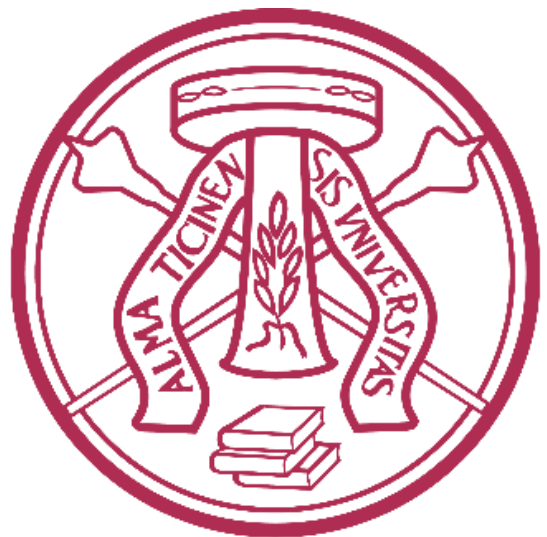




UNIVERSITÀ
DI PAVIA

Corso di Elettronica II – Modulo B

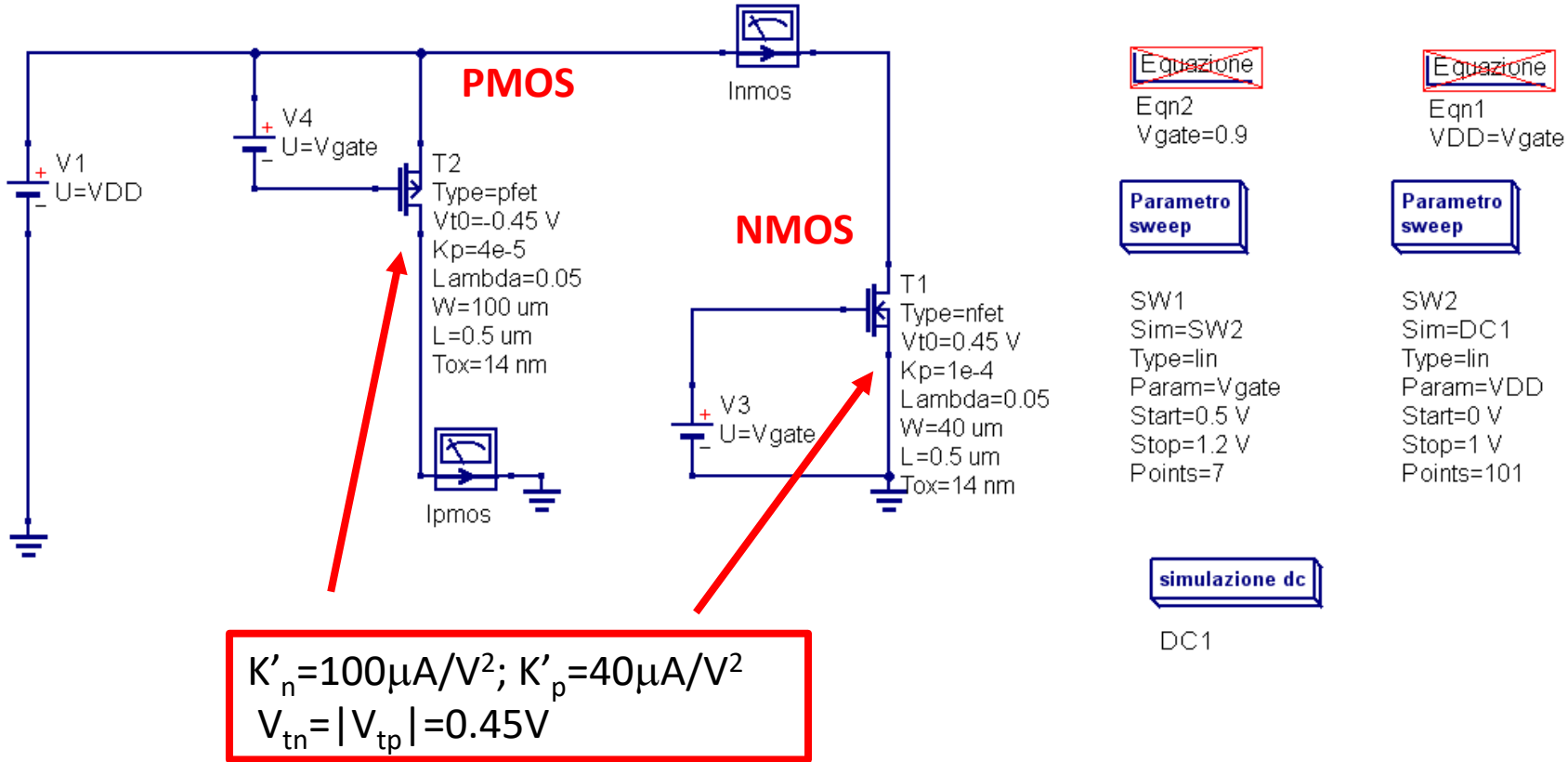
*Attività di Laboratorio
(LAB1): Amplificatori
Operazionali CMOS*

Prof. D. Manstretta

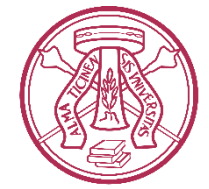
- LAB1: Progettazione assistita dal calcolatore di un amplificatore operazione CMOS a due stadi (esperienza guidata)
 - Caratteristiche tensione-corrente dei MOSFET e parametri dei modelli
 - Definizione degli obiettivi di progetto
 - Disegno del circuito e dimensionamento dei transistori
 - Simulazioni delle principali caratteristiche
- LAB2: Progettazione assistita dal calcolatore di un amplificatore operazione CMOS folded-cascode (facoltativa)
 - Definizione degli obiettivi di progetto
 - Disegno del circuito e dimensionamento dei transistori
 - Simulazione delle principali caratteristiche

- Scaricare files:
 - Progetto: DueStadi_prj
 - File Excel: Dimensionamento MOSFET-OA2st
 - Slides in pdf
- Aprire il progetto in QUCS
- Seguire la lezione e riprodurre i risultati al simulatore

Il Transistore MOS: DC

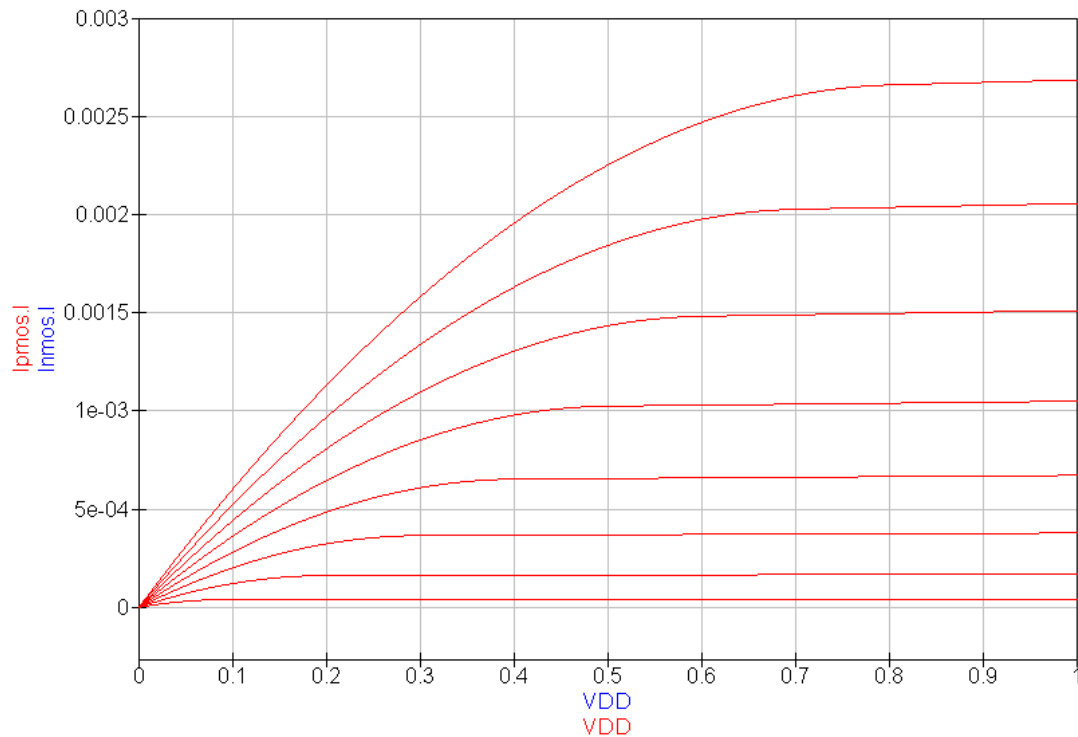


I transistori NMOS (freccia entrante) e PMOS (freccia uscente) si trovano tra i Componenti nella libreria «nonlinear components». Le sonde di corrente permettono di misurare le correnti di drain dei transistori e si trovano nella libreria «probes». La scansione di due parametri (VGS e VDS) attraverso i blocchi SW1 e SW2 consente di tracciare la caratteristica Id-Vds per diverse Vgs. Il blocco «sweep» si trova nella libreria delle simulazioni.

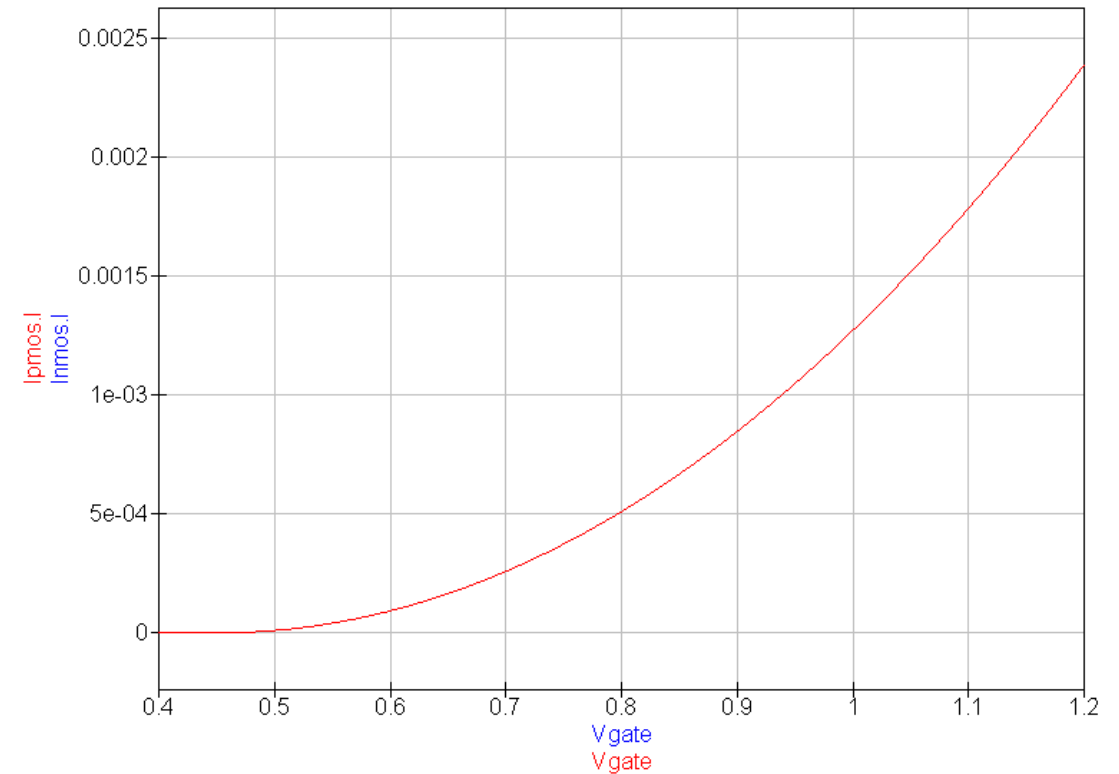


Caratteristiche Tensione-Corrente

I_d vs V_{ds} per diverse V_{gs}



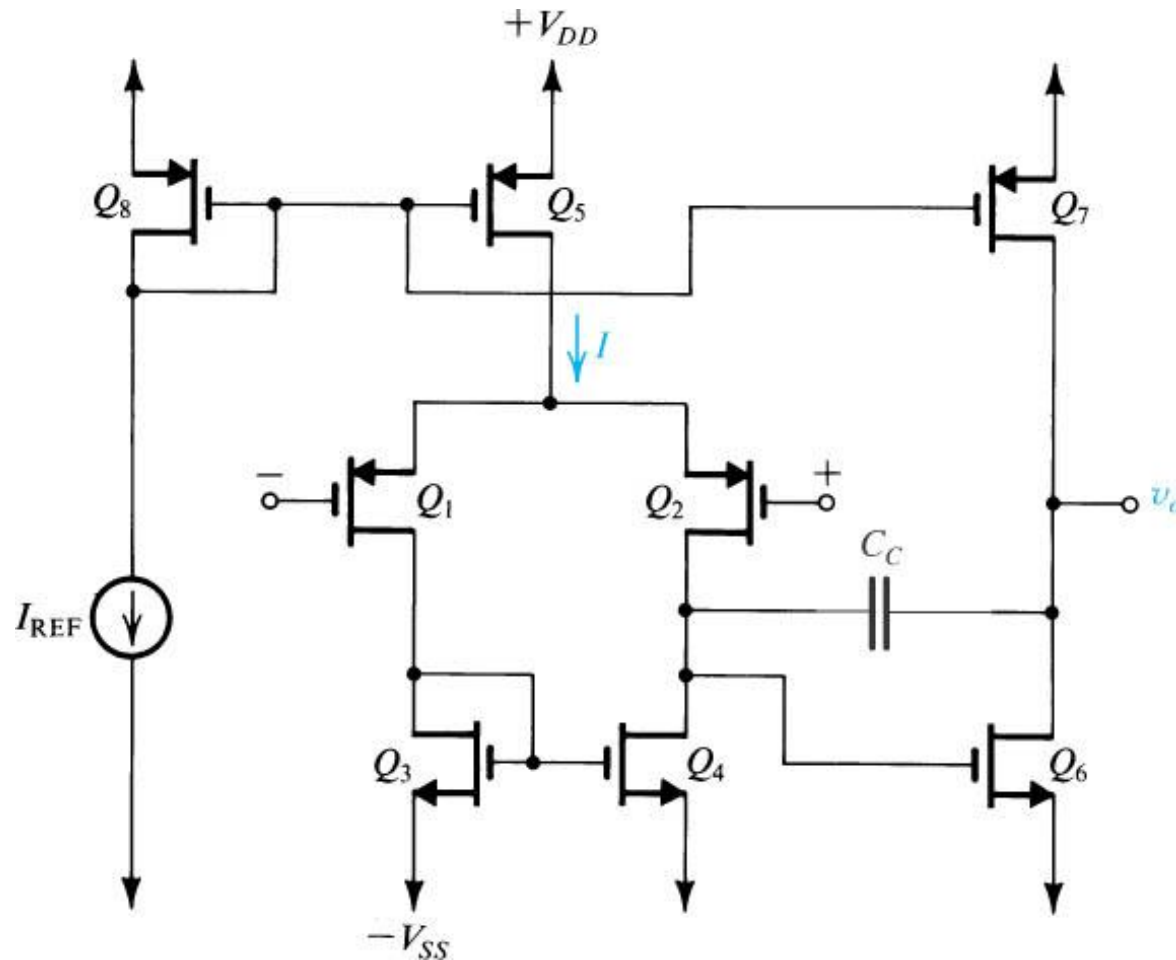
I_d vs V_{gs} per $V_{ds}=V_{ov}$



Corrente in saturazione

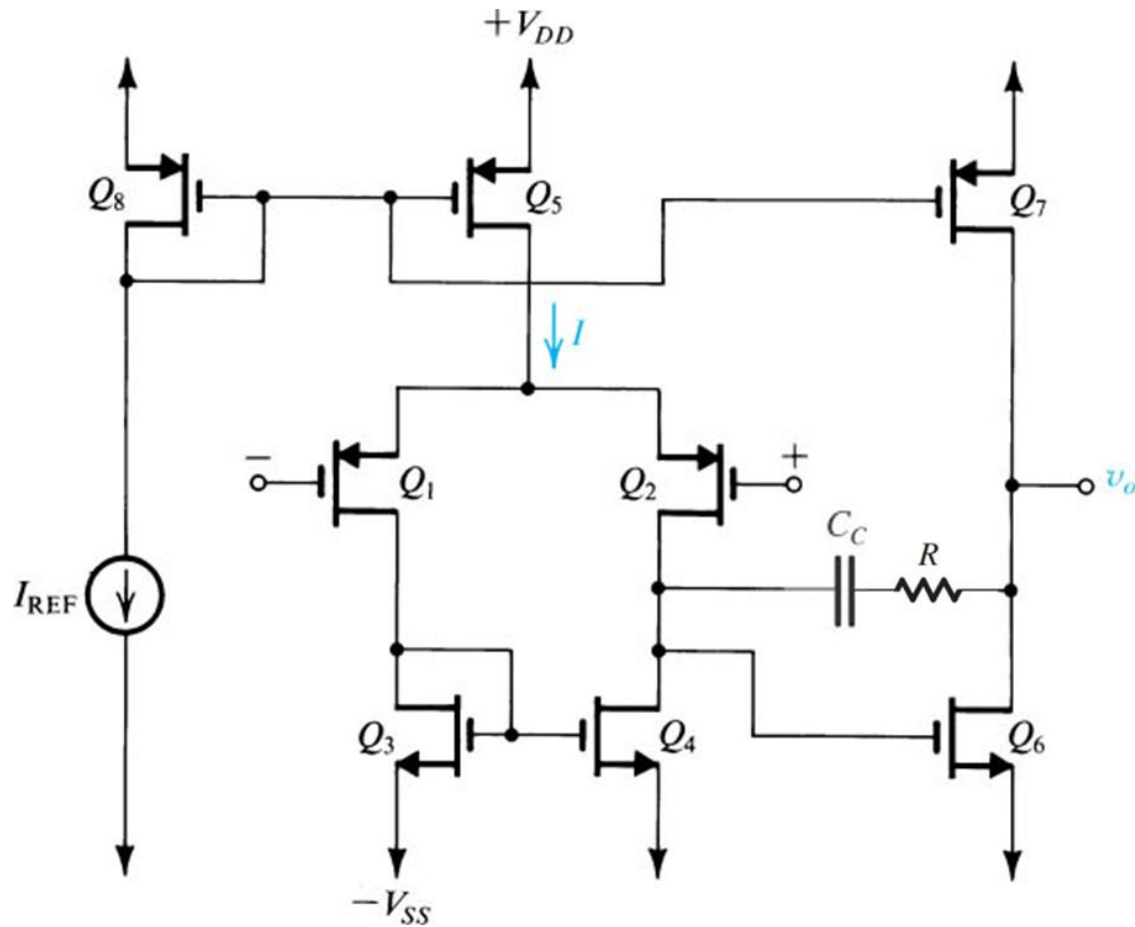
$$I = \frac{1}{2} k'_{n/p} \frac{W}{L} (V_{GS} - V_t)^2 (1 + \lambda V_{DS})$$

Obiettivi di Progetto



- Capacità di carico $C_L=2\text{pF}$
- Banda unitaria $f_t=100\text{MHz}$
- Margine di fase $>70^\circ$
- Slew Rate $>125\text{V}/\mu\text{s}$
- $V_{DD}=V_{SS}=2.5\text{V}$
- $K'_n=100\mu\text{A}/\text{V}^2$; $K'_p=40\mu\text{A}/\text{V}^2$
- $V_{tn}=|V_{tp}|=0.45\text{V}$

Equazioni di Progetto



- Capacità di carico $C_L = 2\text{pF}$

Equazioni di progetto

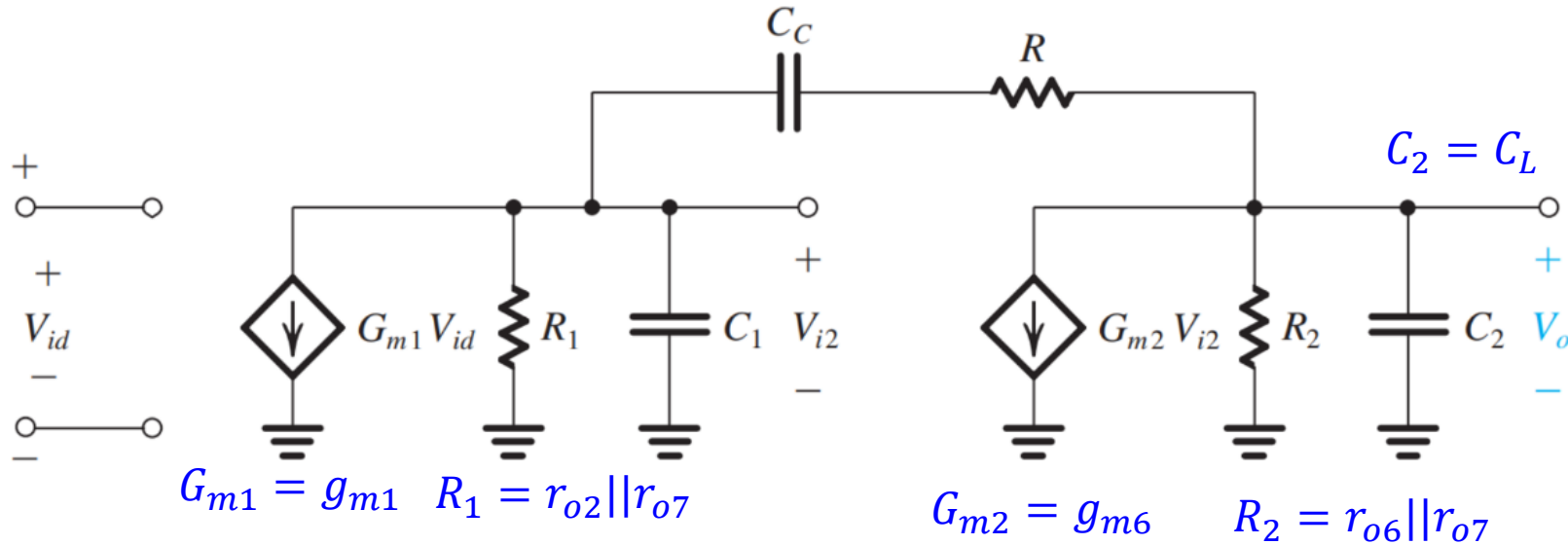
$$\textcircled{1} \quad \omega_t = \frac{g_{m1}}{C_c}$$

$$\textcircled{2} \quad \omega_{p2} = \frac{g_{m6}}{C_L}$$

$$\textcircled{3} \quad \omega_z = \frac{1}{C_c(1/g_{m6} - R)}$$

$$\textcircled{4} \quad SR = \omega_t V_{OV1}$$

Dimensionamento dell'OpAmp



Equazioni di progetto

① $\omega_t = \frac{g_{m1}}{C_c}$

② $\omega_{p2} = \frac{g_{m6}}{C_L}$

③ $\omega_z = \frac{1}{C_c(1/g_{m6} - R)}$

④ $SR = \omega_t V_{OV1}$

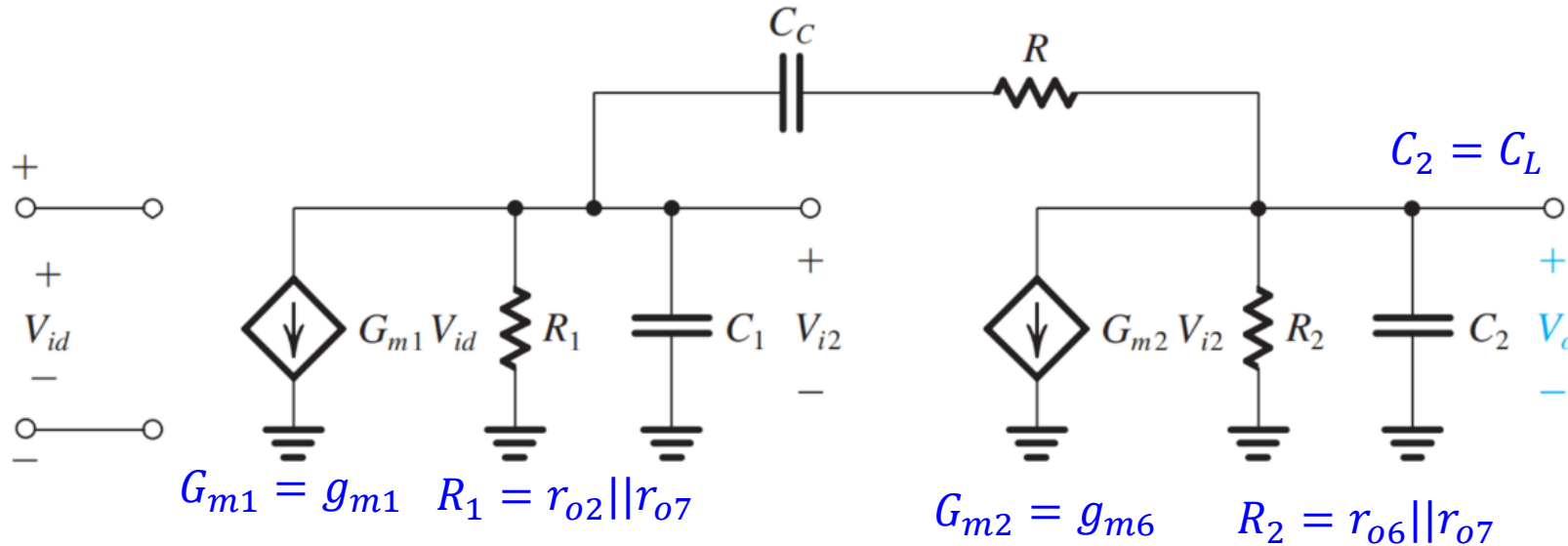
$$PM = 90^\circ - \text{atan}\left(\frac{\omega_t}{\omega_{p2}}\right) - \text{atan}\left(\frac{\omega_t}{\omega_z}\right)$$

Per ottenere un $PM > 70^\circ$, scegliamo $f_z = \infty$ e $f_{p2} = 4f_t$. $\longrightarrow$ $PM = 90^\circ - \text{atan}\left(\frac{1}{4}\right) = 76^\circ$

③ $R = 1/g_{m6}$

② $g_{m6} = \omega_{p2} C_L = 4\omega_t C_L = 8\pi 10^8 \times 2 \cdot 10^{-12} \cong 5 \text{ mA/V}$

Dimensionamento dell'OpAmp



Equazioni di progetto

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

$$\textcircled{2} \quad \omega_{p2} = \frac{g_{m6}}{C_L}$$

$$\textcircled{3} \quad \omega_z = \frac{1}{C_c(1/g_{m6} - R)}$$

$$\textcircled{4} \quad SR = \omega_t V_{OV1}$$

$$\textcircled{4} \quad V_{OV1} = \frac{SR}{\omega_t} = \frac{125 \times 10^6 V/s}{2\pi 10^8 Hz} \cong 0.2V$$

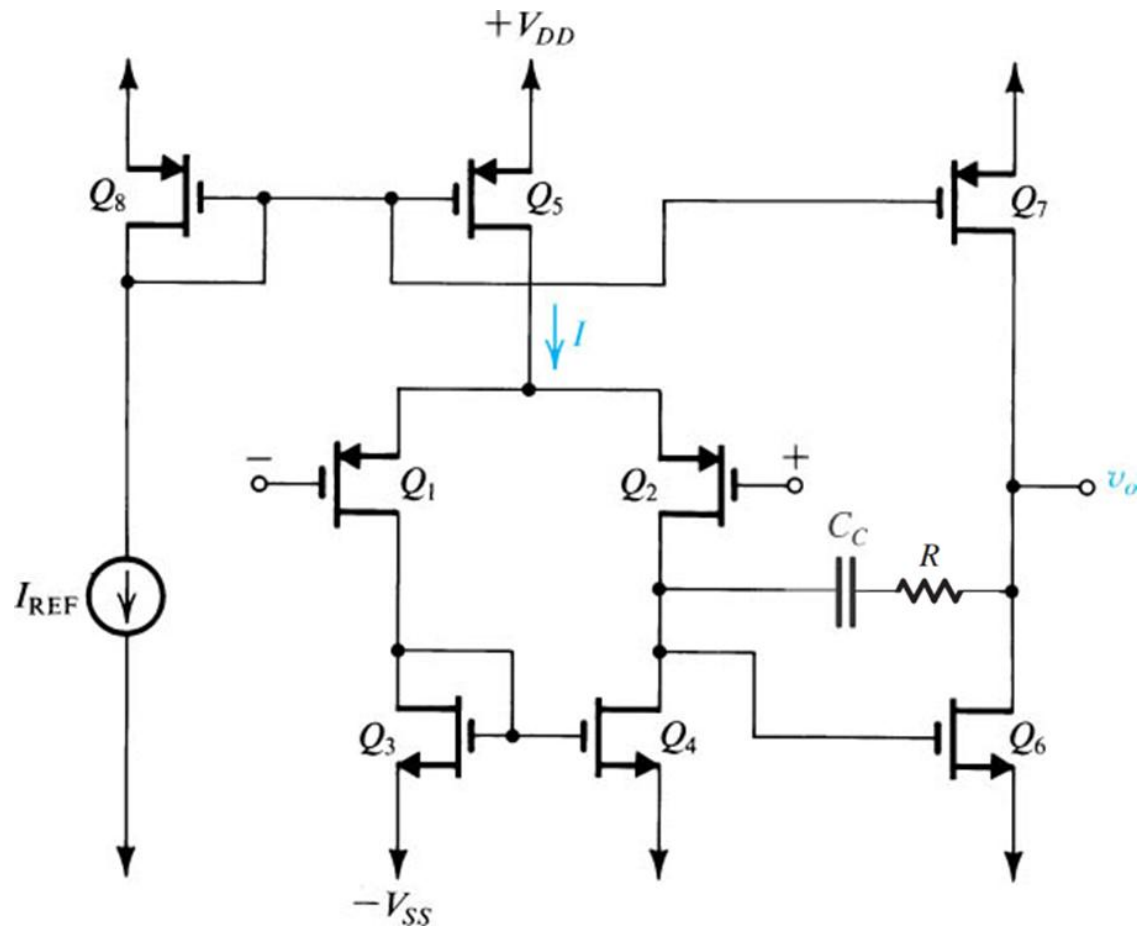
Scegliamo $g_{m1} = 1mS$. Allora:

$$g_{m1} = \frac{I}{V_{OV1}} \longrightarrow I = g_{m1} V_{OV1} = 200\mu A$$

$$\textcircled{1} \quad C_c = \frac{g_{m1}}{\omega_t} = \frac{1mS}{2\pi 10^8 Hz} \cong 1.6pF$$

NOTA. La scelta di g_{m1} è dettata in generale da diverse esigenze. Prima fra tutte il rumore dell'OpAmp, ma anche lo slew rate, come vedremo nelle simulazioni seguenti.

Dimensionamento dei Transistori



$$I = 200\mu A$$

$$g_{m1} = 1mA/V$$

- Per semplicità, scegliamo lo stesso overdrive per tutti i transistori: $V_{ov}=0.2V$

$$g_{m6} = 5mA/V$$

$$I = 500\mu A$$

$$R = 1/g_{m6} = 200\Omega$$

$$C_C = 1.6pF$$

Dimensionamento dei Transistori

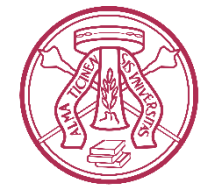
Foglio Excel

	tipo	PMOS	PMOS	NMOS	NMOS	PMOS	NMOS	PMOS	PMOS
		T1	T2	T3	T4	T5	T6	T7	T8
Input	K'n/p [A/V ²]	4,00E-05	4,00E-05	1,00E-04	1,00E-04	4,00E-05	1,00E-04	4,00E-05	4,00E-05
Input	ID [A]	1,00E-04	1,00E-04	1,00E-04	1,00E-04	2,00E-04	1,00E+00	1,00E+00	1,00E+00
Input	W [um]	62,5	62,5	25	25	125	1	1	1
Input	L [um]	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5
Valore calcolato	W/L	125	125	50	50	250	2	2	2
Valore calcolato	Vov [V]	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2	100	158,1139	158,113883
Input	VA [V]	20	20	20	20	20	20	20	20
Valore calcolato	Lamba (1/VA)	0,05	0,05	0,05	0,05	0,05	0,05	0,05	0,05
Valore calcolato	gm [A/V]	1,00E-03	1,00E-03	1,00E-03	1,00E-03	2,00E-03	2,00E-02	1,26E-02	1,26E-02
Valore calcolato	ro [Ohm]	2,00E+05	2,00E+05	2,00E+05	2,00E+05	1,00E+05	2,00E+01	2,00E+01	2,00E+01
Input	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
Costante	E ox [F/m]	3,4515E-11	3,45E-11	3,45E-11	3,4515E-11	3,45E-11	3,45E-11	3,45E-11	3,4515E-11
Costante	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
Valore calcolato	Cgs [F]	5,14E-14	5,14E-14	2,05E-14	2,05E-14	1,03E-13	8,22E-16	8,22E-16	8,22E-16
Valore calcolato	fp' [Hz]			fp'1=	1,94E+09	fp'2=	7,96E+09		
Valore calcolato	Cap [F]	Cc	1,60E-12			CL	2,00E-12		
Valore calcolato		ft [Hz]	9,95E+07			fp2 [Hz]	1,59E+09		
Valore calcolato		SR [V/s]	1,25E+08						

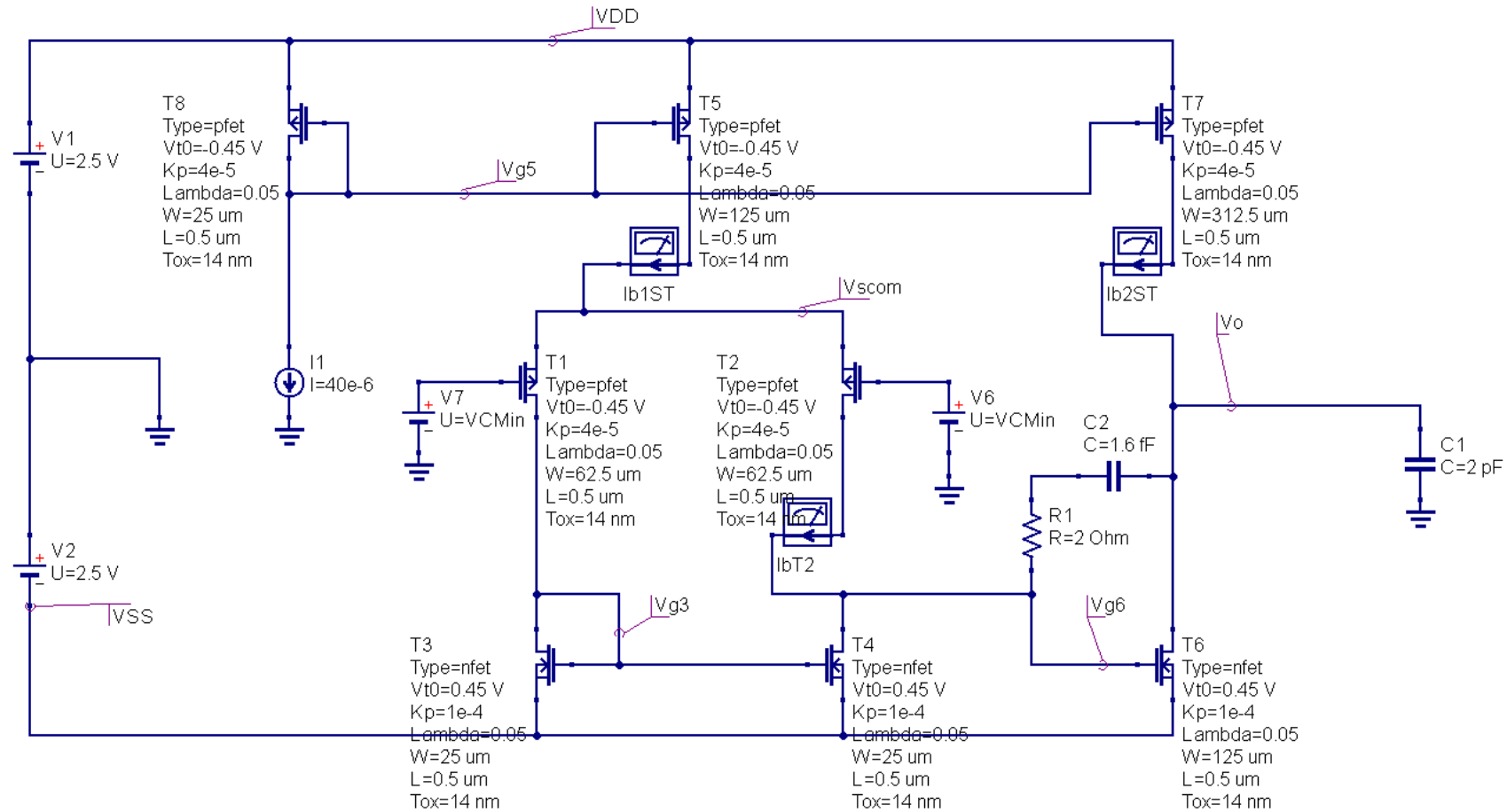
Corrente in saturazione

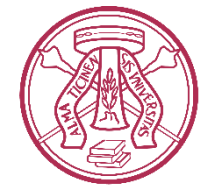
$$I = \frac{1}{2} k'_{n/p} \frac{W}{L} (V_{GS} - V_t)^2 (1 + \lambda V_{DS})$$

- Per semplicità, scegliamo lo stesso overdrive per tutti i transistori: $V_{ov}=0.2V$
- Fissiamo $L=0.5\mu m$ e $\lambda=1/VA=1/20V$ 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 , $\lambda(=1/VA)$) devono essere **impostate a mano**. I valori di W/L , Vov , gm , ro vengono calcolati automaticamente dal foglio Excel.
- **Si consiglia di non modificare i valori di k e V_t .**
- **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.

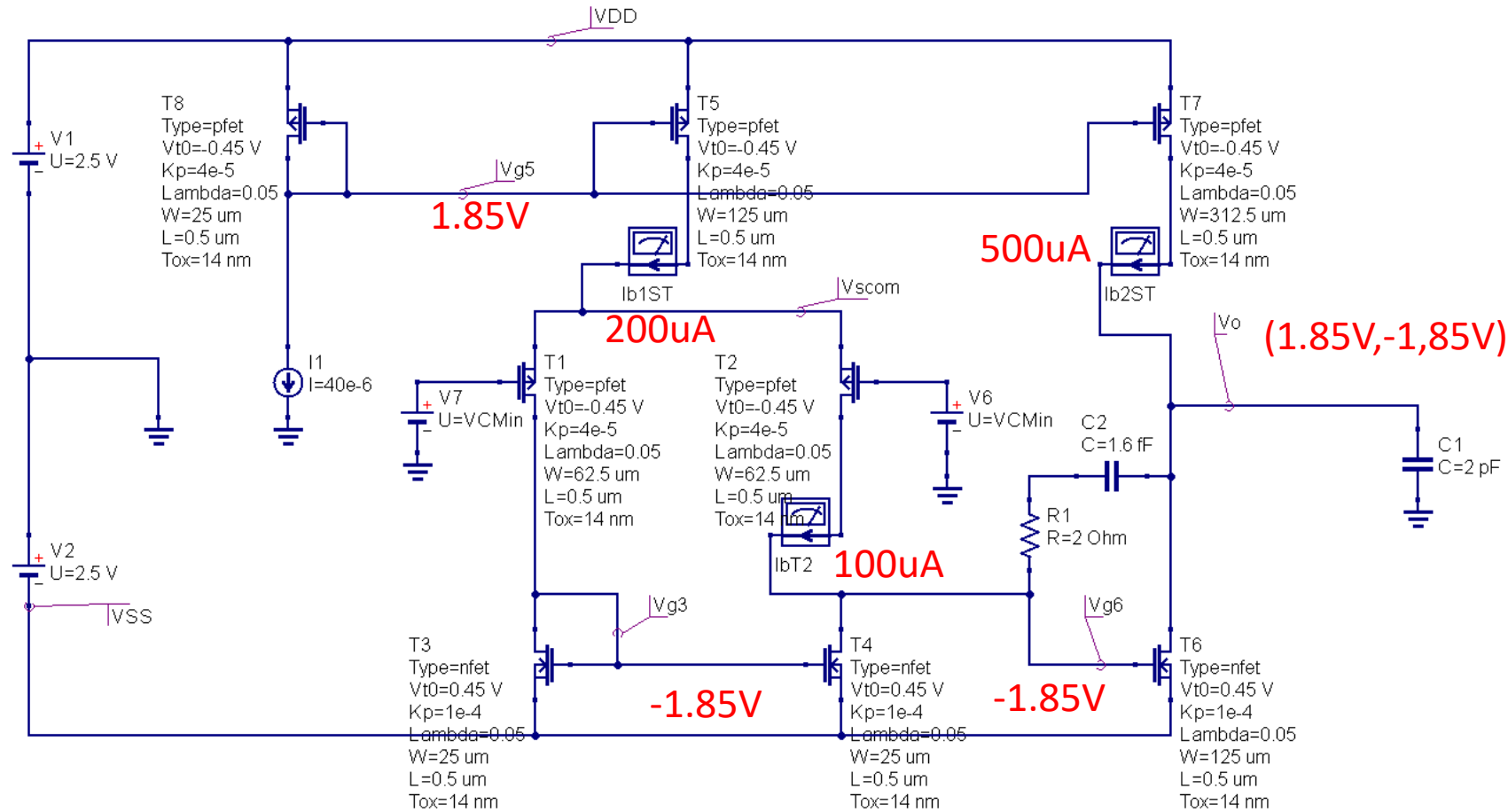


Disegno del Circuito





Simulazione DC: Verifica del Punto Operativo DC



Guadagno di Modo Comune DC

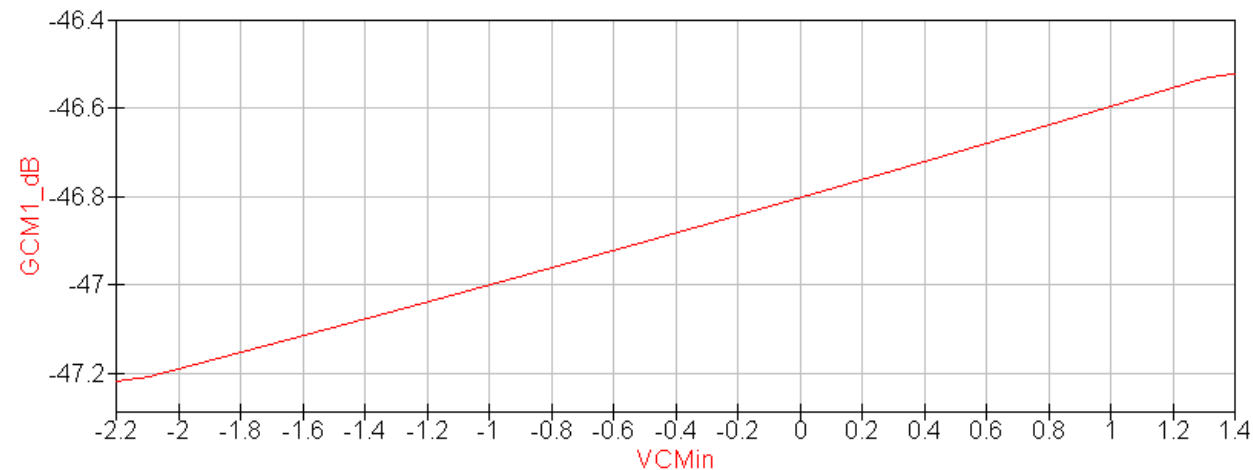
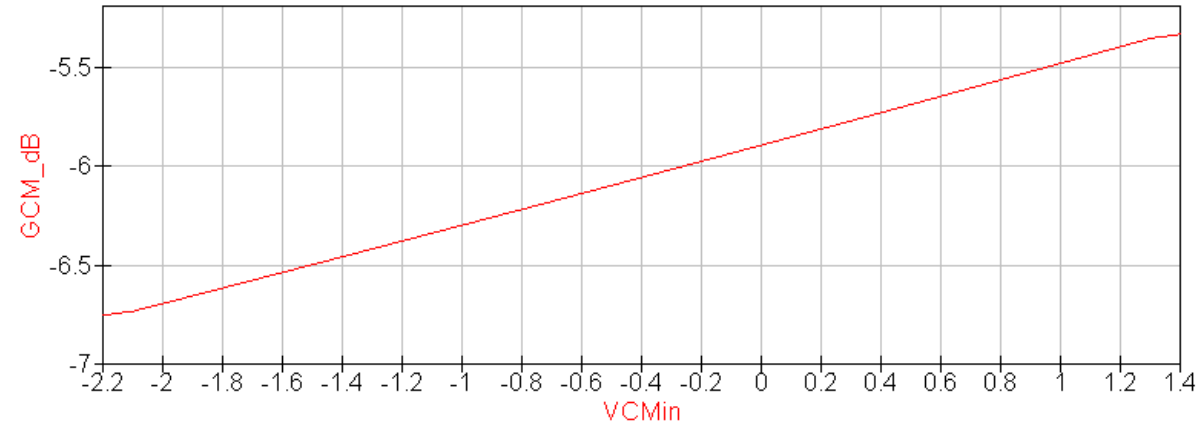
Facendo una scansione della tensione di modo comune in ingresso e valutando le variazioni della tensione d'uscita, calcoliamo il guadagno di modo comune in DC.

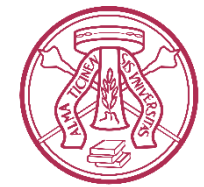
Parametro sweep

SW1
Sim=DC1
Type=lin
Param=VCMIn
Start=-2.2
Stop=1.4
Points=37

Equazione

Eqn1
 $GCM = \text{diff}(V_o, V, VCMIn)$
 $GCM_dB = \text{dB}(GCM)$
 $GCM1 = \text{diff}(V_{g6}, V, VCMIn)$
 $GCM1_dB = \text{dB}(GCM1)$





Simulazione AC: Risposta in Frequenza

Guadagno AC senza Cc

Equazione

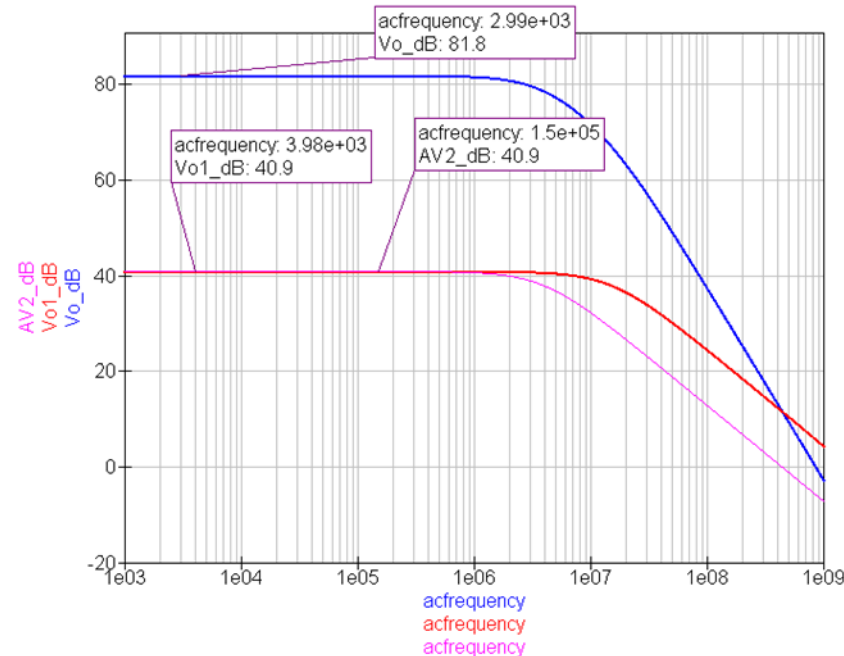
```
Eqn3
Vo_dB=dB(Vo.v)
Vo_deg=phase(Vo.v)
Vo_dB_max=max(dB(Vo.v))
fp_dom=xvalue(Vo_dB,Vo_dB_max-3)
```

Equazione

```
Eqn5
ft=xvalue(Vo_dB,0)
PM=yvalue(Vo_deg,ft)
```

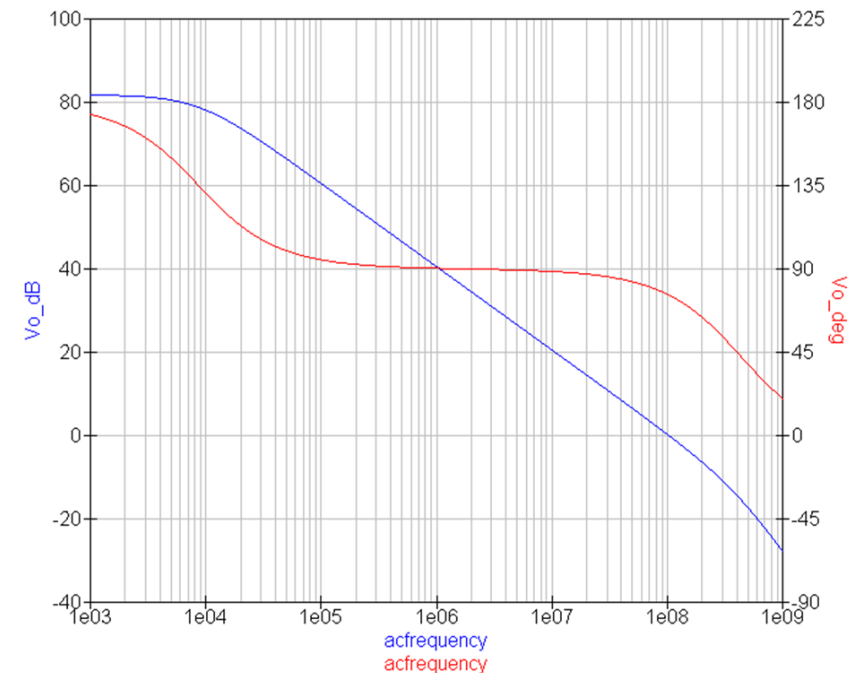
Equazione

```
Eqn4
Vo1_dB=dB(Vg6.v)
AV1_DC=max(Vo1_dB)
fp1=xvalue(Vo1_dB,AV1_DC-3)
AV2_dB=dB(Vo.v)-dB(Vg6.v)
AV2_DC=max(AV2_dB)
fp2=xvalue(AV2_dB,AV2_DC-3)
```



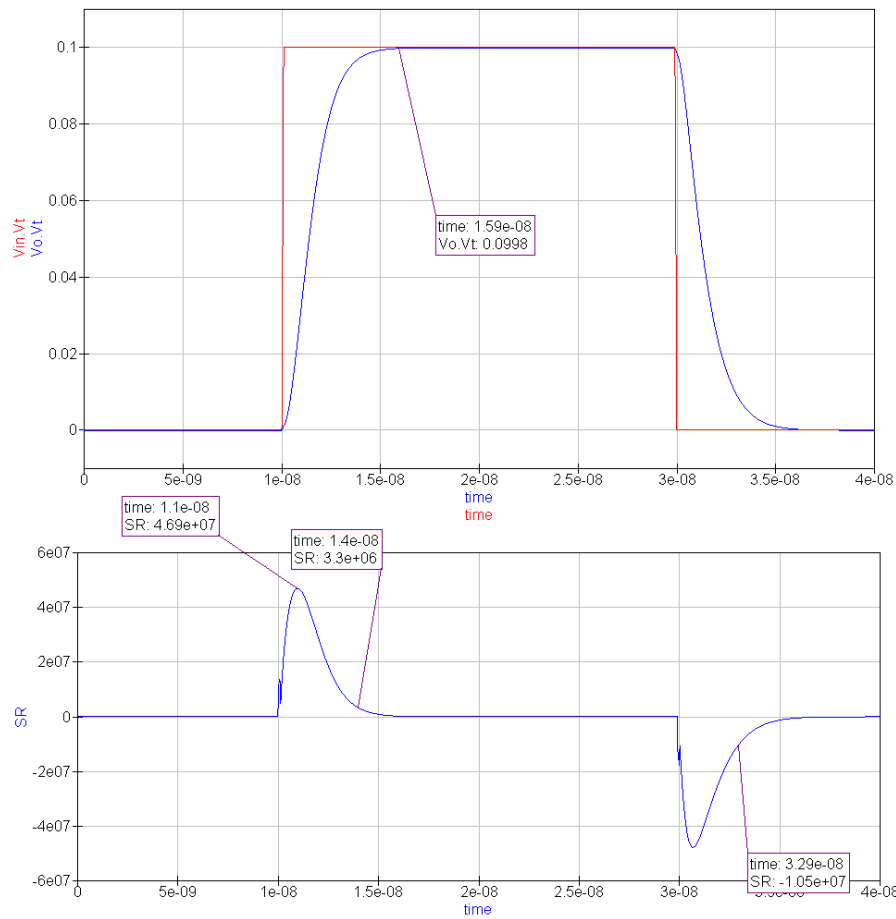
Guadagno AC con Cc

number	ft	PM	AV1_DC	fp1	AV2_DC	fp2
1	1.06e+08	75.5	40.8	8.91e+03	40.9	2.24e+06

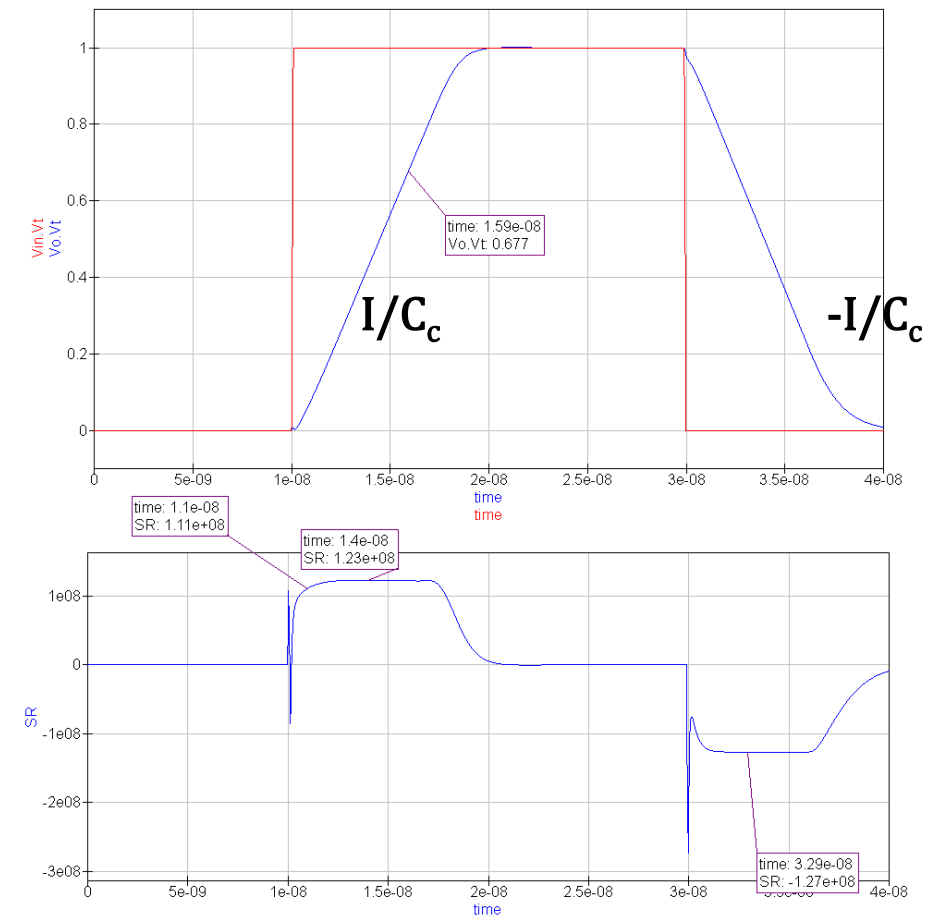


Simulazione Transient: Risposta al Gradino

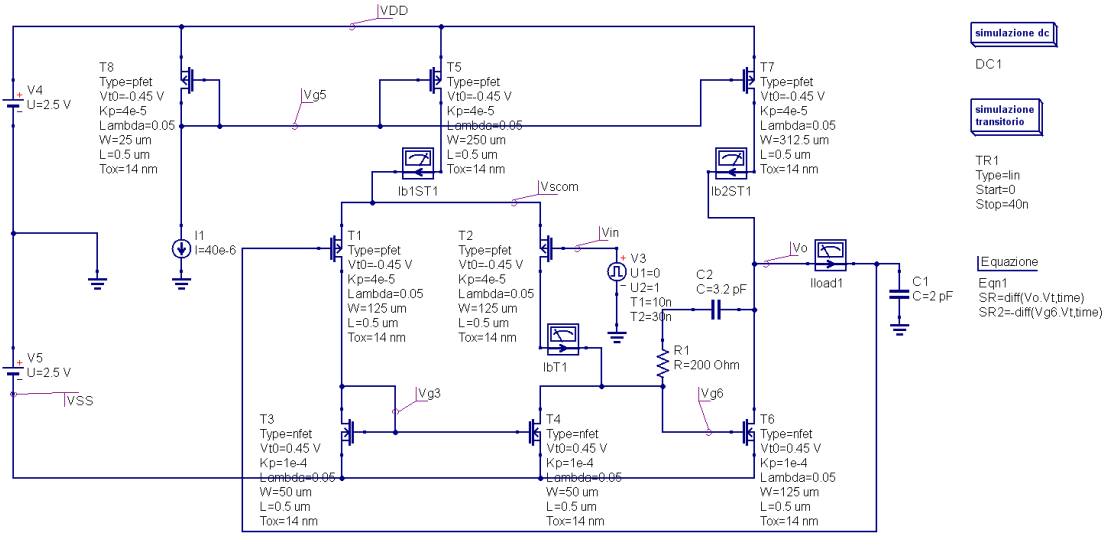
Settling Lineare



Slewing



Slewing Asimmetrico

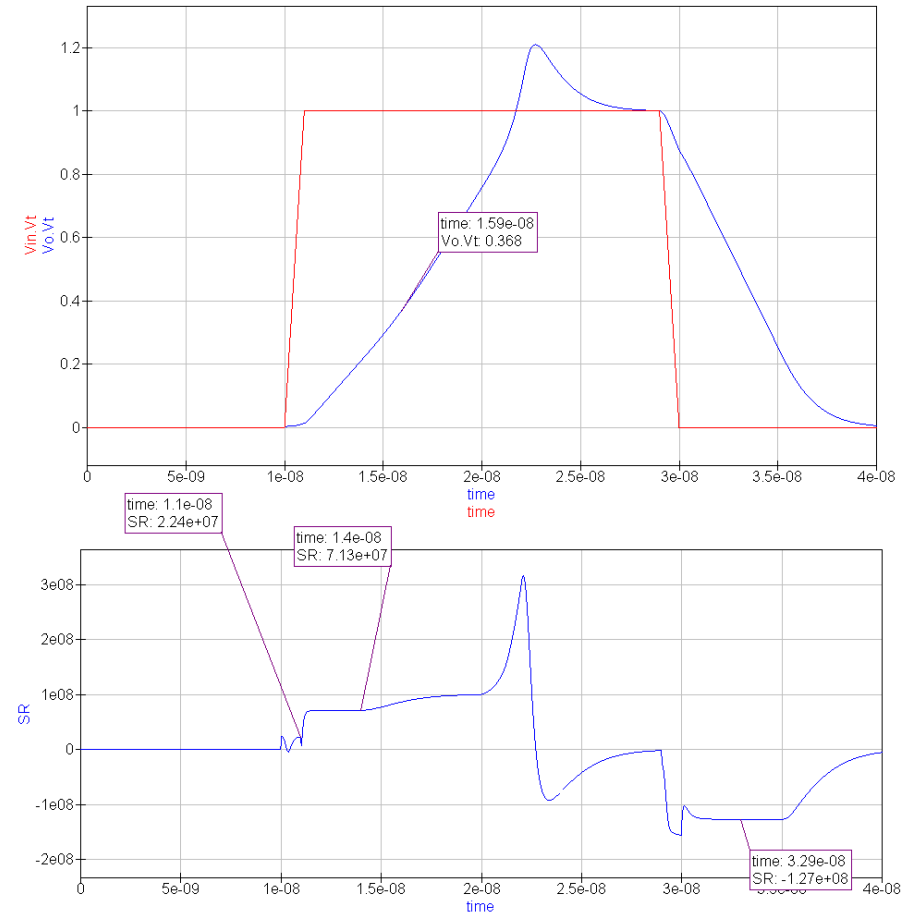


Quando C_c è troppo grande, I_7 non riesce a caricare C_c e C_L insieme.

Regola aggiuntiva di progetto:

$$\frac{I_7}{C_L + C_C} > \frac{I}{C_C}$$

Questa regola è rispettata nel design originale ma non nel re-design, che infatti ha slewing più lento sul fronte di salita.





UNIVERSITÀ
DI PAVIA