



UNIVERSITÀ  
DI PAVIA

## Corso di Elettronica II – Modulo B

*Attività di Laboratorio:  
Amplificatori Operazionali  
CMOS*

*Prof. D. Manstretta*

*AA 2022-23*

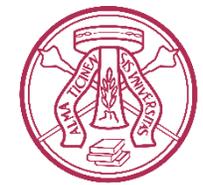


- L'obiettivo finale di questa attività di laboratorio consiste nella progettazione di un OpAmp folded cascode che rispetti le specifiche di progetto
- Scaricare files:
  - Progetto: FoldedCascode\_prj
  - File Excel: Dimensionamento MOSFET-FC
  - Slides in pdf
- Aprire il progetto in QUCS
- Seguire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

# Amplificatore Operazionale CMOS Folded Cascode

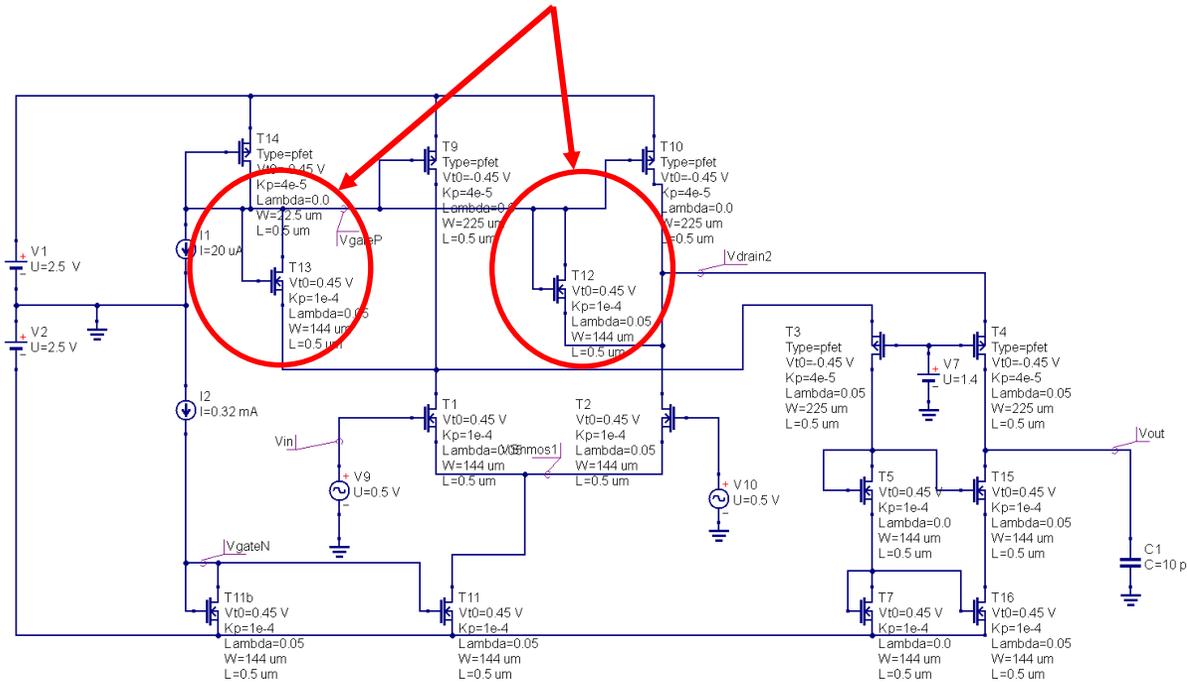
---

Laboratorio 2



# Obiettivi di Progetto

Transistori per il miglioramento dello slew rate



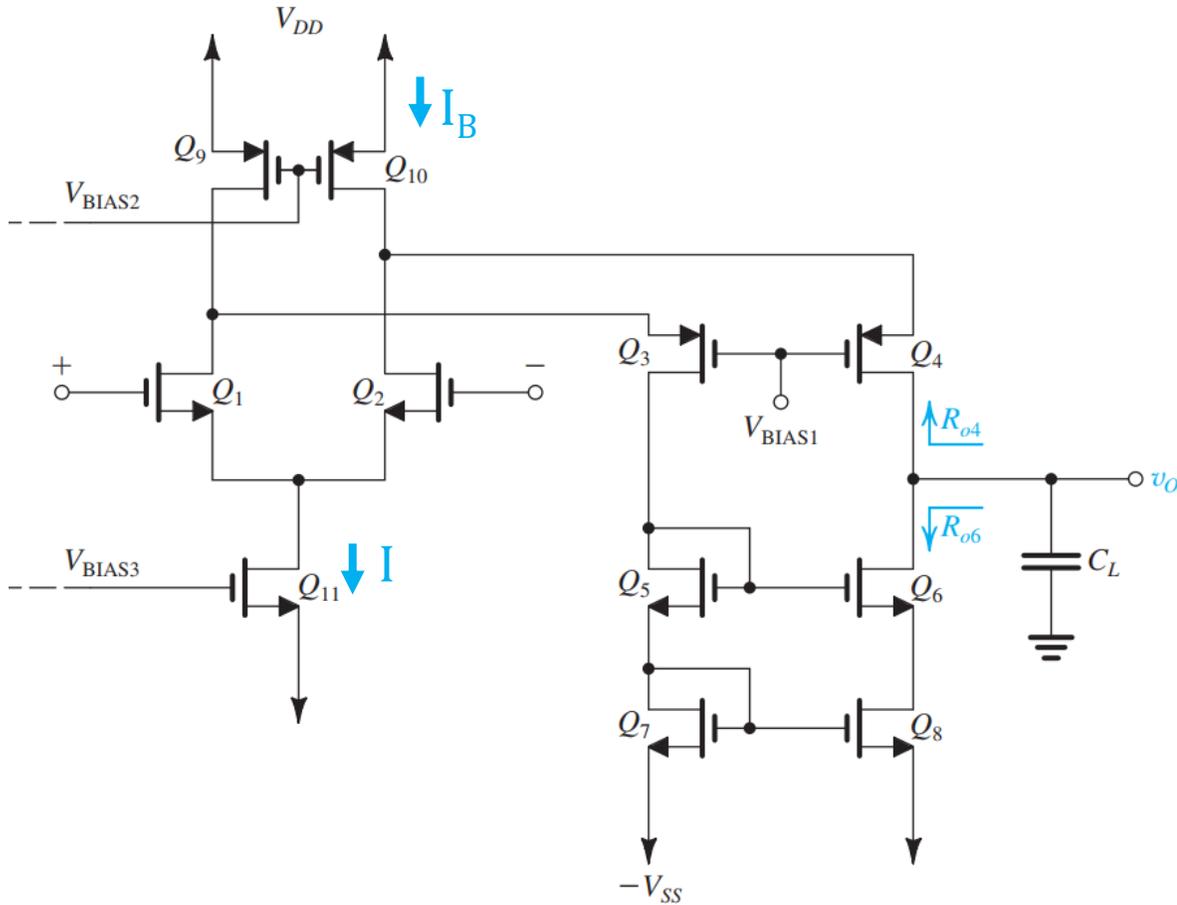
**Amplificatore Operazionale Folded Cascode**

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

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

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

$$G_m \cong g_{m1}$$

$$R_o = R_{o4} \parallel R_{o6}$$

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

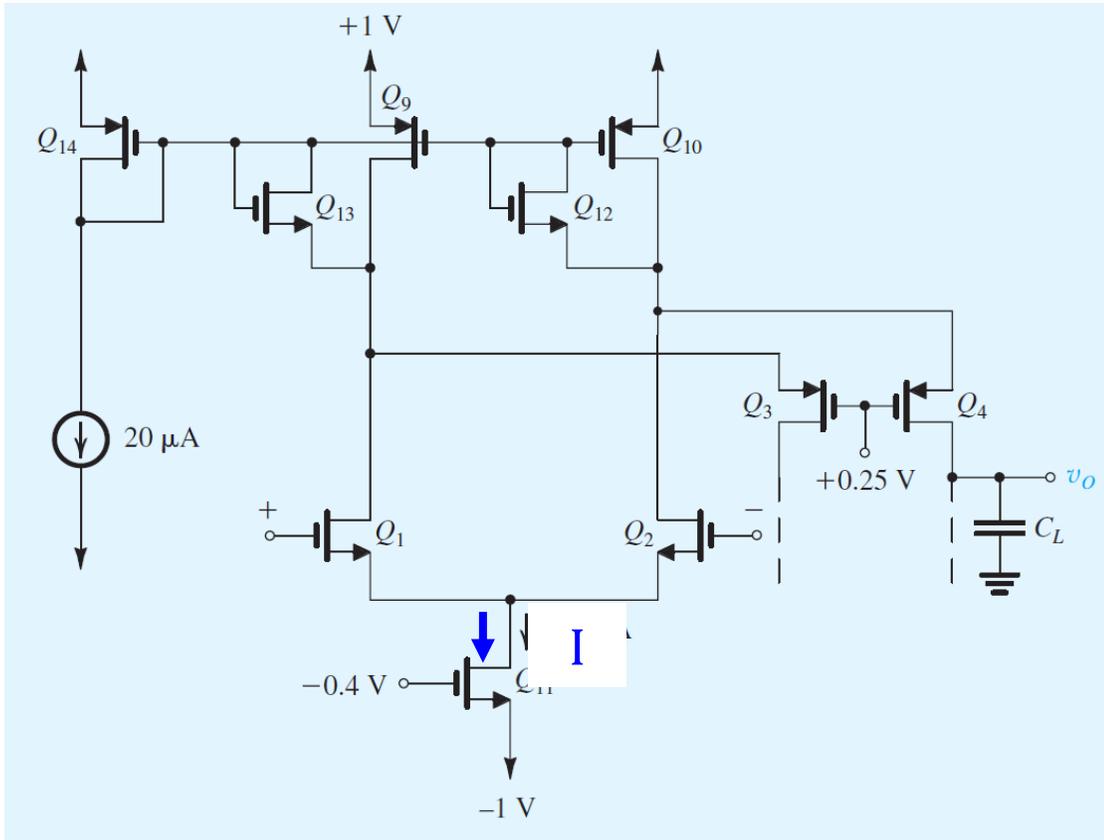
# Slew Rate

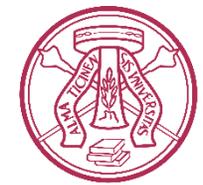
- Spiegare il funzionamento del circuito in condizioni di slewing presenza dei transistori Q12 e Q13, anche con l'ausilio di simulazioni in transitorio
- Dimostrare che se Q9 e Q10 hanno W/L molto maggiore di Q14, lo slew rate è dato approssimativamente da:

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

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

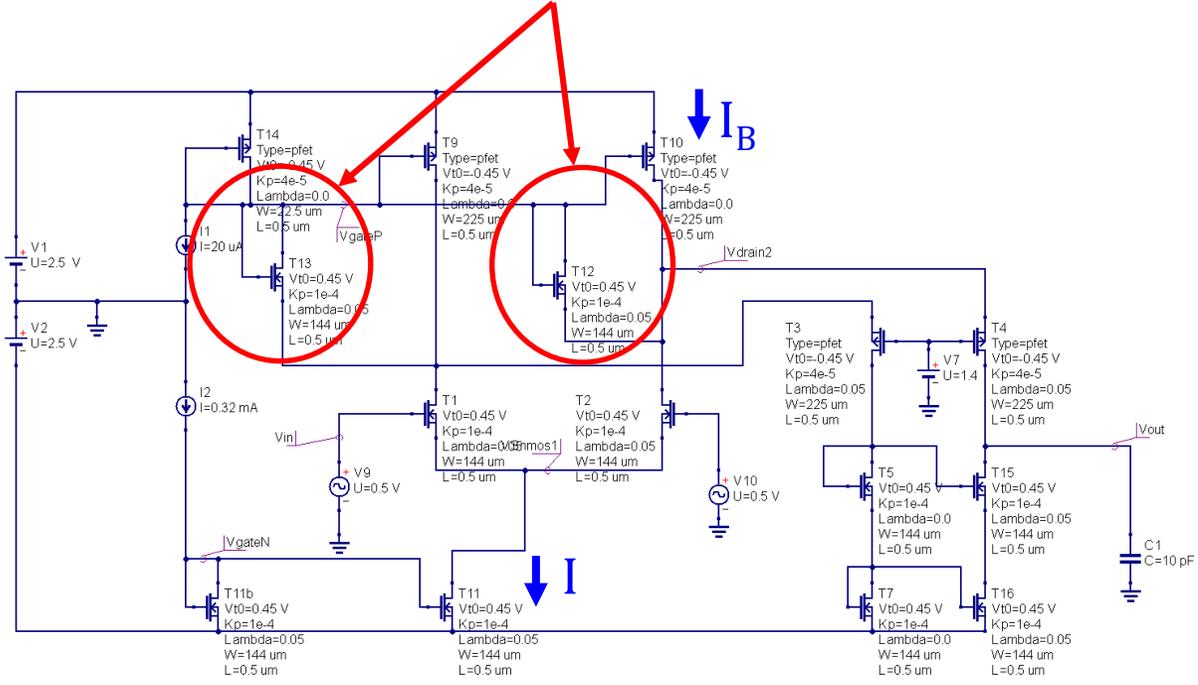
Si faccia riferimento anche alla soluzione dell'Esercizio 7, Lezione 4.





# Dimensionamento del Circuito

Transistori per il miglioramento dello slew rate

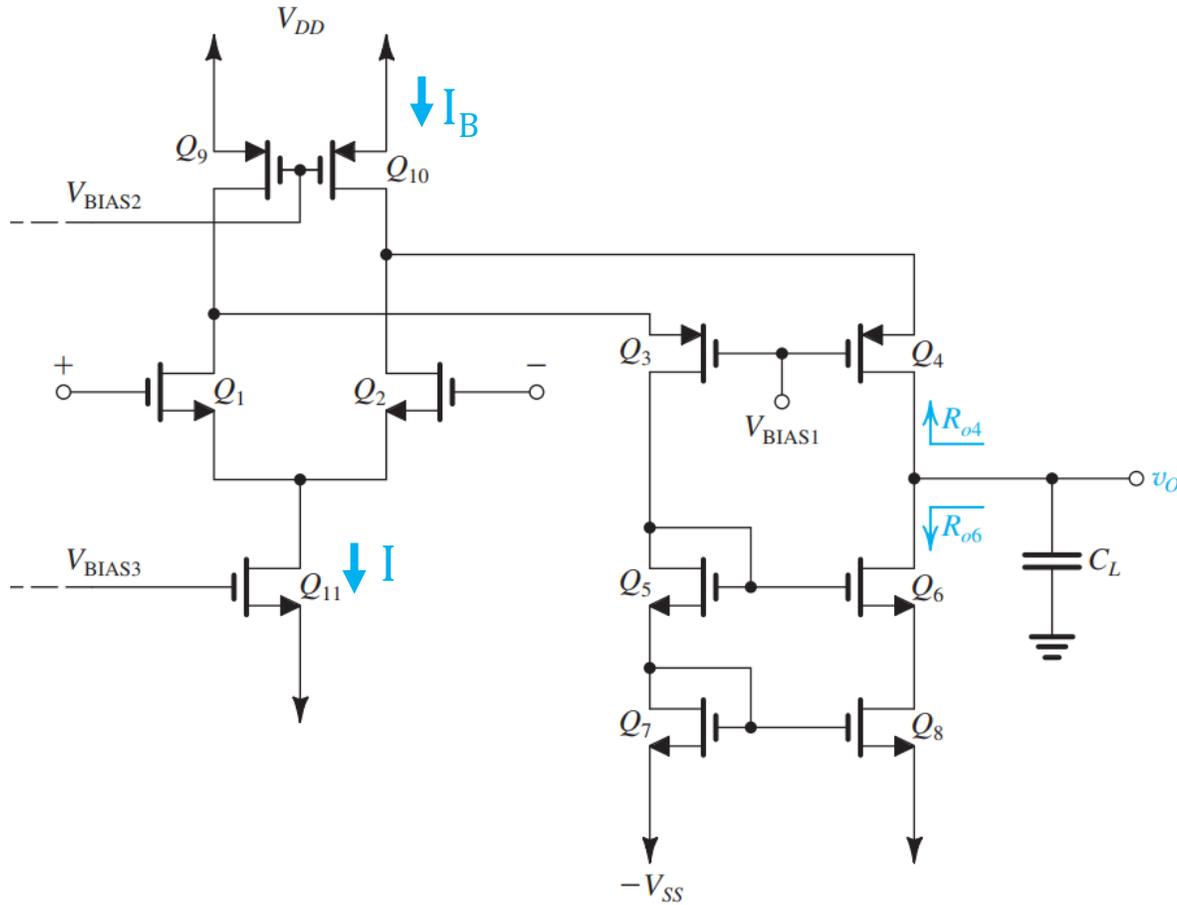


**Amplificatore Operazionale Folded Cascode**

- 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  $I_B$



# Guadagno di Tensione DC



$$A_V = G_m R_o$$

$$G_m = \frac{I}{V_{OV1}}$$

$$R_o \cong$$

$$A_V \cong -$$



# 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

tipo	NMOS T1	PMOS T2	NMOS T3	PMOS T4	NMOS T5	PMOS T6	NMOS T7	PMOS T8	NMOS T9	PMOS T10	NMOS T11
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
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
W [um]	25	62,5	100	100	100	100	100	100	100	100	100
L [um]	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5
W/L	50	125	200	200	200	200	200	200	200	200	200
Vov [V]	0,2	0,2	0,1	0,15811	0,1	0,15811	0,1	0,15811	0,1	0,15811	0,1
VA [V]	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20
Lamba (1/VA)	0,05	0,05	0,05	0,05	0,05	0,05	0,05	0,05	0,05	0,05	0,05
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
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
E ox [F/m]	3,452E-11	3,5E-11									
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
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 ( $k$ ,  $V_t$ ,  $W$ ,  $L$ ,  $\lambda$ ) 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 Q3, Q4 e Q5, Q6, Q7 e Q8 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.



# Verifica del Punto Operativo DC

- 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

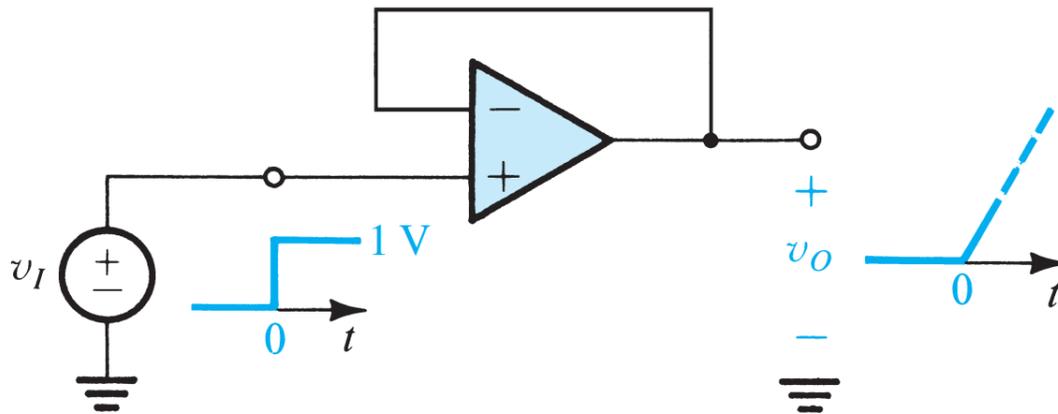


- Inserire i grafici del guadagno in funzione della frequenza
- Elencare i risultati di simulazione relativi a: guadagno DC, ft, margine di fase
- Gli obiettivi sono stati raggiunti?



# 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:

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



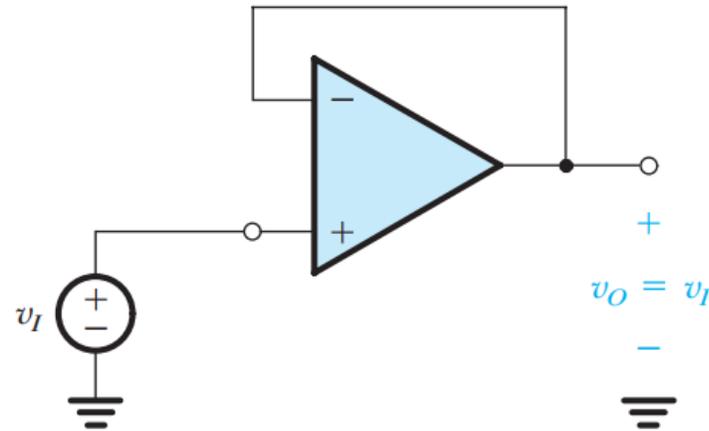
# Slew Rate

- 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