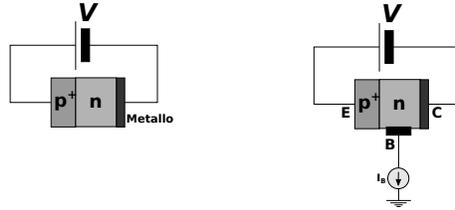


## PROVA SCRITTA di DISPOSITIVI ELETTRONICI del 12 Giugno 2019

### ESERCIZIO 1

In figura è rappresentato, a sinistra, un dispositivo costituito da una giunzione  $p^+n$  e da un contatto metallico sulla parte  $n$ . Per la parte  $n$  abbiamo:  $N_D = 10^{16} \text{ cm}^{-3}$ ,  $\mu_p = 0.04 \text{ m}^2/\text{Vs}$ ,  $\tau_p = 10^{-6} \text{ s}$ ,  $W_n = 4 \text{ }\mu\text{m}$ ,  $S = 1 \text{ mm}^2$ .



- 1) Per  $\phi_M = 4.0 \text{ eV}$  si determini la corrente per  $V = -5 \text{ V}$  e  $V = 0.5 \text{ V}$ . [3]
- 2) Per  $\phi_M = 5.1 \text{ eV}$  si determini la corrente per  $V = 5 \text{ V}$ . SUGGERIMENTO: tenere a mente l'equivalente circuitale (la corrente è piccola, ma diversa da 0). [4]
- 3) Come mostrato nella figura a destra, un generatore di corrente  $I_B = 10 \text{ }\mu\text{A}$  viene applicato alla base  $n$  mediante un secondo contatto metallico (ohmico). Si determinino le correnti e le tensioni ai terminali ( $V_{EC} = 5 \text{ V}$ ,  $\phi_M = 5.1 \text{ V}$ , si approssimi  $x_{nCB} \simeq x_{nCB}(5 \text{ V})$ ). [3]

### ESERCIZIO 2

Un condensatore MOS ideale ( $t_{ox} = 30 \text{ nm}$ ,  $N_A = 10^{16} \text{ cm}^{-3}$ ) è utilizzato per fabbricare un transistore MOS con  $L = 10 \text{ }\mu\text{m}$ ,  $W = 10 \text{ }\mu\text{m}$ . Per  $V_{GS} < V_{TH}$  la corrente  $I_{DS}$  dovrebbe essere nulla, in realtà è molto piccola ma diversa da 0. Si consideri  $\mu_n = 0.1 \text{ m}^2/\text{Vs}$ ,  $\tau_n = 10^{-6} \text{ s}$ , sia nel canale che nel bulk.

- 1) Sapendo che l'area di interfaccia tra il pozzetto  $n^+$  di Drain e il substrato è pari a  $100 \text{ }\mu\text{m}^2$ , determinare la corrente  $I_{DS}$  per  $V_{DS} = 5 \text{ V}$  e  $V_{GS} = 0 \text{ V}$ . [3]
- 2) Il condensatore MOS viene polarizzato in maniera tale da avere  $V_S$  alla superficie pari a  $1.5\psi_B$ . Determinare: a)  $V_{GS}$  in maniera tale da ottenere  $V_S = 1.5\psi_B$ ; b) la concentrazione di elettroni  $n_s$  alla superficie, lontano dai pozzetti. [3]

3) Si faccia riferimento al punto 2) ( $V_{GS}$  tale da avere  $V_S = 1.5\psi_B$ ), e si assuma  $V_{DS} = 0.1$  V (zona lineare). Come ipotesi semplificativa, si assuma che la carica  $n_s$  sia costante in un sottile strato sotto la superficie, di spessore pari a 5 nm. Calcolare la corrente  $I_{DS}$  (trascurare le regioni di svuotamento dei pozzetti), e confrontarla con quella che si ottiene per  $V_{GS} = 3$  V. [4]

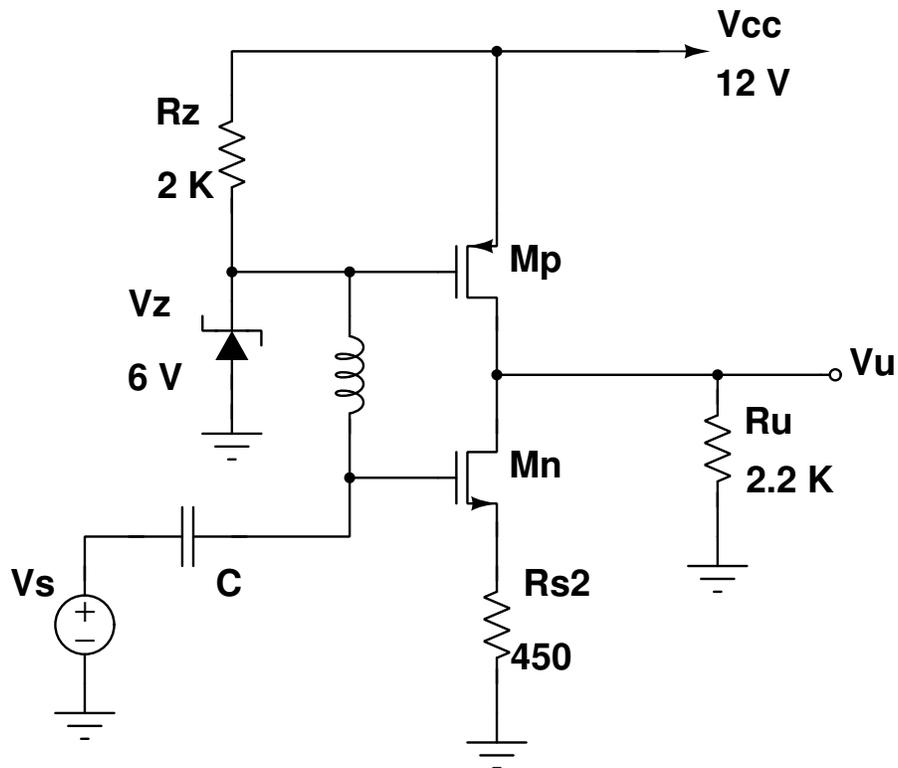
### ESERCIZIO 3

Nel circuito in figura, i transistori MOS hanno  $t_{ox} = 30$  nm e: Mp con  $N_D = 10^{16}$  cm<sup>-3</sup>,  $\mu_p = 0.02$  m<sup>2</sup>/Vs,  $W_p/L_p = 20$ ,  $V_{TH} = -1$  V; Mn con  $N_A = 5 \times 10^{15}$  cm<sup>-3</sup>,  $V_{TH} = 1$  V. Il gate è realizzato per entrambi con lo stesso metallo, mentre la carica parassita all'interfaccia ossido-silicio  $Q_{ox}$  è risultata numericamente uguale, ma di segno opposto.

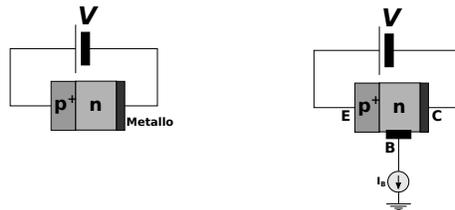
1) Determinare la funzione di lavoro del metallo di gate e la  $Q_{ox}$  (bisogna risolvere un sistema lineare). [5]

2) Determinare  $W_n/L_n$  in maniera tale da avere 6 V in uscita. Determinare le tensioni e le correnti nei transistori. [3]

3) Determinare il valore massimo di  $R_u$  che consente la polarizzazione dei transistori. [2]



**ESERCIZIO 1** In figura è rappresentato, a sinistra, un dispositivo costituito da una giunzione  $p^+n$  e da un contatto metallico sulla parte  $n$ . Per la parte  $n$  abbiamo:  $N_D = 10^{16} \text{ cm}^{-3}$ ,  $\mu_p = 0.04 \text{ m}^2/\text{Vs}$ ,  $\tau_p = 10^{-6} \text{ s}$ ,  $W_n = 4 \mu\text{m}$ ,  $S = 1 \text{ mm}^2$ .



- 1) Per  $\phi_M = 4.0 \text{ eV}$  si determini la corrente per  $V = -5 \text{ V}$  e  $V = 0.5 \text{ V}$ . [3]
- 2) Per  $\phi_M = 5.1 \text{ eV}$  si determini la corrente per  $V = 5 \text{ V}$ . SUGGERIMENTO: tenere a mente l'equivalente circuitale (la corrente è piccola, ma diversa da 0). [4]
- 3) Come mostrato nella figura a destra, un generatore di corrente  $I_B = 10 \mu\text{A}$  viene applicato alla base  $n$  mediante un secondo contatto metallico

(ohmico). Si determinino le correnti e le tensioni ai terminali ( $V_{EC} = 5 \text{ V}$ ,  $\phi_M = 5.1 \text{ V}$ , si approssimi  $x_{nCB} \simeq x_{nCB}(5 \text{ V})$ ).[3]

### SOLUZIONE 1

1) La funzione di lavoro del silicio  $n$  è pari a:

$$\frac{E_C - E_F}{q} = V_T \ln \frac{N_C}{N_D} = 0.205 \text{ V}$$

$$\Phi_s = \chi + \frac{E_C - E_F}{q} = 4.305 \text{ V}$$

Quindi se  $\Phi_M = 4.0 \text{ V} < \Phi_S$  il contatto metallo-silicio è ohmico, e il dispositivo si comporta come una giunzione  $p^+n$  a base corta. Per  $V = -5 \text{ V}$  la giunzione  $p^+n$  è in inversa, e possiamo calcolare la corrente di saturazione inversa come:

$$V_0 = \frac{E_q}{q - \frac{E_C - E_F}{q}} = 0.955 \text{ V}$$

$$x_n = W(-5 \text{ V}) = \sqrt{\frac{2\epsilon_s}{qN_D}} (V_0 + 5) = 0.88 \text{ } \mu\text{m}$$

$$D_p = V_T \mu_n = 1.034 \times 10^{-3}$$

$$I_S = qS \frac{D_p}{W_n - x_n} \frac{n_i^2}{N_D} = 1.2 \times 10^{-12} \text{ A}$$

Nel caso di  $V = 0.5 \text{ V}$  la giunzione  $p^+n$  è polarizzata in diretta. Dobbiamo ricalcolare  $I_S$ , considerando la diversa lunghezza di base. Trascurando la regione di svuotamento della giunzione  $p^+n$  polarizzata in diretta avremo:

$$I_S = qS \frac{D_p}{W_n} \frac{n_i^2}{N_D} = 0.9 \times 10^{-12}$$

$$I = I_S \left( e^{\frac{V}{V_T}} - 1 \right) = 0.234 \text{ mA}$$

2) Se  $\Phi_M = 5.1 \text{ V} > \Phi_S$  il contatto metallo-silicio è rettificante, si comporta come una giunzione. Se  $V = 5 \text{ V}$  il dispositivo corrisponde a due giunzioni back-to-back e, in particolare (vedi punto 3) il dispositivo può funzionare da transistor bipolare se il metallo viene usato come collettore. Quindi per

$V = 5 \text{ V}$  si ottiene che  $V_{p+n} = 0.018$  (vedi transistoro bipolare con  $I_B = 0$ ) e  $\delta p(0) = p_0 = n_i^2/N_D$ . Avremo dunque:

$$\begin{aligned} I &= qSD_p \frac{2p_0}{W_n - x_n} \\ V_{0Met-n} &= 5.1 - \Phi_S = 0.795 \text{ V} \\ x_{nMet-n} &= \sqrt{\frac{2\epsilon_s}{qN_D} (V_0 + 5)} = 0.87 \text{ } \mu\text{m} \\ I &= 2.4 \text{ pA} \end{aligned}$$

3) Il dispositivo è chiaramente un transistoro bipolare. Avremo:

$$\begin{aligned} Q_B &= qS\delta p(0) \frac{W}{2} = I_B \tau_n \\ W &= W_n - x_{nMet-n} = 3.13 \text{ } \mu\text{m} \\ \delta p(0) &= \frac{I_B \tau_n}{qS \frac{W}{2}} = 4 \times 10^{19} \text{ m}^{-3} \\ \delta p(0) &= \frac{n_i^2}{N_D} e^{\frac{V_{EB}}{V_T}} \\ V_{EB} &= V_T \ln \frac{\delta p(0)}{\frac{n_i^2}{N_D}} = 0.55 \text{ V} \\ \beta_f &= \frac{\tau_p}{\frac{W^2}{2D_p}} = 211 \\ I_C &= \beta_f I_B = 2.11 \text{ mA} \end{aligned}$$

La corrente  $I_C$  è uscente, mentre  $I_E$  è entrante e pari a  $I_E = I_C + I_B = 2.12 \text{ mA}$ .

## ESERCIZIO 2

Un condensatore MOS ideale ( $t_{ox} = 30 \text{ nm}$ ,  $N_A = 10^{16} \text{ cm}^{-3}$ ) è utilizzato per fabbricare un transistoro MOS con  $L = 10 \text{ } \mu\text{m}$ ,  $W = 10 \text{ } \mu\text{m}$ . Per  $V_{GS} < V_{TH}$  la corrente  $I_{DS}$  dovrebbe essere nulla, in realtà è molto piccola ma diversa da 0. Si consideri  $\mu_n = 0.1 \text{ m}^2/\text{Vs}$ ,  $\tau_n = 10^{-6} \text{ s}$ , sia nel canale che nel bulk.

1) Sapendo che l'area di interfaccia tra il pozzetto  $n^+$  di Drain e il substrato è pari a  $100 \text{ } \mu\text{m}^2$ , determinare la corrente  $I_{DS}$  per  $V_{DS} = 5 \text{ V}$  e  $V_{GS} = 0 \text{ V}$ . [3]

2) Il condensatore MOS viene polarizzato in maniera tale da avere  $V_S$  alla superficie pari a  $1.5\psi_B$ . Determinare: a)  $V_{GS}$  in maniera tale da ottenere  $V_S = 1.5\psi_B$ ; b) la concentrazione di elettroni  $n_s$  alla superficie, lontano dai pozzetti. [3]

3) Si faccia riferimento al punto 2) ( $V_{GS}$  tale da avere  $V_S = 1.5\psi_B$ ), e si assuma  $V_{DS} = 0.1$  V (zona lineare). Come ipotesi semplificativa, si assuma che la carica  $n_s$  sia costante in un sottile strato sotto la superficie, di spessore pari a 5 nm. Calcolare la corrente  $I_{DS}$  (trascurare le regioni di svuotamento dei pozzetti), e confrontarla con quella che si ottiene per  $V_{GS} = 3$  V. [4]

## SOLUZIONE 2

1) La giunzione drain-substrato è polarizzata in inversa, per  $V_{DS} = 5$  V. Quindi tra Source e Drain, per  $V_{GS} = 0$ , scorre la corrente di saturazione inversa (piccola) del diodo Drain-substrato.

$$\begin{aligned} D_n &= V_T \mu_n = 2.585 \times 10^{-3} \text{ m}^2/\text{s} \\ L_n &= \sqrt{D_n \tau_n} = 50.85 \text{ } \mu\text{m} \\ I_S &= qS \frac{D_n}{L_n} \frac{n_i^2}{N_A} = 1.83 \times 10^{-17} \text{ A} \end{aligned}$$

2) Per  $V_S = 1.5\psi_B$  la carica mobile è trascurabile rispetto a quella fissa, quindi  $V_{GS}$  può essere scritta come:

$$\begin{aligned} C_{ox} &= \frac{\epsilon_{ox}}{C_{ox}} = 1.15 \times 10^{-3} \text{ F/m}^2 \\ \psi_B &= V_T \ln \frac{N_A}{n_i} = 0.347 \text{ V} \\ V_{GS} &= \frac{\sqrt{2\epsilon_s q N_A 1.5\psi_B}}{C_{ox}} + 1.5\psi_B = 0.885 \text{ V} \end{aligned}$$

La concentrazione di elettroni all'interfaccia è data semplicemente da:

$$n_s = \frac{n_i^2}{N_A} e^{\frac{V_S}{V_T}} = \frac{n_i^2}{N_A} e^{\frac{1.5\psi_B}{V_T}} = 1.25 \times 10^{18} \text{ m}^{-3} \quad (1)$$

3) La carica  $Q_n = qn_s \times 5 \text{ nm} = 10^{-9} \text{ C/m}^2$ . Questa carica mobile, negativa, è costante nel canale (siamo in regime lineare). Quindi avremo:

$$R_{can} = \frac{1}{q\mu_n n_s} \frac{L}{W 5 \text{ nm}}$$

$$I_{DS} = \frac{V_{DS}}{R_{can}} = q\mu_n n_s 5 \text{ nm} \frac{W}{L} \quad V_{DS} = 0.1 \text{ nA}$$

Per  $V_{GS} = 3 \text{ V}$  avremo:

$$V_{TH} = \frac{\sqrt{2\epsilon_s q N_A 2\psi_B}}{C_{ox}} + 2\psi_B = 1.11 \text{ V}$$

$$I_{DS} = \mu_n C_{ox} \frac{W}{L} (V_{GS} - V_{TH}) V_{DS} = 21.73 \text{ } \mu\text{A}$$

### ESERCIZIO 3

Nel circuito in figura, i transistori MOS hanno  $t_{ox} = 30 \text{ nm}$  e: Mp con  $N_D = 10^{16} \text{ cm}^{-3}$ ,  $\mu_p = 0.02 \text{ m}^2/\text{Vs}$ ,  $W_p/L_p = 20$ ,  $V_{TH} = -1 \text{ V}$ ; Mn con  $N_A = 5 \times 10^{15} \text{ cm}^{-3}$ ,  $V_{TH} = 1 \text{ V}$ . Il gate è realizzato per entrambi con lo stesso metallo, mentre la carica parassita all'interfaccia ossido-silicio  $Q_{ox}$  è risultata numericamente uguale, ma di segno opposto.

1) Determinare la funzione di lavoro del metallo di gate e la  $Q_{ox}$  (bisogna risolvere un sistema lineare). [5]

2) Determinare  $W_n/L_n$  in maniera tale da avere 6 V in uscita. Determinare le tensioni e le correnti nei transistori. [3]

3) Determinare il valore massimo di  $R_u$  che consente la polarizzazione dei transistori. [2]

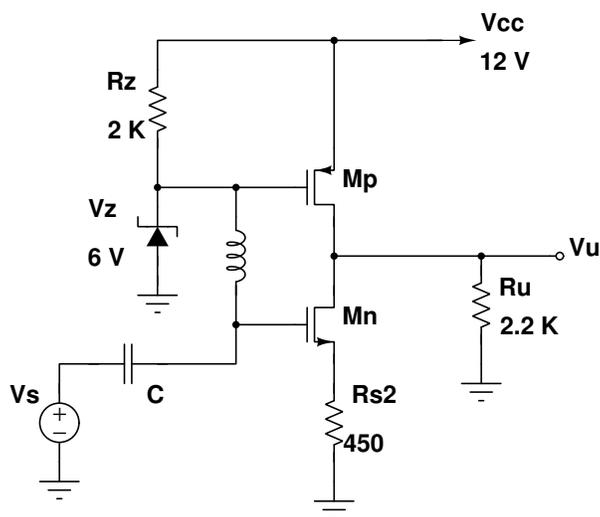
### SOLUZIONE 3

1) Per entrambi i transistori avremo che:

$$C_{ox} = \frac{\epsilon_{ox}}{t_{ox}} = 1.15 \times 10^{-3} \text{ F/m}^2$$

$$\psi_{Bn} = V_T \ln \frac{N_A}{n_i} = 0.347 \text{ V}$$

$$\psi_{Bp} = V_T \ln \frac{N_D}{n_i} = 0.329 \text{ V}$$



Per il canale  $n$  è sotto  $E_i$ , e quindi  $\phi_{Sn} = \chi + \frac{E_g}{2q} + \psi_{Bn} = 5.027$  V; per il canale  $p$  il substrato è di tipo  $n$ , e avremo  $\phi_{Sp} = \chi + \frac{E_g}{2q} - \psi_{Bp} = 4.33$  V. Per i due transistori avremo quindi rispettivamente:

$$V_{THn} = \frac{\sqrt{2\epsilon_s q N_A 2\psi_{Bn}}}{C_{ox}} + 2\psi_{Bn} + \Phi_M - \Phi_{Sn} - \frac{Q_{ox}}{C_{ox}}$$

$$V_{THp} = -\frac{\sqrt{2\epsilon_s q N_D 2\psi_{Bp}}}{C_{ox}} - 2\psi_{Bp} + \Phi_M - \Phi_{Sp} + \frac{Q_{ox}}{C_{ox}}$$

Questo è un sistema di due equazioni nelle due incognite  $\Phi_M$  e  $Q_{ox}$ :

$$1 = 1.11 + \Phi_M - 5.03 - \frac{Q_{ox}}{C_{ox}}$$

$$-1 = -0.95 + \Phi_M - 4.33 + \frac{Q_{ox}}{C_{ox}}$$

$$\Phi_M - \frac{Q_{ox}}{C_{ox}} = 4.92$$

$$\Phi_M + \frac{Q_{ox}}{C_{ox}} - 1 = 4.28$$

Quindi  $\Phi_M = 4.6$  V e  $Q_{ox} = -C_{ox} \times 0.64 = 7.36 \times 10^{-4}$  C/m<sup>2</sup>.

2) Calcoliamo  $I_{SD}$  del primo transistor Mp, per cui  $V_{SG} = 6$  V,  $V_{GS} - V_{TH} = -5$  V:

$$I_{SDp} = \frac{\mu_p C_{ox} W_p}{2 L_p} (V_{GS} - V_{TH}) = 5.75 \text{ mA} \quad (2)$$

Se  $V_u = 6$  V avremo che  $I_{Ru} = V_u/R_u = 2.73$  mA. Avremo dunque  $I_{DSn} = 3.02 \approx 3$  mA. Quindi, dall'equazione:

$$\begin{aligned} V_S &= R_{S2} I_{DSn} = 1.35 \text{ V} \\ V_{GSn} &= V_Z - V_S = 4.65 \text{ V} \\ I_{DS} &= \frac{\mu_n C_{ox} W_n}{2 L_n} (V_{GS} - V_{TH})^2 \end{aligned}$$

Dall'ultima equazione ricaviamo  $\frac{W_n}{L_n} \approx 5$ . Avremo che  $V_{DSp} = -6$  V, che in valore assoluto è maggiore di  $V_{GSp} - V_{THp} = -5$  V, quindi il transistor è in saturazione. Avremo anche  $V_{DSn} = 6 - 1.35 = 4.65$  V =  $V_{GSn} - V_{THn} = 3.65$  V, quindi anche Mn è in saturazione.

3) All'aumentare di  $R_u$  avremo che  $V_{Dp} = V_{Dn}$  aumenta. Questo è bene per il transistor  $n$ , ma può portare il transistor  $p$  verso la zona triodo. Il valore minimo è  $V_{DSp} = V_{GSp} - V_{THp} = -5$  V, che corrisponde a  $V_{Dp} = 7$  V. Poiché sia Mp che Mn hanno il gate ad una tensione nota, per entrambi i transistori la corrente non dipende da  $V_u$ , finché rimangono in saturazione. Quindi avremo che  $I_{Ru} = 2.75$  mA e  $R_{umax} = 7/2.75 = 2.55$  k $\Omega$ .