



UNIVERSITÀ
DI PAVIA

Corso di Elettronica II – Modulo B

*Attività di Laboratorio:
Amplificatori Operazionali
CMOS*

*Prof. D. Manstretta
AA 2021-22*



- L'obiettivo finale di questa attività di laboratorio consiste nella progettazione di un OpAmp folded cascode che rispetti le specifiche di progetto
- Scaricare files:
 - Progetto: FoldedCascode_prj
 - File Excel: Dimensionamento MOSFET-FC
 - Slides in pdf
- Aprire il progetto in QUCS-Studio
 - CMOS_FoldedCascode_prj_QucsStudio
- Seguire il tutorial e rispondere alle domande con l'ausilio del simulatore
- Preparare una relazione con le risposte alle domande

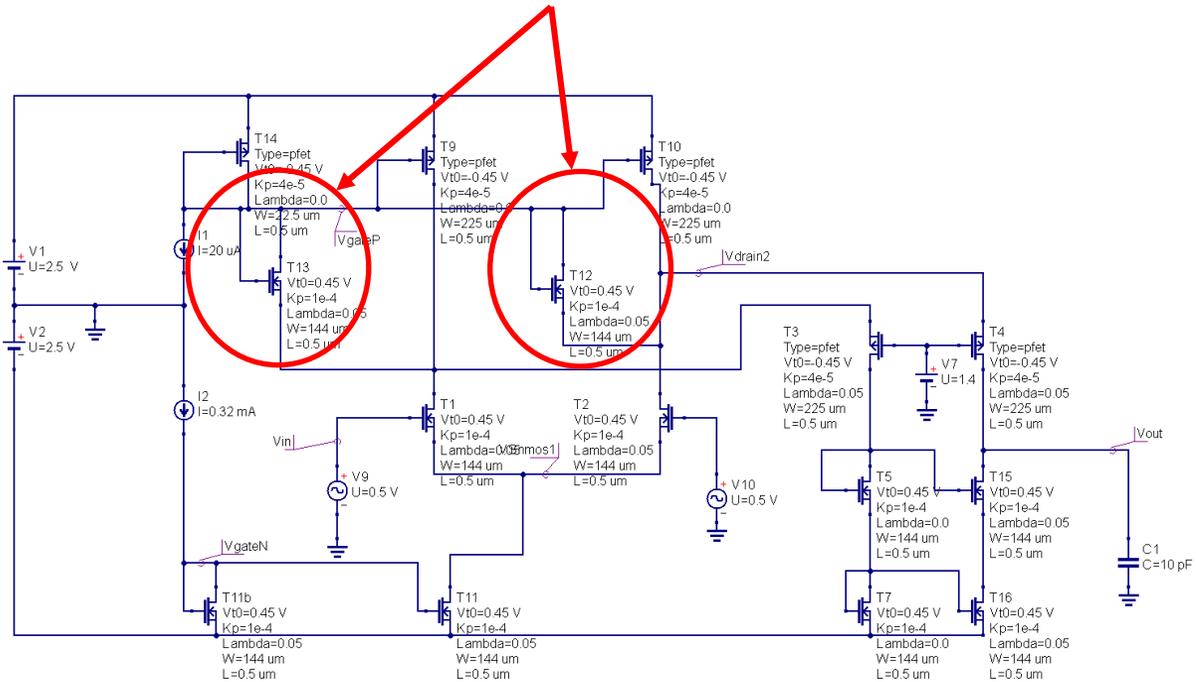
Amplificatore Operazionale CMOS Folded Cascode

Laboratorio 2



Obiettivi di Progetto

Transistori per il miglioramento dello slew rate



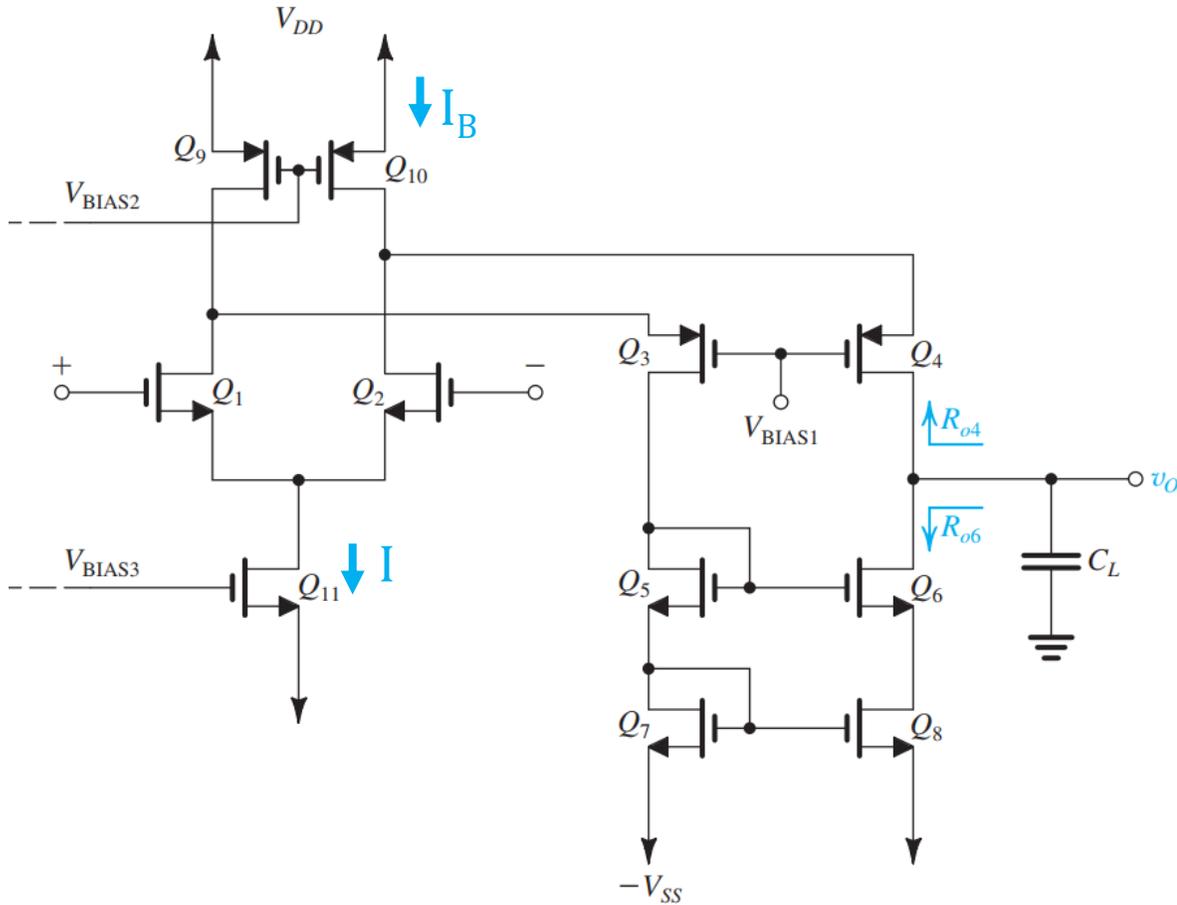
Amplificatore Operazionale Folded Cascode

1. Banda unitaria $f_t=100\text{MHz}$
2. Guadagno DC $> 83 \text{ dB}$
3. Slew Rate $>125\text{V}/\mu\text{s}$

- Capacità di carico $C_L=2\text{pF}$
- $V_{DD}=V_{SS}=2.5\text{V}$
- $K'_n=100\mu\text{A}/\text{V}^2$; $K'_p=40\mu\text{A}/\text{V}^2$
- $V_{tn}=|V_{tp}|=0.45\text{V}$
- $V_A=20\text{V}$



Equazioni di Progetto



Equazioni di progetto

$$\textcircled{1} \quad \omega_t = \frac{g_{m1}}{C_L}$$

$$\textcircled{2} \quad A_V = G_m R_o$$

$$G_m \cong g_{m1}$$

$$R_o = R_{o4} || R_{o6}$$

$$R_{o4} \cong (g_{m4} r_{o4})(r_{o10} || r_{o2}) \quad R_{o6} \cong (g_{m6} r_{o6}) r_{o8}$$

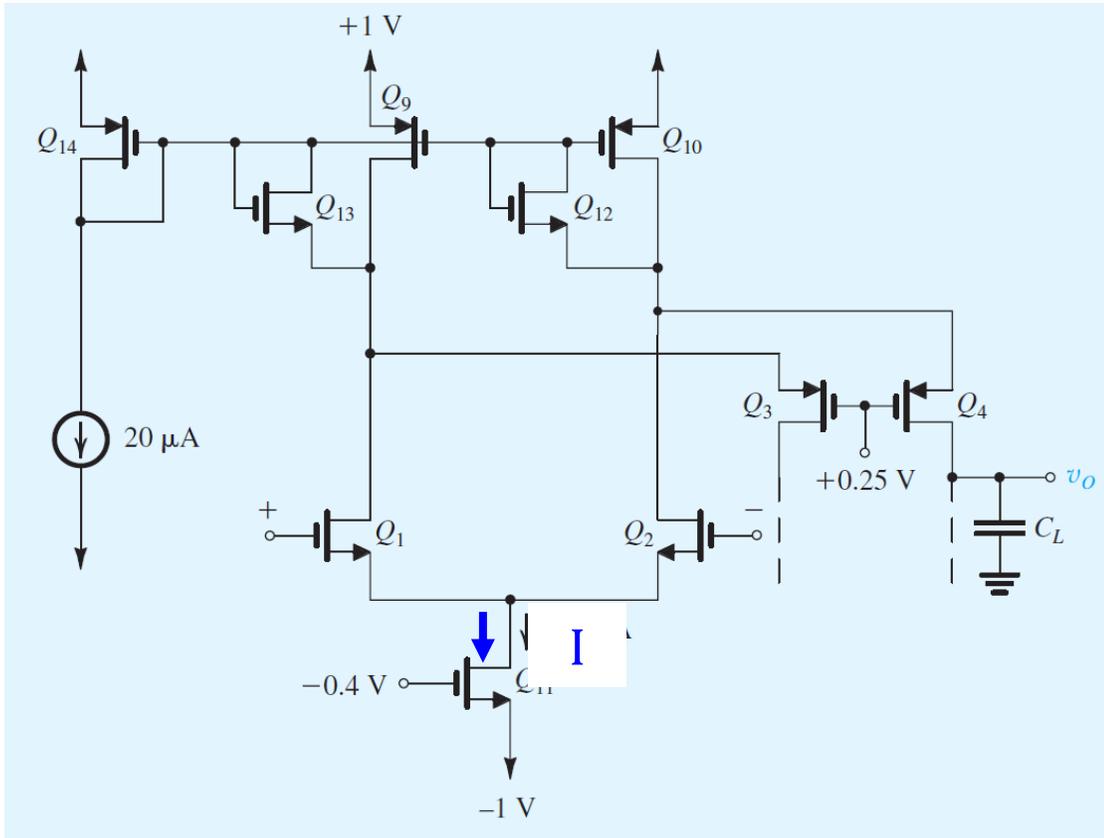
Slew Rate

- Spiegare il funzionamento del circuito in condizioni di slewing presenza dei transistori Q12 e Q13, anche con l'ausilio di simulazioni in transitorio
- Dimostrare che se Q9 e Q10 hanno W/L molto maggiore di Q14, lo slew rate è dato approssimativamente da:

$$\textcircled{3} \quad SR \cong \frac{I}{C_L}$$

Si assuma : $\left(\frac{W}{L}\right)_9 = \left(\frac{W}{L}\right)_{10} = 10 \left(\frac{W}{L}\right)_{14}$

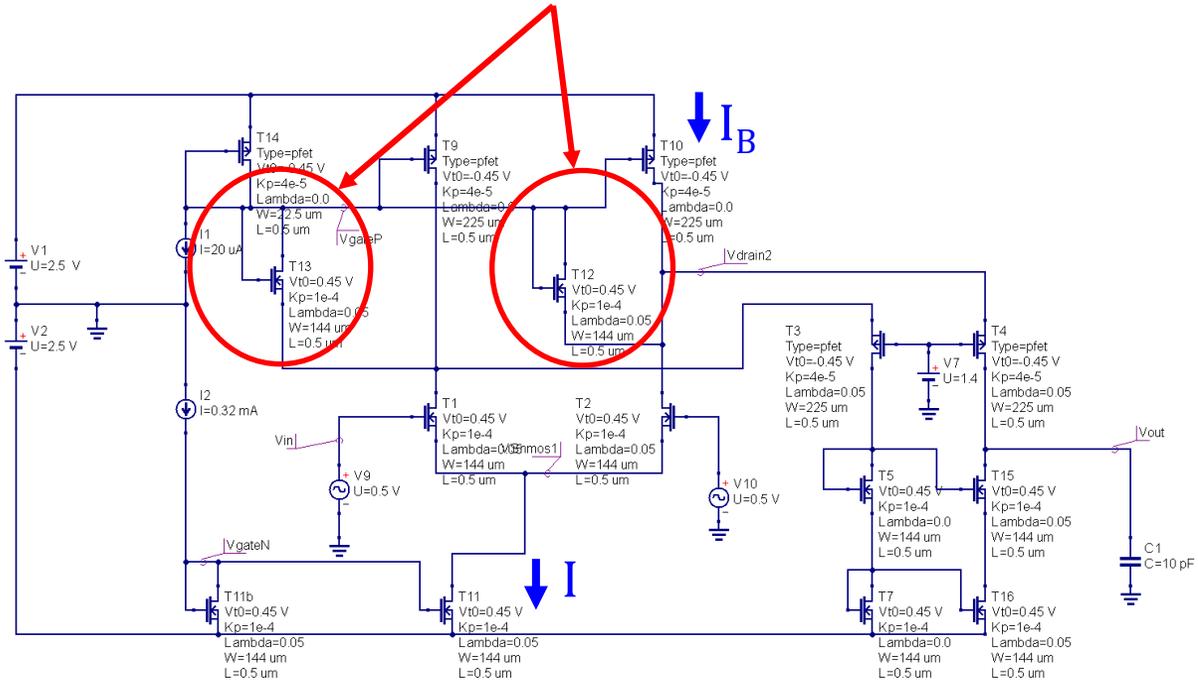
Si faccia riferimento anche alla soluzione dell'Esercizio 7, Lezione 4.





Dimensionamento del Circuito

Transistori per il miglioramento dello slew rate



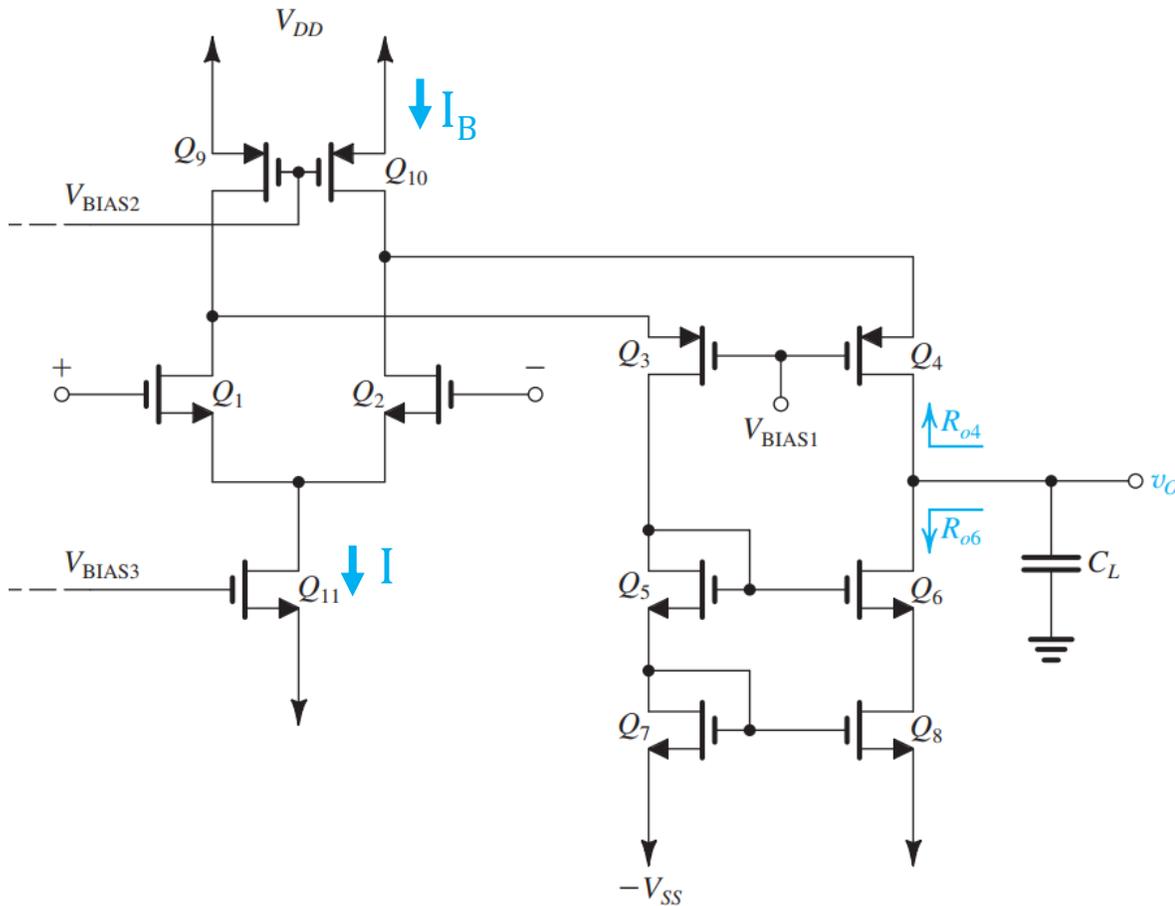
Amplificatore Operazionale Folded Cascode

- Si assuma che in prima approssimazione che tutti i transistori abbiano la stessa tensione di overdrive e la stessa tensione di Early $V_A=20V$
- Esprimere il guadagno DC in funzione di V_{OV} , V_A , I e I_B



Soluzione

Equazioni di progetto



$$\textcircled{1} \quad \omega_t = \frac{g_{m1}}{C_L} \qquad \textcircled{3} \quad SR \cong \frac{I}{C_L}$$

$$g_{m1} = \frac{I}{V_{OV}}$$

$$V_{OV} = \frac{I}{g_{m1}} = \frac{I}{C_L} \frac{C_L}{g_{m1}} = \frac{SR}{\omega_t} = \frac{125 \cdot 10^6}{2\pi \cdot 10^8} = 0.2V$$

$$I \cong SR \times C_L = 125 \cdot 10^6 \times 2 \cdot 10^{-12} = 250\mu A$$

$$G_m = \frac{I}{V_{OV1}} = \frac{0.25mA}{0.2V} = 1.25mS$$



Guadagno di Tensione DC

$$A_V = G_m R_o$$

$$R_o = R_{o4} || R_{o6}$$

$$R_{o4} \cong (g_{m4} r_{o4})(r_{o10} || r_{o2})$$

$$R_{o6} \cong (g_{m6} r_{o6}) r_{o8}$$

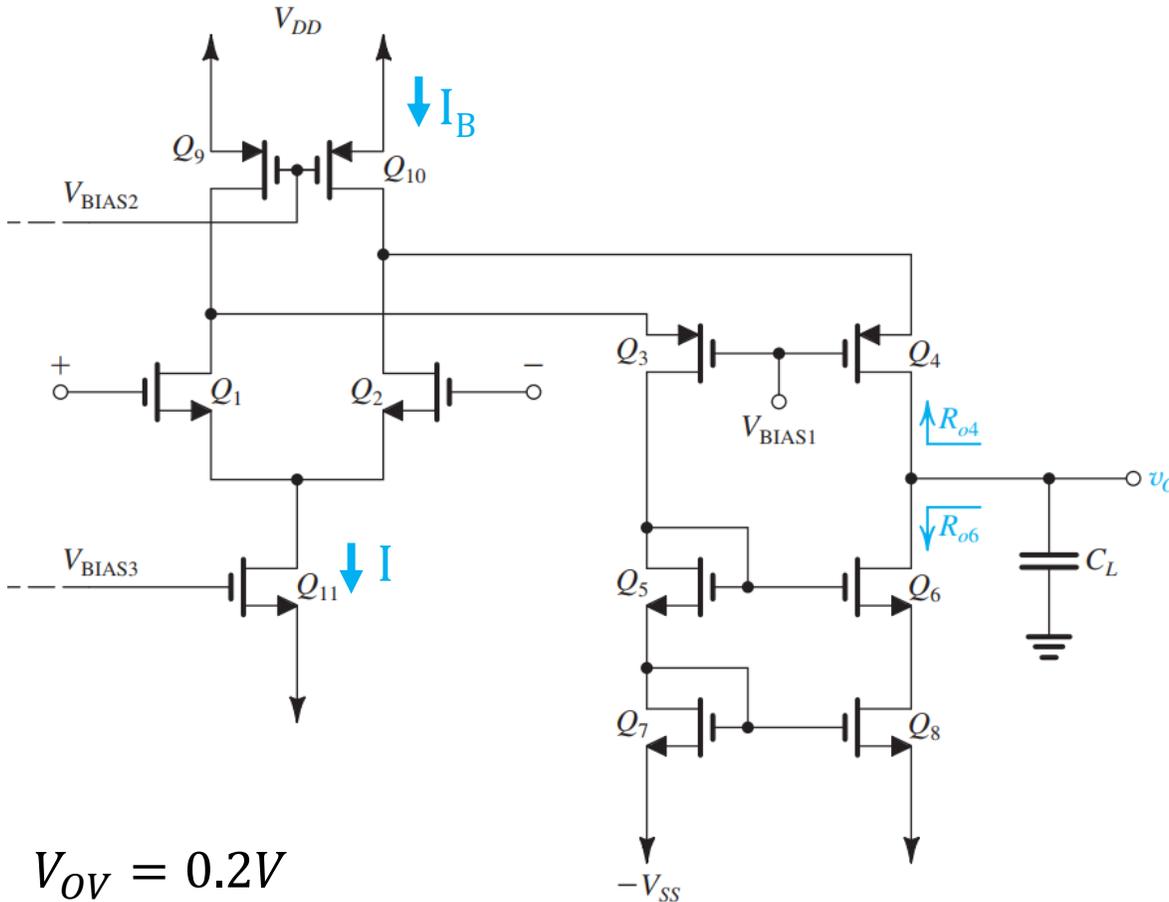
$$g_{m4} r_{o4} = g_{m6} r_{o6} = \frac{2V_A}{V_{OV}} = 200$$

$$r_{o10} || r_{o2} || r_{o8} = \frac{1}{\frac{I_B}{V_A} + \frac{I/2}{V_A} + \frac{I_B - I/2}{V_A}} = \frac{V_A}{2I_B}$$

$$R_o \cong \frac{2V_A}{V_{OV}} \frac{V_A}{2I_B} \qquad G_m = \frac{I}{V_{OV1}}$$

$$A_V = g_{m1} R_o = \left(\frac{V_A}{V_{OV}} \right)^2 \frac{I}{I_B} > 14.000$$

$$I_B < \left(\frac{V_A}{V_{OV}} \right)^2 \frac{I}{A_V} = \frac{10.000}{14.000} I = 0.7mA$$



$$V_{OV} = 0.2V$$

$$V_A = 20V \quad I = 250\mu A$$



Dimensionamento del Circuito

- In base agli obiettivi di progetto elencare i parametri circuitali scelti (I , I_B , V_{OV} , g_{m1} , ecc.) e giustificare le scelte fatte.



Dimensionamento dei Transistori

| | | NMOS | PMOS | NMOS | PMOS | NMOS | PMOS | NMOS | PMOS | NMOS | PMOS | NMOS |
|----|---------------|-----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|
| | tipo | T1 | T2 | T3 | T4 | T5 | T6 | T7 | T8 | T9 | T10 | T11 |
| 4 | K'n/p [A/V^2] | 1,00E-04 | 4,00E-05 | 1,00E-04 | 4,00E-05 | 1,00E-04 | 4,00E-05 | 1,00E-04 | 4,00E-05 | 1,00E-04 | 4,00E-05 | 1,00E-04 |
| 5 | ID [A] | 1,00E-04 | 1,00E-04 | 1,00E-04 | 1,00E-04 | 1,00E-04 | 1,00E-04 | 1,00E-04 | 1,00E-04 | 1,00E-04 | 1,00E-04 | 1,00E-04 |
| 6 | W [um] | 25 | 62,5 | 100 | 100 | 100 | 100 | 100 | 100 | 100 | 100 | 100 |
| 7 | L [um] | 0,5 | 0,5 | 0,5 | 0,5 | 0,5 | 0,5 | 0,5 | 0,5 | 0,5 | 0,5 | 0,5 |
| 8 | W/L | 50 | 125 | 200 | 200 | 200 | 200 | 200 | 200 | 200 | 200 | 200 |
| 9 | Vov [V] | 0,2 | 0,2 | 0,1 | 0,15811 | 0,1 | 0,15811 | 0,1 | 0,15811 | 0,1 | 0,15811 | 0,1 |
| 10 | VA [V] | 20 | 20 | 20 | 20 | 20 | 20 | 20 | 20 | 20 | 20 | 20 |
| 11 | Lambda (1/VA) | 0,05 | 0,05 | 0,05 | 0,05 | 0,05 | 0,05 | 0,05 | 0,05 | 0,05 | 0,05 | 0,05 |
| 12 | gm [A/V] | 1,00E-03 | 1,00E-03 | 2,00E-03 | 1,26E-03 | 2,00E-03 | 1,26E-03 | 2,00E-03 | 1,26E-03 | 2,00E-03 | 1,26E-03 | 2,00E-03 |
| 13 | tox [m] | 1,40E-08 | 1,40E-08 | 1,40E-08 | 1,40E-08 | 1,40E-08 | 1,40E-08 | 1,40E-08 | 1,40E-08 | 1,40E-08 | 1,40E-08 | 1,40E-08 |
| 14 | E ox [F/m] | 3,452E-11 | 3,5E-11 |
| 15 | Cox [F/um^2] | 2,47E-15 | 2,47E-15 | 2,47E-15 | 2,47E-15 | 2,47E-15 | 2,47E-15 | 2,47E-15 | 2,47E-15 | 2,47E-15 | 2,47E-15 | 2,47E-15 |
| 16 | Cgs [F] | 3,08E-14 | 7,70E-14 | 1,23E-13 |

Corrente in saturazione

$$I = \frac{1}{2} k'_{n/p} \frac{W}{L} (V_{GS} - V_t)^2 (1 + \lambda V_{DS})$$

- Fissiamo $L=0.5\mu m$ e $\lambda=1/20V$ per tutti i transistori.
- Possiamo utilizzare un foglio Excel, incluso nel pacchetto scaricato, per aiutarci a determinare le W dei transistori.
- Nota. Le caratteristiche di ciascun transistore (k , V_t , W , L , λ) devono essere impostate *a mano*.
- NOTA. Le equazioni del foglio Excel hanno il solo scopo di aiutare a determinare W e non tengono conto dell'effetto Early, quindi in simulazione ci saranno dei piccoli scostamenti.



Dimensionamento dei Transistori

- Inserire lo schematico del circuito progettato ed indicare in una tabella le dimensioni (W/L), la corrente di polarizzazione nominale, il g_m e la r_o di ciascun transistorore (ad es. includendo la tabella del foglio excel).
- Consiglio: Si raccomanda di dimensionare i transistori Q_3 , Q_4 e Q_5, Q_6, Q_7 e Q_8 con dimensioni maggiorate, come se dovessero portare una corrente pari a quella di polarizzazione dello stadio d'ingresso. In caso contrario lo slew rate potrebbe risultare inferiore al previsto.



- Inserire lo schematico ed indicare il punto operativo di ciascun transistoro.
- Verificare che tutti i transistori operino in saturazione.
 - Scegliere in modo opportuno la tensione di polarizzazione del gate dei transistori folded cascode

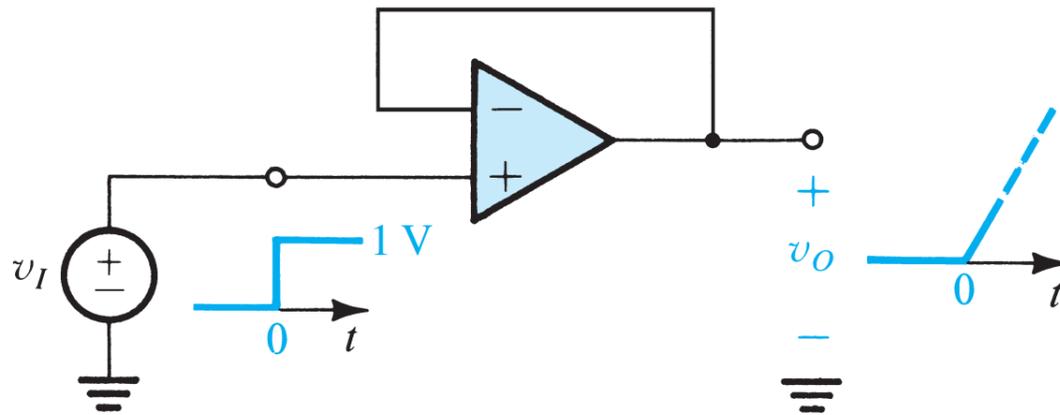


- Inserire i grafici del guadagno in funzione della frequenza
- Elencare i risultati di simulazione relativi a: guadagno DC, ft, margine di fase
- Gli obiettivi sono stati raggiunti?



Slew Rate

Connettiamo l'OpAmp in configurazione a buffer e applichiamo un gradino da 0 a 1V in ingresso



Inizialmente si osserverà in uscita una rampa con una pendenza finita. Definiamo Slew Rate (SR) la massima pendenza:

$$SR = \left. \frac{dv_O}{dt} \right|_{\max}$$



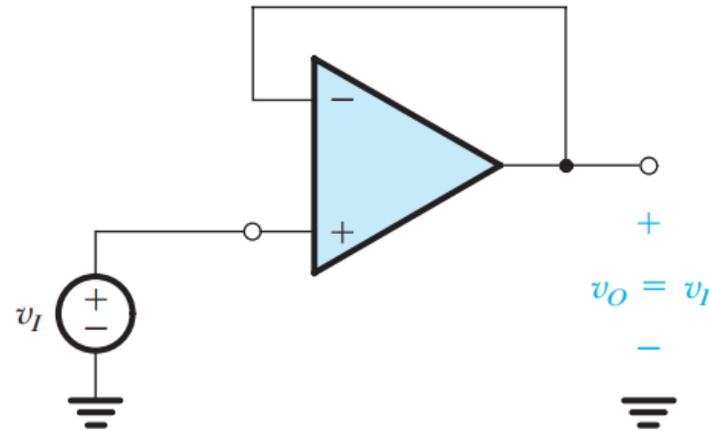
Slew Rate

- Inserire i grafici della risposta al gradino e valutare lo SR.
- L'obiettivo di progetto è stato raggiunto?
- Giustificare i risultati ottenuti in base a considerazioni sul funzionamento del circuito. Dimostrare la validità della formula approssimata usata per la stima dello SR.
- Si faccia riferimento anche alla soluzione dell'Esercizio 7, Lezione 4.



Impedenza d'uscita ad Anello Chiuso

- Se l'amplificatore viene chiuso a buffer unitario, qual è la sua resistenza d'uscita ad anello chiuso $R_{o,CL}$?





Impedenza d'uscita ad Anello Chiuso

- Mostrare il risultato della simulazione (schematico e risposta AC) e giustificare la risposta da un punto di vista teorico.

Schematico del circuito

Zout: simulazione AC

Utilizzare una formula nel simulatore per calcolare Z_{out} in funzione della tensione applicata in uscita e della corrente assorbita



UNIVERSITÀ
DI PAVIA