



UNIVERSITÀ
DI PAVIA

Corso di Elettronica II – Modulo B

*Attività di Laboratorio:
Amplificatori Operazionali
CMOS*

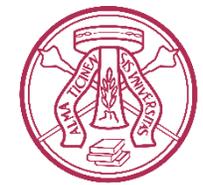
*Prof. D. Manstretta
AA 2021-22*



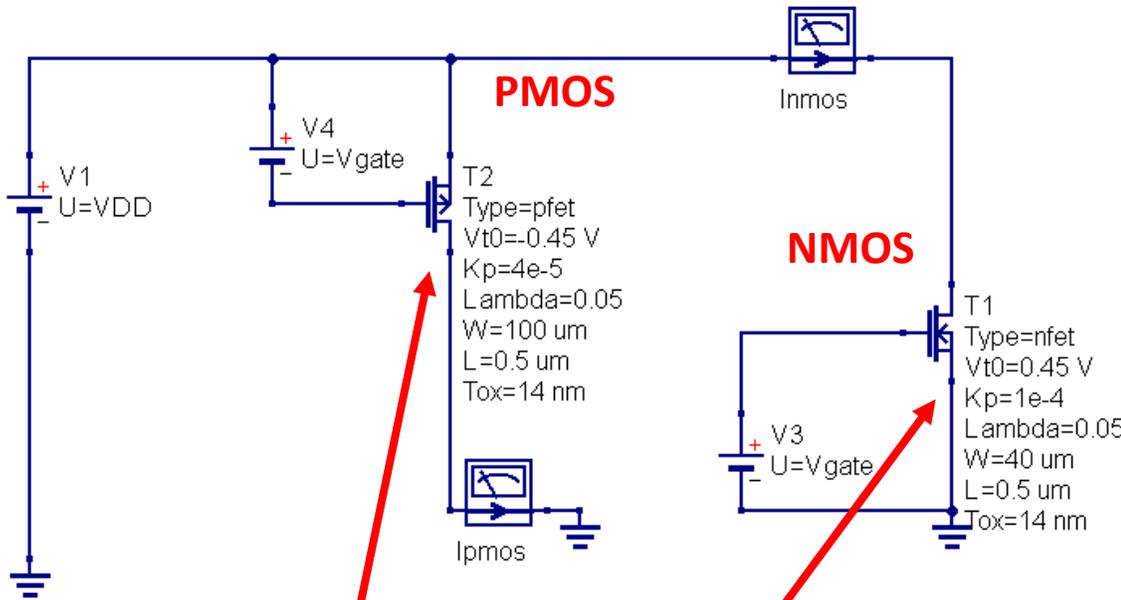
- LAB1: Progettazione assistita dal calcolatore di un amplificatore operazione CMOS a due stadi (esperienza guidata)
 - Caratteristiche tensione-corrente dei MOSFET e parametri dei modelli
 - Definizione degli obiettivi di progetto
 - Disegno del circuito e dimensionamento dei transistori
 - Simulazioni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



- Scaricare files:
 - Progetto: CMOS_DueStadi_prj
 - File Excel: Dimensionamento MOSFET-OA2st
 - Slides in pdf
- Aprire il progetto in QUCS-Studio
 - CMOS_DueStadi_prj-QucsStudio (versione per Qucs-Studio)
 - DueStadi_prj_Qucs (versione per Qucs)
- Seguire la lezione e riprodurre i risultati al simulatore



Il Transistore MOS: DC



$$K'_n = 100 \mu\text{A}/\text{V}^2; K'_p = 40 \mu\text{A}/\text{V}^2$$

$$V_{tn} = |V_{tp}| = 0.45\text{V}$$

~~Equazione~~

Eqn2
Vgate=0.9

Parametro
sweep

SW1
Sim=SW2
Type=lin
Param=Vgate
Start=0.5 V
Stop=1.2 V
Points=7

simulazione dc

DC1

~~Equazione~~

Eqn1
VDD=Vgate

Parametro
sweep

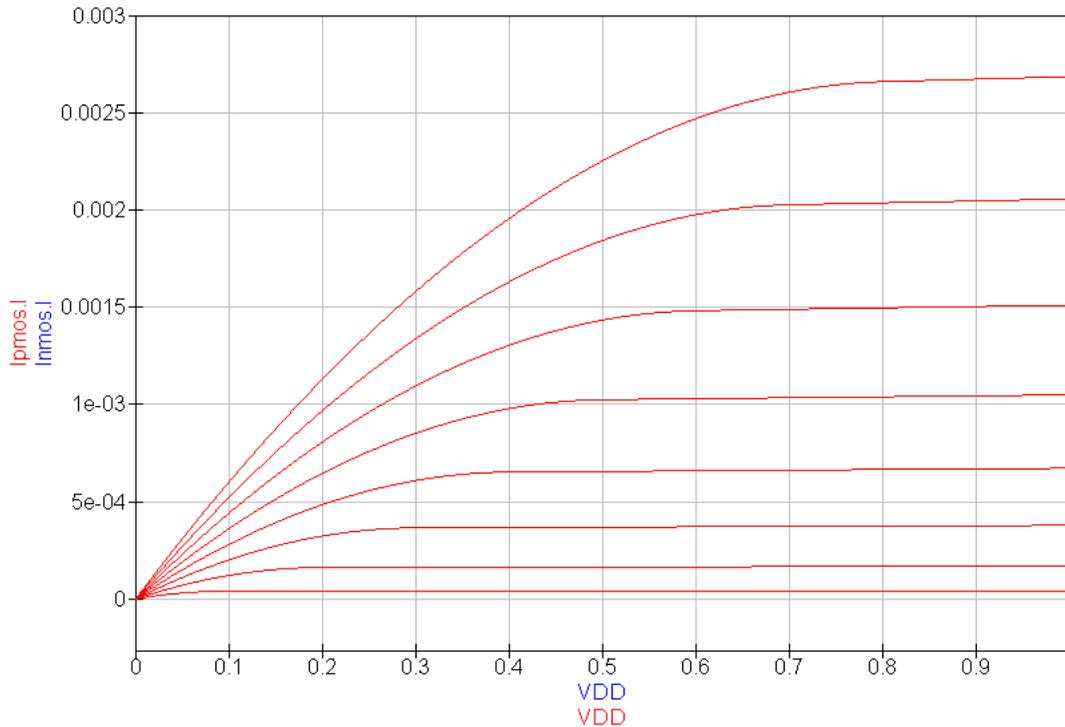
SW2
Sim=DC1
Type=lin
Param=VDD
Start=0 V
Stop=1 V
Points=101

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.

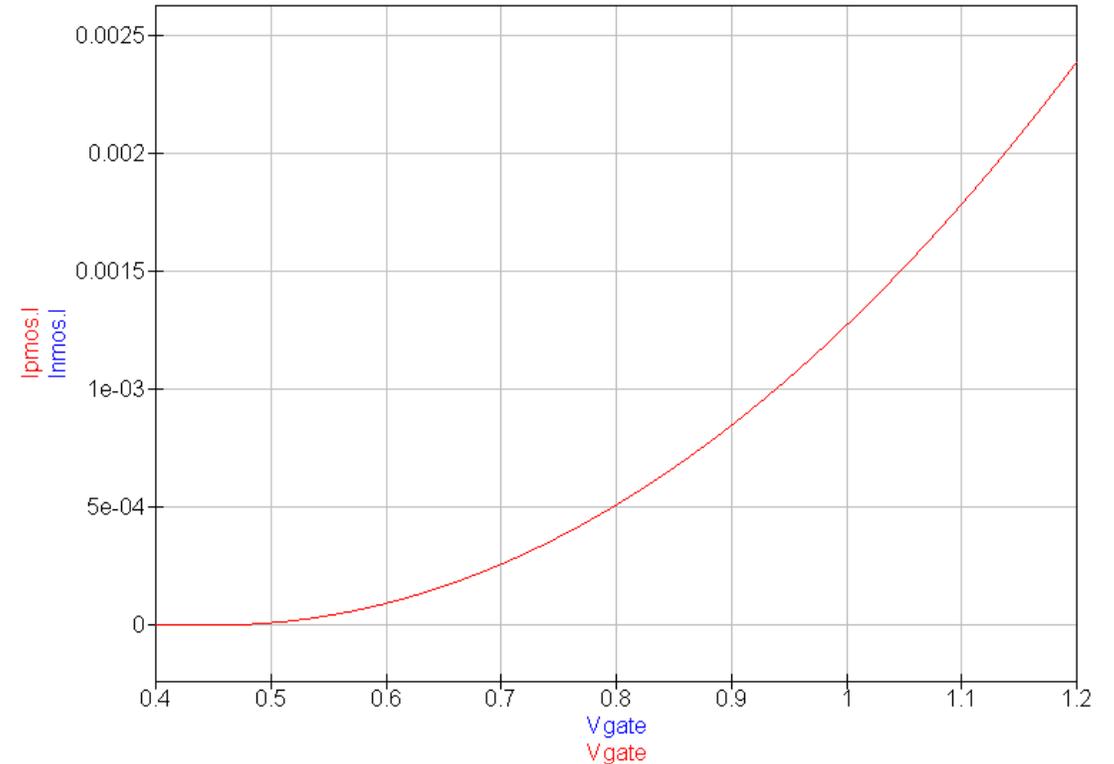


Caratteristiche Tensione-Corrente

Id vs Vds per diverse Vgs



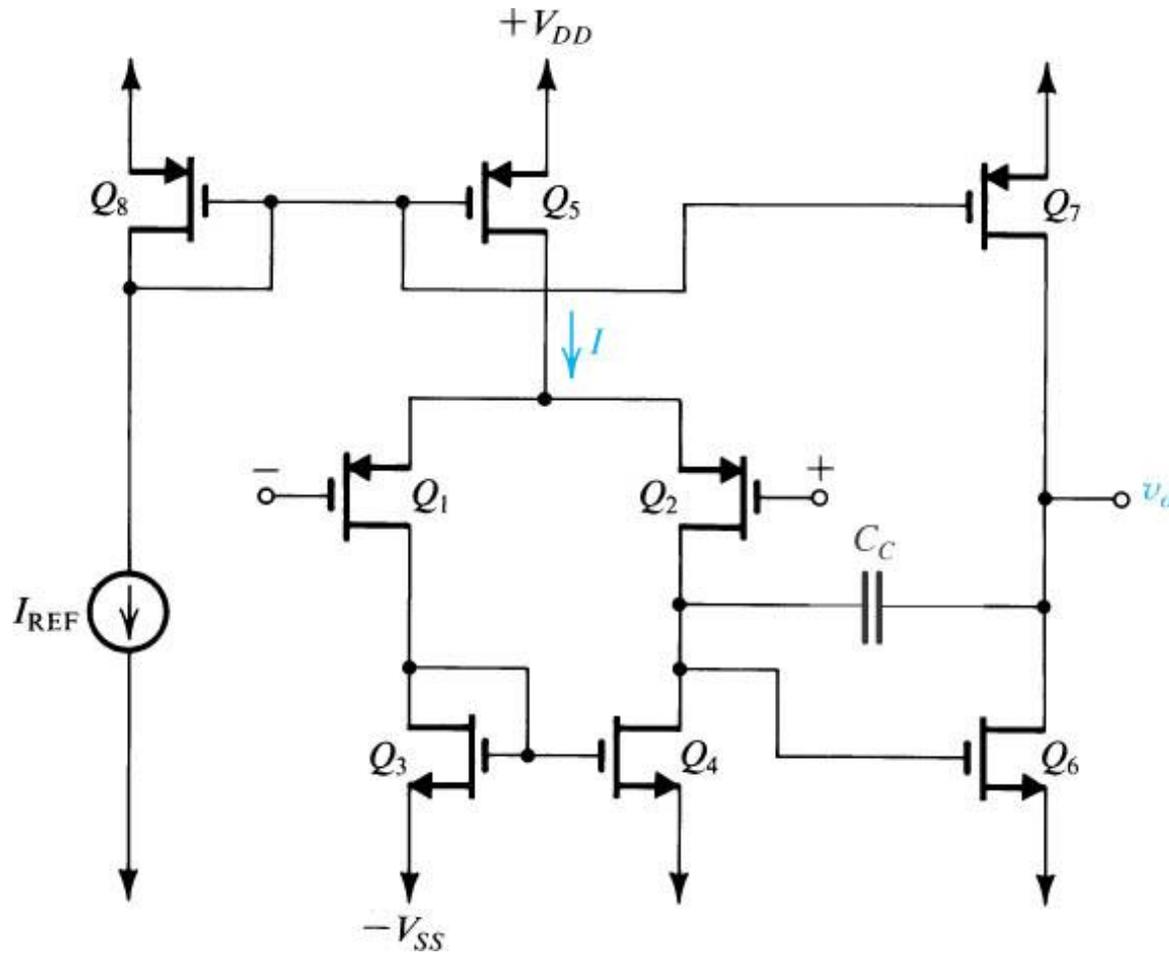
Id vs Vgs per Vds=Vov



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

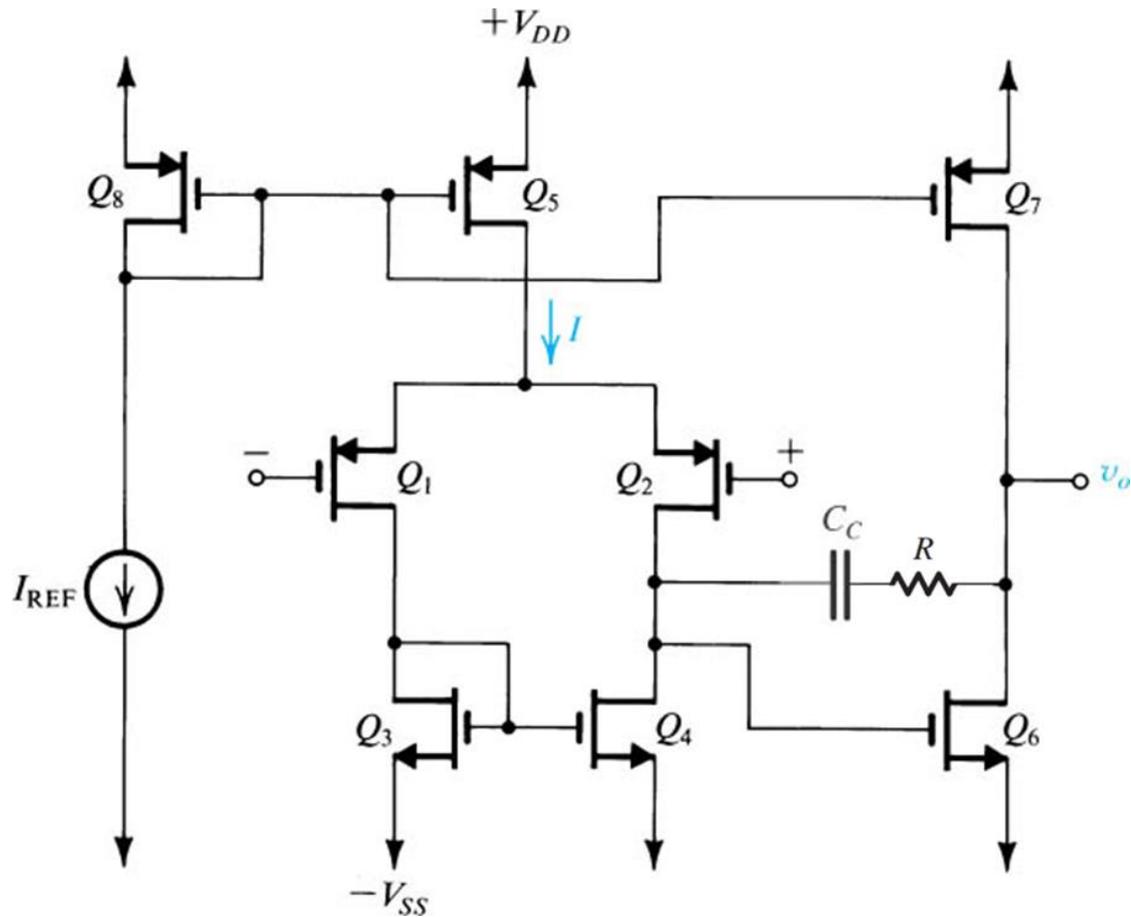


- Capacità di carico $C_L=2\text{pF}$
- Banda unitaria $f_t=100\text{MHz}$
- Margine di fase $>70^\circ$
- Slew Rate $>125\text{V}/\mu\text{s}$

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



Equazioni di Progetto



- Capacità di carico $C_L=2\text{pF}$

Equazioni di progetto

① $\omega_t = \frac{g_{m1}}{C_c}$

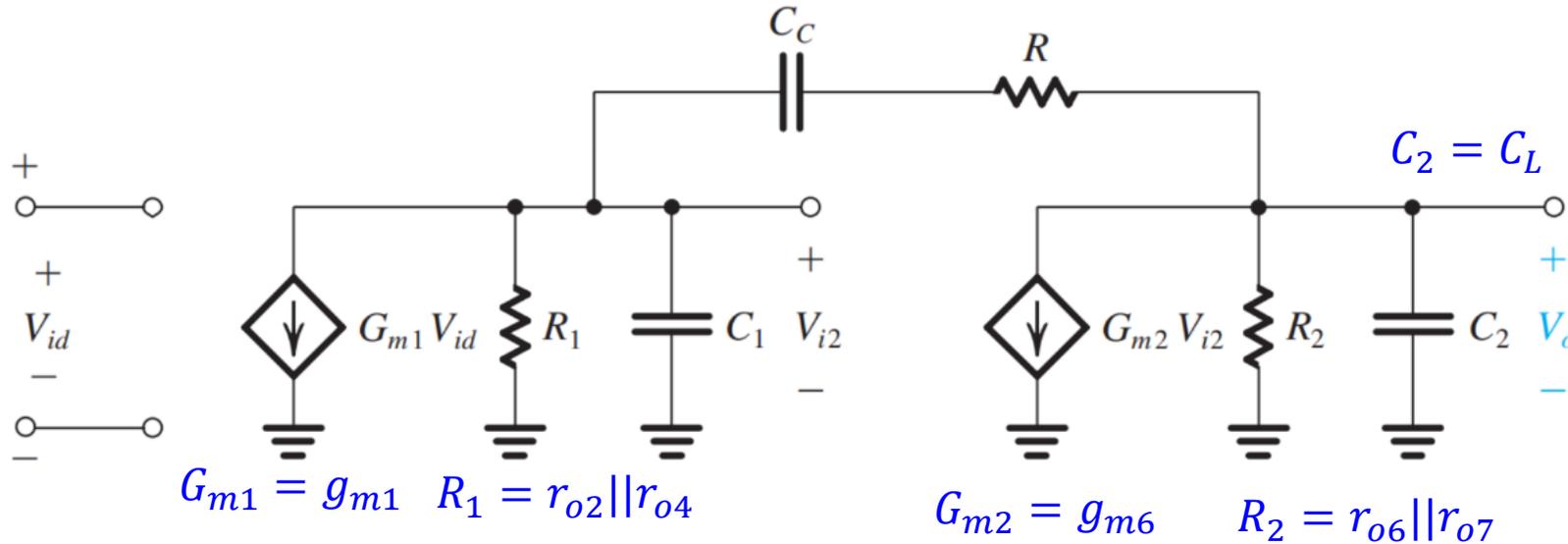
② $\omega_{p2} = \frac{g_{m6}}{C_L}$

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

④ $SR = \omega_t V_{OV1}$



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 $SR = \omega_t V_{OV1}$

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

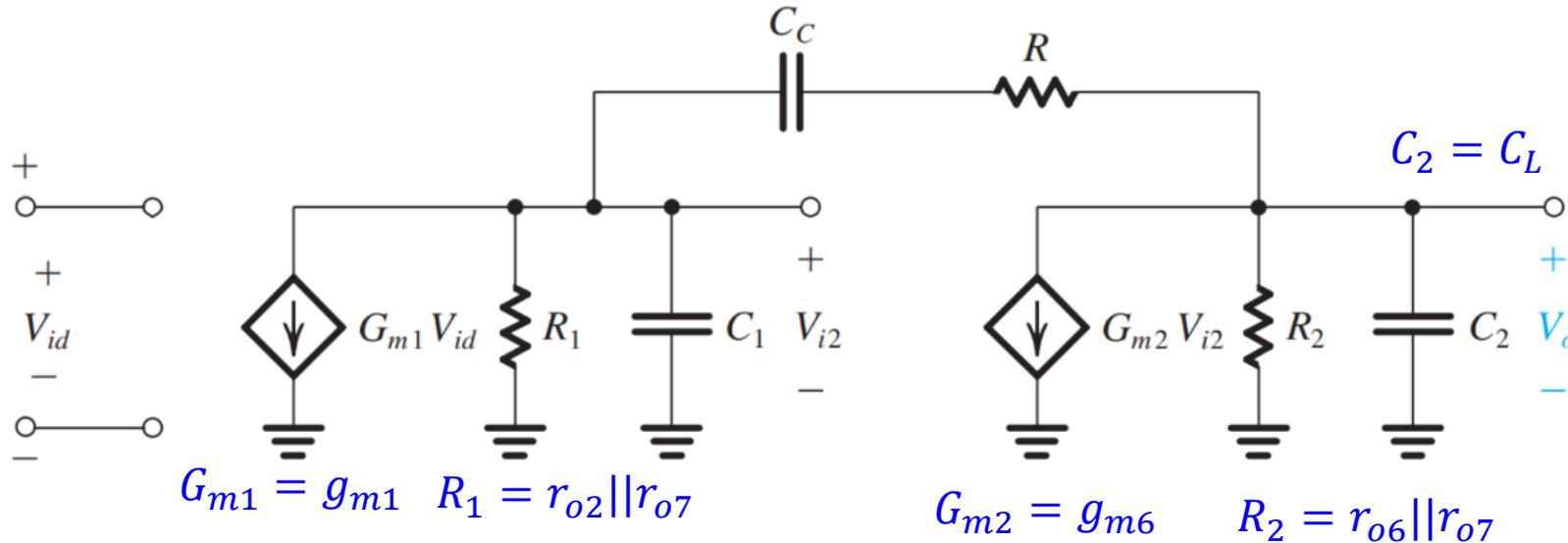
Per ottenere un $PM > 70^\circ$, scegliamo $f_z = \infty$ e $f_{p2} = 4f_t$. \longrightarrow $PM = 90^\circ - \text{atan}\left(\frac{1}{4}\right) = 76^\circ$

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

- 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 $SR = \omega_t V_{OV1}$

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

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

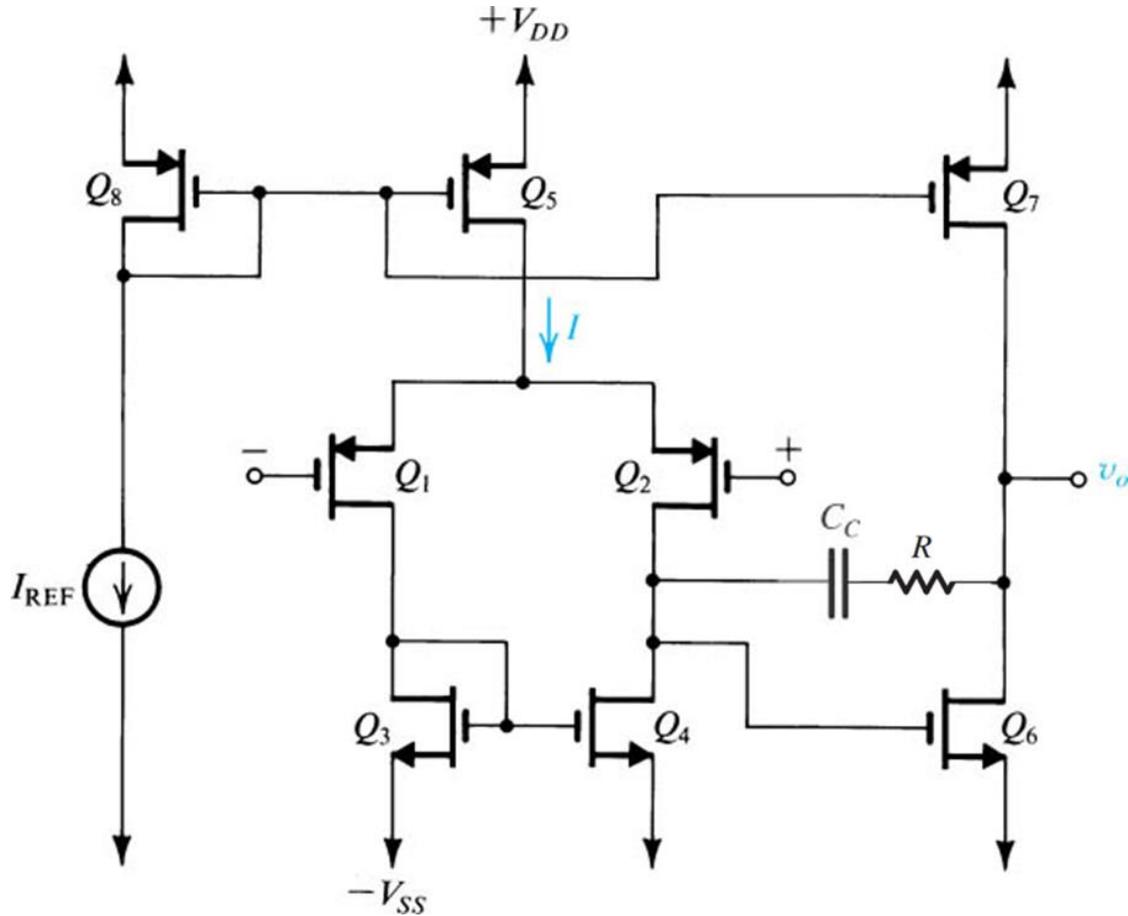
$$g_{m1} = \frac{I}{V_{OV1}} \longrightarrow I = g_{m1} V_{OV1} = 200\mu A$$

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

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



$$I = 200\mu A$$

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

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

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

$$I = 500\mu A$$

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

$$C_c = 1.6\text{pF}$$



Dimensionamento dei Transistori

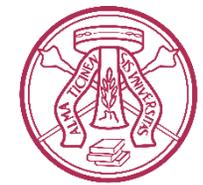
Dimensionamento MOSFET

	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M	N	O
1												
2	tipo	NMOS	PMOS	NMOS	PMOS	NMOS	PMOS	NMOS	PMOS	NMOS	PMOS	NMOS
3		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								

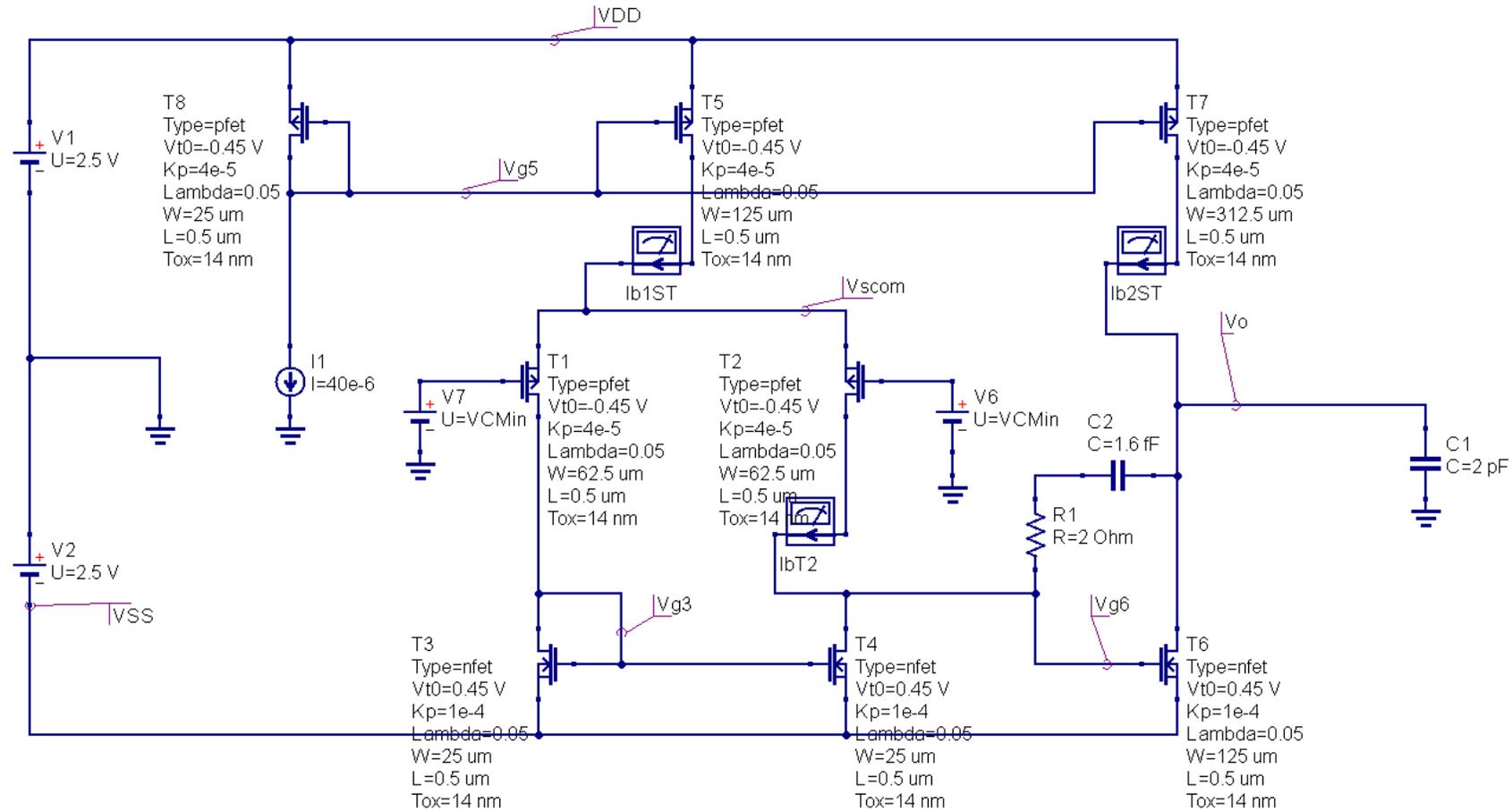
Corrente in saturazione

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

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

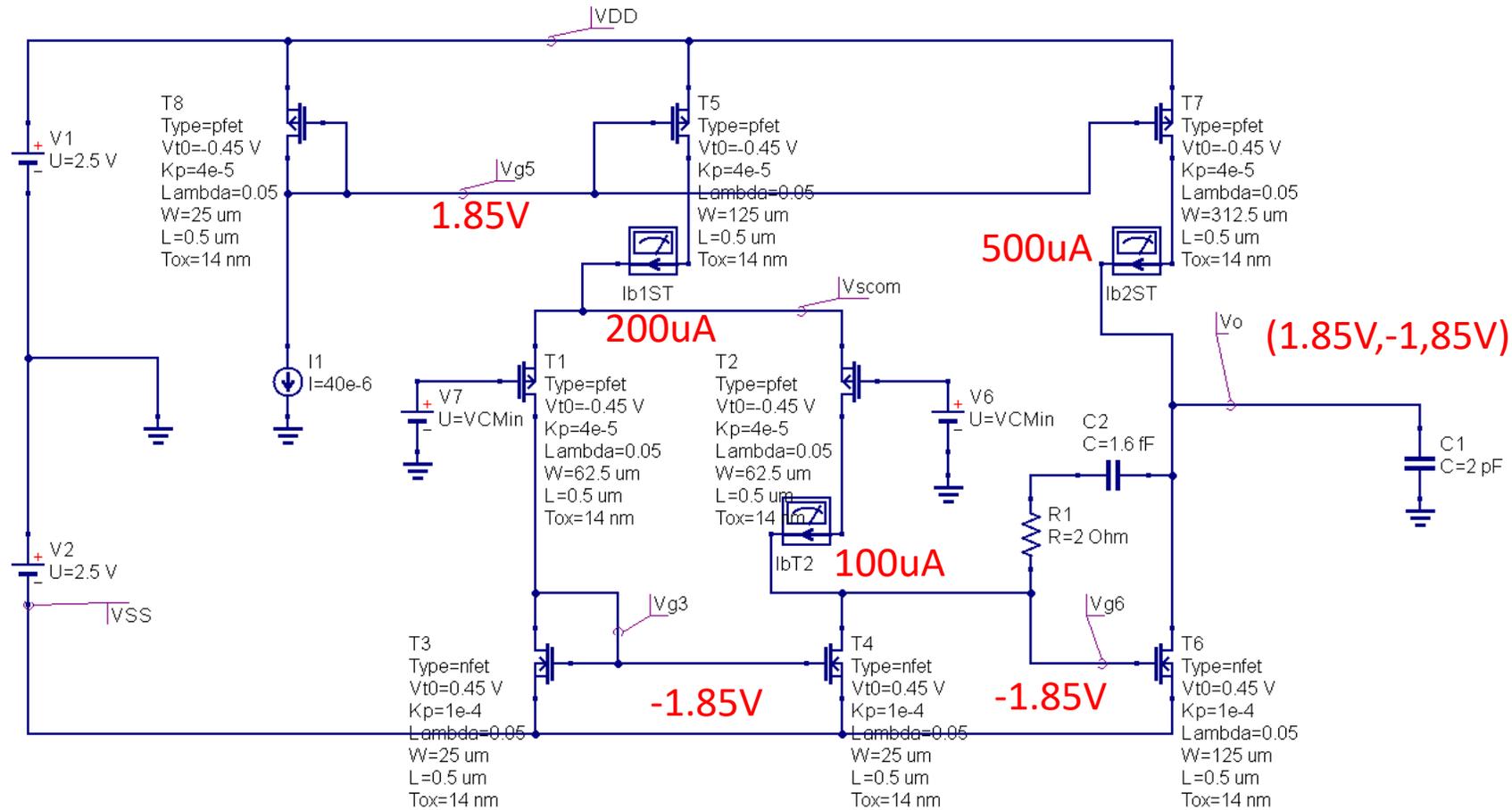


Disegno del Circuito





Verifica del Punto Operativo DC





Guadagno di Modo Comune DC

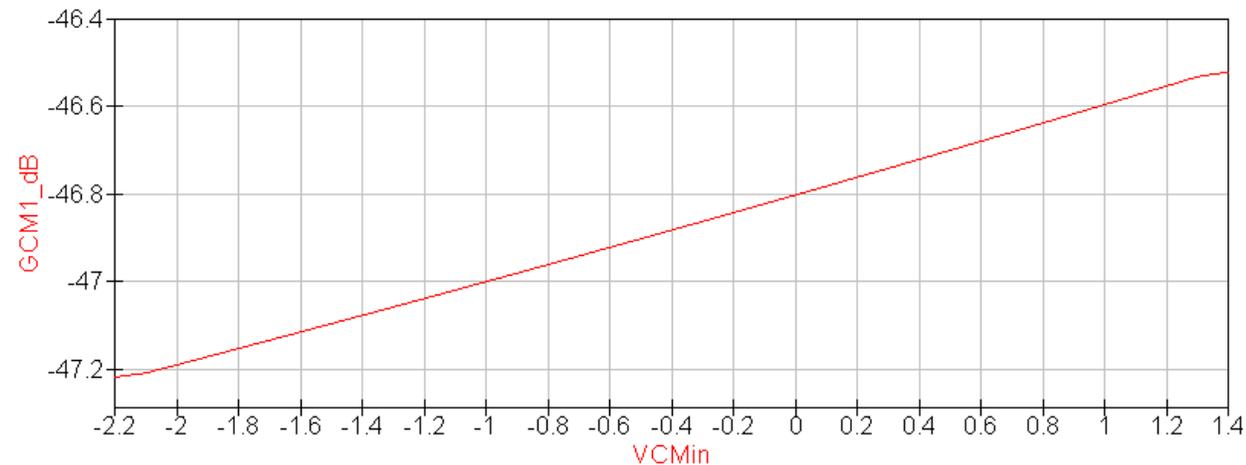
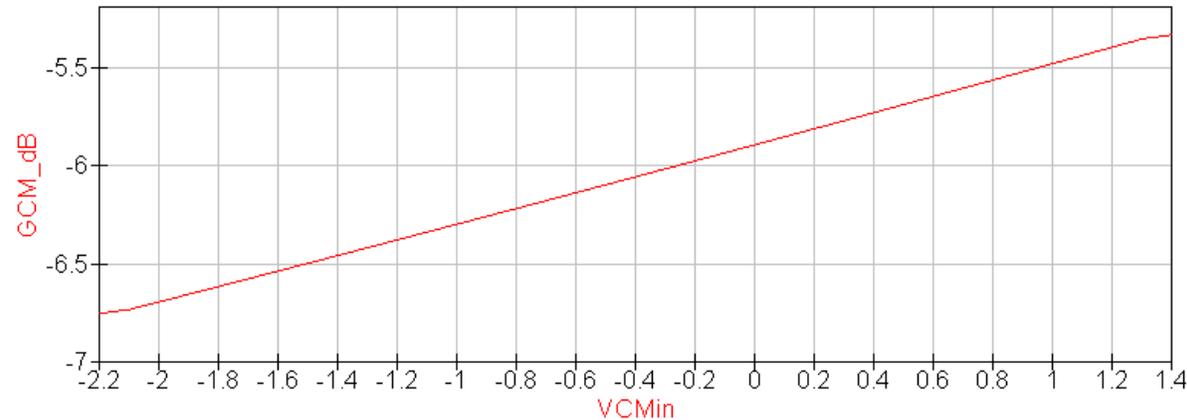
Facendo una scansione della tensione di modo comune in ingresso e valutando le variazioni della tensione d'uscita, calcoliamo il guadagno di modo comune in DC.

Parametro sweep

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

Equazione

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





Risposta in Frequenza

Guadagno AC senza Cc

Equazione

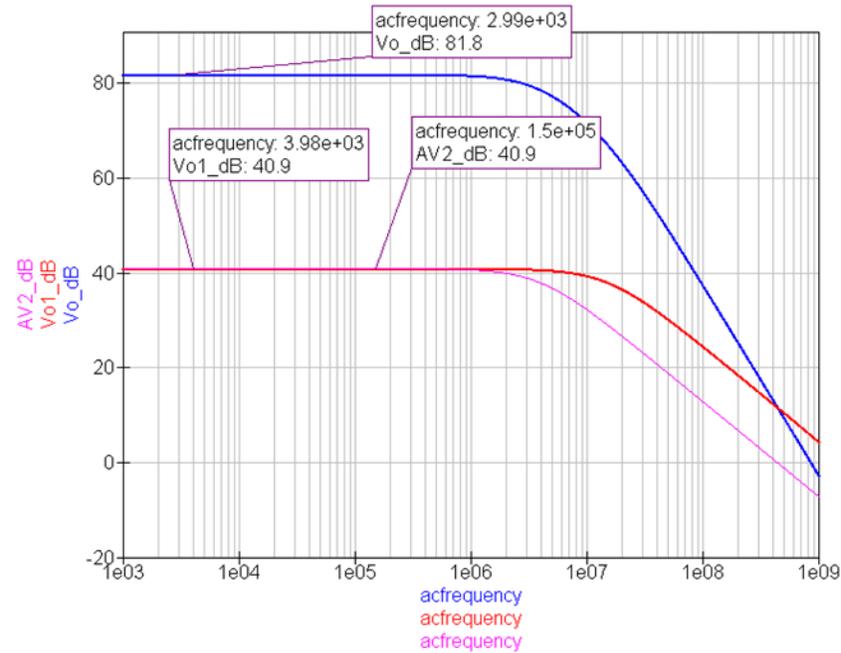
```
Eqn3
Vo_dB=dB(Vo.v)
Vo_deg=phase(Vo.v)
Vo_dB_max=max(dB(Vo.v))
fp_dom=xvalue(Vo_dB,Vo_dB_max-3)
```

Equazione

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

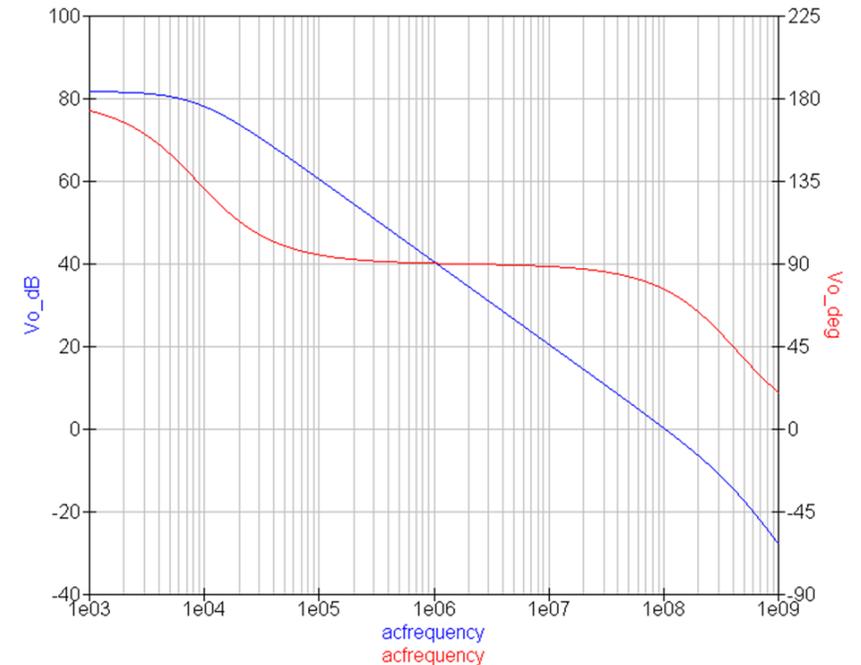
Equazione

```
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

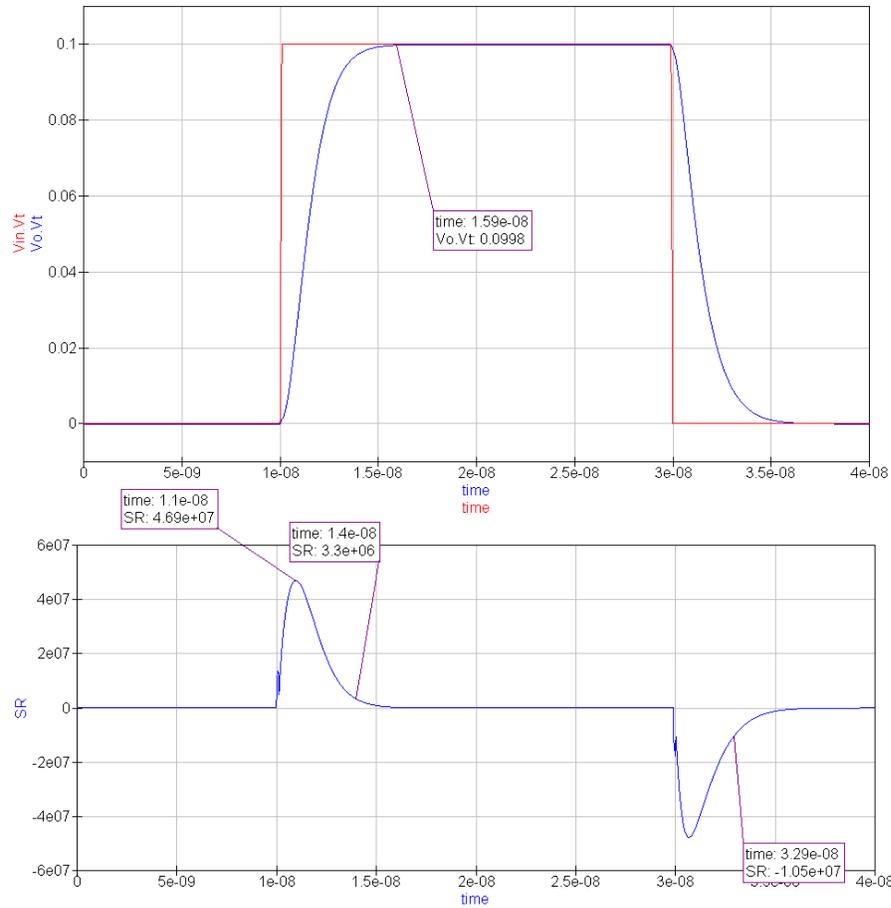
number	ft	PM	AV1_DC	fp1	AV2_DC	fp2
1	1.06e+08	75.5	40.8	8.91e+03	40.9	2.24e+06



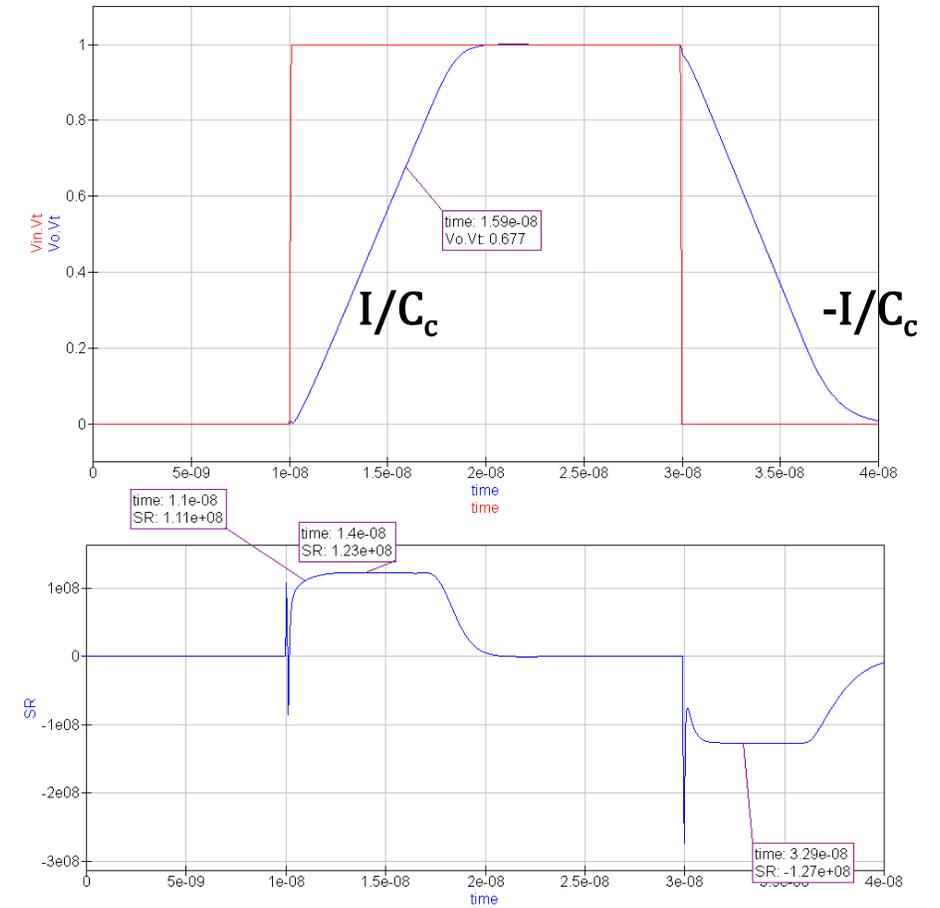


Risposta al Gradino

Settling Lineare

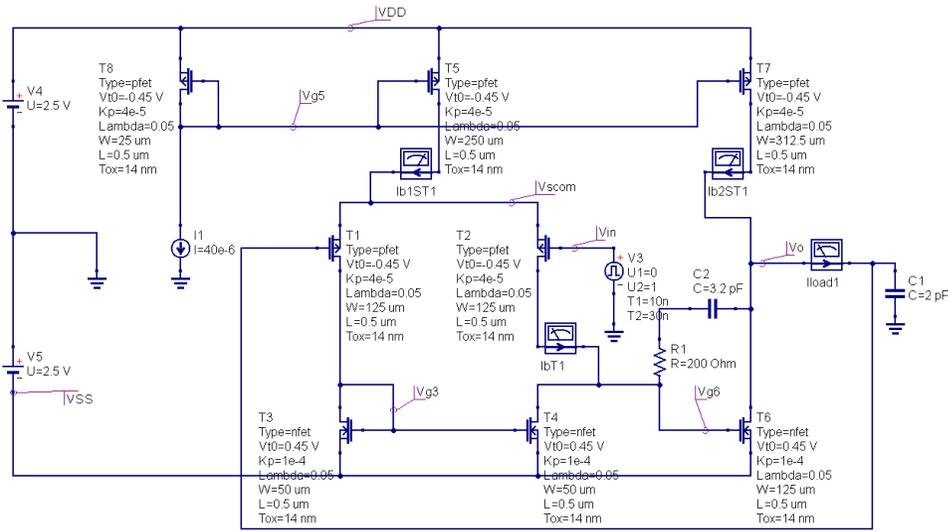


Slewing





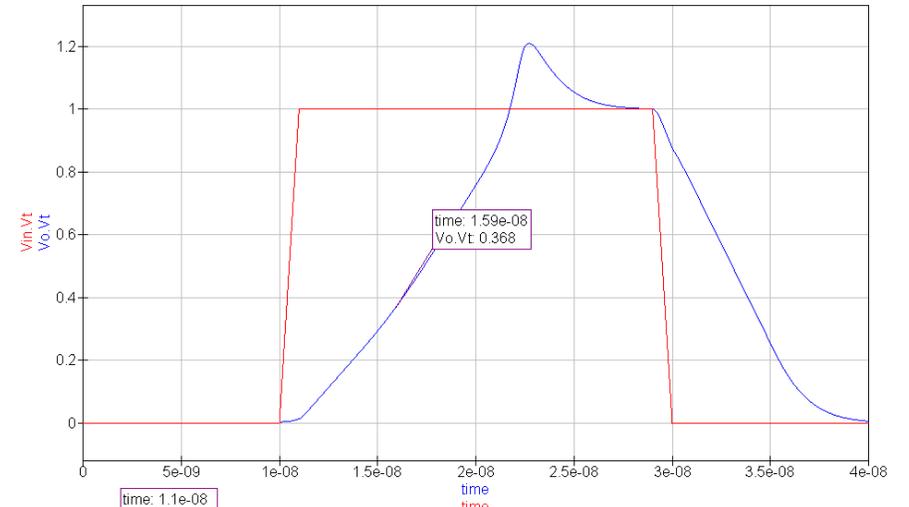
Slewing Asimmetrico



simulazione dc
DC1

simulazione transitorio
TR1
Type=lin
Start=0
Stop=40n

Equazione
Eqn1
SR=diff(Vo,Vt,time)
SR2=diff(Vg6,Vt,time)

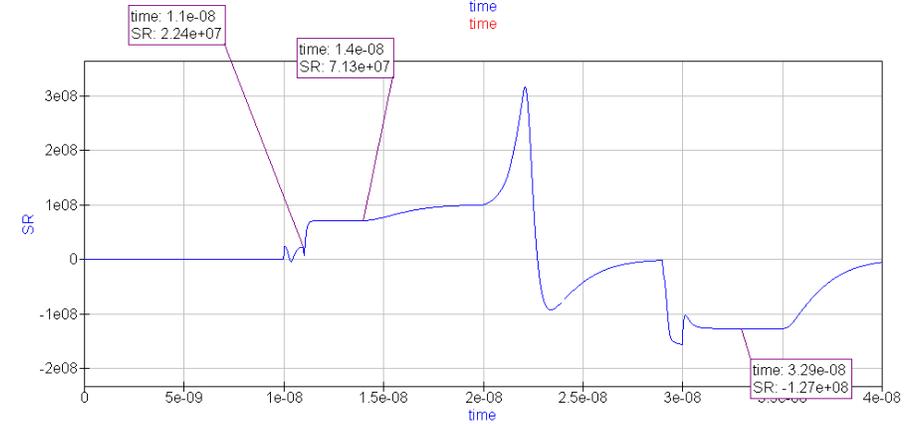


Quando C_c è troppo grande, I_7 non riesce a caricare C_c e C_L insieme.

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