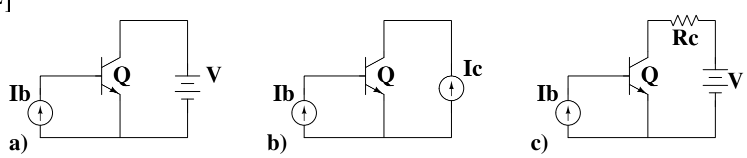
DE e DTE: PROVA SCRITTA DEL 26 Gennaio 2015

ESERCIZIO 1 (DE,DTE) Un transistore bipolare n^+pn con $N_{Abase} = N_{Dcollettore} = 10^{16}$ cm^{-3}, $\mu_n = 0.09$ m^2/Vs, $\mu_p = 0.035$ m^2/Vs, $\tau_n = \tau_p = 10^{-6}$ s, S=1 mm^2, $W_{met} = 3$ μm, è polarizzato con $I_B = 20$ μA (emettitore a massa).

1) Tra collettore ed emettitore è applicata una batteria che genera $V_{CE} = 5$ V (fig. 1a). Calcolare la corrente di collettore e le tensioni V_{CB} e V_{BE} ai terminali. (Per il calcolo delle regioni di svuotamento si approssimi preventivamente $V_{BE} = 0.5$ V).[4]

2) Tra collettore ed emettitore è applicato un generatore di corrente $I_C = 3$ mA ($I_B = 20$ μA, fig. 1b). Calcolare le cadute di tensione ai terminali e verificare che il transistore è in saturazione. (Si trascurino le regioni di svuotamento delle giunzioni polarizzate in diretta). [4]

3) Si calcoli la resistenza da applicare in serie al collettore, secondo lo schema di figura 1c, che dia una corrente $I_C = 3$ mA in saturazione ($V = 5$ V, $I_B = 20$ μA).SUGGERIMENTO: usare i valori di tensione calcolati nel punto 2. [2]



ESERCIZIO 2 (DE,DTE) Si consideri un condensatore n-MOS polysilicon gate ($t_{ox} = 30$ nm, $N_A = 10^{16}$ cm^{-3}), tempo di vita media dei portatori minoritari $\tau_n = 3$ ms.

1) Per $V_{GS} = V_{TH}/2$ calcolare la carica fissa e mobile e disegnare i grafici della concentrazione di carica e del campo elettrico in direzione x (perpendicolare alla superficie).[4]

2) Viene applicato un gradino di tensione pari a 5 V ($V_{GS} = 5$ V per $t > 0$). Calcolare la carica fissa per $t = 0^+$ ($t << \tau_n$) e disegnare il grafico della carica e del campo elettrico lungo x.[4]

3) Determinare le cariche fissa e mobile, e il campo elettrico nell'ossido, per tempi molto lunghi ($V_{GS} = 5$ V).[2]

ESERCIZIO 3 (DTE) 1) Descrivere il processo LOCOS con LDD per la fabbricazione di un transistore n-MOS. [6]

2) La tensione di alimentazione massima di un circuito è pari a 3 V. I transistori n MOS del circuito sono realizzati con il processo LOCOS su un

substrato con drogaggio pari a 10^{16} cm^{-3}. Determinare lo spessore minimo dell'ossido di campo richiesto per garantire l'isolamento tra i dispositivi.[4]

ESERCIZIO 4 (DE) Nel circuito in figura, M_1 e M_2 sono transistori con caratteristiche simili (uno a canale n e l'altro a canale p): stessa $V_{TH} = 1$ V in valore assoluto ($V_{THp} < 0$), $t_{ox} = 30$ nm, $\mu_n = 800$ cm^2/Vs, $\mu_p = 500$ cm^2/Vs, $W = 10$ μm, $L = 1$ μm. Q è un transistore bipolare con $\beta_{f\ min} = 300$.

1) Determinare R_{G2} in maniera tale che $V_u = 0$.[5]

2) Calcolare il punto di riposo dei transistori.[5]

ESERCIZIO 1 (DE,DTE) Un transistore bipolare n^+pn con $N_{Abase} = N_{Dcollettore} = 10^{16}$ cm^{-3}, $\mu_n = 0.09$ m^2/Vs, $\mu_p = 0.035$ m^2/Vs, $\tau_n = \tau_p = 10^{-6}$ s, S=1 mm^2, $W_{met} = 3$ μm, è polarizzato con $I_B = 20$ μA (emettitore a massa).

1) Tra collettore ed emettitore è applicata una batteria che genera $V_{CE} = 5$ V (fig. 1a). Calcolare la corrente di collettore e le tensioni V_{CB} e V_{BE} ai terminali. (Per il calcolo delle regioni di svuotamento si approssimi preventivamente $V_{BE} = 0.5$ V).[4]

2) Tra collettore ed emettitore è applicato un generatore di corrente $I_C = 3$ mA ($I_B = 20$ μA, fig. 1b). Calcolare le cadute di tensione ai terminali e verificare che il transistore è in saturazione. (Si trascurino le regioni di svuotamento delle giunzioni polarizzate in diretta). [4]

3) Si calcoli la resistenza da applicare in serie al collettore, secondo lo schema di figura 1c, che dia una corrente $I_C = 3$ mA in saturazione ($V = 5$ V, $I_B = 20$ μA).SUGGERIMENTO: usare i valori di tensione calcolati nel punto 2. [2]

SOLUZIONE 1

1) La base è sicuramente corta. Calcoliamo infatti:

$$
\begin{aligned}
D_n &= \frac{kT}{q}\mu_n = 2.33 \times 10^{-3} \\
L_n &= \sqrt{D_n \tau_n} 48.28 \qquad \mu\text{m}
\end{aligned}
$$

Calcoliamo le regioni di svuotamento. Si può fare l'approssimazione di trascurare la regione di svuotamento base-emettitore. Per la regione di svuotamento base-collettore avremo ($V_{BC} \simeq 5 - 0.5 = 4.5$ V):

$$
\begin{aligned}
V_{0BE} &= \frac{kT}{q} ln \left(\frac{N_{A\ base} N_{D\ collettore}}{n_i^2} \right) = 0.695 \\
W_{BE} &= \sqrt{\frac{2\epsilon_s}{q} \left(\frac{1}{N_A} + \frac{1}{N_D} \right) (V_{0BE} + 4.5)} = 1.17 \quad \mu\text{m} \\
X_{BE} &= \frac{W_{BE}}{2} = 0.584 \qquad \mu\text{m}
\end{aligned}
$$

Quindi avremo:

$$
\begin{aligned}
W_{eff} &= 3 - 0.584 = 2.42 \qquad \mu\text{m} \\
\alpha_f &= \frac{1}{1 + \frac{W^2}{2L^2}} = 0.998749 \\
I_C &= \frac{\alpha_f}{1 - \alpha_f} I_B = 15.97 \qquad \text{mA}
\end{aligned}
$$

Per il calcolo della V_{BE} possiamo fare riferimento alla carica in base ($W = W_{eff}$):

$$
\begin{aligned}
Q_B &= I_B \tau_n = qS \frac{\delta_p(0) W}{2} \\
\delta_n(0) &= \frac{2 I_B \tau_n}{qWS} = 1.03 \times 10^{20} \qquad \text{m}^{-3}
\end{aligned}
$$

Dalla relazione di Shockley:

$$
\begin{aligned}
\delta_n(0) &= n_{p0} e^{\frac{V_{BE}}{V_T}} = \frac{n_i^2}{N_{A\ base}} e^{\frac{V_{BE}}{V_T}} \\
V_{BE} &= V_T ln \left(\frac{\delta_n(0)}{n_{p0}} \right) = 0.58 \qquad (V)
\end{aligned}
$$

Quindi l'approssimazione suggerita dal testo $V_{BE} \simeq 0.5$ per il calcolo delle regioni di svuotamento è molto buona. Avremo $V_{CB} = 5 - 0.58 = 4.42$ V.

2) La corrente di collettore è imposta da un generatore di corrente, ed è più piccola di quella che si ha in zona attiva diretta con la stessa I_B, quindi il transistore è in saturazione (si può ragionare sul profilo dell'eccesso dei portatori minoritari. Trascurando le regioni di svuotamento avremo (in valore assoluto):

$$\begin{aligned} I_C &= qSD_n \frac{d\delta_n x}{d_x} \mid_{x=0} = qSD_n \frac{\delta_n(0) - delta_n W}{W} \\ \delta_n(0) - \delta_n(W) &= \frac{I_C W}{qSD_n} = 2.41 \times 10^{19} \qquad \mathrm{m}^{-3} \end{aligned}$$

La corrente di base stabilisce la carica in base (area del trapezio):

$$\begin{aligned} Q_B &= I_B \tau_n = qS \frac{\delta_n(0) + \delta_n(W)}{2} W \\ \delta_n(0) + \delta_n(W) &= \frac{2 I_B \tau_n}{qWS} = 1.03 \times 10^{20} \end{aligned}$$

Risolvendo il sistema avremo la concentrazione di portatori agli estremi di W, e conseguentemente le tensioni ai terminali:

$$\begin{aligned} \delta_n(0) - \delta_n(W) &= 2.41 \times 10^{19} \qquad \mathrm{m}^{-3} \\ \delta_n(0) + \delta_n(W) &= 1.03 \times 10^{20} \\ \delta_n(W) &= 3.94 \times 10^{19} \qquad \mathrm{m}^{-3} \\ \delta_n(0) &= 6.33 \times 10^{19} \qquad \mathrm{m}^{-3} \\ V_{BE} &= V_T ln \left(\frac{\delta_n(0)}{n_{p0}} \right) = 0.56 \qquad (V) \\ V_{BC} &= V_T ln \left(\frac{\delta_n(W)}{n_{p0}} \right) = 0.55 \end{aligned}$$

E quindi $V_{CE} = 0.01 \simeq= 0$ V.

3) Avremo molto semplicemente:

$$\begin{aligned} V &= R_C I_C + V_{CE} \\ R_C &= \frac{V}{I_C} = 1.67 \qquad \mathrm{K}\Omega \end{aligned}$$

ESERCIZIO 2 (DE,DTE) Si consideri un condensatore n-MOS polysilicon gate ($t_{ox} = 30$ nm, $N_A = 10^{16}$ cm^{-3}), tempo di vita media dei portatori minoritari $\tau_n = 3$ ms.

1) Per $V_{GS} = V_{TH}/2$ calcolare la carica fissa e mobile e disegnare i grafici della concentrazione di carica e del campo elettrico in direzione x (perpendicolare alla superficie).[4]

2) Viene applicato un gradino di tensione pari a 5 V ($V_{GS} = 5$ V per $t > 0$. Calcolare la carica fissa per $t = 0^+$ ($t << \tau_n$) e disegnare il grafico della carica e del campo elettrico lungo x.[4]

3) Determinare le cariche fissa e mobile, e il campo elettrico nell'ossido, per tempi molto lunghi $V_{GS} = 5$ V.[2]

SOLUZIONE 2

1) Calcoliamo anzitutto la tensione di soglia:

$$
\begin{aligned}
C_{ox} &= \frac{\epsilon_{ox}}{t_{ox}} = 1.15 \times 10^{-3} \qquad \text{F/m}^2 \\
\psi_B &= \frac{kT}{q} ln\left(\frac{N_A}{n_i}\right) = 0.347 \\
\phi_{MS} &= \frac{E_g}{q} - \frac{E_F - E_V}{q} = -\frac{kT}{q} ln\left(\frac{N_V}{N_A}\right) = 0.902 \qquad \text{V} \\
V_{TH} &= \frac{\sqrt{2\epsilon_s q N_a 2\psi_B}}{C_{ox}} + 2\psi_B - \phi_{MS} = 0.212 \qquad \text{V}
\end{aligned}
$$

Per $V_{GS} = V_{TH}/2$ avremo che la carica nel silicio sarà costituita solo dalla carica fissa. Dobbiamo calcolare la caduta di tensione nel silicio, scrivendo l'equazione:

$$
\begin{aligned}
\frac{V_{TH}}{2} &= \frac{\sqrt{2\epsilon_s q N_a \psi_S}}{C_{ox}} + \psi_S - \phi_{MS} \\
0.106 &= 0.505\sqrt{\psi_S} + \psi_S - 0.902
\end{aligned}
$$

la cui soluzione accettabile è pari a $\psi_S = 0.7$ V, cioè praticamente $2\psi_B$. La densità di carica nel silicio è pari a $-qN_a$, per una profondità pari a $W(\psi_s) = 0.3$ μm nel silicio. Il campo elettrico è lineare nel silicio, fino all'interfaccia dove vale $qN_AW/\epsilon_s = 4.56$ MV/m, cioè la carica totale nel silicio diviso la costante dielettrica. Nell'ossido il campo elettrico è costante, e pari a quello nel silicio moltiplicato per il rapporto tra le costanti dielettriche: $\varepsilon_{ox} = \varepsilon_{Si}\ \epsilon_s/\epsilon_{ox} = qN_AW/\epsilon_{ox}$. Nei diagrammi seguenti (non in scala) sono rappresentate la densitdi carica e il campo elettrico in funzione di x.

2) A $t = 0^+$ la carica mobile è 0 poichè non si è ancora generata, e il condensatore MOS è in svuotamento profondo. Basta ripetere i conti e le considerazioni del punto 1, con $V_{GS} = 5$ V.

$$\begin{aligned} 5 &= \frac{\sqrt{2\epsilon_s q N_a \psi_S}}{C_{ox}} + \psi_S - \phi_{MS} \\ 5 &= 0.505\sqrt{\psi_S} + \psi_S - 0.902 \end{aligned}$$

da cui si ottiene, come soluzione utile, $\psi_S = 4.79$ V. La densità di carica nel silicio è costante e pari a $-qN_a$, per una profondità pari a $W(\psi_s) = 0.8\ \mu$m. Il campo elettrico si può calcolare come sopra, considerando la diversa W. Nei diagrammi seguenti (non in scala) sono rappresentate la densitdi carica e il campo elettrico in funzione di x.

3) La carica fissa (negativa) è quella dovuta alla $2\psi_B$:

$$Q_W = \sqrt{2\epsilon_s q N_a 2\psi_B} = 4.84 \times 10^{-4} \qquad \mathrm{C/m^2} \tag{1}$$

La carica mobile (negativa) si può calcolare da C_{ox}:

$$Q_w = C_{ox}\left(V_{GS} - V_{TH}\right) = 5.5^{-3} \qquad \mathrm{C/m^2} \tag{2}$$

Il campo elettrico nell'ossido (in valore assoluto) si può determinare dalla carica:

$$\varepsilon_{ox} = \frac{Q_n + Q_W}{\epsilon_{ox}} = 173.5 \qquad \mathrm{V/m} \tag{3}$$

ESERCIZIO 3 (DTE)

1) Descrivere il processo LOCOS con LDD per la fabbricazione di un transistore n-MOS. [6]

2) La tensione di alimentazione massima di un circuito è pari a 3 V. I transistori n MOS del circuito sono realizzati con il processo LOCOS su un

substrato con drogaggio pari a 10^{16} cm^{-3}. Determinare lo spessore minimo dell'ossido di campo richiesto per garantire l'isolamento tra i dispositivi.[4]

SOLUZIONE 3

1) Si rimanda alla dispensa per la trattazione del processo LOCOS e la fabbricazione degli LDD.

2) Il condensatore MOS parassita costituito dal poly n^+/ ossido di campo deve avere una tensione di soglia superiore a 3 V. Avremo dunque:

$$\begin{aligned}
\psi_B &= \frac{kT}{q} ln\left(\frac{N_A}{n_i}\right) = 0.347 \\
\phi_{MS} &= \frac{E_g}{q} - \frac{E_F - E_V}{q} = -\frac{kT}{q} ln\left(\frac{N_V}{N_A}\right) = 0.902 \qquad \text{V} \\
V_{TH} &= \frac{\sqrt{2\epsilon_s q N_a 2\psi_B}}{C_{ox}} + 2\psi_B - \phi_{MS} > 3 \qquad \text{V} \\
C_{ox} &< \frac{\sqrt{2\epsilon_s q N_a 2\psi_B}}{3 - 2\psi_B + \phi_{MS}} = 1.51 \times 10^{-4} \qquad \text{F/m}^2 \\
t_{ox} &> 223 \qquad \text{nm}
\end{aligned}$$

ESERCIZIO 4 (DE) Nel circuito in figura, M_1 e M_2 sono transistori con caratteristiche simili (uno a canale n e l'altro a canale p): stessa $V_{TH} = 1$ V in valore assoluto ($V_{THp} < 0$), stesso $t_{ox} = 30$ nm, $\mu_n = 800$ cm^2/Vs, $\mu_p = 500$ cm^2/Vs, stesse dimensioni $W = 10$ μm, $L = 1$ μm. Q è un transistore bipolare con $\beta_{f\ min} = 300$.

1) Determinare R_{G2} in maniera tale che $V_u = 0$.[5]

2) Calcolare il punto di riposo dei transistori.[5]

SOLUZIONE 4

1) Se $V_u = 0$ allora $I_{RL} = 0$ e quindi $I_{DS1} = I_{SD2}$. La V_{SG2} è imposta dallo zener: $V_{SG2} = V_{S2} - V_{G2} = 0 - (-12 + 6) = 6$ V.Supponendo entrambi

i transistori in saturazione avremo:

$$\begin{aligned}
I_{DS1} &= I_{DS2} \\
\mu_n C_{ox}\frac{W_1}{2L_1}\left(V_{GS1}-V_{THn}\right)^2 &= \mu_p C_{ox}\frac{W_1}{2L_1}\left(V_{GS2}-V_{THp}\right)^2 \\
V_{GS1}-V_{TH} &= \sqrt{\frac{\mu_p}{\mu_n}}\left(V_{SG2}-V_{TH}\right) \\
V_{GS1} &= \sqrt{\frac{\mu_p}{\mu_n}}\left(V_{SG2}-V_{TH}\right)+V_{TH} = 4.9 \qquad \mathrm{V}
\end{aligned}$$

Quindi $V_{G2} = -6$ V, $V_{G1} = 4.9$ V. La caduta su R_{G2} è dunque pari a 10.9 V. Avremo:

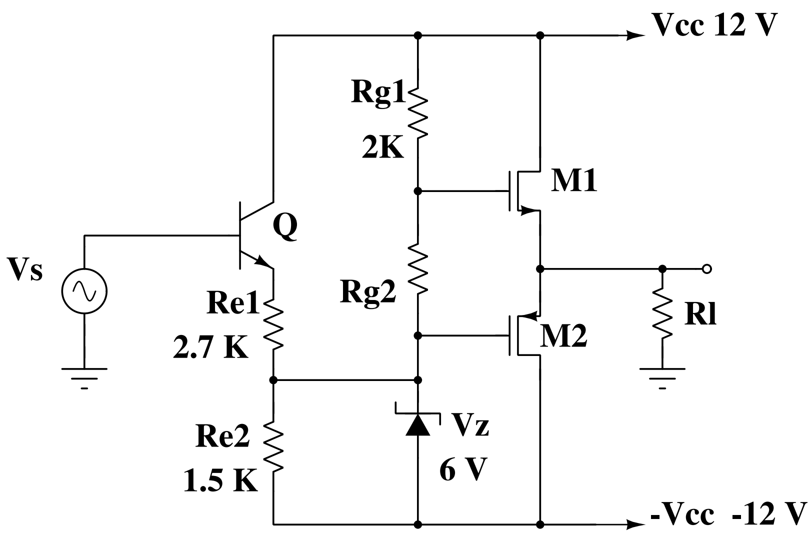
$$\begin{aligned}
V_{G1}-V_{G2} &= \left(V_{CC}-V_{G2}\right)\frac{R_{G2}}{R_{G1}+R_{G2}} \\
10.9 &= 18\frac{R_{G2}}{R_{G1}+R_{G2}} \\
R_{G2} &= 3 \qquad \mathrm{K\Omega}
\end{aligned}$$

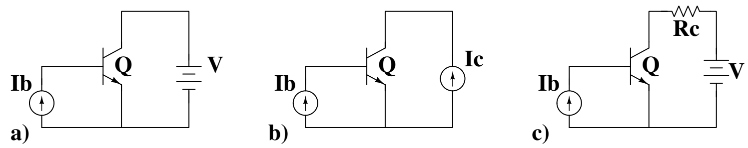
2) La corrente che scorre nei transistori MOS, che hanno entrambi, in valore assoluto, $V_{DS} = 12$ V e quindi sono evidentemente in saturazione $V_{DS} > V_{GS} - V_{TH}$ (per il p i segni sono scambiati). Per il bipolare avremo:

$$\begin{aligned}
V_{BE} &\simeq V_\gamma = 0.7 \qquad \mathrm{V} \\
V_E &= -0.7 \qquad \mathrm{V} \\
I_E &= \frac{V_E - V_Z - (-V_{CC})}{R_{E1}} = 1.96 \qquad \mathrm{mA} \\
I_{R_{E2}} &= \frac{V_Z}{R_{E2}} = 4 \qquad \mathrm{mA} \\
I_{R_{G1}\ R_{G2}} &= \frac{V_{CC}-V_{G2}}{R_{G1}+R_{G2}} = 3.6 \qquad \mathrm{mA}
\end{aligned}$$

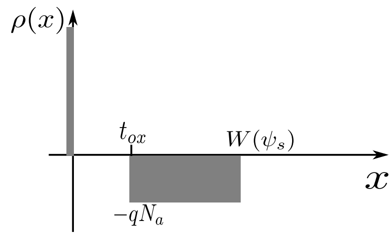
Il bilancio delle correnti al nodo $G2$ ci permette di calcolare $I_Z = I_E + I_{R_{G1}\ R_{G2}} - I_{R_{E2}} = 1.56$ mA. Il diodo zener risulta dunque correttamente polarizzato. Il transistore bipolare ha una $V_{CE} = 12.7$ V, e quindi è in zona attiva diretta. La corrente nei transistori MOS risulta ($C_{ox} = \epsilon_{ox}/t_{ox} = 1.15 \times 10^{-3}$ F/m^2):

$$I_{DS1} = I_{SD2} = \mu_n C_{ox}\frac{W_1}{2L_1}\left(V_{GS1}-V_{THn}\right)^2 = 7 \qquad \mathrm{mA} \tag{4}$$

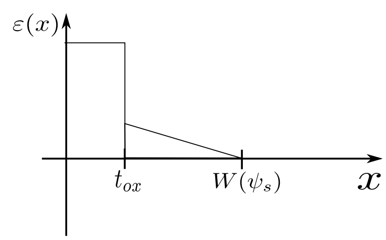

Vcc 12 V
Rg1
2K
M1
Q
Vs
Re1
2.7 K
Rg2
M2
Rl
Re2
1.5 K
Vz
6 V
-Vcc -12 V



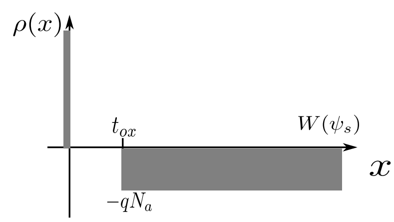
Ib
Q
V
a)
Ib
Q
Ic
b)
Ib
Q
Rc
V
c)



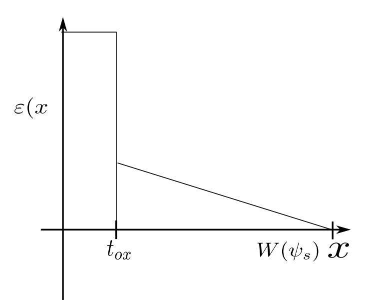
$\rho(x)$
t_{ox}
$W(\psi_s)$
x
$-qN_a$



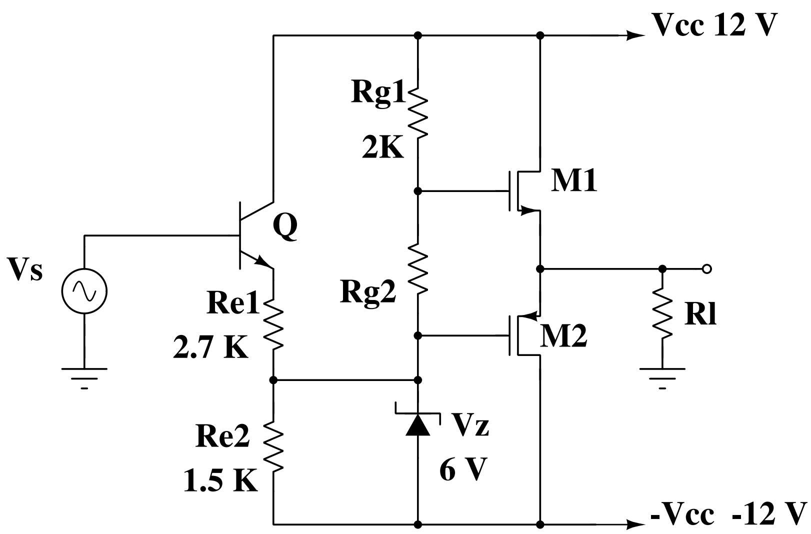
$\varepsilon(x)$
t_{ox}
$W(\psi_s)$
x



$\rho(x)$
t_{ox}
$W(\psi_s)$
x
$-qN_a$



$\varepsilon(x$
t_{ox}
$W(\psi_s)$
x


Vcc 12 V
Rg1
2K
M1
Q
Vs
Re1
2.7 K
Rg2
M2
Rl
Vz
6 V
Re2
1.5 K
-Vcc -12 V