

Capitolul IV. MODELE SPICE ALE TRANZISTOARELOR MOS

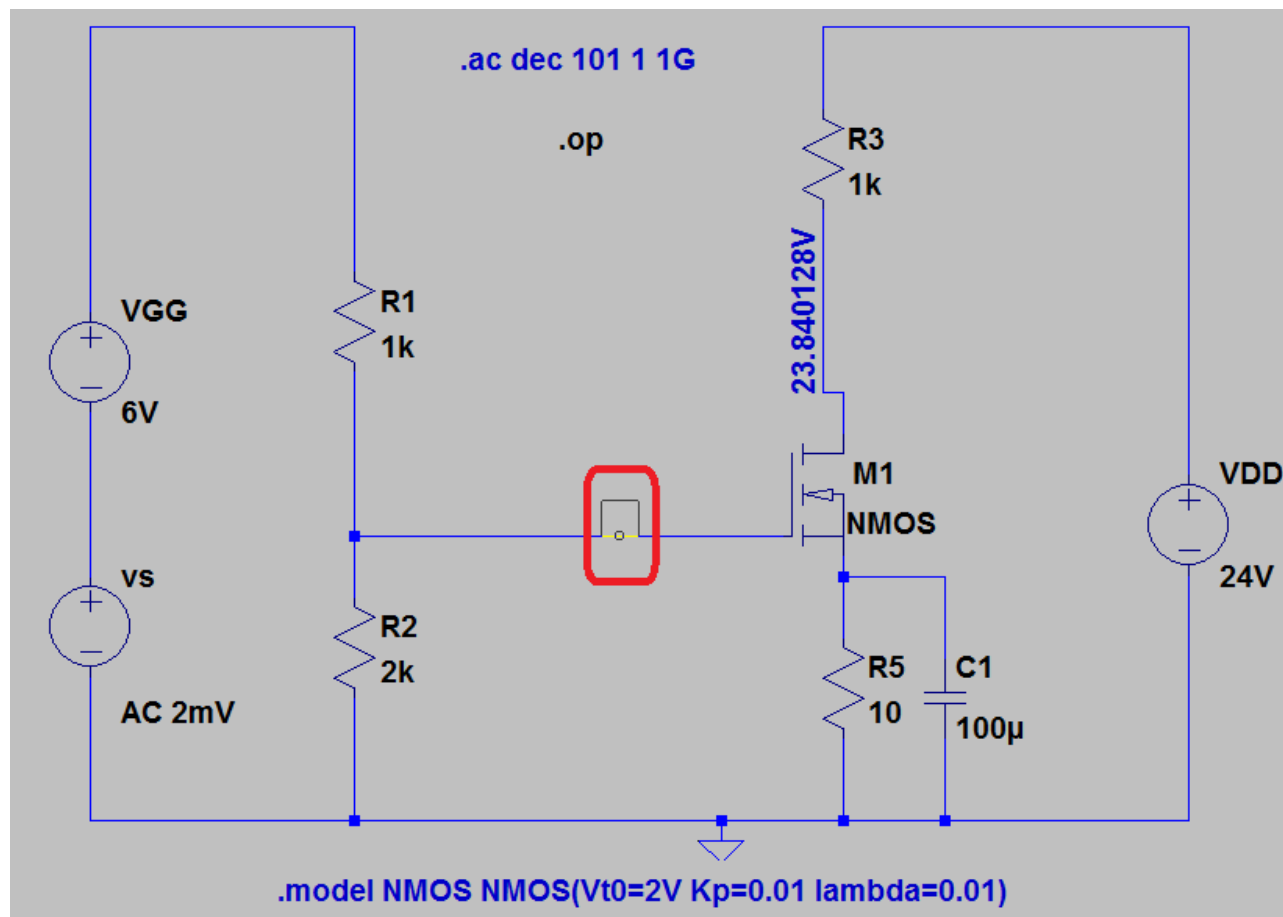
4.1. DESCRIEREA UNUI TRANZISTOR MOS ÎN SPICE

4.1. continuare

- Forma generală de declarare a unui tranzistor MOS într-o linie de program SPICE este:
- $Mnume$ drena grila sursa substrat $MODEL_nume$ $\langle area \rangle$
 $\langle OFF \rangle$ $\langle ID=V_{DS0}, V_{GS0}, V_{BS0} \rangle$
- $.MODEL MODEL_nume$ NMOS/PMOS($V_{T0}=2$ $KP= \dots$)
- Dacă linia de program începe cu litera “M”, programul înțelege că urmează descrierea unui tranzistor MOS.
- Fără “spațiu” urmează numele format din maxim 7 caractere. Nodurile drenă, grilă, sursă, substrat, exact în această ordine.

- Factorul de scală <area>, implicit egal cu 1, este un egal cu numărul de tranzistoare identice, conectate în paralel.
- Cuvântul cheie <OFF>, dacă apare, inițializează tranzistorul în regim de blocare (toate tensiunile =0); în caz contrar tranzistorul este inițializat la limita de conductie, având pentru soluțiile de curent continuu la $V_{GS} = V_{T0}$, $V_{DS}=0V$, $V_{BS} = -1V$.
- *MODEL_ nume* este numele modelului care specifică între paranteze parametrii pentru acest tranzistor. Apoi trebuie precizat tipul tranzistorului : cu canal n sau p.

- Un exemplu pentru definirea tranzistorului MOS:
- M1 2 1 5 MOD1
- .MODEL MOD1 NMOS(VT0=2 Kp=0.01 lambda=0.01)



4.2. Modelarea regimului static a TMOS

- **Modelul complet al tensiunii de prag**

$$V_T = V_{T0} + \gamma \left(\sqrt{2\phi_F + |V_{BS}|} - \sqrt{2\phi_F} \right)$$

- Unde V_{T0} este V_T cand $V_B = V_S = 0V$ si este:

$$V_{T0} = 2\phi_F + V_{FB} + \gamma \sqrt{2\phi_F}$$

- Cazuri particulare: (a) $V_B = V_S$ dar nenule

$$V_T = 2\phi_F + V_S + V_{FB} + \gamma \sqrt{2\phi_F + V_S}$$

- (b) $V_B = V_S$ plus modelul simplificat ($\gamma = 0$)

$$V_T = 2\phi_F + V_S + V_{FB}$$

4.2.1 Modele integrale ale caracteristicilor statice

Date initiale:

- Tratatam un tranzistor MOS cu canal n indus in conductie;
- Datele constructive sunt:
- N_A - doparea substratului,
- x_{ox} - grosimea oxidului,
- L - lungimea canalului pe direcția Oy ,
- W - lățimea canalului pe direcția Oz ,
- x_C - grosimea canalului pe direcția Ox ,
- μ_n - mobilitatea electronilor din canal,
- $C_{ox} = \epsilon_{ox}/x_{ox}$ - capacitatea specifică pe unitatea de arie a oxidului de poartă;
- substratul este referință de potențial.

- *Legea lui Ohm* scrisă pe o porțiune de lungime infinitezimală, dy , din canal, la o coordonată oarecare x , de rezistența dR :

$$dV = I_D \cdot dR = I_D \frac{dy}{\sigma_m(y) \cdot W \cdot x_c}$$

unde σ_m - este *conductivitatea medie din canal pe Ox*.

- Media de-a lungul axei Ox cu teorema de medie:

$$\overline{\sigma_m(y)} = \frac{1}{x_c} \cdot \int_0^{x_c} \sigma(x, y) dx = \frac{q \cdot \mu_n}{x_c} \cdot \int_0^{x_c} n(x, y) dx$$

- Se introduce noțiunea de *sarcină specifică* (pe unitatea de arie, arie considerată pe direcțiile Ox și Oz), la coordonata y , $Q_n(y)$, a electronilor din canal:

$$Q_n(y) = -q \cdot \int_0^{x_c} n(x, y) dx$$

Se poate exprima conductivitatea medie în funcție de densitatea specifică a electronilor din canal, Q_n :

$$\overline{\sigma_m}(y) = -\frac{Q_n(y) \cdot \mu_n}{x_c}$$

în condiții de prag, potențialul suprafeței semiconductorului, la coordonata este:

$$(*) \quad \phi_S(y) = 2\phi_F + V(y)$$

după înlocuirea conductivității medii:

$$I_D dy = -W\mu_n Q_n(V(y), V_G) dV$$

Făcând schimbarea de variabilă $V(y)=V$, avem o ecuație diferențială cu variabile separate. Se integrează în membrul stâng de la $y=0$ la $y=L$, iar în membrul drept de la $V(0)=V_S$ la $V(L)=V_D$

- Avem dupa separari – **expresia integrala**:

$$I_D = -\frac{W}{L} \mu_n \int_{V_S}^{V_D} Q_n(V, V_G) dV = -\frac{W}{L} \mu_n C_{ox} \int_{V_S}^{V_D} \frac{Q_n(V, V_G)}{C_{ox}} dV$$

- Notând cu $F(V, V_G)$ o primitivă a funcției $Q_n(V, V_G)/C_{ox}$, se obține **expresia cu Primitiva** a curentului de drenă:

$$I_D = \beta [F(V_S, V_G) - F(V_D, V_G)]$$

- Parametri Spice: $K = \text{Kappa}; W/L$ $K = \mu_n C_{ox}$

$$\beta = KW / L$$

4.2.2. Modelul Ihantola-Moll

- Modelul Ihantola-Moll = model de inversie puternică.
- “modele peste prag” în care se neglijează complet curenții sub prag, adică se presupune $I_D=0$ pentru $V_G < V_T$.
- Pt $V_G > V_T$ se scrie tensiunea de poartă, cu (*):

$$(1) \quad V_G = V_{FB} + V_{ox} + \phi_S = V_{FB} + V_{ox} + 2\phi_F + V(y)$$

- Scriem legea fluxului electric prin suprafață Σ ce include sarcina totală $Q_{RSS} + Q_n$ -> câmpul în oxid în *inversie puternică*:

$$E_{ox}(y) = \frac{-Q_{RSS} + Q_n}{\epsilon_{ox}} = \frac{qN_A}{\epsilon_{ox}} x_d - \frac{Q_n(V(y))}{\epsilon_{ox}}$$

- Din E_{ox} aflăm tensiunea V_{ox} prin înmulțire cu grosimea oxidului:

$$V_{ox} = \frac{qN_A x_d x_{ox}}{\epsilon_{ox}} - \frac{Q_n(V(y))}{C_{ox}}$$

Distanța x_d se înlocuiește în funcție de potențialul suprafeței ϕ_s

Apoi $\gamma = \frac{\sqrt{2qN_A \epsilon_{Si}}}{C_{ox}}$ și ϕ_s se înlocuiește cu (*)

$$x_d = \sqrt{\frac{2\epsilon_{Si}}{qN_A} \phi_s}$$

$$(2) \quad V_{ox} = \gamma \sqrt{2\phi_F + V(y)} - \frac{Q_n(V(y))}{C_{ox}}$$

Se înlocuiește (2) în (1) pt a extrage $Q_n(V(y))$ și $V(y)=V$:

$$\frac{Q_n(V(y))}{C_{ox}} = -V_G + V_{FB} + 2\phi_F + V(y) + \gamma \sqrt{2\phi_F + V(y)}$$

- Primitiva acestei funcții de variabilă V se notează cu:

$$F(V, V_G) = \frac{1}{2} \left[(V_G - V_{FB} - 2\phi_F - V)^2 + \frac{4\gamma}{3} (2\phi_F + V)^{3/2} \right]$$

Cu ajutorul acestei primitive se poate exprima curentul de drenă:

$$(3) \quad I_D = \frac{W}{L} \frac{K}{2} \left[(V_G - V_{FB} - 2\phi_F - V_S)^2 - (V_G - V_{FB} - 2\phi_F - V_D)^2 + \frac{4\gamma}{3} (2\phi_F + V_S)^{3/2} - \frac{4\gamma}{3} (2\phi_F + V_D)^{3/2} \right]$$

Valabilitate: *pentru* $V_G > V_T$ și $0 < V_S < V_D < V_{Dsat}$

Relația (3), alături de $I_D = 0$ pentru $V_G < V_T$, reprezintă *modelul Iantola-Moll pentru tranzistorul MOS*.

4.2.3. Modelul simplificat (patratic sau parabolic)

- neglijează sarcina electrică a ionilor din regiunea de sarcină spațială $\sim Q_{RSS} = 0 \sim \gamma = 0$

$$Q_{RSS} = qN_A x_d = \gamma \sqrt{\phi_S} \cdot \epsilon_{ox}$$

- Atunci se face $\gamma = 0$ in (3):

$$I_D = \frac{W}{L} \frac{K}{2} [(V_G - V_{FB} - 2\phi_F - V_S)^2 - (V_G - V_{FB} - 2\phi_F - V_D)^2]$$

- Dar pt $\gamma = 0$ aveam modelul lui V_T – caz part (b):

$$V_T = 2\phi_F + V_S + V_{FB}$$

- Dupa inlocuiri rezulta:

$$(4) \quad I_D = \frac{W}{L} K [(V_G - V_T)(V_D - V_S) - (V_D - V_S)^2 / 2]$$

- Modelul (4) reprezintă **modelul simplificat** în regim **cvasiliniar**, adică la $V_G > V_T$ și $0 < V_S < V_D < V_{Dsat}$.
- Tensiunea de saturație se calculează din:

$$\left. \frac{\partial I_D}{\partial V_D} \right|_{V_D = V_{Dsat}} = 0$$

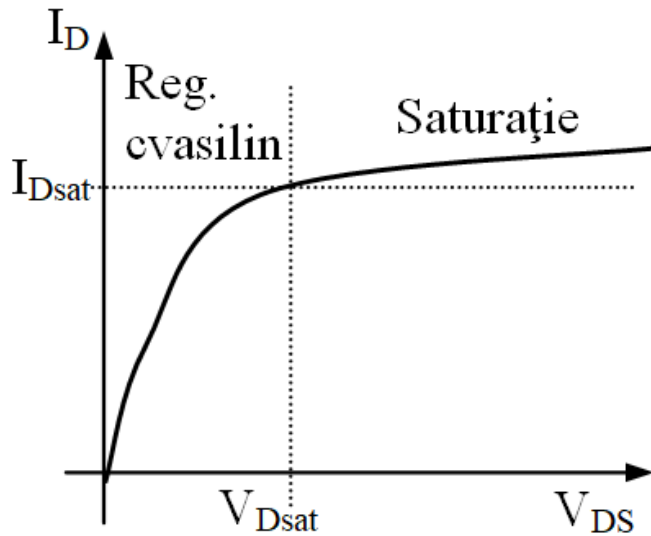
- Da: $V_{Dsat} = V_G - V_S - V_T = V_{GS} - V_T$
- Curentul in sat, cu valoarea V_{Dsat} anter in (4) da:

$$I_D = I_{Dsat} = \frac{W}{L} \frac{K}{2} (V_{GS} - V_T)^2$$

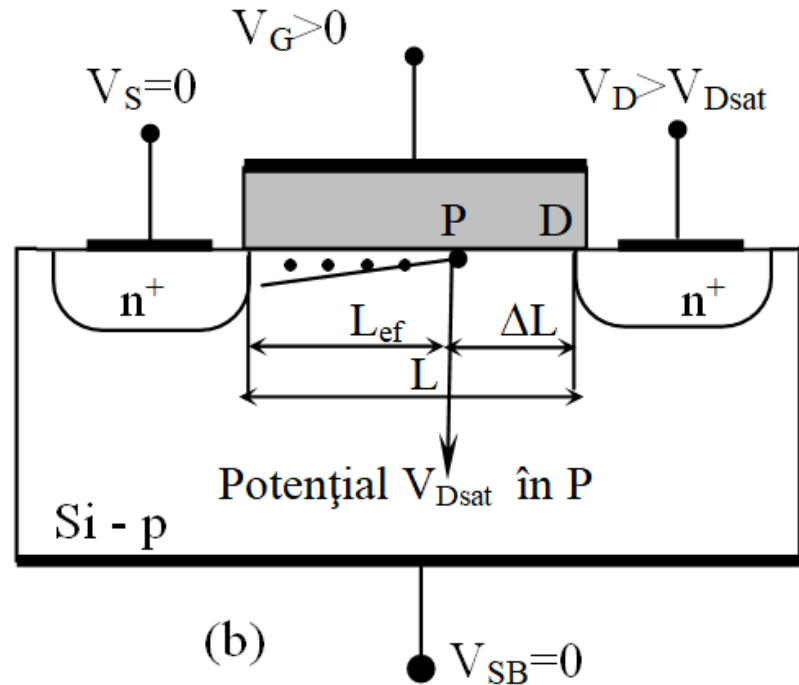
Care e **modelul simplificat (sau parabolic) in SATURATIE**

4.2.4. Modelul Spice Level 1

Scurtarea canalului în regim de saturație



(a)



(b)

Scurtarea canalului în regim de saturație se face prin corectia in SAT:

$$I_D \cong I_{Dsat} [1 + \lambda |V_{DS}|] = \frac{W}{L} \frac{K}{2} (V_{GS} - V_T)^2 (1 + \lambda |V_{DS}|)$$

- Modulul asigura modelarea MOS cu can si n si p.
- Revenim la can n.
- Modelul Spice Level 1 = modelul simplificat + corectia scurtarii can in sat.

- **Model Spice Level 1 pt MOS can. N** este:

- In Cvasli-lin: ($V_G > V_T$ si $0 < V_{DS} < V_{Dsat}$):
$$I_D = \frac{W}{L} K \left[(V_G - V_T) V_{DS} - \frac{V_{DS}^2}{2} \right]$$

- In SAT: ($V_G > V_T$ si $0 < V_{DS} < V_{Dsat}$):
$$I_D = \frac{W}{L} \frac{K}{2} (V_{GS} - V_T)^2 (1 + \lambda V_{DS})$$

- Evident in blocare: ($V_G < V_T$ si orice V_{DS}): $I_D = 0$.

Parametrii modelului Spice Level 1 sunt:

- W/L – dati de tehnologie (nodul tehnologic CMOS): latime/lungime canal.
- K – parametru de transconductanta [A/V²]; ex. Kn=Kappa=0.01uA/V².
- Tensiunea de prag in modelul cel mai complet:

$$V_T = V_{T0} + \gamma \left(\sqrt{2\phi_F + |V_{BS}|} - \sqrt{2\phi_F} \right)$$

- Cu parametrii:
- VT0 – tensiunea de prag a capacitorului MOS real (V); ex. 0.1V....1V.
- Factorul de substrat, γ - notat GAMMA se masoara in radical din Volt;
- Parametrul $2\phi_F$ – notat PHI (Volti): ex. 0.2....0.6V.
- Parametrul pt scurtarea canalului in SAT: λ - notat cu LAMBDA; se masoara in 1/V.
- Optional se furnizeaza si x_{ox} – grosimea oxidului –se noteaza TOX (Thickness).

- Obs: In formule noi folosim notatiile scurte (γ , λ etc).
- Insa in instructiunea .MODEL din librarii se folosesc asa:

```
.MODEL MOD1 NMOS(VT0=1.5 Kn=0.1 LAMBDA=0.05 TOX=0.1u)
```