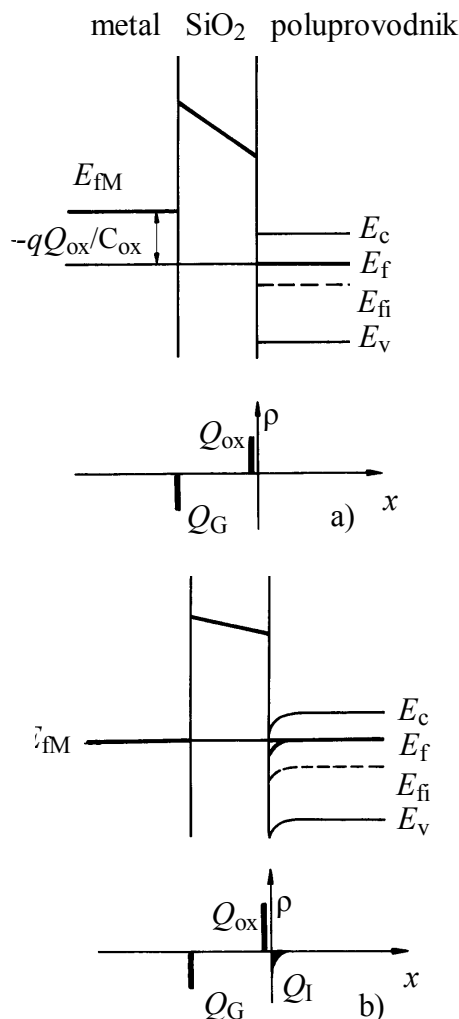
Sl. 1.5.3 Energijski dijagram koji prikazuje izlazni rad metal-silicijum (a) slučaj ravnih zona (b) gejt uzemljen

Najzad, pri velikom negativnom naponu formira se invertovan sloj uz samu površinu tako da se formira stvarna redna veza kondenzatora. Obloge prvog sačinjavaju metal i nagomilano naelektrisanje pri čemu je dielektrik oksid, a obloge drugog čine nagomilano naelektrisanje i naelektrisanje u osnovi s tim što dielektrik čini osiromašena oblast između invertovanog sloja i podloge. Ubrzo širina osiromašene oblasti dostiže maksimum pa ukupni kapacitivnost više ne opada.

1.5.1.2 Napon praga MOS strukture

Pre nego što konačno krenemo u određivanje analitičke zavisnosti karakteristika tranzistora razmotrimo još faktore koji utiču na određivanje graničnih linija između triju uslova koji vladaju na površini poluprovodnika.

Prelaz između nagomilavanja i osiromašenja nastaje kada energijski opsezi u silicijumu ostaju horizontalni sve do površine. To je ilustrovano na Sl. 1.5.3a i naziva se uslovom "ravnih zona". U ovom slučaju u silicijumu nema električnog polja, a gustina viška naelektrisanja je jednaka nuli. Pokretni elektroni u N-osnovi neutralizuju pozitivno naelektrisanje donorskih atoma.



Sl. 1.5.4 Uticaj naelektrisanja u oksidu na promenu izlaznog rada (a) slucaj ravnih zona i (b) gejt uzemljen

U odsustvu naelektrisanja u oksidu ($Q'_{ox}=0$) električno polje van silicijuma jednako je nuli i energijski opsezi u oksidu su takođe horizontalni. Međutim, kao što je prikazano na Sl. 1.5.3b. ovaj uslov ne nastaje kada je napon na gejtu jednak nuli. To je posledica razlike između izlaznog rada (jonizacione energije) silicijuma i metala koji omogućava formiranje potencijalne barijere između metala i silicijuma (Φ_{MS}). Ovde imjamo situaciju koja podseća na Schottky-jevu diodu s tim što su, ovde, poluprovodnik i metal razdvojeni oksidom tako da se naelektrisanja ne prenose.

Izlazni rad materijala definiše se kao energija potrebna da se jedan elektron sa Fermijevog nivoa u metalu prenese u vakuum. U slucaju MOS strukture, energije koje smo pomenuli gore, predstavljaju modifikovane izlazne radove od Fermi-jevog nivoa u metalu gejta do nekog provodnog opsega u oksidu. Oni su prikazani na Sl. 1.5.3a preko ekvivalentnih potencijalnih barijera Φ_M i Φ_{Si} . Slika pokazuje uslov pri ravnim zonama i bez Q_{ox} . Stoga, napon na gejtu potreban da se dobiju ravne zone je prosto jednak razlici potencijalnih barijera i iskazuje se kao

$$(1.5.11) \quad V_G = \Phi_{MS} = \Phi_M - \Phi_{Si}$$

Φ_{MS} se često naziva izlaznim radom od metala do silicijuma. Za tipične koncentracije dopiranja Φ_{MS} iznosi oko -0.3 V za silicijum N-tipa.

Zbog prisustva Q_{ox} vrednost napona koji je potreban da se dobiju ravne zone razlikuje se od one date sa (1.5.11). To je ilustravano na Sl. 1.5.4. Pri ravnim zonama, polje u silicijumu ne postoji. Da bi se to postiglo pri pozitivnom Q_{ox} , napon na gejtu mora biti dovoljno negativan pa se na metalu pojavljuje isto ali negativno naelektrisanje. Sada je

$$(1.5.12) \quad V_G = Q'_{ox} / C'_{ox}$$

Kada se uzme u obzir i Q'_{ox} i razlika u izlaznim radovima (Φ_{MS}) za napon koja će izazvati ravne zone u silicijumu imamo:

$$(1.5.13) \quad V_{FB} = \Phi_{MS} - Q'_{ox} / C'_{ox}$$

Kada je napon na gejtu negativniji od V_{FB} površina silicijuma postaje osiromašena i zona se zakrivljuje na gore.

Kada E_{fi} samo dodiruje E_f , poluprovodnik je čist (na površini). Sa daljim povećanjem E_{fi} formira se invertovan sloj P-tipa. Ovo definiše granicu između osiromašenja i inverzije. Mi smo, međutim, pod inverzijom usvojili samo jaku inverziju koja će nastati ako je

$$(1.5.14) (E_{fi} - E_f) \text{ na površini} = (E_f - E_{fi}) \text{ u osnovi.}$$

Stoga, za ukupnu potencijalnu barijeru (Φ_B) koja je posledica savijanja zona na površini imamo

$$(1.5.15) \quad \Phi_B = -2\Phi_f.$$

Negativan znak ukazuje da se energijske zone savijaju u smeru suprotnom od Φ_f . U našem primeru, E_{fi} je, u osnovi, ispod E_f pa se zone zakrivljuje na gore. U komponenti sa P-kanalom Φ_B je negativan broj.

Do veličine širina osiromašene oblasti dolazimo analogijom sa širinom osiromašene oblasti na jednoj strani p-n spoja za koju smo ranije izveli da je

$$w_n = \sqrt{\frac{2\epsilon(E_0 - q \cdot V)}{q^2 N_D (1 + N_D / N_A)}}.$$

Ako se smatra da koncentracija N_A odgovara koncentraciji nosilaca u metalu onda je $N_A \gg N_D$. Ako, sada, smatramo da je potencijalna razlika između površine i osnove (V) jednaka nuli i ako potencijalnu barijeru na spoju (E_0/q) identifikujemo sa $-\Phi_B$, dobija se

$$(1.5.16) \quad X_d = \sqrt{2\epsilon_s(-\Phi_B)/(qN_D)},$$

a naelektrisanje u njoj, na osnovu (1.5.1), je:

$$(1.5.17) \quad Q'_B = \sqrt{2\epsilon_s q N_D (-\Phi_B)}.$$

Napon na gejtu koji je potreban da se izazove jaka inverzija naziva se naponom praga (V_T). Vrednost ovog napona dobijamo kao zbir

- napona koji je potreban da se izazovu ravne zone (V_{FB}),

-napona koji će izazvati savijanje energijskih opsega da bi se izazvala jaka inverzija i

-napona koji je potreban za formiranje električnog polja koje održava naelektrisanje Q_B u osiromašenoj oblasti.

Naelektrisanje Q_B zahteva naelektrisanje $-Q_B$ u metalu odnosno napona na gejtu $-Q_B/C_{ox}$.

Shodno ovome za napon praga imamo

$$(1.5.18) \quad V_T = V_{FB} + \Phi_B - Q'_B / C'_{ox},$$

a upotrebom (1.5.13) dobijamo

$$(1.5.19a) \quad V_T = \Phi_{MS} + \Phi_B - Q'_{ox} / C'_{ox} - Q'_B / C'_{ox}.$$

Tabela 1.5.1 Znaci veličina koje učestvuju u izrazu za napon praga

Parametar	P-podloga	N-podloga
Φ_{MS} za gejt od:		
metala	-	-
$N^+ Si$	-	-
$P^+ Si$	+	+
Φ_f	-	+
Q_B	-	+
Q_{ox}	+	+
V	+	-
B	+	-

Primer 1.15

Odrediti napon praga MOS strukture ako se radi sa osnovom od silicijuma N-tipa pri $N_D = 10^{15} \text{ cm}^{-3}$. Poznato je $\Phi_{MS} = -0.3 \text{ V}$, $Q'_{ox} = 1.5 \cdot 10^{11} (1.6 \cdot 10^{-19}) \text{ C/cm}^2$, $t_{ox} = 10^{-7} \text{ m}$, $\epsilon_s = 1 \text{ pF/cm}$ i $\epsilon_{ox} = 0.346 \text{ pF/cm}$.

Rešenje:

Najpre izračunavamo
 $C'_{ox} = \epsilon_{ox} / t_{ox} = 3.46 \cdot 10^{-8} \text{ F/cm}^2$.

Zatim određujemo

$$\Phi_B = -2\Phi_f = -2 \cdot \ln(N_D/n_i) \approx -0.6 \text{ V}.$$

Ostaje da se odredi

$$Q'_B = \sqrt{2\epsilon_s q N_D (-\Phi_B)} = 1.4 \cdot 10^{-8} \text{ C/cm}^2,$$

pa se dobija

$$V_T = \Phi_{MS} + \Phi_B - Q'_{ox} / C'_{ox} - Q'_B / C'_{ox} = -0.3 - 0.6 - 0.7 - 0.41 = -2.01 \text{ V.} \quad \checkmark$$

U poslednjem izrazu uzeto je da se Q'_B izračunava iz (1.5.17). Pri tome se smatralo da ne postoji pad napona između invertovanog sloja (kanala) i osnove. Ukoliko ovaj napon postoji Q'_B treba izračunavati iz

$$(1.5.20) \quad Q'_B(V) = \sqrt{2\epsilon_s q N_D (-V - \Phi_B)},$$

gde je V napon na spoju između P-kanala i N-osnove redukovano za veličinu Φ_f . Za konkretni primer (N-osnova) veličine V i Φ_B su negativne. Za ovaj slučaj izraz za napon praga modifikuje se u

$$(1.5.19b) \quad V_T = V_{T0} + B \cdot (\sqrt{|V - 2\Phi_f|} - \sqrt{2|\Phi_f|})$$

gde je Φ_f dato sa (1.5.7),

$$(1.5.19c) \quad B = \sqrt{2q\epsilon_s N_D} / C'_{ox}$$

$$(1.5.19d) \quad V_{T0} = \Phi_{MS} - 2\Phi_f - \frac{Q'_{ox} + Q'_{B0}}{C'_{ox}}$$

i

$$(1.5.19e) \quad Q'_{B0} = Q'_B(0).$$

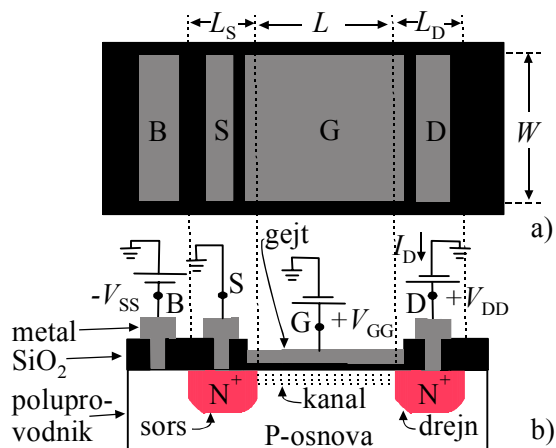
Da bi se lakše rukovalo sa ovim izrazima navešćemo Tabelu 1.5.1 sa znakovima veličina koje ulaze u njih.

1.5.2 MOS Tranzistor

U osnovi, tranzistor sa izolovanim gejtom predstavlja otpornik čija se otpornost kontroliše spoljnim naponom slično kao kod JFET-a i na taj način ostvaruje tranzistorski efekt. Najjednostavnija komponenta ovog tipa prikazana je na Sl. 1.5.5. Ona se naziva MOSFET sa indukovanim kanalom.

Osnovu predstavlja poluprovodnik P-tipa u koji su difundovane dve N-oblasti sa velikom koncentracijom primesa (N^+). Jedna od njih je sors, a druga drejn. Osnova (podloga) P-tipa ima mali sadržaj primesa. N-oblasti se formiraju difuzijom. Preko P- i N-oblasti postavljen je izolator od SiO_2 kroz koji su napanavanjem u vakuumu nanoseni aluminijumski kontakti za sors i za drejn. Na sredini između sorsa i drejna, preko izolatora, nanosi se metal koji predstavlja gejt. Gejt je, dakle, izolovan od osnove.

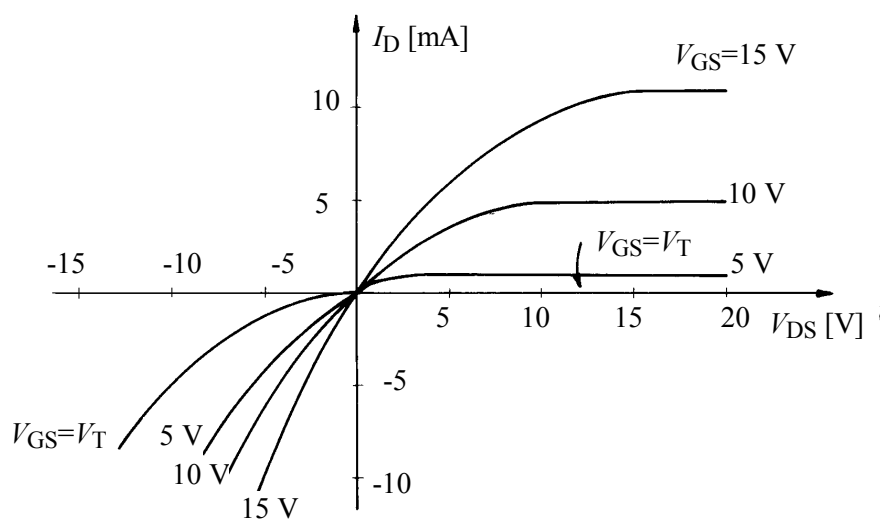
Za razumevanje rada ove komponente treba najpre imati na umu da i sors i drejn sa podlogom formiraju p-n spojeve čije se osiromašene oblasti praktično u celosti nalaze u podlozi. Stoga, kada se posmatra struktura: sors-podloga-drejn, prepoznamo dve diode vezane u opoziciji slično kao kod bipolarnog tranzistora (emitor-baza-kolektor). Suštinska razlika u odnosu na bipolarni tranzistor jeste u tome što se podloga ne koristi kao baza već se njena površina u delu između sorsa i drejna, invertuje, tako da po površini poluprovodnika nastane otpornik istog tipa provodnosti kao i sors i drejn. Preko ovog otpornika uspostavlja se struja između sorsa i drejna. Modulacijom njegove otpornosti pomoću potencijala gejta, ostvaruje se tranzistorski efekt. U tom cilju polarizacija tranzistora se ostvaruje na sledeći način. Za N-kanalni tranzistor drejn je na pozitivnijem potencijalu u odnosu na sors ($V_{DS} > 0$), a gejt je na potencijalu koji je najmanje za veličinu napona praga veći od potencijala osnove.



Sl. 1.5.5 MOSFET sa indukovanim kanalom. a) pogled odozgo i dimenzije, b) poprečni presek i polarizacija

Za P-kanalni tranzistor važi: Drejn je na negativnijem potencijalu u odnosu na sors ($V_{DS} < 0$), a gejt je na potencijalu koji je za veličinu napona praga negativniji od potencijala osnove. Za specijalni slučaj kada je osnova vezana za sors, dakle, kada je $V_{BS} = 0$, onda se napon gejta meri u odnosu na potencijal sorsa. Zato za uspostavljanje kanala u N-kanalnom tranzistoru potrebno je $V_{GS} > V_T$, a za uspostavljanje kanala u P-kanalnom tranzistoru potrebno je $V_{GS} < V_T$.

Pretpostavlja se da je podloga vezana za najnegativniji potencijal u kolu ($-V_{SS}$) ili za sors. Kada je $V_{GS} < V_T$, površina ispod gejta je poluprovodnik P-tipa, kanal nije formiran i između sorsa i drejna ne protiče struja. Kada dovedemo pozitivan napon, gejt indukuje elektrone u površinu i invertuje tip provodnosti iste. Kada napon na gejtu dostigne napon paraga (tako da je za P-podlogu $V_{GS} > V_T$) područje između sorsa i drejna postaje poluprovodnik N-tipa i ima ulogu kanala, analogno sa JFET-om. Otuda i ime N-kanalni MOSFET sa indukovanim kanalom. Grubo rečeno, u ovim uslovima, sors i drejn su kratko spojeni kanalom.



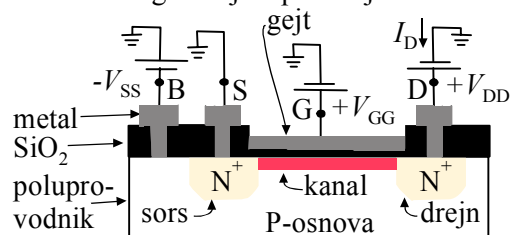
Sl. 1.5.6 Izlazne karakteristike N-kanalnog MOSFET-a sa indukovanim kanalom

Struja između sorsa i drejna zavisi od napona V_{DS} i od napona V_{GS} . Pri tome je, razumljivo, dominantniji uticaj napona između gejta i sorsa. Ukoliko ovaj napon raste po apsolutnoj vrednosti, veći je broj indukovanih elektrona pa je struja drejna veća. Razlog tome je činjenica da ovaj napon određuje ukupni broj elektrona koji će biti raspoloživ za formiranje struje. Za dati napon V_{GS} , sa porastom napona između sorsa i drejna, struja drejna najpre raste pa prelazi u zasićenje. U zasićenju (naponsko) struja drejna ne zavisi od napona V_{DS} već samo od napona V_{GS} . O pojavama u kanalu pri promeni napona na drejnu biće reči kasnije. Na Sl. 1.5.6 prikazane su izlazne karakteristike N-kanalnog MOSFET-a sa indukovanim kanalom. Treba primetiti da je za $V_{GS}=0$ i $V_{DS}>0$ struja drejna jednaka nuli odnosno $I_D=0$.

Posebno su zanimljive karakteristike MOSFETa pri negativnim naponima na drejnu. Tok ove karakteristike prikazan je na Sl. 1.5.6 u trećem kvadrantu. Naime, pošto je MOSFET simetrična komponenta, očekivalo bi se da se karakteristike ponašaju kao neparna funkcija. Zašto to nije tako? U stvari jeste. Problem sa Sl. 1.5.6 pri negativnim V_{DS} je u tome što kada je V_{DS} negativno, sors i drejn menjaju uloge, a mi i dalje V_{GS} merimo od gejta do sorsa. Da smo V_{GS} merili od gejta do drejna dobili bi simetričnu karakteristiku onoj iz prvog kvadranta. Ovako, dobijamo paraboličnu karakteristiku jer ako se potencijal gejta drži fiksni, potencijalna razlika između gejta i novog sorsa se stalno uvećava tako da to nisu karakteristike za konstantan ulazni napon.

MOSFET se često proizvodi sa N-poluprovodnikom između sorsa i drejna kao što je to prikazano na Sl. 1.5.7. Modifikacija u odnosu na MOSFET sa Sl. 1.5.5 je u tome što se između sorsa i drejna implantacijom formira N-kanal sa manjom koncentracijom donora (N). Zato se ova struktura naziva MOSFET sa ugrađenim kanalom. Kod ovog tipa MOSFET-a u kanalu postoje slobodni elektroni kao većinski nosioci i u odsustvu pozitivnog napona na gejtu. Njima se, pri pozitivnoj polarizaciji gejta, pridodaju indukovani elektroni. Sa promenom napona V_{GS} menja se i ukupni broj slobodnih elektrona u kanalu, a time i provodnost kanala što ima za posledicu promenu struje između drejna i sorsa.

Osnovni efekt koji se ostiže ugradnjom kanale je programiranje vrednosti napona praga tranzistora. Naime, zavisno od koncentracije implantiranih jona u području između sorsa i drejna, vrednost napona praga može da se smanjuje i čak da postane negativna. Tako, postojanje slobodnih nosilaca u kanalu (postojanje kanala) i bez posebnog napona polarizacije, omogućava da napon V_{GS} menja znak odnosno da gejt bude i na negativnijem potencijalu od sorsa, a da i dalje protiče struja.

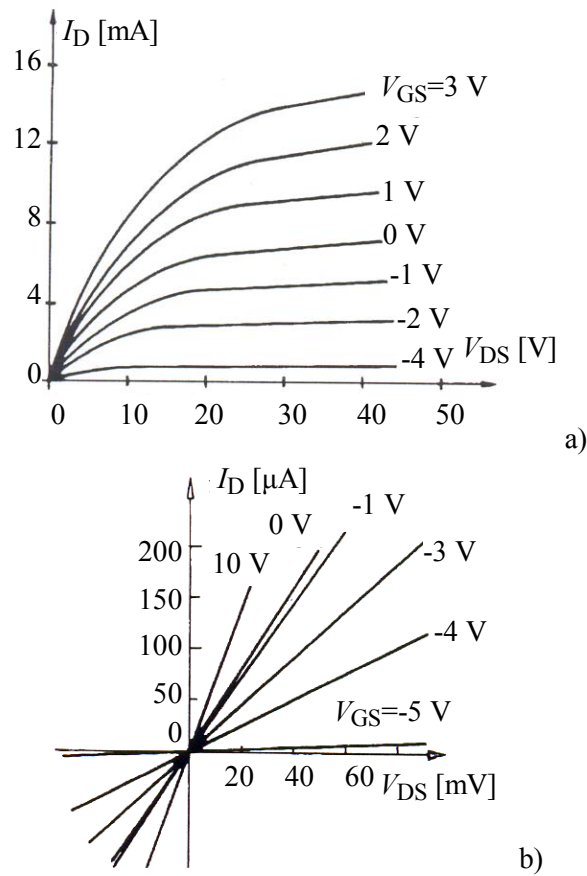


Sl. 1.5.7 N-kanalni MOSFET sa ugrađenim kanalom

Pri pozitivnim naponima na gejtu MOSFET se ponaša jednako kao i kad je kanal indukovao jer pozitivni napon na gejtu indukuje nove elektrone u kanalu privlačeći ih iz osnove. Kada je gejt na negativnom potencijalu u odnosu na osnovu, broj slobodnih nosilaca u kanalu (elektroni) se smanjuje njihovim povlačenjem u osnovu. Šupljine koje sada privlači elektroda gejta ne učestvuju u provođenju struje budući da je spoj drejn-osnova inverzno polarisan pa je provodan samo za manjinske nosioce (u P-osnovi to su elektroni).

Kod N-kanalnog MOSFET-a sa ugrađenim kanalom je, dakle, napon praga negativan pa pri $V_{GS}=0$ i $V_{DS}>0$, $I_D>0$. Struja drejna se može svesti na nulu ako napon na gejtu postane negativan i

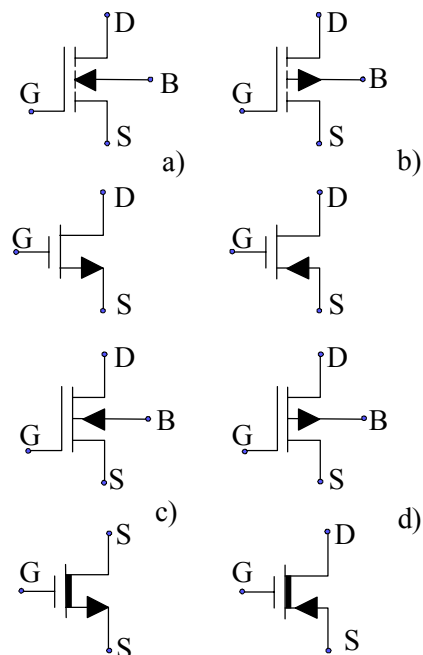
manji (negativniji) od napona praga. Tipične karakteristike ovog tranzistora prikazane su na Sl. 1.5.8a. Sl. 1.5.8b pokazuje da se i ova komponenta može koristiti kao linearni otpornik kontrolisan naponom.



Sl. 1.5.8 Izlazne karakteristike N-kanalnog MOSFET-a sa ugrađenim kanalom, a) celo polje i b) u okolini koordinatnog početka

U upotrebi je više simbola za MOSFET. Oni su prikazani na Sl. 1.5.9. Pored izvoda za sors (S), gejt (G) i drejn (D), MOSFET može imati i izvod za osnovu (B od bulk). Ovaj izvod je, međutim, najčešće priključen za sors što je prikazano u drugom redu Sl. 1.5.9. Ukoliko to nije slučaj vrednost potencijala podloge u odnosu na potencijal sorsa može da ima značajan uticaj na rad tranzistora čak i za normalnu polarizaciju podloge odnosno za inverznu polarizaciju spojeva sors-podloga i drejn-podloga. Ako je neki od ova dva spoja direktno polarisan rad komponente je praktično onemogućen. Može se uočiti da je gejt i simbolično izdvojen od kanala. Vodoravna linija priključka gejta pomerena je tako da se ukaže koja je od dveju simetričnih elektroda sors.

S obzirom na komplikovanost kompletnih simbola koji su prikazani u prvom redu Sl. 1.5.9, u upotrebi su i pojednostavljeni simboli. Jedan niz takvih simbola prikazan je u drugom redu iste slike. Razmotrimo najpre prvi red odnosno kompletne simbole. Vertikalna linija paralelno sa gejtom odnosi se na kanal. Indukovani kanal prikazan je isprekidanom linijom, a kod MOSFET-a sa ugrađenim kanalom linija je puna. Osnova čini sa drejnom i sorsom dva p-n spoja koji su, normalno, inverzno polarisani. Strelica u simbolu pokazuje smer diode između drejna i osnove (ili između sorsa i osnove).



Sl. 1.5.9 Simboli za MOSFET, a) i b) sa indukovanim, c) i d) sa ugrađenim kanalom, a) i c) sa N-kanalom, b) i d) sa P-kanalom.

U drugom redu simbola pretpostavlja se da je sors kratko spojen za osnovu. Pored toga, umesto da se ukazuje na indukovani kanal isprekidanom linijom, ovde se ukazuje na ugrađeni kanal zadebljanjem linije. Strelica, sada, označava prirodni smer struje sorsa što je ekvivalentno bipolarnom tranzistoru. Treba napomenuti da u nekim dokumentima i knjigama može da se sretne simbol za tranzistor koji nema strelicu. Dakle nije naznačen tip kanala tranzistora. U takvim slučajevima radi se o elektronskom kolu koje je isključivo sastavljeno od tranzistora jednog tipa kanala pa se unapred zna o kakvim tranzistorima se radi. Treba još imati na umu da je, najčešće, MOS tranzistor simetrična komponenta. Polazeći od toga, za donji red simbola na Sl. 1.5.5 može se reći da je sors određen time što je podloga vezana za njega.

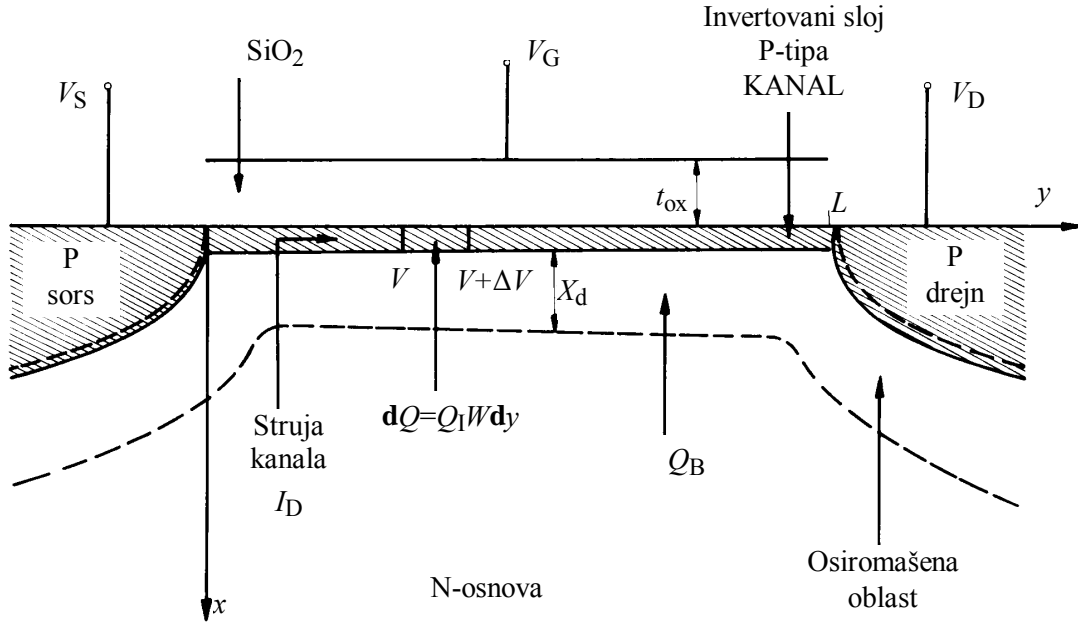
Ukoliko se koristi simbol iz prvog reda ali je vodoravna linija priključka gejtja na sredini, ostaje da se na osnovu polarizacije (smera struje drejna koji je određen baterijom) i principa da je sors ona elektroda od koje polaze nosioci (elektroni kod N-kanalnog i šupljine kod P-kanalnog tranzistora) odredi koja je elektroda sors, a koja drejn.

1.5.3 Karakteristike MOSFET-a

Dosadašnja izlaganja omogućavaju generisanje analitičkog izraza za karakteristiku MOSFET-a.

Sl. 1.5.10 ilustruje strukturu P-kanalnog MOSFET-a. Na slici su označeni koordinatni sistem i značajnije dimenzije koje će biti kasnije upotrebljene.

U daljoj analizi biće uzeto u obzir samo kretanje nosilaca u jednom smeru (duž y-ose) što znači da će, kao i kod BJT-a, analiza biti jednodimenzionalna. Biće još pretpostavljeno da komponenta električnog polja duž x-ose (dakle dubinska komponenta) ne utiče na kretanje naelektrisanja duž kanala.



Sl. 1.5.10 P-kanalni MOSFET sa indukovanim kanalom

Razmotrimo mali deo kanala. Kada je napon na gejtju jednak naponu praga kanal tek počinje da se formira. Porast napona za iznad napona praga $\Delta V_G = V_G - V_T$ ima za posledicu porast površinskog naelektrisanja za $\Delta Q' = C'_{ox} \cdot \Delta V_G$ na elektrodi gejta, a time i naelektrisanja suprotnog znaka ($-C'_{ox} \cdot \Delta V_G$) na drugoj oblozi kondenzatora koju čini oksid. Ovo predstavlja priraštaj odgovarajućeg pokretnog naelektrisanja u kanalu.

U opštem slučaju, ako je pad napona na kanalu V (od sorsa do tačke sa koordinatom y), napon na kapacitivnosti C'_{ox} je $V_G - V$ i pokretno naelektrisanje Q'_I u invertovanom sloju je

$$(1.5.21) \quad Q'_I = -C'_{ox} (V_G - V_T - V)$$

Ekvivalentno provodnosti poluprovodnika za koju je bilo pokazano da je jednaka proizvodu pokretljivosti i količine naelektrisanja po jedinici zapremine [jed. (A.3.51)], površinska provodnost (σ_s) definiše se preko površinske količine naelektrisanja i srednje pokretljivosti tog naelektrisanja (μ_p):

$$(1.5.22) \quad \begin{aligned} \sigma_s &= \mu_p Q'_I = \\ &= -\mu_p C'_{ox} (V_G - V_T - V) \quad (1/\Omega). \end{aligned}$$

Na osnovu Ohm-ovog zakona za površinsku gustinu struje imamo $J_s = \sigma_s K_y$. Veličina K_y je funkcija samo gradijenta napona duž y -ose. $K_y = dV/dy$. Ako se ima u vidu da se površinska gustina struje dobija kao količnik struje I_D i širine kanala W možemo pisati

$$(1.5.23) \quad \frac{I_D}{W} = J_s = \sigma_s K_y = -\sigma_s \frac{dV}{dy}$$

ili

$$(1.5.24) \quad I_D dy = -\sigma_s W \cdot dV$$

Smenom (1.5.22) dobija se

$$(1.5.25) \quad I_D dy = W \cdot \mu_p C'_{ox} (V_G - V_T - V) dV.$$

Neka su naponi sorsa i drejna **u odnosu na osnovu** označeni sa V_S i V_D , respektivno. Integracijom (1.5.25) od $y=0$ (sors) do $y=L$ (drejn) dobija se:

$$(1.5.26a) \quad I_D = 2 \cdot \beta \left\{ (V_G - V_{T0}) \cdot (V_D - V_S) - \frac{1}{2} (V_D^2 - V_S^2) - \frac{2}{3} B \cdot \left[(-V_D - \Phi_B)^{\frac{3}{2}} - (-\Phi_B)^{\frac{3}{2}} \right] \right\}$$

pri čemu je V_T eliminisano pomoću (1.5.19) i (1.5.20),

$$(1.5.26b) \quad \beta = \frac{\mu_p}{2} C'_{ox} \cdot \frac{W}{L},$$

a B je dato sa (1.5.19c).

Često se, u elektronskim kolima, sors MOSFET-a vezuje za osnovu. U tom slučaju u (1.5.26) zamenujemo $V_S=0$ pa se za struju dobija:

$$(1.5.27) \quad I_D = 2 \cdot \beta \left\{ \left(V_{GS} - V_{T0} - \frac{1}{2} V_{DS} \right) \cdot V_{DS} - \frac{2}{3} \cdot B \left[(-V_{DS} - \Phi_B)^{\frac{3}{2}} - (-\Phi_B)^{\frac{3}{2}} \right] \right\}.$$

Čitalac može samostalno izvesti odgovarajući izraz za slučaj kada je osnova vezana za drejnu.

U (1.5.26) izabrano je da je smer struje u pravcu pozitivne y -ose.

Relacija (1.5.26) može se pojednostaviti ako se uzme da je Q_B konstantno duž kanala i dato izrazom (1.5.17). U tom slučaju, umesto (1.5.26) dobijamo

$$(1.5.28a) \quad I_D = 2 \cdot \beta \cdot \left[(V_G - V_{T0})(V_D - V_S) - \frac{1}{2} (V_D^2 - V_S^2) \right],$$

a za slučaj kada je sors vezan za podlogu odnosno kada je $V_S=0$, umesto (1.5.27) dobija se

$$(1.5.28b) \quad I_D = 2 \cdot \beta \cdot \left[(V_{GS} - V_{T0})V_{DS} - \frac{1}{2} V_{DS}^2 \right].$$

pri čemu je V_{T0} dato sa (1.5.19d). Moguće je izvesti i druga uprošćenja izraza (1.5.26) odnosno (1.5.27).

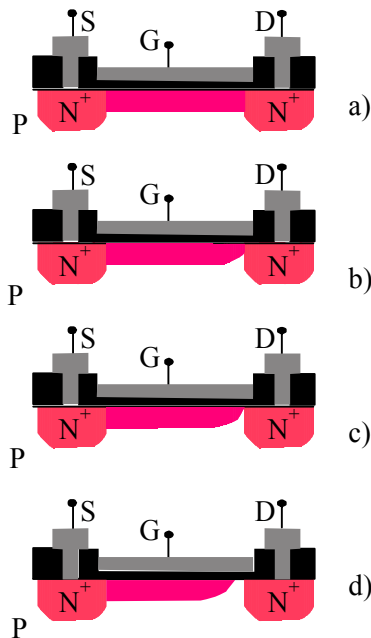
Pomenimo sada da je (1.5.26) izvedena pod uslovom da kanal postoji u celoj oblasti od sorsa do drejna. U pod odgovarajućim uslovima, međutim, to nije slučaj. Stoga, treba razlikovati deo karakteristika koji je opisan sa (1.5.26). Ovaj deo naziva se *linearnom ili omskom oblašću* karakteristika MOSFET-a.

Pod određenim uslovima, struja može da teče i kada kanal nije formiran u malom delu površine ispod gejta. Ova situacija se naziva *zasićenjem* (naponsko) struje kanala (drejna) i predstavlja radne uslove koji su različiti od onih koji vladaju u omskoj oblasti karakteristika tranzistora. U daljem tekstu biće dato više detalja o ovom radnom režimu MOS tranzistora.

Razmotrimo P-kanalni tranzistor sa uzemljenim sorsom ($V_S=0$) i sa fiksnim naponom na gejtu pri čemu je $V_G < V_T$ (tj. $|V_G| > |V_T|$). Kanal je formiran time što naelektrisanje u izolovanom gejtu održava naelektrisanje u kanalu. Ova situacija pri malim naponima na drejnu ($V_{DS} \approx 0$) ilustrovana je na Sl. 1.5.11a. Kanal se ponaša kao linearni otpornik i zato kažemo da se radi o linearnoj oblasti karakteristika tranzistora. Takve karakteristike prikazane su na Sl. 1.5.8b.

Neka se sada napon na drejnu poveća po apsolutnoj vrednosti (napon na drejnu je negativan). Na

početku, između sorsa i drejna postoji kanal konstantne otpornosti pa struja I_D raste linearno sa porastom V_D . Kako V_D postaje negativnije, potencijal kanala (V), na kraju kanala sa strane drejna, V_{DS} , postaje takođe negativniji i teži da osiromaši p-n spoj drejn-osnova, pa se smanjuje deo električnog polja (usled napona na gejtu) koje je na raspolaganju za održavanje naelektrisanja u kanalu. Dakle imamo dva uticaja: efektivni napon na gejtu $V_{GS}-V_T$ teži da invertuje površinu i tako formira kanal, a potencijal drejna V_{DS} teži da osiromaši površinu i prekine kanal. Ova je situacija ilustrovana na Sl. 1.5.11b. Dakle, za veće napone na drejnu kada je još uvek $V_{DS} < V_{GS}-V_T$, Q_I blizu drejna se smanjuje, provodnost kanala postaje manja pa se karakteristike zakrivljuju i teže da postanu vodoravne.



Sl. 1.5.11 Kanal MOS tranzistora. a) linearna oblast ($V_{DS} \approx 0$), b) omska oblast ($V_{DS} < V_{GS}-V_T$), c) granica (prekid kanala) između omske oblasti i zasićenja, ($V_{DS} = V_{GS}-V_T$) i d) oblast zasićenja sa skraćivanjem kanala ($V_{DS} > V_{GS}-V_T$)

Kada se ispuni uslov $V_{DS} = V_{GS}-V_T$ dolazi do prekida kanala. Naime napon na drejnu dovoljan je da se neutrališe dejstvo efektivnog napona na gejtu. Ova je situacija ilustrovana na Sl. 1.5.11c.

Napon na drejnu može porasti toliko da električno polje u oksidu blizu drejna postane nedovoljno za održavanje i najmanjeg naelektrisanja u invertovanoj oblasti. Sada će kraj kanala sa strane drejna pripadati osiromašenoj oblasti spoja drejn-osnova. Kaže se da se kanal prekida što je ilustrovano na Sl. 1.5.11d. Sada između sorsa i drejna imamo rednu vezu kanala čija je otpornost relativno mala i vrlo veliku otpornost osiromašene oblasti. Od trenutka nastajanja prekida nadalje, celokupni priraštaj napona V_{DS} biva prihvaćen od strane velike otpornosti osiromašene oblasti i zato struja drejna praktično više ne raste. Nastaje naponsko zasićenje. Napon na drejnu koji dovodi do (naponskog) zasićenja obeležava se sa $V_{DS\text{ sat}}$.

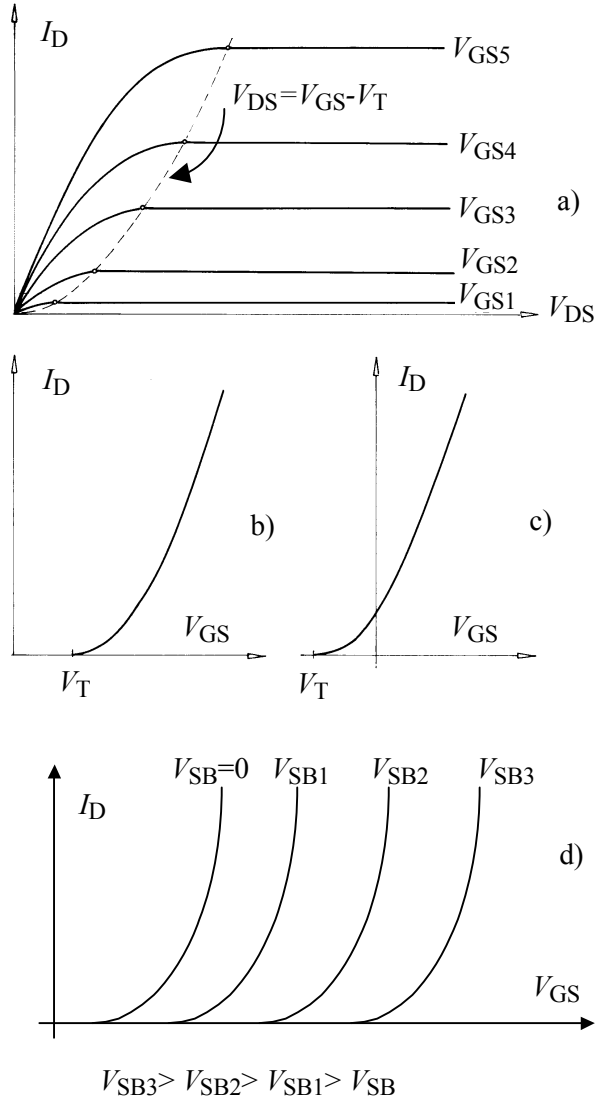
Kada nastane zasićenje struja kroz tranzistor određena je delom kanala od sorsa do prekida. Stoga, pod pretpostavkom da dužina kanala ostaje ista, struja ne zavisi od napona na drejnu pa ostaje konstantna – zasićuje se. Slobodni nosioci u kanalu (šupljine) kreću se driftom pod uticajem električnog polja koje formira napon na drejnu. Kada iz kanala pređu u osiromašenu oblast oko drejna bivaju naglo privučeni na drejn usled velikog električnog polja u ovoj oblasti.

Na osnovu ovih razmatranja možemo da odredimo model MOSFETa za oblast zasićenja. Na granici zasićenja, uz drejn, pokretno naelektrisanje u invertovanoj oblasti je jednako nuli:

$$(1.5.29) \quad Q'_1 = -C'_{ox} (V_G - V_T - V) = 0.$$

U ovom slučaju $V = V_{DS} = V_{DS\text{ sat}}$ pa je

$$(1.5.30a) \quad V_{DS\text{ sat}} = V_{GS} - V_T.$$



Sl. 1.5.12 Računate karakteristike N-kanalnog MOSFET-a. a) izlazne, b) prenosna sa indukovanim kanalom c) prenosna sa ugrađenim kanalom i d) prenosne za različite vrednosti potencijalne razlike između sorsa i osnove

Pri razmatranju ovog izraza treba imati na umu da je V_T (dato sa (1.5.19)) funkcija napona V koji je, u ovom slučaju, jednak potencijalnoj razlici između osnove (podloge) i kanala (koji je stalno vezan za sors) V_{BS} . Ako se, jednostavnosti radi, uzme da je V_T konstantan (kao pri izvođenju (1.5.28)) i napon $V_{DS\text{ sat}}$ iz (1.5.30a) zameni u (1.5.28) dobija se vrednost struje zasićenja:

$$(1.5.31a) \quad I_{Dsat} = A \cdot (V_{GS} - V_T)^2 = \\ = I_{DSS} (1 - V_{GS} / V_T)^2.$$

gde je $A=2 \cdot \beta$ i $I_{DSS}=A \cdot (V_T)^2$.

Na osnovu ove analize dobili smo aproksimaciju prenosne karakteristike MOSFET-a u oblasti zasićenja u istom obliku kao i kod JFET-a. Treba međutim imati na umu da kod MOS tranzistora napon na gejtu treba (po apsolutnoj vrednosti) da bude veći od napona praga da bi proticala struja tako da ne može da se kaže da postoji jednostavna analogija između V_T i V_p . I I_{DSS} nema isto značenje. Da bi se lakše shvatio smisao rečenog na Sl. 1.5.12a prikazane su izlazne, na Sl. 1.5.12b prenosna karakteristika tranzistora sa indukovanim kanalom računane prema (1.5.28) i (1.5.31a), na Sl. 1.5.12.c prenosna karakteristika N-kanalnog MOSFET-a sa ugrađenim kanalom računati prema (1.5.31a).

Na Sl. 1.5.12d, međutim, prikazane su prenosne karakteristike istog tranzistora kada se uzme u račun i uticaj potencijalne razlike između podloge i sorsa na napon praga. Kao što se moglo očekivati, pošto se napon praga povećava saglasno povećanju V_{BS} , prenosna karakteristika se pomera translatorno ka području većih (po apsolutnoj vrednosti) napona na gejtu.

Ova promena napona praga ima značajan uticaj na celokupne karakteristike tranzistora tako da je direktno vezana i sa zakločenjem. Veći napon praga znači da je potreban veći napon na gejtu da bi tranzistor proveo (da bi se otkočio).

Ako se (1.5.31a) reši po naponu VGS dobija se

$$(1.5.31b) \quad V_{GS} = V_T \pm \sqrt{I_D / A}$$

gde se gornji znak uzima za N-kanalni tranzistor, a donji za P-kanalni. Ovaj izraz govori o tome da napon na gejtu može da se posmatra kao da ima dve komponente. Jedna bi formirala kanal, a druga savladava napon na drejnu koji se suprotstavlja formiranju kanala. Tako, posle poređenja sa (1.5.30a) identifikujemo

$$(1.5.30b) \quad V_{DSsat} = \pm \sqrt{I_D / A}.$$

Napomenimo da kao i kod BJTa, izlazna karakteristika pri naponskom zasićenju kod stvarnog MOSFET-a nisu horizontalne. Uzrok tome treba tražiti u sledećem. Širina osiromašene oblasti na spoju drejn-osnova, koja u stvari predstavlja osiromašenu oblast od tačke prekida kanala do drejna, nije konstantna. Ona zavisi od veličine napona na drejnu. Naime, pošto je koncentracija u području drejna mnogo veća od koncentracije u osnovi, praktično, promena širine p-n spoja se odvija na račun osiromašene oblasti u osnovi (kod bipolarnog tranzistora se sužavala baza) odnosno na račun dužine kanala. Ako se dužina kanala smanjuje, a napon na njemu ostaje $V_{DS sat}$, električno polje na njemu je veće pa se nosioci naelektrisanja više ubrzavaju što ima za posledicu povećanje struje drejna. Tako, unutrašnja (izlazna) otpornost MOSFET-a nije beskonačna i iznosi nekoliko desetina kilooma. Stoga se i za karakteristiku MOSFET-a u oblasti zasićenja može pisati izraz sličan onome koji je važio za JFET:

$$(1.5.31c) \quad I_D = A \cdot (V_{GS} - V_T)^2 \cdot (1 + \lambda \cdot V_{DS}).$$

Tipične brojne vrednosti λ kreću se oko 10^{-2} V^{-1} , što znači da je recipročna vrednost λ (napon koji odgovara Early-jevom naponu bipolarnog tranzistora) oko 100 V.

Izvođenje karakteristika MOSFET-a sa ugrađenim kanalom teče slično kao i izvođenje u ovom odeljku. Pri tome pokretno naelektrisanje u kanalu Q_I treba uvećati za konstantu koja je određena površinskom koncentracijom ugrađenog slobodnog naelektrisanja.

Primer 5.16

Za N-kanalni MOSFET poznato je $W/L = 6 \text{ } \mu\text{m} / 1 \text{ } \mu\text{m}$, $V_{T0} = 0.7 \text{ V}$, $k' = \mu_n C_{ox} / 2 = 55 \text{ } \mu\text{A/V}^2$ i $\lambda = 0.04$. Odrediti struju drejna ako je $V_B = V_S = 0 \text{ V}$, $V_D = 3 \text{ V}$ i $V_G = 2 \text{ V}$.

Rešenje:

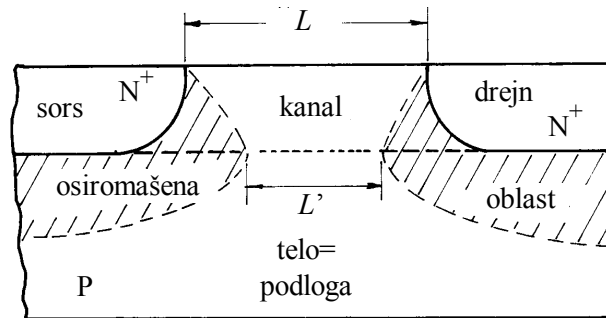
Najpre konstatujemo da podloga ne utiče na veličinu napona praga i da je $V_T=V_{T0}$ pa određujemo oblast rada tranzistora. Pošto je $V_{DSsat}=V_G-V_T=2-0.7=1.3$ V, što je manje od V_D , zaključujemo da tranzistor radi u oblasti zasićenja. Tako iz (1.5.31c) izračunavamo:

$$\begin{aligned}
 I_D &= A \cdot (V_{GS} - V_T)^2 \cdot (1 + \lambda \cdot V_{DS}) = \\
 &= 55 \cdot 10^{-6} \cdot \frac{6 \cdot 10^{-6}}{1 \cdot 10^{-6}} (2 - 0.7)^2 (1 + 0.04 \cdot 3). \\
 &= 0.62 \text{ mA. } \boxed{\checkmark}
 \end{aligned}$$

1.5.3.1 Modeli kratkokanalnih MOS tranzistora

Razvoj tehnologije integriranih kola išao je za tim da se smanjuju dimezije komponenata iz više razloga. Najpre, manje dimezije znače povećanje broja komponenata po jedinici površine što povećava gustinu pakovanja odnosno smanjuje cenu silicijuma po jednom tranzistoru. kratkokanalnih tranzistora. Zatim, smanjenje dimezija dovodi i do smanjenja svih kapacitivnosti što povećava gornju graničnu frekvenciju primene tranzistora. Najzad, kod MOS tranzistora, kontrolom dimezija tranzistora (W ili L) može da se kontroliše i karakteristika tranzistora. Tako, skraćivanjem kanala mogu se dobiti veće struje drejna pri istim priključenim naponima ili, što je isto, ista struja može se dobiti sa manjim naponima.

Ove MOS tranzistore, zato što je kanal kratak, možemo da posmatramo kao komponente kod kojih se struktura sors_osnova_drejn može da smatra bipolarnim tranzistorom čija je baza (osnova) vezana za fiksni potencijal. Struja kolektora (drejna) ovog tranzistora je mala s obzirom da je tranzistor zakočen. Pored ovoga, ili, paralelno sa ovim, između sorsa i drejna u potpunosti ili delimično se formira kanal koji nosi glavnu komponentu struje. Imajući ovo u vidu zaključujemo da kratkokanalni tranzistori imaju neka specifična svojstva pa se zato njima ovde posvećuje posebna pažnja.



Sl. 1.5.13 Uticaj osiromašene oblasti na osiromašenje dela kanala pre inverzije

Razmotrimo najpre uticaj skraćivanja kanala na napon praga MOS tranzistora. Kao što je već ranije rečeno, veličinu napona praga određuje i nepokretno prostorno naelektrisanje Q_B' u kanalu. Uticaj osiromašenih oblasti na sorsu i drejnu je takav da one već formiraju deo ovog naelektrisanja i kada je kanal kratak taj deo nije više zanemariv u odnosu na Q_B' pa se time i smanjuje potrebni napon na gejtu, odnosno napon praga za njegovo formiranje. Sada se može smatrati da kanal (gledan podužno) nema pravougaoni već trapezni oblik kao na Sl. 1.5.13.

Daljim povećanjem napona na drejnu, pre zasićenja, osiromašena oblast na drejnu ima veći uticaj pa se napon praga još smanjuje. Ovde treba napomenuti da pozitivno naelektrisanje u oksidu redukuje napon praga N-kanalnih tranzistora tako da, da bi se imala razumno reproduktivna vrednost napona praga, obično treba da koncentracija na površini tela bude oko 10^{15} cm^{-3} . Ovo se

postize lokalnom implantacijom atoma bora u plitkom površinskom sloju tela.

Kod tranzistora sa kratkim kanalom, pri velikim naponima na drejnu dolazi do pojave zasićenja brzine elektrona u blizini drejna gde je ubrzavajuće polje najveće. Ovo ima za posledicu promenu oblika prenosne karakteristike tranzistora. Naime ako je pokretljivost (da bi brzina bila konstantna) obrnuto proporcionalna električnom polju koje vlada u kanalu: $K = (V_{DS} - V_{GS} + V_T)/L$ onda se može smatrati da je u oblasti zasićenja prenosna karakteristika približno linearna.

$$(1.5.32) \quad I_D = \frac{\epsilon_{ox} W}{2 \cdot t_{ox}} (V_G - V_T).$$

Precizniji izrazi će biti dati kasnije.

Elektroni koji se nalaze u velikom električnom polju ($K > 10^4$ V/cm) dobijaju veću energiju nego što gube prilikom procesa rasejavanja. Stoga se može smatrati kao da imaju veću temperaturu nego što je temperatura kristala: postaju vrući. Takvi elektroni mogu da imaju energiju veću od energije **gornje** granice provodnog opsega odnosno da savladaju barijeru na površini poluprovodnika i da ga napuste. U slučaju MOS-strukture takvi elektroni mogu da prodru u oksid gde bivaju hvatani od pozitivnog naelektrisanja oksida i na taj način formiraju struju gejta, utiču na nestabilnost napona praga i smanjenje strmine tranzistora. Da bi se redukovao ovaj efekt potrebno je da se na pogodan način smanji broj zamki (pozitivnih naelektrisanja) u oksidu što se postiže kaljenjem oksida na oko 400 °C.

U prisustvu napona na drejnu kod kratkokanalnih tranzistora nastaje niz efekata koji značajno utiču na ukupne osobine komponente. Ako je kanal kratak i ako je otpornost osnove velika može se desiti da dođe do preklapanja osiromašenih oblasti sorsa i drejna čak i pri $V_D = 0$. U ovakvoj situaciji moguća su dva mehanizma provođenja struje: usled prisustva kanala i usled prisustva $N^+ - P^- - N^+$ BJTa. Naravno da je ovde od interesa samo ova druga komponenta struje.

Kombinujući

$$(11.5.33) \quad J = -\sigma_n K = qn\mu_n K$$

i Poisson-ovu jednačinu

$$(1.5.34) \quad dK/dy = qn/\epsilon,$$

posle integracije lako dobijamo

$$(1.5.35) \quad -dV/dy = K = \sqrt{2yJ/(\epsilon\mu)}.$$

Ponovnom integracijom uz $V = 0$ za $y = 0$ i $V = V_D$ za $y = L$, i rešavanjem po J dobijamo

$$(1.5.36) \quad J = (9\mu\epsilon V_D^2)/(8L^3).$$

Možemo zaključiti da je dodatna komponenta struje koja se formira na diodi $N^+ - P^- - N^+$ parabolična i podseća na karakteristiku vakuumske triode. Znači da u slučaju preklapanja osiromašenih oblasti sorsa i drejna imamo potpuno novi oblik komponente struje. Ona protiče i u odsustvu kanala tako da za zakočenje tranzistora je potrebno preduzeti posebne mere. To znači da treba telo tranzistora polarisati dovoljno inverzno u odnosu na sors kako bi se onemogućila injekcija iz sorsa.

Do proticanja struje drejna I_{DST} u odsustvu kanala dolazi i kada osiromašene oblasti na drejnu i na sorsu nisu preklapljenе. To je struja glavnih nosilaca osnove komponente. Za N-kanalni tranzistor to je struja šupljina. S obzirom da se radi o struji p-n spoja zavisnost struje I_{DST} od napona je eksponencijalna. Prilikom formiranja kanala dolazi do naglog povećanja površine diode koju čini s jedne strane telo tranzistora kao P anoda i sa druge strane aktivni deo tranzistora (sors-kanal-drejn) kao N katoda. Usled toga naglo raste i I_{DST} . Naravno da je sada ona manja od struje drejna. Njen značaj dolazi do izražaja kada tranzistor treba da bude zakočen (da bi ostala zanemarivo mala potrebno je da napon na gejtu bude bar za 0.5 V manji od napona praga) ili kada

je struja drejna mala (u ovom slučaju o I_{DST} mora da se vodi računa).

O probodu MOS tranzistora je već dosta rečeno. Ovde će biti ukazano na dva efekta koji se nadgrađuju na već pomenute u slučaju kratkih kanala.

Kod N-kanalnog MOS tranzistora sa kratkim kanalom, posle proboda na drejnu dolazi do naglog smanjenja napona i porasta struje slično kao kod bipolarnog tranzistora. Veličina na koju se stabilizuje napon na drejnu V_{DS0} zavisi od napona na gejtu i smanjuje se pri porastu V_G . Ova pojava se vezuje za postojanje parazitne $N^+P^-N^+$ strukture paralelno MOS tranzistoru tako da telo komponente (P) igra ulogu baze bipolarnog tranzistora. Deo struje drejna pri probodu prelazi u podlogu i na otpornosti tela podloge stvara pad napona koji direktno polariše spoj sors-telo što potpuno odgovara situaciji kod bipolarnog tranzistora gde je otpornost tela baze igrala istu ulogu.

Imajući u vidu sve efekte koji su ovde pomenuti, a koji se odnose na tranzistor sa kratkim kanalom možemo zaključiti da je ovakav MOS tranzistor veoma specifična komponenta. Teško je verovati da se karakteristika ovakve komponente može prikazati u zatvorenom obliku. Stoga se koriste analitički izrazi koji potiču od onih koje smo ranije izveli ali sadrže i modifikacije koje se odnose na odgovarajući efekat. Pri tome se uvode empirijske konstante pomoću kojih se ponderišu svaki efekat. U daljem tekstu će biti dat primer takvog modela MOS tranzistora.

Ranije prikazani model MOS tranzistora (jed. (1.5.26)) koji nije vodio računa o skraćivanju kanala i o pojavama u kratkim kanalima može da se ponovo iskaže kao:

$$(1.5.37) \quad I_D = \beta \cdot [2(V_{GS} - V_T) \cdot V_{DS} - V_{DS}^2],$$

za omsku oblast, i

$$(1.5.38) \quad I_{D \text{ zas}} = \beta \cdot (V_{GS} - V_T)^2$$

za oblast zasićenja, gde je

$$(1.5.39a) \quad \beta = A = \frac{\mu C'_{ox}}{2} \frac{W}{L} = k' \cdot \frac{W}{L},$$

$$(1.5.39b) \quad k' = \mu C'_{ox} / 2,$$

$$(1.5.40) \quad V_T = V_{T0} + B \cdot (\sqrt{V_{SB} + 2\Phi_f} - \sqrt{2\Phi_f})$$

$$(1.5.41) \quad \Phi_f = \frac{kT}{q} \cdot \ln(N_A / n_i),$$

$$(1.5.42) \quad B = \sqrt{2q\epsilon N_A} / C'_{ox}$$

i

$$(1.5.43) \quad V_{T0} = \Phi_{MS} + \Phi_B + Q'_{ox} / C'_{ox}.$$

Φ_{MS} je dato sa (1.5.11), Φ_B sa (1.6.8), a V_{SB} je potencijalna razlika između sorsa i osnove.

Kada se radi sa kratkokanalnim tranzistorom, modifikovani model za omsku oblast bio bi

$$(1.5.44a) \quad I_D = \frac{\alpha' \cdot A \cdot [2(V_{GS} - V_T)V_{DS} - \alpha' \cdot V_{DS}^2]}{1 + \theta \cdot (V_{GS} - V_T)}$$

pri $V_{DS} \leq (V_{GS} - V_T) / \alpha'$,

a za zasićenje

$$(1.5.44b) \quad I_{D \text{ sat}} = \frac{A \cdot (V_{GS} - V_T)^2 [1 + \lambda(\alpha'/\alpha')^2 V'_{DS}]}{1 + \theta \cdot (V_{GS} - V_T)}$$

pri $V_{DS} > (V_{GS} - V_T) / \alpha'$,

gde je

$$(1.5.45a) \quad V_{D \text{ sat}} = (V_{GS} - V_T) / \alpha'$$

$$(1.5.45b) \quad V'_{DS} = V_{DS} - V_{D \text{ sat}}$$

$$(1.5.46) \quad \alpha' = \alpha + \gamma \cdot (V_{GS} - V_T)$$

i

$$(1.5.47) \quad V_T = V_{T0} + B \cdot [\sqrt{V_{SB} + 2\Phi_f} - \sqrt{2\Phi_f}] - D \cdot \sqrt{V_{DS}}$$

Ovde su uvedene nove empirijske konstante α , γ , λ , θ i D koji se nazivaju parametrima kratkokanalnog tranzistora.

1.5.3.2 Model MOSFETa u podpragovskoj oblasti

Pre nego što zaključimo razmatranja o karakteristikama MOS tranzistora treba se osvrnuti još na jednu činjenicu. Naime, prilikom razmatranja napona praga konstatovano je da će do formiranja kanala doći ako se površina invertuje. Pri tome je postavljen značajan uslov da se smatra da je površina invertovana samo ako je **jako** invertovana. Postavlja se pitanje da li protiče struja drejna i za napone na gejtju čija je vrednost manja od napona praga odnosno za koje je površina invertovana ali nije jako invertovana. Odgovor je: da! Režim rada tranzistora u ovom slučaju je podpragovski ili predpragovski.

Struja drejna u ovim uslovima rada modeluje se eksponencijalnom funkcijom kao

$$(1.5.48) \quad I_D = I_{D0} \cdot \frac{W}{L} \cdot \exp\left(\frac{V_{GS}}{n \cdot kT/q}\right),$$

gde su uvedena dva empirijska parametra n i I_{D0} koji se obično, za datu tehnologiju, određuju merenjem. Vrednost n kreće se između 1 i 3.

Pri primeni ovog izraza treba imati na umu da između područja slabe inverzije koje je modelovano sa (1.5.48) i područja jake inverzije koje je modelovano sa (1.5.31) odnosno (1.5.38), postoji prelazno područje čije modelovanje nije tako jednostavno.

Inače, rad MOSFETa u uslovima slabe inverzije od velikog je značaja sa stanovišta minimizacije potrošnje u pojačavačkim elektronskim kolima.

1.5.4 Parametri MOSFET-a

Najvažniji statički parametar MOS tranzistora je napon praga. Mada zavisi od priključenih napona, napon praga može se smatrati parametrom jer je obično sors vezan za podlogu tako da je V_T praktično konstantan.

Često se u literaturi kao parametar iskazuje i veličina:

$$(1.5.49) \quad \beta = A = \frac{\mu}{2} C'_{ox} \frac{W}{L},$$

koja predstavlja (pri datom V_T) meru veličine struje drejna. Naime, kao što smo videli ranije pri datoj tehnologiji (materijal gejtja, debljina oksida, koncentracija u osnovi, naelektrisanja u oksidu, dielektrična konstanta oksida) projektantu tranzistora ostaju na raspolaganju samo dimenzije za definiciju osobina komponente. Promenom odnosa W/L može se uvećati ili smanjivati struja pri istom naponu na gejtju. Povećanjem L povećava se i otpornost kanala pa pri istom naponu dobijamo manju struju i obrnuto. Povećanjem W smanjuje se otpornost kanala pa se struja povećava. Pri tome treba imati na umu da se povećanjem proizvoda W i L povećala ukupna kapacitivnost gejtja tako da za minimizaciju kapacitivnosti i maksimizaciju struje treba tražiti odgovarajući optimum. Kao što ćemo kasnije videti povećanje površine gejtja vodi ka smanjenju šumova MOS tranzistora tako da se ovde mogu tražiti drugi optimumi.

Dinamički parametri MOSFET-a definišu se na isti način kao i kod JFET-a. Suštinska razlika u odnosu na JFET odnosi se na potrebu da se iskaže uticaj potencijala osnove na struju drejna. Naime, u izrazu za struju drejna datom sa (1.5.26) svi su naponi iskazani u odnosu na potencijal podloge.

To znači i da V_S u stvari predstavlja V_{SB} , napon između podloge i sorsa. Ako podloga i sors nisu kratko spojeni promena ove potencijalne razlike imaće za posledicu i promenu struje. Mera odnosa tih promena je strmina definisana u odnosu na podlogu

$$(1.5.52b) \quad S_B = \partial I_D / \partial V_{BS}.$$

Veličina strmine $S = \partial I_D / \partial V_{GS}$, je istog reda kao kod JFET-a, a unutrašnja otpornost je znatno manja i reda je desetina kilooma. Ulazna otpornost, međutim, zbog izolovanog gejta vrlo je velika i dostiže 10^{10} - $10^{12} \Omega$.

Kao i kod JFET-a, za strminu MOSFET-a možemo izvesti izraz:

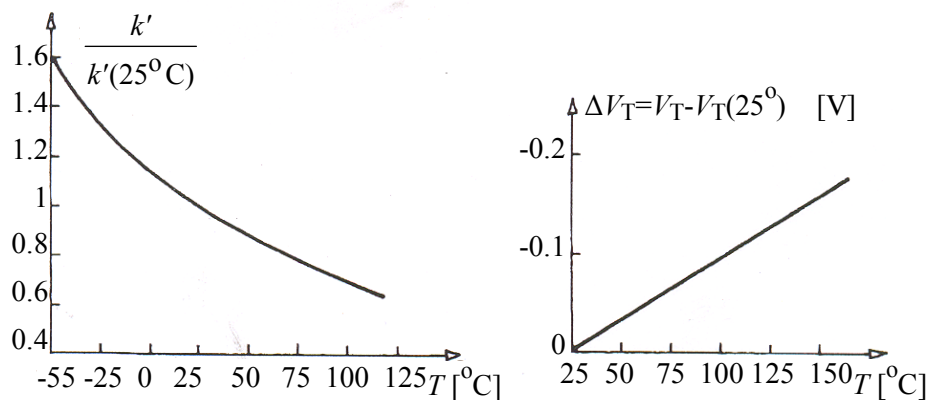
$$(1.5.50a) \quad S = \frac{\partial I_D}{\partial V_{GS}} = \frac{\mu C'_{ox} W}{L} (V_G - V_T) = \\ = 2\beta(V_G - V_T) = 2\sqrt{\beta} \cdot \sqrt{I_D}$$

koji se dobija diferenciranjem (1.5.31a) po V_G . I ovde, za P-kanalni tranzistor, dobijamo negativni znak za strminu s obzirom na izostavljeni znak za negativnu struju. U (1.5.50a) treba uzeti apsolutnu vrednost. Slično, za unutrašnju otpornost imamo

$$(1.5.50b) \quad R_i = \frac{\partial V_{DS}}{\partial I_D} = 1 / \left(\frac{\partial I_D}{\partial V_{DS}} \right) = \\ = \frac{(1 + \lambda V_{DS})}{\lambda_D} \approx \frac{1}{\lambda_D}.$$

Kao i kod svih ostalih poluprovodničkih komponenata i kod MOSFET-a struja zavisi od temperature. I ovde se sa porastom temperature ostvaruju dve tendencije. Najpre, sa porastom temperature opada pokretljivost nosilaca u kanalu što ima za posledicu smanjenje struje. S druge strane, s porastom temperature opada napon praga (oko 40 mV/K) što ima za posledicu povećanje struje. Napon praga opada najvećim delom zbog povećane koncentracije sporednih nosilaca u podlozi pri povećanoj temperaturi. Pri normalnoj polarizaciji, kada napon na gejtu nije suviše blizu napona praga, dominantan uticaj ima pokretljivost tako da se može reći da struja drejna MOS tranzistora ima negativan temperaturski koeficijent. Za prikazivanje temperaturskih osobina MOSFET-a obično se koristi veličina:

$$(1.5.54) \quad k' = \frac{\mu}{2} C'_{ox}.$$



Sl. 1.5.14 Temperaturske osobine MOS tranzistora. a) zavisnost faktora provodnosti i b) zavisnost napona praga.

Ova veličina naziva se faktorom provodnosti. Na Sl. 1.5.14a prikazana je normalizovana zavisnost k' od temperature pri čemu je kao nominalna temperatura uzeta $T=25^\circ\text{C}$. Promena k' sa

temperaturom je uglavnom posledica smanjenja pokretljivosti slobodnih nosilaca u kanalu pri porastu temperature. Zavisnost priraštaja napona praga od temperature prikazana je na Sl. 1.5.14b. Imajući u vidu da je ΔV_T znatno manje od V_G u (1.5.50) zaključujemo da promena V_T praktično ne utiče na promenu strmine tako da je temperaturska zavisnost strmine određena temperaturskom zavisnosti k' i da Sl. 1.5.14a daje istovremeno i zavisnost strmine od temperature.

1.5.5 Aktivna oblast rada MOSFET-a

Kao i kod ostalih tipova poluprovodničkih komponenata najvažnije ograničenje u radu MOSFET-a je maksimalna snaga disipacije na drejnu. Prekoračenje ove snage dovodi do prekoračenja maksimalne temperature što može katastrofalno da utiče na osobine tranzistora. Ako se ne preduzmu posebne mere zbog relativno male površine poprečnog preseka kanala, struja MOSFET-a je mala tako da je MOSFET komponenta male snage i obično ovo ograničenje nije kritično. Fenomen sekundarnog proboja se ne ispoljava.

Minimalna struja je jednaka nuli i nastaje kada je napon na gejtu manji od napona praga. Ovdje treba imati na umu da se kanal uspostavlja, odnosno da se površina invertuje, postepeno tako da i pri naponima koji su nešto manji od napona praga već protiče struja drejna doduše vrlo mala. Pored toga, MOS tranzistor u uslovima kada kanal nije formiran, može da se posmatra kao PNP odnosno NPN struktura čiju bazu čini podloga, a sorsa i drejn čine emitor i kolektor, respektivno. Pri normalnoj polarizaciji MOS tranzistora, između sorsa i drejna protiče I_{CE0} koja je mala s obzirom da je područje baze relativno veliko.

Maksimalna struja je ograničena slično kao i kod JFET-a.

Maksimalni napon na drejnu je određen probijem p-n spoja između drejna i podloge. Radi se o lavinskom probiju inverzno polarisanog p-n spoja. Veličina napona zavisi od koncentracija sa obe strane spoja i meri se desetinama volti.

Minimalni napon na drejnu je određen prelaskom u omsku oblast što se može sagledati sa Sl. 1.5.12a. Kada napon između drejna i sorsa opadne ispod vrednosti $V_{DS}=V_{GS}-V_T$ (za N-kanalni tranzistor) onda pri istim priraštajima V_{GS} dobijamo sve manje priraštaje struje i stoga ovo područje ne pripada aktivnoj oblasti rada tranzistora. Kao što se može videti sa Sl. 1.5.6 minimalni naponi dostižu vrednosti od čak nekoliko volta.

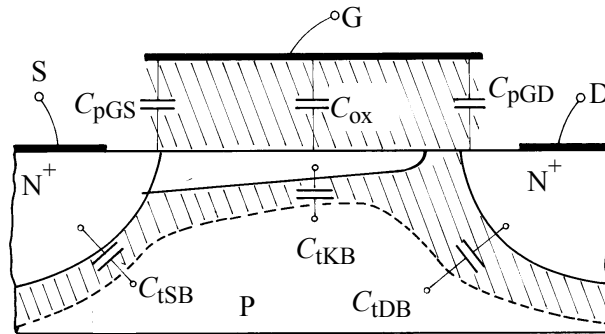
Time je praktično opisana aktivna oblast rada MOSFET-a koja ima isti oblik kao i aktivna oblast rada BJTa sa Sl. 1.3.19. Ovaj tranzistor, međutim, ima još jedno ograničenje o kome treba voditi računa. Naime, zbog male debljine oksida, i pri relativno malim naponima na gejtu, u oksidu mogu da se stvore vrlo velika električna polja i da nastane elektrostatički probij. Na primer za $t_{ox}=10^{-7}$ m i $V=100$ V dobijamo fantastičnih 10^9 V/m što naravno izaziva probij. U tom slučaju komponenta se oštećuje trajno. Zanimljivo je da se pri ovim naponima na gejtu nalazi relativno malo naelektrisanje, zbog male kapacitivnosti oksida, a da se ovo naelektrisanje može stvoriti prilikom rukovanja sa tranzistorom ako gejt nije uzemljen. Stoga kada je MOS tranzistor proizveden kao diskretna komponenta, rukovalac i alat bivaju obavezno uzemljeni za sve vreme rada. U slučajevima kada nije najznačajnije očuvati vrlo veliku ulaznu otpornost MOSFET-a, prilikom izrade tranzistora, paralelno, između gejta i sorsa vezuje se Zener-dioda koja je inverzno polarisana pri normalnoj polarizaciji MOSFET-a. Napon proboja diode se bira tako da pre probije dioda nego gejt. Pošto je proces proboja diode reverzibilan gejt je zaštićen. Za uzvrat, sada između gejta i sorsa pre proboja, pri normalnom radu, protiče inverzna struja diode što znači da je ulazna otpornost tranzistora redukovana. Kod MOS digitalnih integrisanih kola srećemo neznatno modifikovanu zaštitu od elektrostatičkog proboja.

Najzad pomenimo da spoj drejn - osnova mora uvek biti inverzno polarisan kako se tranzistor ne bi ponašao kao dioda.

1.5.6 Kapacitivnosti MOSFET-a

MOSFET je kompleksna komponenta tako da se u njemu formiraju više kapacitivnosti čija je priroda različita. Ilustracija ovih kapacitivnosti data je na Sl. 1.5.17. Kapacitivnost C_{ox} je kapacitivnost oksida. Kao što smo ranije videli ona je nelinearna, odnosno naglo menja svoju vrednost pri formiranju kanala što je prikazano na Sl. 1.5.2. U linearnim kolima, kada postoji stalna polarizacija gejta, a promenljiva komponenta signala je mala u odnosu na polarizacionu, može se smatrati da je ova kapacitivnost konstantna. U digitalnim i impulsnim kolima kada se tranzistor vodi iz zakočenja u omsku oblast preko aktivne oblasti (zasićenja) kapacitivnost menja svoju vrednost. Na Sl. 1.5.17 prikazana je situacija kada je tranzistor zasićen pa se vidi da se najveći deo ove kapacitivnosti preko provodnog kanala vezuje za sors.

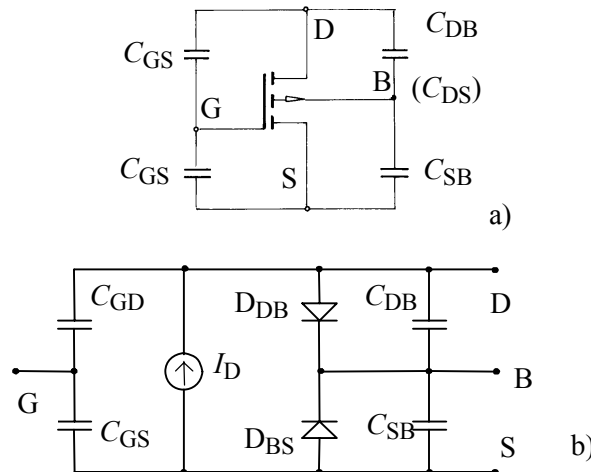
Pored kapacitivnosti oksida između gejta i sorsa i između gejta i drejna deluju kapacitivnosti preklapanja. Naime, da bi bili sigurni da će metal gejta pokriti ceo kanal on je proširen na obe strane tako da delimično pokriva sors i drejn. Na taj način se formiraju dve vrlo male kapacitivnosti koje su obeležene slovom "p" od "preklapanja".



Sl. 1.5.17 Kapacitivnosti MOSFET-a u režimu zasićenja

MOS tranzistor ima dva stalna p-n spoja i dve odgovarajuće kapacitivnosti. S obzirom da su p-n spojevi uvek inverzno polarisani radi se o kapacitivnosti prostornog naelektrisanja spoja sorsa i osnove (C_{tSB}) i spoja drejna i osnove (C_{tDB}). Ove kapacitivnosti su naravno nelinearne i kada postoji i naizmjenična komponenta napona na drejnu (ili sorsu) one menjaju svoju vrednost saglasno promeni signala

Najzad, kada se formira kanal, formira se osiromašena oblast između kanala i osnove, a time i kapacitivnost prostornog naelektrisanja C_{tKB} .



Sl. 1.5.18 a) Ekvivalentne kapacitivnosti MOSFET-a, b) model P-kanalnog MOSFET-a za velike

signale

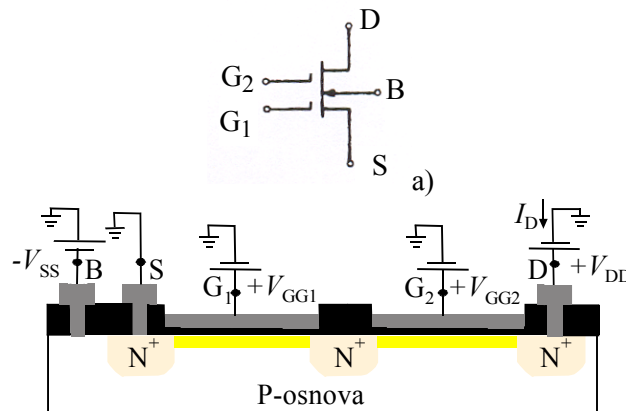
Na Sl. 1.5.18a prikazan je MOSFET gledan kao komponenta sa svojim kapacitivnostima. Ove kapacitivnosti sadrže u sebi one sa Sl. 1.5.17. C_{GS} u najvećoj meri sastoji se od C_{ox} , a sadrži i C_{pGS} . C_{GD} u najvećoj meri se sastoji od C_{pGD} , a kada je tranzistor polarisan u omskoj oblasti, kada kanal nije prekinut, sadrži i deo C_{ox} . C_{DB} je u stvari C_{tDB} (kada je tranzistor polarisan u omskoj oblasti, kada kanal nije prekinut, sadrži i deo C_{tKB}), a C_{SB} sadrži C_{tSB} i C_{tKB} .

Nije teško zaključiti da je C_{SB} u stvari najveća kapacitivnost u tranzistoru zato što obuhvata i spoj sors-osnova i spoj kanal-osnova. To je najvažniji razlog zašto se sors obično vezuje za podlogu. Kada je sors vezan za osnovu ova kapacitivnost nestaje, a C_{DB} postaje C_{DS} . Za razliku od JFET-a ovde imamo neizbežnu i relativno veliku kapacitivnost između drejna i sorsa.

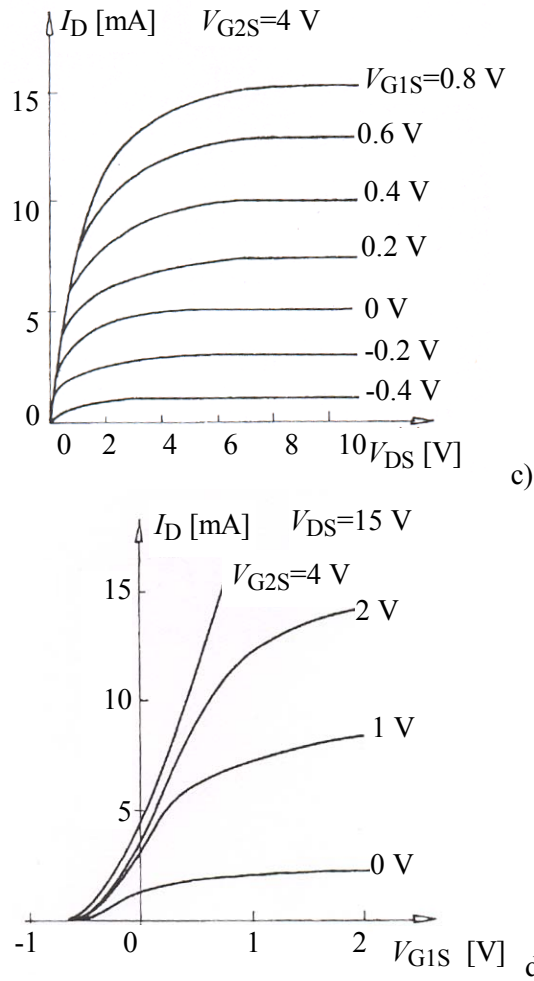
Integrirani MOS tranzistori imaju male kapacitivnosti. Razlog tome su male površine tranzistora koje su određene dužinom kanala (L), širinom kanala (W) i "dužinama" sorsa (L_S) i drejna (L_D) kao na Sl. 1.5.5. Tako, kao tipične mogu se uzeti sledeći brojevi: $C_{GS}=5$ fF, $C_{GD}=10$ fF, $C_{DB}=30$ fF i $C_{SB}=50$ fF. Kod diskretnih tranzistora kapacitivnosti MOSFET-a su reda pikofarada s tim što je najveća C_{DS} , a najmanja C_{GD} . Zbog relativno velikih kapacitivnosti, naročito kod tranzistora sa velikom širinom kanala kada se uvećava površina sorsa i drejna, gornja granična frekvencija primene MOS tranzistora kao diskretnih komponentata niža je nego kod bipolarnih.

Imajući u vidu i kapacitivnosti moguće je konstruisati električnu šemu modela MOS tranzistora za velike signale. Za P-kanalni tranzistor takva šema je prikazana na Sl. 1.5.18b. Kao što se vidi, u odnosu na Sl. 1.5.18a, simbol za tranzistor zamenjen otpornim delom modela MOSFETa koji se sastoji od strujnog izvora I_D (prirodni smer struje) od sorsa do drejna i dveju dioda D_{BS} i D_{BD} koje predstavljaju spojeve podloge sa sorsom i drejnom, respektivno. Ova šema je ekvivalentna električnoj šemi Ebers-Moll-ovog modela sa Sl. 1.3.8. Ona može biti proširivana otpornostima tela drejna i sorsa na način kako je to učinjeno na Sl. 1.3.9 za bipolarni tranzistor.

1.5.7 MOSFET sa dva gejta



b)



Sl. 1.5.19 a) MOSFET sa dva gejta, b) simbol, c) izlazne karakteristike i d) prenosna karakteristika

Kao što je ranije pomenuto od velikog uticaja na ponašanje komponente na visokim frekvencijama je kapacitivnost između izlaznog (D) i ulaznog priključka (G) tranzistora. Razlog ovome je činjenica da ova kapacitivnost stvara povratni put signalu od izlaza ka ulazu. Redukcijom ove kapacitivnosti uvećava se gornja granična frekvencija primene date komponente.

U slučaju MOS tranzistora to se postiže tako što se drejn udalji od gejta. Da bi se stvorili uslovi da struja i dalje protiče, obezbeđuje se provodni put između kanala i drejna tako što se uvodi nastavak kanala.

Formiranje ovog drugog kanala, međutim, kontroliše nova dodatna metalizacija - drugi gejt. Tako nastaje MOSFET sa dva gejta prikazan na Sl. 1.5.19a. Prvi i drugi kanal su povezani jednom N^+ oblašću. Gejt 2 je na fiksnom potencijalu, a na Gejt 1 pored polarizacije dovodi se i signal koji se pojačava. Na ovaj način Gejt 1 i drejn su razdvojeni tako da C_{G1D} postaje vrlo mala, reda od 0.005 do 0.02 pF. Shematski simbol MOSFET-a sa dva gejta prikazan je na Sl. 1.5.19b. Radi se o tranzistoru sa ugrađenim kanalom. Najzad, na slikama 1.5.19c i 1.5.19d prikazane su karakteristike jednog MOSFET-a sa dva gejta. Kao što se vidi izlazne karakteristike se snimaju za fiksnu (najpogodniju) vrednost potencijala drugog gejta koji je ovde obeležen sa V_{G2S} . Prenosne karakteristike se snimaju za fiksnu vrednost potencijala drejna, kao i kod svih FET-ova, ali se razlikuju za različite vrednosti potencijala drugog gejta. Imajući to u vidu struja drejna može da se smatra izrazitom funkcijom potencijala oba gejta i ponekad ova komponenta biva upotrebljena na taj način.