

DE e DTE: PROVA SCRITTA DEL 8 Gennaio 2014

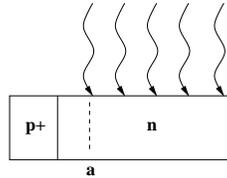
ESERCIZIO 1 (DE,DTE) La giunzione p^+n in figura ($N_D = 10^{16} \text{ cm}^{-3}$, $\mu_n = 0.1 \text{ m}^2/\text{Vs}$, $\tau_n = 10^{-6} \text{ s}$, $\mu_p = 0.045 \text{ m}^2/\text{Vs}$, $\tau_p = 10^{-6} \text{ s}$, $S = 1 \text{ mm}^2$, base lunga) è polarizzata in diretta con $V = 0.3 \text{ V}$.

1) Determinare la corrente nella giunzione, verificando l'ipotesi di bassa iniezione (senza illuminazione).[2]

La giunzione viene poi illuminata uniformemente per $x > a = 10 \mu\text{m}$, come illustrato in figura. L'intensità luminosa è tale da generare 10^{16} coppie elettrone-lacuna per cm^3 , per secondo ($G_{OP} = 10^{16} \text{ cm}^{-3} \text{ s}^{-1}$). Considerare la situazione di regime.

2) Determinare l'espressione dell'eccesso di portatori minoritari nella zona n (trascurare la regione di svuotamento). SUGGERIMENTO: scrivere l'equazione di continuità per $x \leq a$ e $x > a$, e imporre la continuità della funzione e della sua derivata in $x = a$.[5]

3) Calcolare la corrente della giunzione con l'illuminazione, e confrontarla con quella in assenza di illuminazione (può venire negativa?).[3]



ESERCIZIO 2 (DE,DTE) Un transistor MOS con gate in polisilicio a canale n è caratterizzato da $N_A = 10^{16} \text{ cm}^{-3}$, $W = L = 3 \mu\text{m}$, $\mu_n = 0.08 \text{ m}^2/\text{Vs}$, $\mu_{nBulk} = 0.1 \text{ m}^2/\text{Vs}$, $\tau_n = 10^{-6} \text{ s}$. L'area di interfaccia pozzetto di drain/substrato n^+p è pari a 10^{-11} m^{-2} . Per $V_{GS} = 5 \text{ V}$ e $V_{DS} = 0.5 \text{ V}$ è stata misurata una corrente $I_{DS} = 0.7 \text{ mA}$.

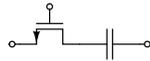
1) Determinare lo spessore dell'ossido.[4]

2) Determinare la corrente per $V_{DS} = 2V_{GS}$, considerando la lunghezza effettiva del canale (calcolare la regione di svuotamento Drain- punto di strozzamento).[3]

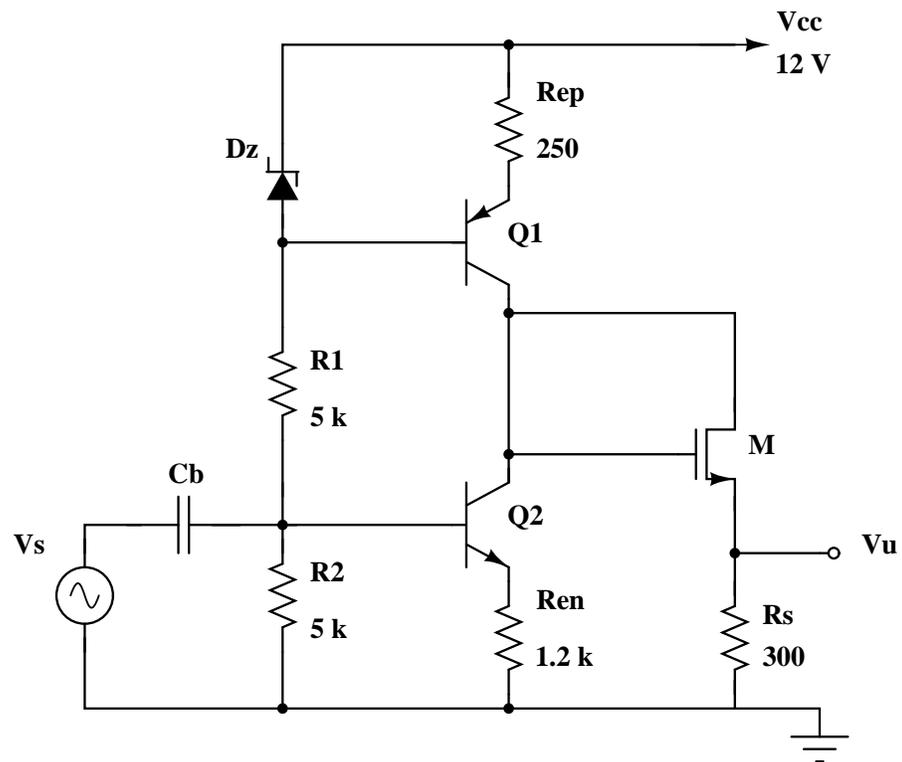
3) Determinare la corrente per $V_{DS} = -0.5 \text{ V}$.[3]

ESERCIZIO 3 (DTE)) Descrivere il processo LOCOS con la variante LDD (Lightly Doped Drain) ed eseguire un disegno di massima di un possibile profilo di drogaggio netto lungo il canale, da Source a Drain.[5]

2) Disegnare le maschere per la realizzazione della parte di circuito in figura, che verrà realizzato mediante processo LOCOS.[5]



ESERCIZIO 4 (DE) Nel circuito in figura, Q_1 e Q_2 sono transistori bipolari con $\beta_{fmin.} = 300$, $h_{oe} \rightarrow 0$; M è un transistore n -MOS con gate in polisilicio di tipo p^+ , $t_{ox} = 30$ nm, $\mu_n = 0.08$ cm²/Vs, $N_A = 5 \times 10^{15}$ cm⁻³, $W = L$; D_Z è un diodo zener ideale con $V_Z = 2$ V.



- 1) Calcolare la tensione di soglia di M . [2]
- 2) Calcolare il punto di riposo dei transistori e disegnare il circuito equivalente per le variazioni; calcolare i parametri dinamici di M ($r_0 \rightarrow \infty$). [5]
- 3) Determinare il valore massimo di W/L che consente la polarizzazione dei transistori. [3]

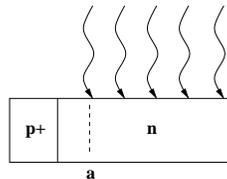
ESERCIZIO 1 (DE,DTE) La giunzione p^+n in figura ($N_D = 10^{16} \text{ cm}^{-3}$, $\mu_n = 0.1 \text{ m}^2/\text{Vs}$, $\tau_n = 10^{-6} \text{ s}$, $\mu_p = 0.045 \text{ m}^2/\text{Vs}$, $\tau_p = 10^{-6} \text{ s}$, $S = 1 \text{ mm}^2$, base lunga) è polarizzata in diretta con $V = 0.3 \text{ V}$.

1) Determinare la corrente nella giunzione, verificando l'ipotesi di bassa iniezione (senza illuminazione).[2]

La giunzione viene poi illuminata uniformemente per $x > a = 10 \text{ }\mu\text{m}$, come illustrato in figura. L'intensità luminosa è tale da generare 10^{16} coppie elettrone-lacuna per cm^3 , per secondo ($G_{OP} = 10^{16} \text{ cm}^{-3} \text{ s}^{-1}$). Considerare la situazione di regime.

2) Determinare l'espressione dell'eccesso di portatori minoritari nella zona n (trascurare la regione di svuotamento). SUGGERIMENTO: scrivere l'equazione di continuità per $x \leq a$ e $x > a$, e imporre la continuità della funzione e della sua derivata in $x = a$.[5]

3) Calcolare la corrente della giunzione con l'illuminazione, e confrontarla con quella in assenza di illuminazione (può venire negativa?).[3]



SOLUZIONE 1

1) Calcoliamo i vari parametri:

$$D_p = \frac{kT}{q} \mu_p = 1.165 \times 10^{-3}$$

$$L_p = \sqrt{D_p \tau_p} = 34.14 \quad \mu\text{m}$$

$$I_0 = qS \frac{D_p n_i^2}{L_p N_D} = 1.23 \times 10^{-13} \quad \text{A}$$

$$I = I_0 \left(e^{\frac{V}{V_T}} - 1 \right) = 1.32 \times 10^{-8} \quad \text{A}$$

La bassa iniezione è verificata:

$$p_n(0) = p_{no} e^{\frac{V}{V_T}} = 2.41 \times 10^{15} \quad \text{m}^{-3}$$

$$p_n(0) \gg p_{n0} = \frac{n_i^2}{N_D} = 2.25 \times 10^{10} \quad \text{m}^{-3}$$

$$p_n(0) \ll n_{n0} = N_D = 10^{22} \quad \text{m}^{-3}$$

2) L'equazione di continuità per l'eccesso di lacune, a regime, risulta ($\tau = \tau_p$):

$$0 = D_p \frac{d^2 \delta p}{dx^2} - \frac{\delta p}{\tau} \quad 0 < x \leq a$$

$$0 = D_p \frac{d^2 \delta p}{dx^2} - \frac{\delta p}{\tau} + G_{OP} \quad x > a$$

La soluzione generale può essere scritta come:

$$\delta p(x) = Ae^{-\frac{x}{L_p}} + Be^{\frac{x}{L_p}} \quad 0 < x \leq a$$

$$\delta p(x) = Ce^{-\frac{x-a}{L_p}} + De^{\frac{x-a}{L_p}} + G_{OP}\tau \quad x > a$$

Dalle condizioni a contorno in $x = 0$ (relazione di Shockley) e $x \rightarrow \infty$ avremo:

$$A + B = p_{n0} \left(e^{\frac{V}{V_T}} - 1 \right)$$

$$D = 0$$

Come suggerito dal testo, per determinare A , B e C imponiamo la continuità della funzione e della derivata in $x = a$. Insieme alla condizione a contorno in $x = 0$, riportata sopra, otterremo un sistema di 3 equazioni in 3 incognite, peraltro semplice da risolvere:

$$A + B = p_{n0} \left(e^{\frac{V}{V_T}} - 1 \right)$$

$$Ae^{-\frac{a}{L_p}} + Be^{\frac{a}{L_p}} = C + G_{OP}\tau \quad \text{Cont.funzione}$$

$$-\frac{A}{L_p} e^{-\frac{a}{L_p}} + \frac{B}{L_p} e^{\frac{a}{L_p}} = -\frac{C}{L_p} \quad \text{Cont.derivata}$$

La risoluzione è semplice, basta semplificare L_p nell'ultima equazione, e sommare le ultime due equazioni ottenendo:

$$2Be^{\frac{a}{L_p}} = G_{OP}\tau$$

$$B = \frac{G_{OP}\tau}{2} e^{-\frac{a}{L_p}} = 3.73 \times 10^{15} \quad \text{m}^{-3}$$

Da cui è immediato calcolare A :

$$A = p_{n0} \left(e^{\frac{V}{V_T}} - 1 \right) - B = -1.316 \times 10^{15} \quad \text{m}^{-3} \quad (1)$$

e C :

$$C = A e^{-\frac{a}{L_p}} + B e^{\frac{a}{L_p}} - G_{OP}\tau = -5.982 \times 10^{15} \quad \text{m}^{-3} \quad (2)$$

Quindi l'espressione dell'eccesso dei portatori minoritari $\delta p(x)$ risulta:

$$\begin{aligned} \delta p(x) &= -1.3 \times 10^{15} e^{-\frac{x}{L_p}} + 3.7 \times 10^{15} e^{\frac{x}{L_p}} & 0 < x \leq a \\ \delta p(x) &= -6.0 \times 10^{15} e^{-\frac{x-a}{L_p}} + 10^{16} & x > a \end{aligned}$$

3) Per il calcolo della corrente si procede nel modo usuale, cioè si calcola la corrente di diffusione di lacune in $x = 0$ (cioè all'estremo della regione di svuotamento, la cui ampiezza è stata trascurata):

$$\begin{aligned} I &= -qSD_p \frac{d\delta p}{dx} \Big|_{x=0} \\ I &= -qS \frac{D_p}{L_p} (-A + B) \\ I &= -2.73 \times 10^{-8} \quad \text{A} \end{aligned}$$

La corrente è negativa, e più elevata in valore assoluto, rispetto al valore senza illuminazione. Il diodo si comporta come un generatore (fotodiodo, o cella solare).

ESERCIZIO 2 (DE,DTE) Un transistor MOS con gate in polisilicio a canale n è caratterizzato da $N_A = 10^{16} \text{ cm}^{-3}$, $W = L = 3 \text{ } \mu\text{m}$, $\mu_n = 0.08 \text{ m}^2/\text{Vs}$, $\mu_{nBulk} = 0.1 \text{ m}^2/\text{Vs}$, $\tau_n = 10^{-6} \text{ s}$. L'area di interfaccia pozzetto di drain/substrato n^+p è pari a 10^{-11} m^{-2} . Per $V_{GS} = 5 \text{ V}$ e $V_{DS} = 0.5 \text{ V}$ è stata misurata una resistenza di quadro di $715 \text{ } \Omega$ (corrente $I_{DS} = 0.7 \text{ mA}$).

1) Determinare lo spessore dell'ossido.[4]

2) Determinare la corrente per $V_{DS} = 2V_{GS}$, considerando la lunghezza effettiva del canale (calcolare la regione di svuotamento Drain- punto di strozzamento).[3]

3) Determinare la corrente per $V_{DS} = -0.5$ V.[3]

SOLUZIONE 2

1) In zona lineare (per piccole V_{DS}) la corrente può essere scritta come ($\frac{W}{L} = 1$):

$$I_{DS} = \mu_n C_{ox} (V_{GS} - V_{th}) \quad (3)$$

Lo spessore dell'ossido appare in C_{ox} e in V_{th} . Esplicitando e svolgendo alcuni semplici passaggi (gate in polisilicio di tipo n^+ , Φ_{MS} in valore assoluto):

$$\begin{aligned} I_{DS} &= \mu_n C_{ox} \left(V_{GS} - \frac{\sqrt{2\epsilon_s q N_a 2\psi_B}}{C_{ox}} - 2\psi_B + \Phi_{MS} \right) \\ I_{DS} &= \mu_n C_{ox} (V_{GS} - 2\psi_B + \Phi_{MS}) - \mu_n \sqrt{2\epsilon_s q N_a 2\psi_B} \\ C_{ox} &= \frac{I_{DS} + \mu_n \sqrt{2\epsilon_s q N_a 2\psi_B}}{\mu_n (V_{GS} - 2\psi_B + \Phi_{MS})} \end{aligned}$$

Calcoliamo:

$$\begin{aligned} \psi_B &= \frac{kT}{q} \ln \left(\frac{N_A}{n_i} \right) = 0.347 \quad \text{V} \\ \Phi_{MS} &= \frac{E_g}{2q} + \psi_B = 0.887 \quad \text{V} \end{aligned}$$

Sostituendo i numeri nell'espressione sopra otteniamo:

$$\begin{aligned} C_{ox} &= 1.685 \times 10^{-3} \quad \text{F/m}^2 \\ t_{ox} &= \frac{\epsilon_{ox}}{C_{ox}} = 20.4 \quad \text{nm} \end{aligned}$$

2) Per $V_{DS} = 2V_{GS}$ il transistor è sicuramente in saturazione ($V_{DS} > V_{GS} - V_{th}$). Calcoliamo la tensione di soglia:

$$V_{th} = \frac{\sqrt{2\epsilon_s q N_a 2\psi_B}}{C_{ox}} + 2\psi_B - \Phi_{MS} = 0.094 \quad \text{V} \quad (4)$$

La regione di svuotamento drain- punto di strozzamento P risulta :

$$\begin{aligned} V_{DP} &= V_{DS} - V_{DSSat} = V_{DS} - (V_{GS} - V_{th}) = 5.09 \quad \text{V} \\ V_0 &= \Phi_{MS} \\ W_{DP} &= \sqrt{\frac{2\epsilon_s}{qN_A}} (V_{DP} - V_0) = 0.74 \quad \mu\text{m} \end{aligned}$$

Quindi ($L_{eff} = L - W_{DP}$):

$$I_{DS} = \mu_n \frac{C_{ox}}{2} \frac{W}{L - W_{DP}} (V_{GS} - V_{th})^2 = 2.15 \quad \text{mA} \quad (5)$$

3) Per $V_{DS} = -0.5$ V la giunzione drain-substrato, che ha una superficie di 10^{-11} m^{-3} , è polarizzata in diretta. Alla corrente di canale, pari a -0.7 mA (il transistor è simmetrico), si aggiunge in parallelo la corrente della giunzione I_D :

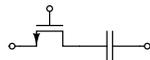
$$\begin{aligned} D_n &= \frac{kT}{q} \mu_{nBulk} = 2.59 \times 10^{-3} \\ L_n &= \sqrt{D_n \tau_n} = 50.89 \quad \mu\text{m} \\ I_D &= qS \frac{D_n}{L_n} \frac{n_i^2}{N_A} \left(e^{-\frac{V_{DS}}{V_T}} - 1 \right) = 4.44 \times 10^{-10} \quad \text{A} \end{aligned}$$

Questa corrente risulta comunque molto piccola rispetto a quella del MOS.

ESERCIZIO 3 (DTE)

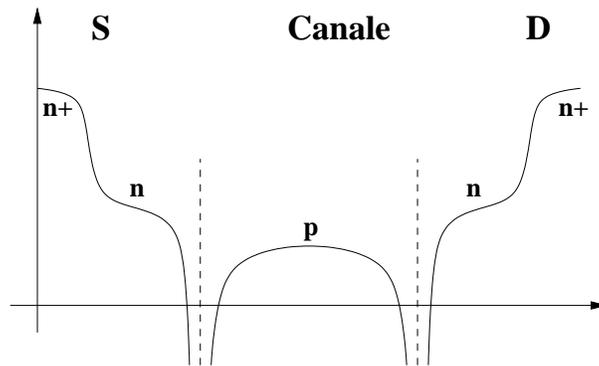
1) Descrivere il processo LOCOS con la variante LDD (Lightly Doped Drain) ed eseguire un disegno di massima di un possibile profilo di drogaggio netto lungo il canale, da Source a Drain.[5]

2) Disegnare le maschere per la realizzazione della parte di circuito in figura, che verrà realizzato mediante processo LOCOS.[5]



SOLUZIONE 3

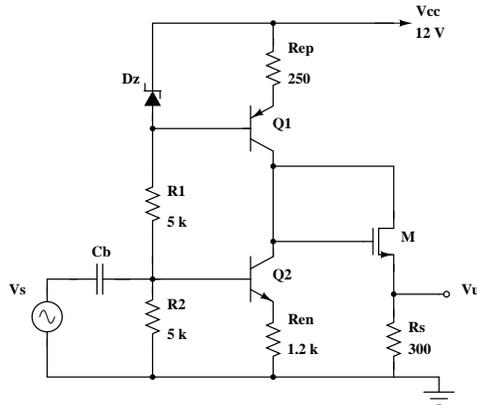
1) Si rimanda alla dispensa del Prof. Diligenti per una dettagliata descrizione del processo LOCOS con la variante LDD. Un possibile profilo di drogaggio netto da Source a Drain può essere disegnato come segue:



2) A fianco del transistor, la diffusione n^+ del Drain viene fatta di area opportuna, per realizzare l'armatura inferiore del condensatore. L'armatura superiore può essere realizzata e definita mediante il polisilicio, insieme alla definizione dei gates; il dielettrico è l'ossido di gate.

ESERCIZIO 4 (DE) Nel circuito in figura, Q_1 e Q_2 sono transistori bipolari con $\beta_{fmin.} = 300$, $h_{oe} \rightarrow 0$; M è un transistor n -MOS con gate in polisilicio di tipo p^+ , $t_{ox} = 30$ nm, $\mu_n = 0.08$ cm²/Vs, $N_A = 5 \times 10^{15}$ cm⁻³, $W = L$; D_Z è un diodo zener ideale con $V_Z = 2$ V.

- 1) Calcolare la tensione di soglia di M . [2]
- 2) Calcolare il punto di riposo dei transistori e disegnare il circuito equivalente per le variazioni; calcolare i parametri dinamici di M ($r_0 \rightarrow \infty$). [5]
- 3) Determinare il valore massimo di W/L che consente la polarizzazione dei transistori. [3]



SOLUZIONE 4

1) La tensione di soglia può essere calcolata come segue. Essendo il gate di tipo p^+ , la Φ_{MS} (da intendersi in valore assoluto nelle formule sotto) contribuisce ad aumentare la tensione di soglia.

$$\psi_B = \frac{kT}{q} \ln \left(\frac{N_A}{n_i} \right) = 0.329 \quad \text{V}$$

$$\Phi_{MS} = \frac{E_g}{2q} - \psi_B = 0.211 \quad \text{V}$$

$$C_{ox} = \frac{\epsilon_{ox}}{t_{ox}} = 1.151 \times 10^{-3} \quad \text{F/m}^2$$

$$V_{th} = \frac{\sqrt{2\epsilon_s q N_a} 2\psi_B}{C_{ox}} + 2\psi_B + \Phi_{MS} = 1.16 \quad \text{V}$$

2) Per il punto di riposo:

$$\begin{aligned} V_{B1} &= 10 \quad \text{V} \\ V_{E1} &= 10.7 \quad \text{V} \\ I_{E1} \simeq I_{C1} &= \frac{V_{CC} - V_{E1}}{R_{EP}} = 5.2 \quad \text{mA} \\ V_{B2} &= V_{B1} \frac{R_2}{R_1 + R_2} = 5 \quad \text{V} \\ V_{E2} &= 4.3 \quad \text{V} \\ I_{E2} &\simeq I_{C2} = 3.58 \quad \text{mA} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 I_{DS} &= 5.2 - 2.9 = 1.62 \quad \text{mA} \\
 V_S &= I_{DS} R_S = 0.49 \quad \text{V}
 \end{aligned}$$

La tensione di collettore di Q_1 e di Q_2 si possono determinare da V_{GS} . Il MOS è sicuramente in saturazione, poichè $V_{GS} = V_{DS}$:

$$\begin{aligned}
 I_{DS} &= \frac{\mu_n C_{OX} W}{2 L} (V_{GS} - V_{th})^2 \\
 (V_{GS} - V_{th})^2 &= \frac{I_{DS}}{\frac{\mu_n C_{OX} W}{2 L}} \\
 V_{GS} &= 4.77 \quad \text{V}
 \end{aligned}$$

Quindi $V_{C1} = V_{C2} = V_G = 5.26 \text{ V}$. Riassumendo, per Q_1 :

$$\begin{aligned}
 I_{C1} &\simeq I_{E1} = 5.2 \quad \text{mA} \\
 I_{B1} &= \frac{I_{C1}}{\beta_{fmin}} = 0.17 \quad \mu\text{A} \\
 V_{BE1} &\simeq V_\gamma = 0.7 \quad \text{V} \\
 V_{EC1} &= V_{E1} - V_{C1} = 10.7 - 5.26 = 5.44 \quad \text{V}
 \end{aligned}$$

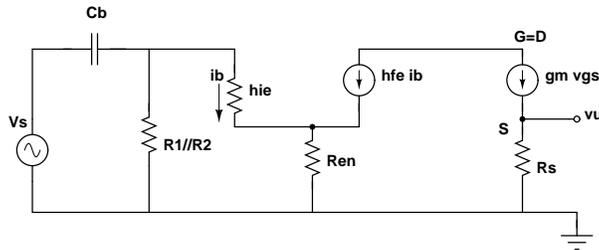
Per Q_2 :

$$\begin{aligned}
 I_{C2} &\simeq I_{E2} = 3.58 \quad \text{mA} \\
 I_{B2} &= \frac{I_{C1}}{\beta_{fmin}} = 12 \quad \mu\text{A} \\
 V_{BE1} &\simeq V_\gamma = 0.7 \quad \text{V} \\
 V_{CE1} &= V_{C1} - V_{E1} = 5.26 - 4.3 = 0.96 \quad \text{V}
 \end{aligned}$$

Quindi Q_2 è polarizzato correttamente, e avremo $I_{B2} = 12 \mu\text{A} \ll I_{R1,R2} = 1 \text{ mA}$. Per M :

$$\begin{aligned}
 I_{DS} &= 1.62 \quad \text{mA} \\
 V_{GS} &= V_{DS} = 4.77 \quad \text{V}
 \end{aligned}$$

L'unico parametro dinamico da calcolare per M è il $g_m = \mu_n C_{ox} (V_{GS} - V_{th}) = 3.32 \times 10^{-4} \text{ A/V}$. Per il circuito equivalente, possiamo considerare lo zener



corto-circuito (ideale), mentre Q_1 è montato come generatore di corrente, con la tensione di base (base-emettitore) fissata dallo zener. Il circuito equivalente risulta dunque molto semplice:

3) Il limite è costituito dalla V_C del transistor Q_2 , nonché dal fatto che dovrà essere $V_{GS} > V_{th}$. V_{C1} deve essere maggiore di 5 affinché Q_2 sia polarizzato correttamente in zona attiva diretta, quindi $V_{Gmin} = 5$ V. I_{DS} è imposta da Q_1 e da Q_2 , quindi $V_{GSmin} = 5 - 0.49 = 4.51$ V. Avremo:

$$(V_{GSmin} - V_{th})^2 = \frac{I_{DS}}{\frac{\mu_n C_{OX}}{2} \frac{W}{L} |_{max}}$$

$$\frac{W}{L} |_{max} = 3.13$$

Quindi W/L potrà essere al massimo pari a 3 (numero intero).