



POLITECNICO
DI TORINO

DET

Department of Electronics and Telecommunications

Amplificatori a MOS

Concetti base

- **Analisi di Piccolo segnale dei circuiti a MOS**
- **Stadi Amplificatori MOS a Singolo Transistore**
 - Source comune (CS)
 - Amplificazione di tensione, impedenza d'ingresso, impedenza d'uscita
 - Drain comune (CD)
 - Amplificazione di tensione, impedenza d'ingresso, impedenza d'uscita
 - Gate comune (CG)
 - Amplificazione di tensione, impedenza d'ingresso, impedenza d'uscita
- **Amplificatori a più stadi**
 - accoppiamento in DC e problemi di polarizzazione
 - accoppiamento in AC



Analisi di piccolo segnale dei circuiti a MOS

Si procede in tre passi

1) Si determina il *punto di lavoro* Q

- Si considerano solo le grandezze elettriche **costanti nel tempo**, ossia:
 - si spengono i generatori variabili nel tempo (ma non la componente continua se è non nulla)
 - essendo $\partial/\partial t = 0$ per grandezze costanti nel tempo:
 - i condensatori si sostituiscono con circuiti aperti
 - gli induttori si sostituiscono con corto circuiti
 - si considerano le caratteristiche *non-lineari statiche* degli elementi non-lineari.
 - si analizza il circuito e si determina **punto di lavoro Q** degli elementi non-lineari



Analisi di piccolo segnale dei circuiti a MOS

1) Poiché il calcolo del punto Q richiede comunque una analisi non lineare, in questo corso verranno fatte ipotesi semplificative

→ negli esercizi sarà quasi sempre pre-assegnato o ricavabile senza calcoli laboriosi

- si formulano ipotesi sulla regione di funzionamento (quasi sempre **saturazione**)
- si analizza il circuito sulla base di queste ipotesi
- si **verifica** il funzionamento dei transistori MOS nella regione ipotizzata (tipicamente saturazione per applicazioni analogiche)

nMOS

in saturazione

$$v_{GS} > V_{TH}$$

$$v_{DS} > v_{GS} - V_{TH}$$

pMOS

in saturazione

$$v_{SG} > V_{TH}$$

$$v_{SD} > v_{SG} - V_{TH}$$



POLITECNICO
DI TORINO

DET
Department of Electronics and Telecommunications

Analisi di piccolo segnale dei circuiti a MOS

- 2) Si costruisce il *circuito equivalente per il piccolo segnale del MOS*
 - Si valutano la transconduttanza e la conduttanza di uscita a partire dal punto di lavoro Q trovato al passo precedente



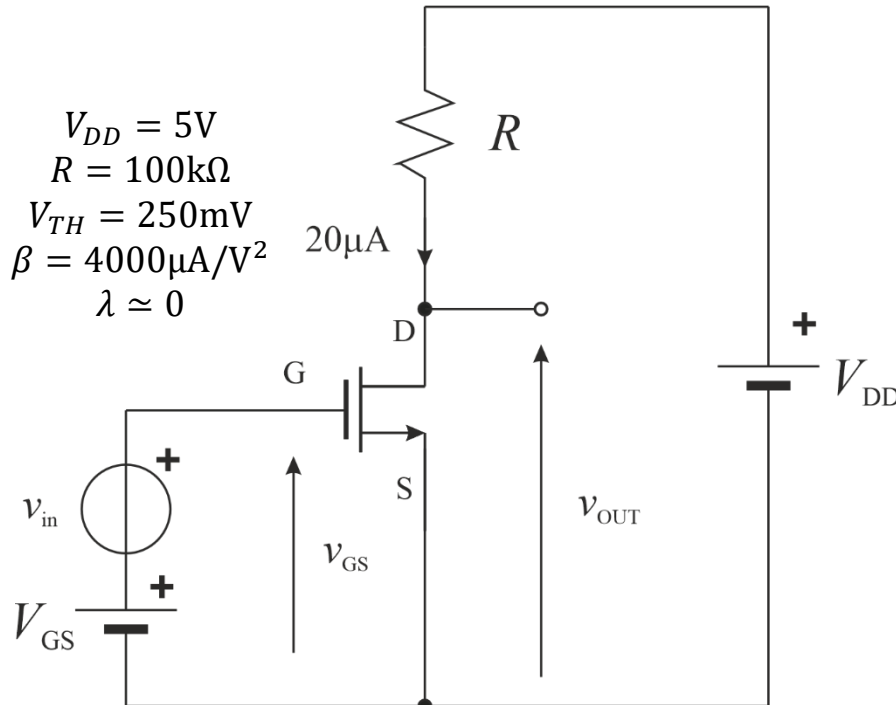
Analisi di piccolo segnale dei circuiti a MOS

- 3) Si costruisce il *circuito equivalente per il piccolo segnale dello stadio completo* e lo si risolve
- Si considerano solo le grandezze elettriche ***variabili nel tempo***, ossia:
 - si spengono i generatori costanti nel tempo, si considerano ***solo le componenti di segnale***
 - si considerano gli elementi reattivi (condensatori e induttori), se presenti.
- Per gli elementi non-lineari:
 - si determinano i parametri di piccolo segnale ***nel punto di lavoro trovato al passo 1)***.
 - si sostituiscono con i relativi ***circuiti equivalenti per il piccolo segnale***
- Si risolve il circuito di piccolo segnale valutando le richieste
 - funzioni di trasferimento, impedenze di ingresso e di uscita e i relativi diagrammi di Bode



Analisi di piccolo segnale: esempio (I)

1. Si determina il punto di funzionamento a riposo (V_{GS}, V_{DS})
 - si fanno ipotesi sulla regione di funzionamento (quasi sempre saturazione)
 - si analizza il circuito sulla base di queste ipotesi
 - **si verifica il funzionamento dei transistori MOS nella regione ipotizzata**



$$I_D = \frac{\beta}{2} (V_{GS} - V_{TH})^2 = 20\mu A$$

$$V_{DS} = V_{DD} - RI_D = 5V - 2V = 3V$$

$$Q = (V_{GS}, V_{DS}) = (350mV, 3V)$$

Verifica funzionamento in saturazione

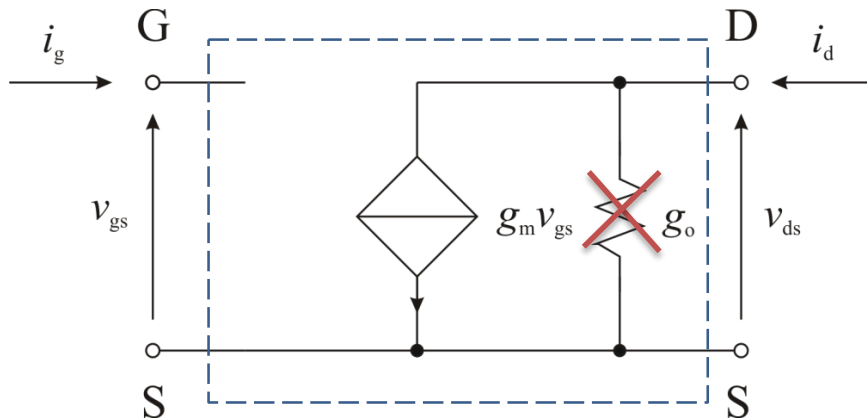
$$V_{GS} > V_{TH} ? \quad 350mV > 250mV$$

$$V_{DS} > V_{GS} - V_{TH} ? \quad 3V > 100mV$$



Analisi di piccolo segnale: esempio (II)

2. Si determina il circuito equivalente per il piccolo segnale nel punto di funzionamento a riposo determinato al passo precedente.



$$\begin{aligned} V_{DD} &= 5V \\ R &= 100k\Omega \\ V_{TH} &= 250mV \\ \beta &= 4000\mu A/V^2 \\ \lambda &\simeq 0 \end{aligned}$$

$$Q = (V_{GS}, V_{DS}) = (350mV, 3V)$$

Calcolo parametri di piccolo segnale

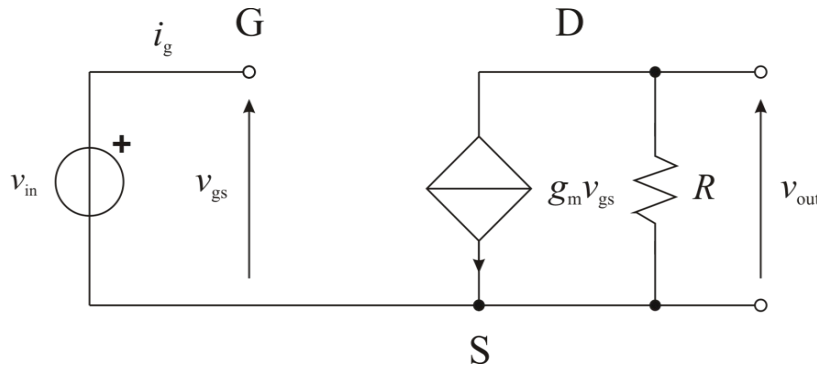
$$g_m = \sqrt{2I_D\beta} = 400\mu S$$

$$g_o = \lambda I_D \simeq 0$$



Analisi di piccolo segnale: esempio (III)

3. Si costruisce il circuito per il piccolo segnale dello stadio completo **sostituendo al MOS il suo circuito equivalente e spegnendo i generatori in continua.** Si procede poi a analizzare il circuito ottenuto.



$$R = 100k\Omega$$

$$g_m = \sqrt{2I_D\beta} = 400\mu S$$

$$v_{gs} = v_{in}$$

$$v_{out} = -g_m R v_{in}$$

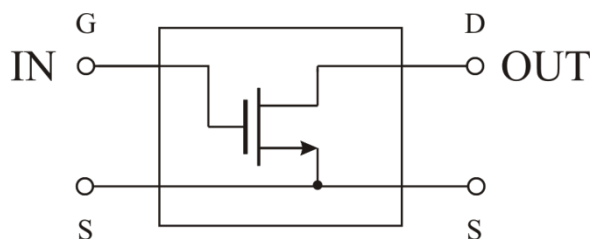
$$A_v = \frac{v_{out}}{v_{in}} = -g_m R = -40$$

$$R_{out} = \left. \frac{v_{out}}{i_t} \right|_{v_{in}=0} = R = 100k\Omega$$



Amplificatori a MOS: Stadi Elementari

- E' possibile ottenere amplificatori a partire da transistori MOS o BJT.
- Con un solo transistor, a seconda di come si applica l'ingresso e di come si preleva l'uscita è possibile ottenere tre stadi 'elementari' con caratteristiche diverse.
- Questi tre stadi elementari saranno esaminati nel seguito in condizioni adinamiche.

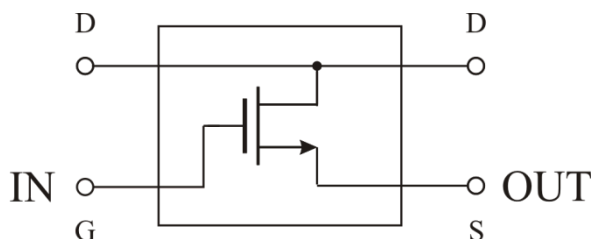


Source comune, Common Source, CS

Ingresso: GATE

Uscita: DRAIN

Terminale comune: SOURCE

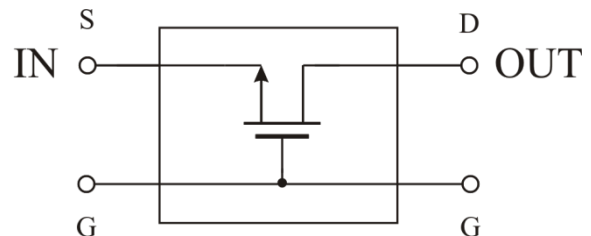


Drain comune, Common Drain, CD

Ingresso: GATE

Uscita: SOURCE

Terminale comune: DRAIN



Gate comune, Common Gate, CG

Ingresso: SOURCE

Uscita: DRAIN

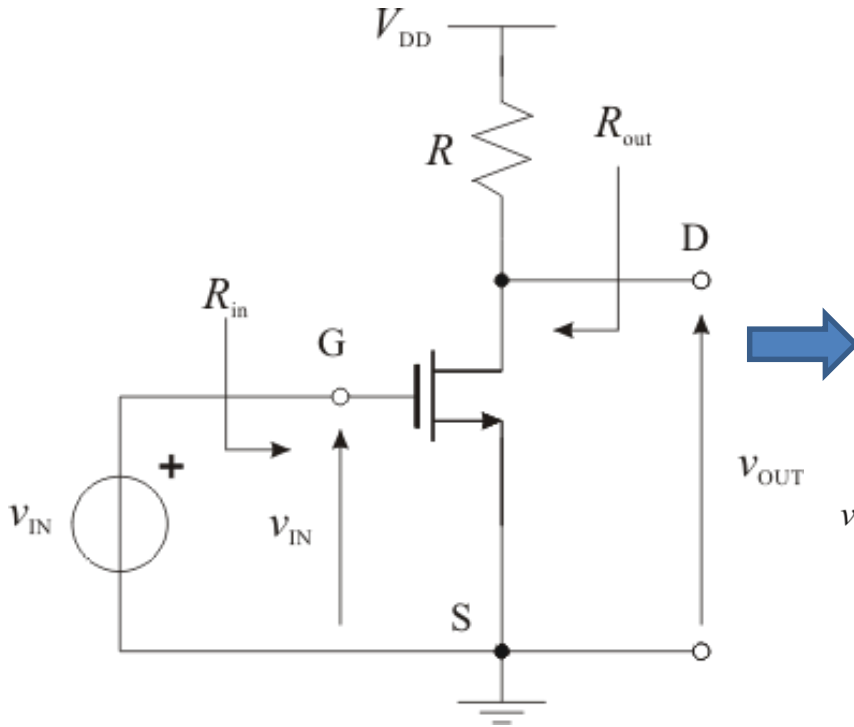
Terminale comune: GATE



POLITECNICO
DI TORINO

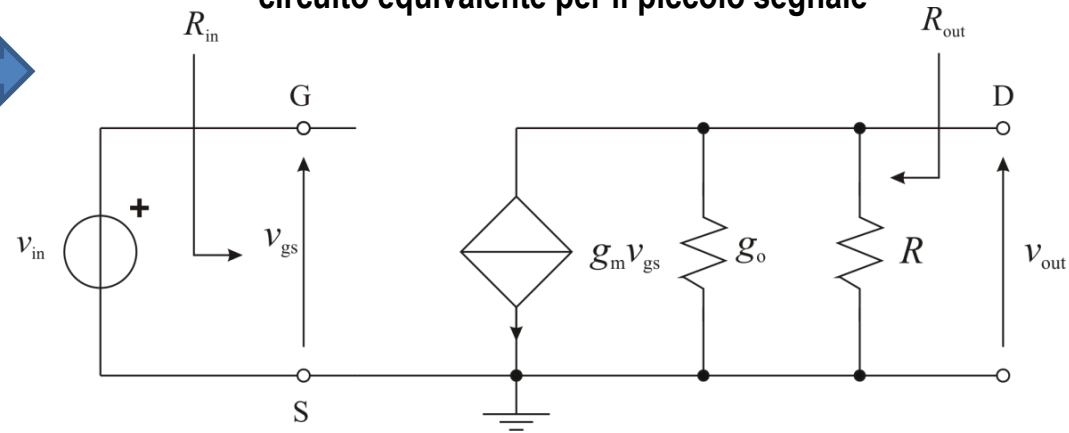
DET
Department of Electronics and Telecommunications

Stadio Source Comune (I)



$$\begin{aligned}\beta &= 10\text{mA/V}^2 & V_{GS} - V_{TH} &= 100\text{mV} \\ \lambda &= 0.1\text{V}^{-1} & I_D &= 50\mu\text{A} \\ R &= 50\text{k}\Omega\end{aligned}$$

circuito equivalente per il piccolo segnale



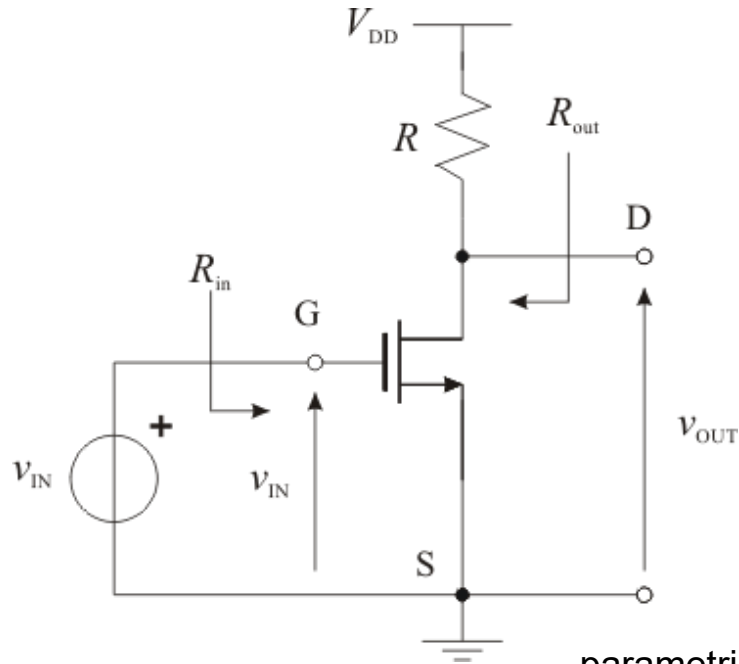
- Transistore polarizzato in regione di saturazione
- punto di funzionamento a riposo $Q \equiv (V_{GS}, V_{DS})$
- Si ricavano i parametri g_m e g_o del circuito di piccolo segnale

$$g_m = \frac{2I_D}{V_{GS} - V_{TH}} = 1\text{mS}$$

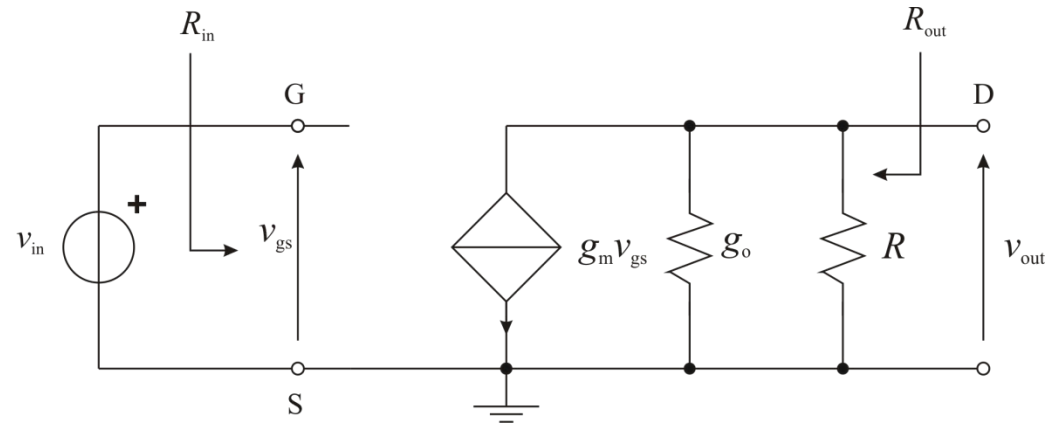
$$g_o \cong \lambda I_D = 5\mu\text{S}$$



Stadio Source Comune (II)



circuito equivalente per il piccolo segnale



Dati:

parametri di
piccolo segnale

$$\lambda = 0.1V^{-1}$$

$$V_{GS} - V_{TH} = 100\text{mV}$$

$$I_D = 50\mu\text{A}$$

$$R = 50\text{k}\Omega$$

$$g_m = \frac{2I_D}{V_{GS} - V_{TH}} = 1\text{mS}$$

$$g_o \cong \lambda I_D = 5\mu\text{S}$$

$$r_o = 200\text{k}\Omega$$

$$R \parallel r_o = 40\text{k}\Omega$$

$$A_v = -g_m (R \parallel r_o) = -40 \text{ (+32dB)}$$

$$R_{in} \rightarrow \infty$$

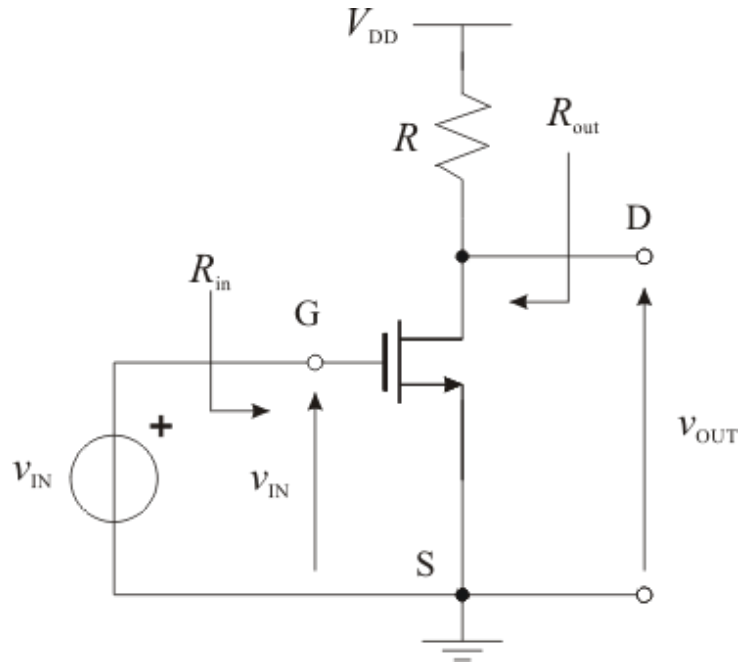
$$R_{out} = R \parallel r_o = 40\text{k}\Omega$$



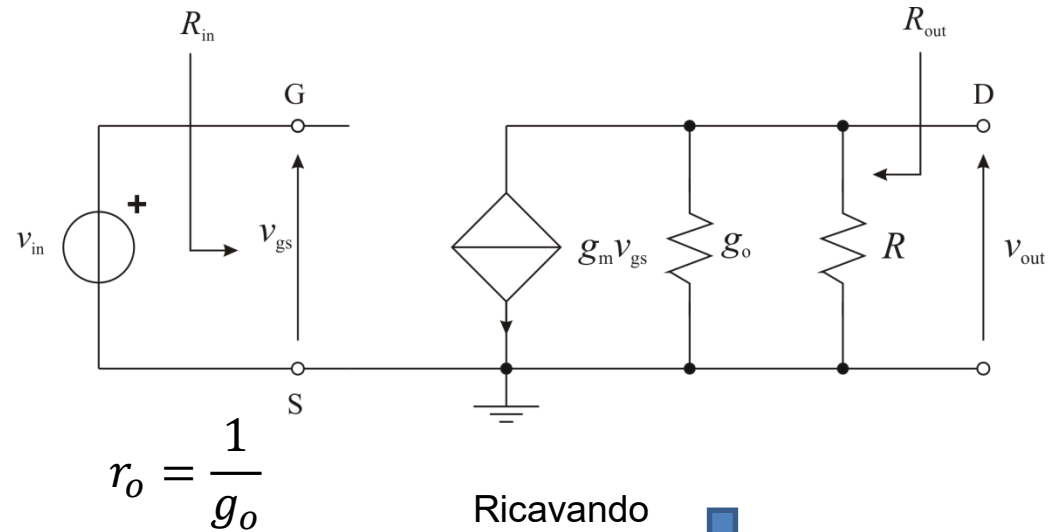
POLITECNICO
DI TORINO

DET
Department of Electronics and Telecommunications

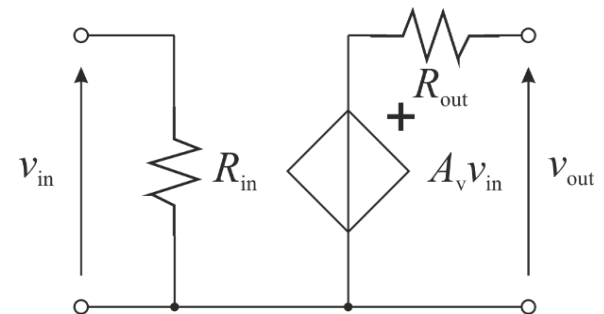
Stadio Source Comune come amplificatore



circuito equivalente per il piccolo segnale



Ricavando
 A_v, R_{in}, R_{out}



$$A_v = -g_m (R \parallel r_o)$$

amplificazione di tensione invertente,
anche elevata in modulo (max: $g_m r_o$)

$$R_{in} \rightarrow \infty$$

gate del transistor MOS

$$R_{out} = R \parallel r_o$$

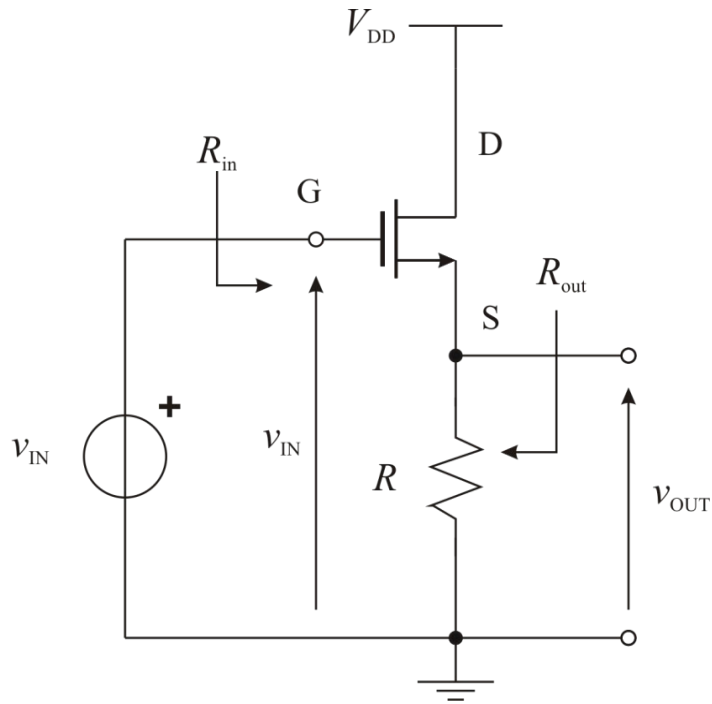
a parità di g_m ,
 A_v elevata $\rightarrow R_{out}$ elevata;
più simile ad un ampl. di g_m
che ad un ampl. di tensione.



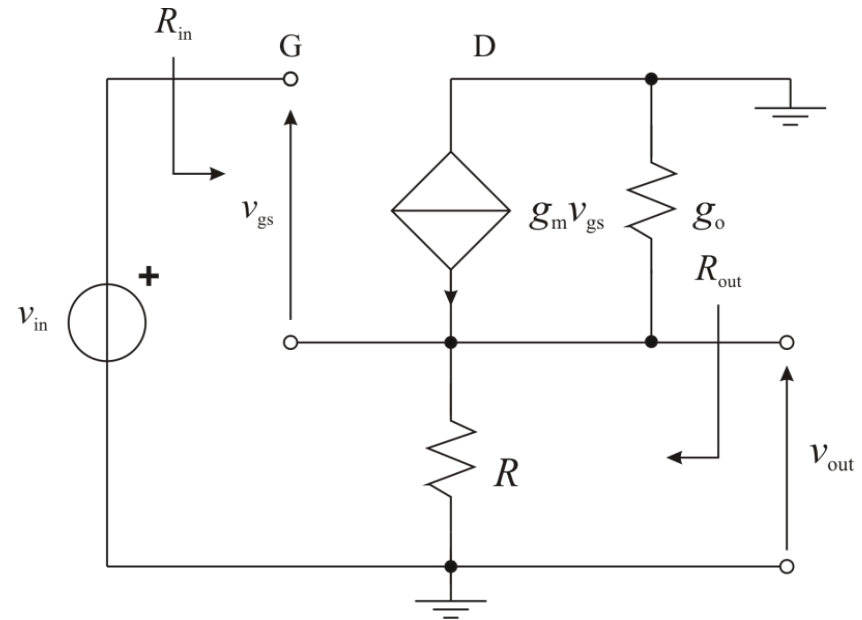
POLITECNICO
DI TORINO

DET
Department of Electronics and Telecommunications

Stadio Drain Comune (I)



circuito equivalente per il piccolo segnale



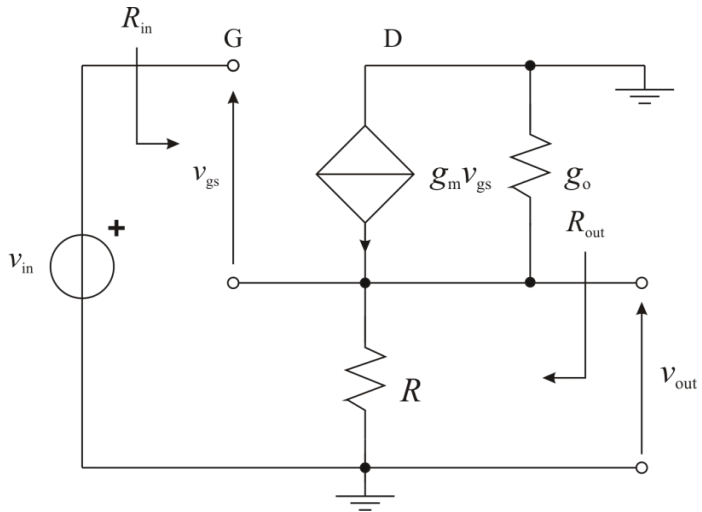
- Transistore polarizzato in regione di saturazione.
- Punto di funzionamento a riposo $Q \equiv (V_{GS}, V_{DS})$ identico al caso del source comune.
- Si ricavano i parametri g_m e g_o del circuito di piccolo segnale.

$$g_m = \frac{2I_D}{V_{GS} - V_{TH}} = 1\text{mS}$$

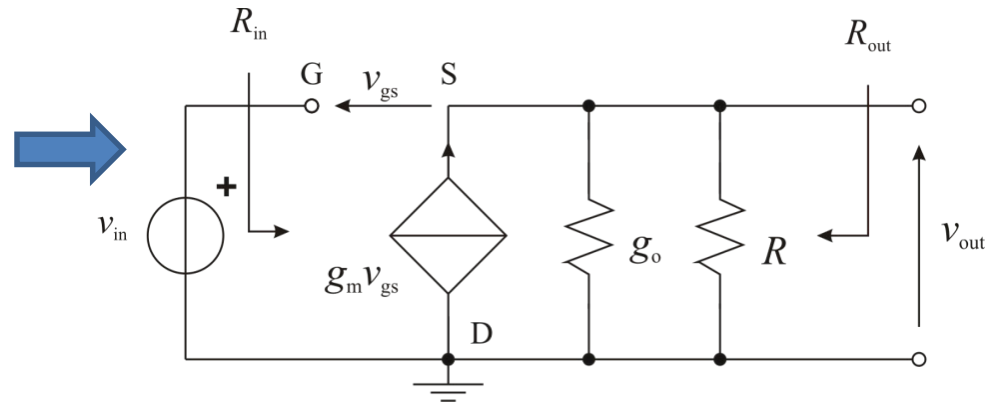
$$g_o \cong \lambda I_D = 5\mu\text{S}$$



Stadio Drain Comune (II)



circuito equivalente per il piccolo segnale



Dati:

$$\lambda = 0.1V^{-1}$$

$$V_{GS} - V_{TH} = 100\text{mV}$$

$$I_D = 50\mu\text{A}$$

$$R = 50\text{k}\Omega$$

parametri di
piccolo segnale

$$g_m = \frac{2I_D}{V_{GS} - V_{TH}} = 1\text{mS}$$

$$g_o \cong \lambda I_D = 5\mu\text{S}$$

$$r_o = 200\text{k}\Omega$$

$$R' = R \parallel r_o = 40\text{k}\Omega$$

$$A_v = \frac{g_m R'}{1 + g_m R'} = 0.975 \quad (-0.21\text{dB})$$

$$R_{in} \rightarrow \infty$$

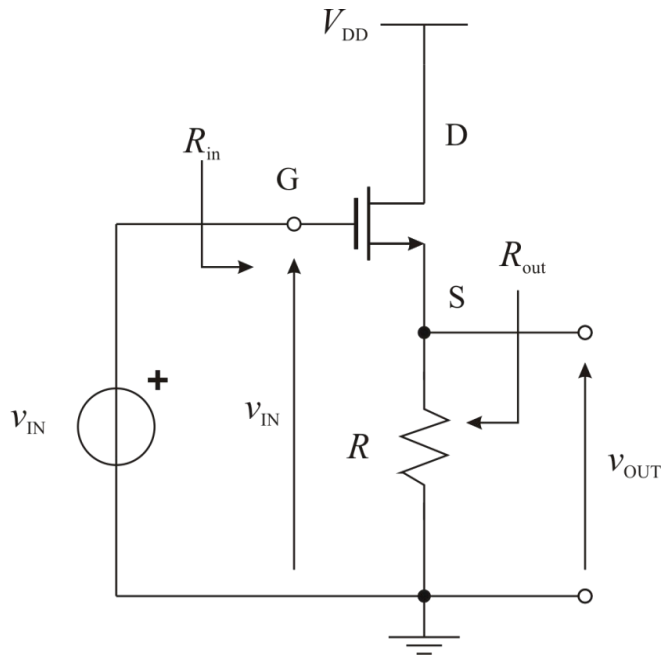
$$R_{out} = \frac{1}{g_m} \parallel R' = 975\Omega \simeq \frac{1}{g_m} = 1\text{k}\Omega$$



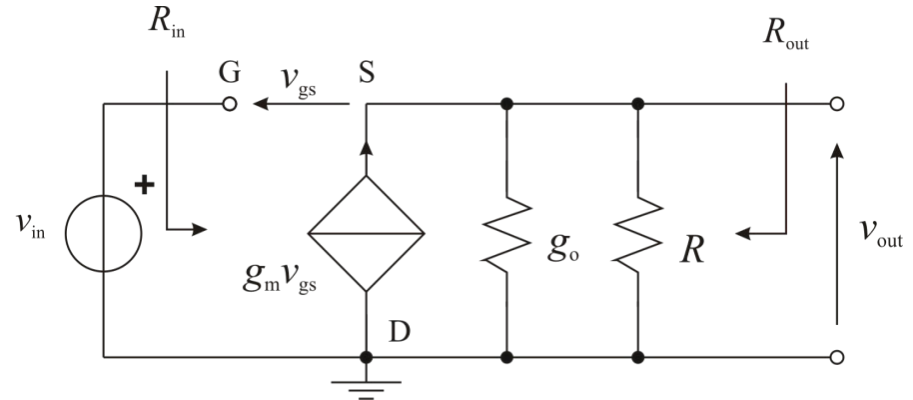
POLITECNICO
DI TORINO

DET
Department of Electronics and Telecommunications

Stadio Drain Comune come amplificatore



circuito equivalente per il piccolo segnale



$$r_o = \frac{1}{g_o}, R' = R \parallel r_o$$

$$A_v = \frac{g_m R'}{1 + g_m R'} < 1$$

$$R_{in} \rightarrow \infty$$

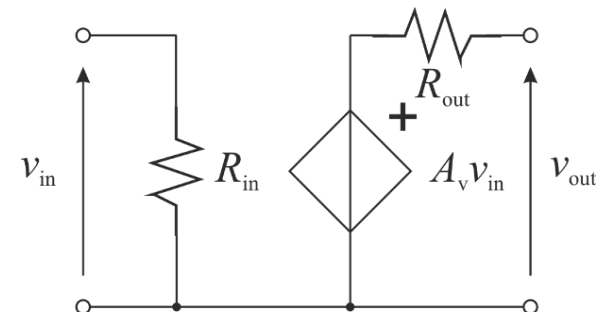
$$R_{out} = \frac{1}{g_m} \parallel R' \simeq \frac{1}{g_m}$$

amplificazione di tensione
sempre positiva (stadio non
invertente) e < 1 .

gate del transistore MOS

se $g_m \uparrow$, $R_{out} \downarrow$
 \rightarrow buona uscita in tensione

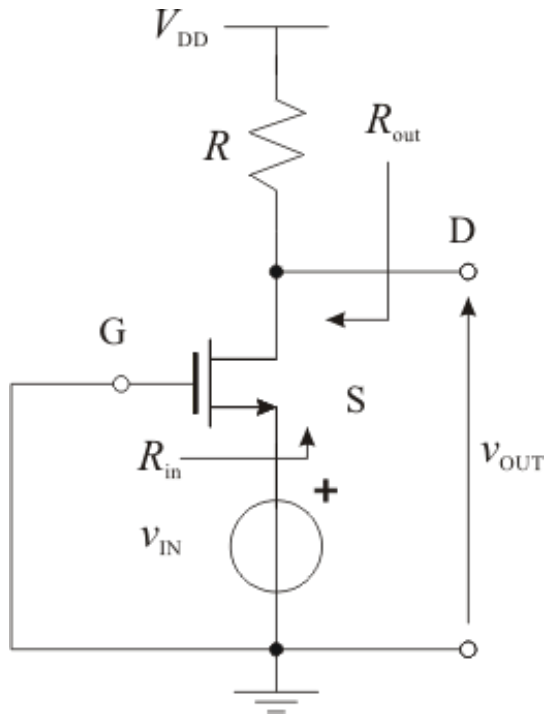
Ricavando
 A_v, R_{in}, R_{out}



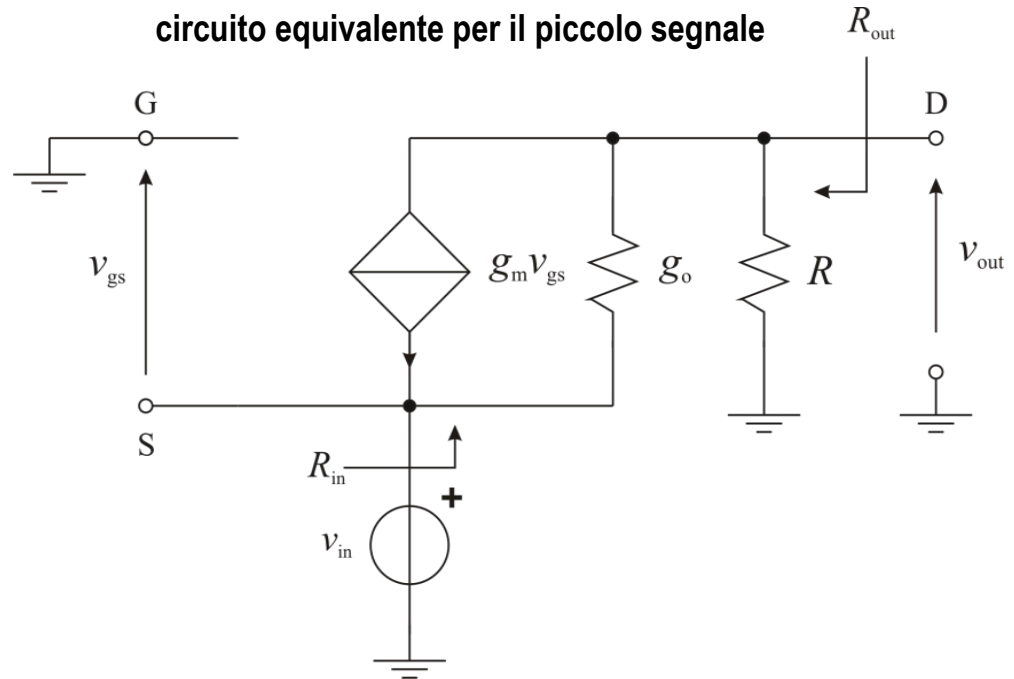
POLITECNICO
DI TORINO

DET
Department of Electronics and Telecommunications

Stadio Gate Comune (I)



circuito equivalente per il piccolo segnale



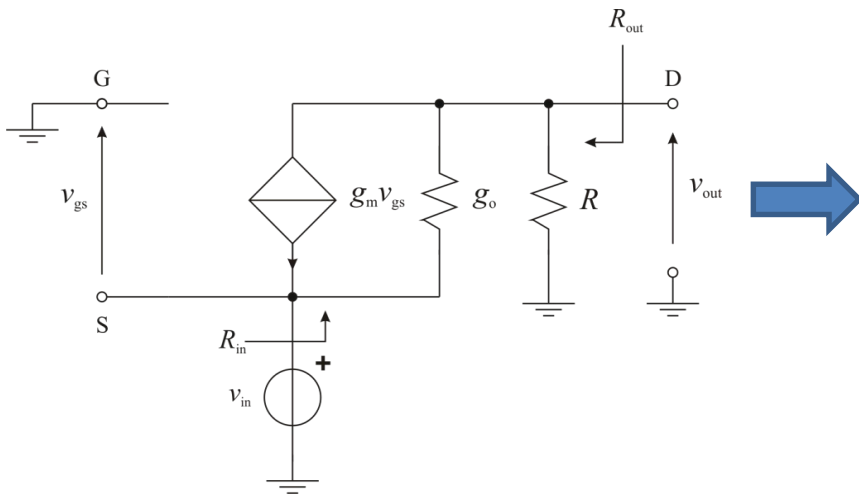
- Transistore polarizzato in regione di saturazione.
- Punto di funzionamento a riposo $Q \equiv (V_{GS}, V_{DS})$ identico al caso del source comune.
- Si ricavano i parametri g_m e g_o del circuito di piccolo segnale.

$$g_m = \frac{2I_D}{V_{GS} - V_{TH}} = 1\text{mS}$$

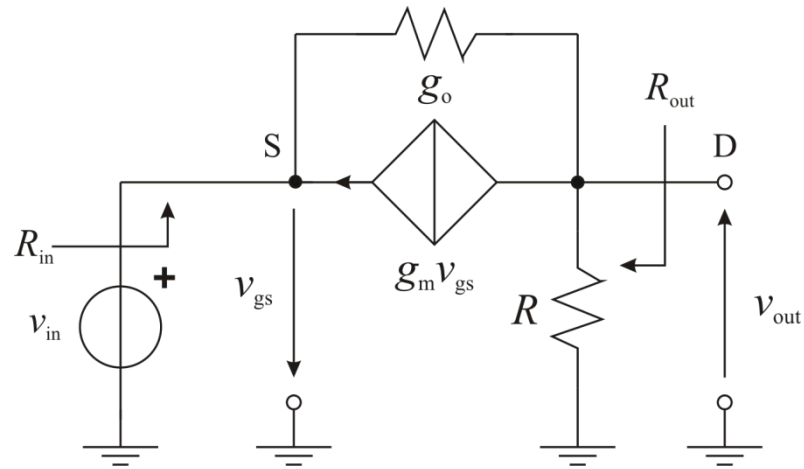
$$g_o \cong \lambda I_D = 5\mu\text{S}$$



Stadio Gate Comune (II)



circuito equivalente per il piccolo segnale



Dati:

$$\lambda = 0.01V^{-1}$$

$$V_{GS} - V_{TH} = 100\text{mV}$$

$$I_D = 50\mu\text{A}$$

$$R = 50\text{k}\Omega$$

parametri di
piccolo segnale

$$g_m = \frac{2I_D}{V_{GS} - V_{TH}} = 1\text{mS}$$

$$g_o \cong \lambda I_D = 0.5\mu\text{S}$$

$$r_o = 200\text{k}\Omega$$

$$R' = R \parallel r_o = 40\text{k}\Omega$$

$$A_v = g_m R' + \frac{R'}{r_o} = 40.2 \text{ (32.1dB)}$$

$$\simeq g_m R' = 40 \text{ (32dB)}$$

$$R_{in} = \frac{r_o + R}{g_m r_o + 1} = 1.25\text{k}\Omega \simeq \frac{1}{g_m} = 1\text{k}\Omega$$

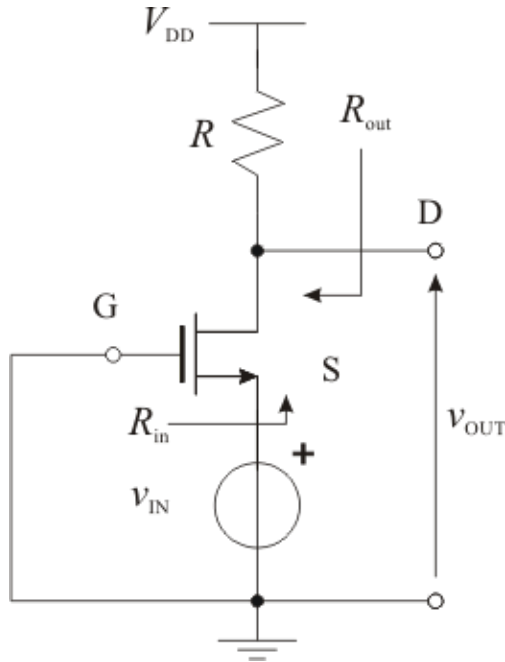
$$R_{out} = R' = 40\text{k}\Omega$$



POLITECNICO
DI TORINO

DET
Department of Electronics and Telecommunications

Stadio Gate Comune come amplificatore

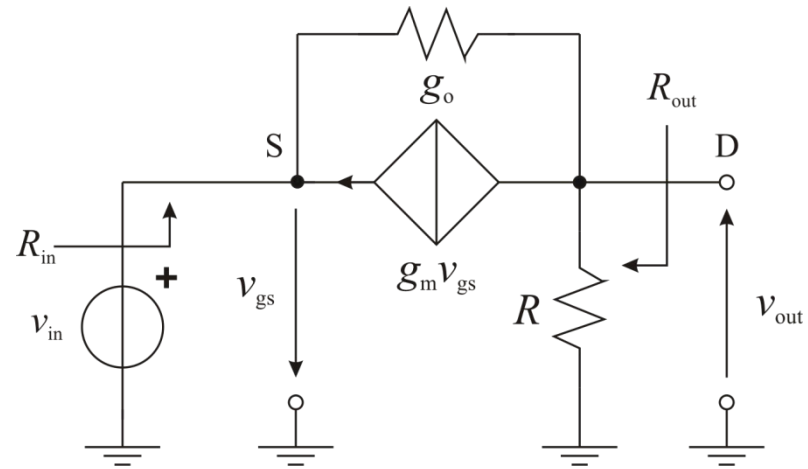


$$A_v = g_m R' + \frac{R'}{r_o} \simeq g_m R'$$

$$R_{in} = \frac{r_o + R}{g_m r_o + 1} \simeq \frac{1}{g_m}$$

$$R_{out} = R'$$

circuito equivalente per il piccolo segnale



$$r_o = \frac{1}{g_o}, R' = R \parallel r_o$$

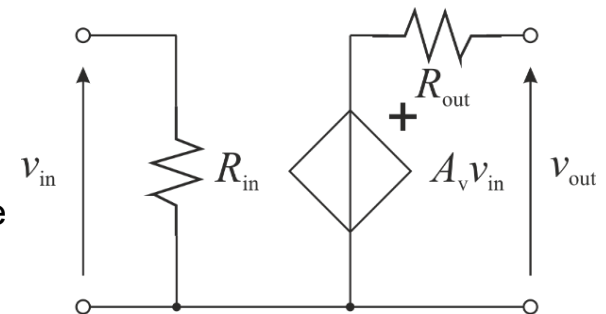
Amplificazione di tensione
non invertente, anche
elevata (max: $g_m r_o$)

se $g_m \uparrow$, $R_{in} \downarrow$

→ buon ingresso in corrente
→ cattivo ingresso in tensione

a parità di g_m ,
 A_v elevata → R_{out} elevata

Ricavando
 A_v, R_{in}, R_{out}



POLITECNICO
DI TORINO

DET
Department of Electronics and Telecommunications

Stadi amplificatori elementari: Riepilogo

	A_v	R_{in}	R_{out}	commenti
Source Comune	$-g_m (R \parallel r_o)$	$\rightarrow \infty$	$R \parallel r_o$	<ul style="list-style-type: none"> - R_{in} e R_{out} elevate \rightarrow buon ampl. di <i>transconduttanza</i> - Amplificazione di tensione invertente, anche elevata in modulo
Drain Comune	$\frac{g_m R'}{1 + g_m R'} < 1$	$\rightarrow \infty$	$\simeq \frac{1}{g_m}$	<ul style="list-style-type: none"> - R_{in} elevata, R_{out} ridotta \rightarrow buon ampl. di <i>tensione</i> - L'amplificazione di tensione A_v è sempre minore di 1 in modulo
Gate Comune	$\simeq g_m (R \parallel r_o)$	$\simeq \frac{1}{g_m}$	$R \parallel r_o$	<ul style="list-style-type: none"> - R_{in} ridotta R_{out} elevata \rightarrow buon ampl. di <i>corrente</i> - L'ampl. di tensione A_v è non invertente e può essere elevata

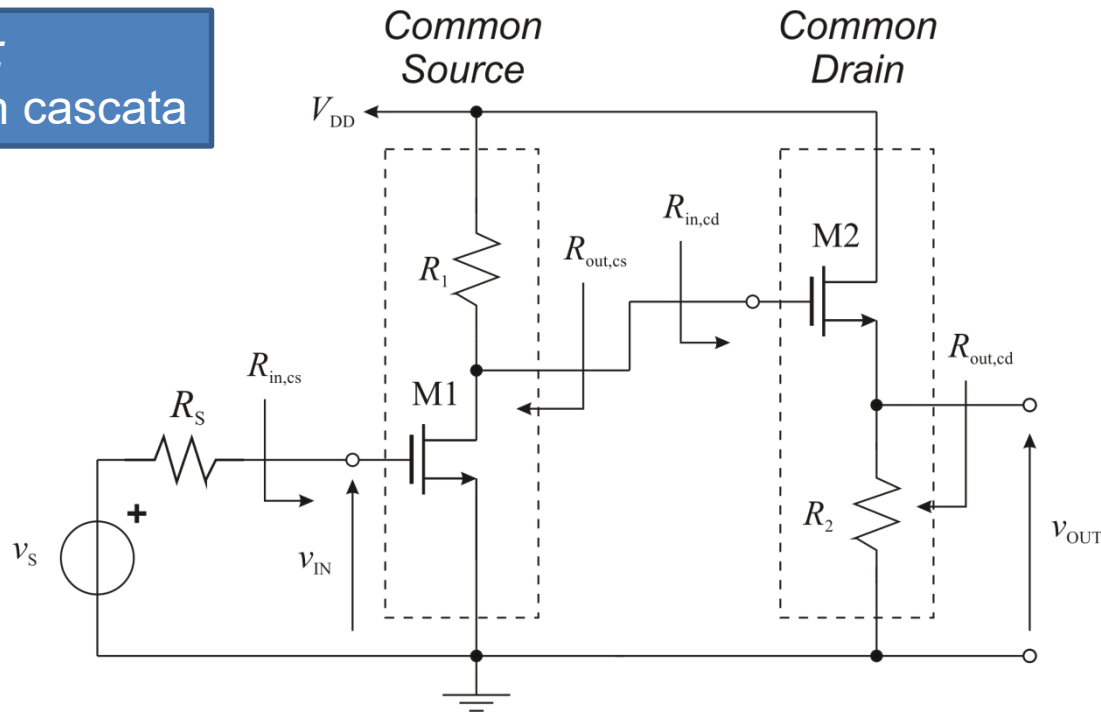
N.B. La simbologia adottata in tabella fa riferimento alle slide precedenti



Amplificatori a più stadi (I)

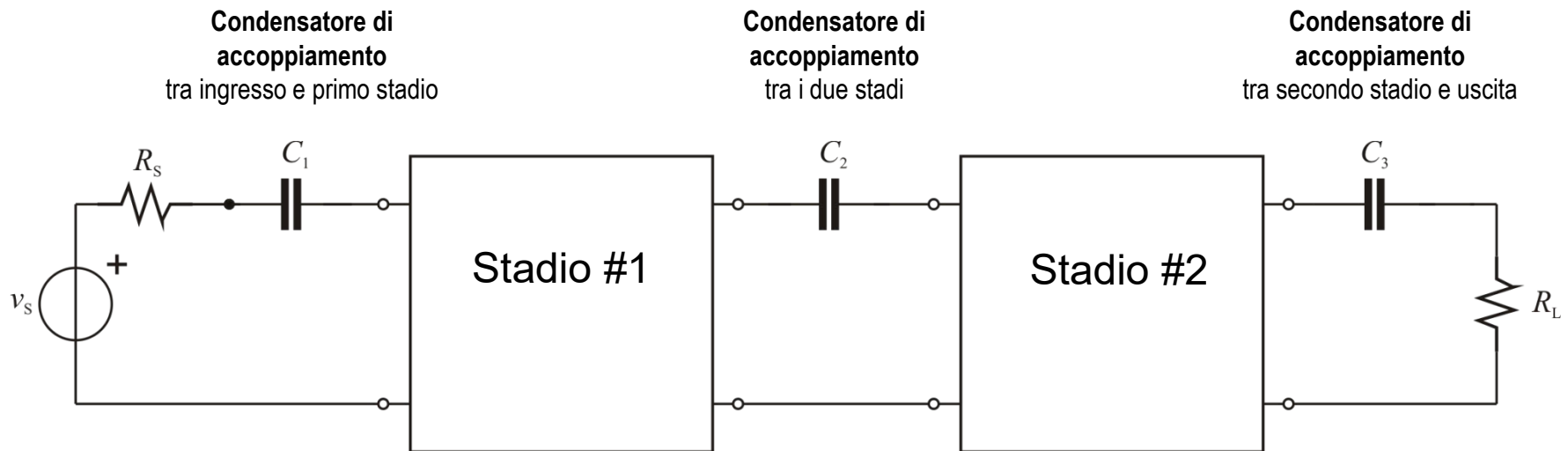
- Gli stadi elementari non coprono tutte le esigenze (ad esempio: nessuno stadio elementare può essere considerato un buon amplificatore di tensione con $A_v > 1$).
- E' possibile ottenere amplificatori con caratteristiche diverse collegando in cascata (o in altro modo...) più stadi elementari.

Esempio:
CS-CD in cascata



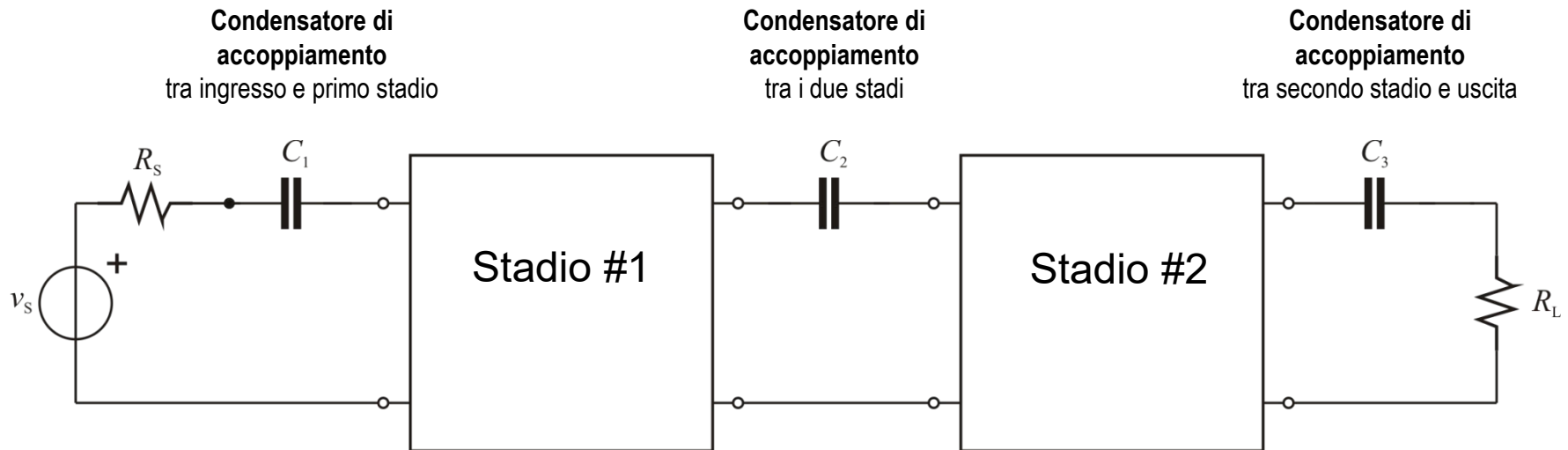
Amplificatori a più stadi (II)

- Quando si collegano stadi in cascata possono nascere problemi di conflitto tra le polarizzazioni (DC) dei due stadi.
- Possono anche presentarsi problemi di conflitto tra i generatori in DC (polarizzazione) e generatori di segnale se posti in parallelo sullo stesso nodo: esempio se il generatore di segnale ha valor medio diverso da quanto richiesto e/o il carico ha impedenza in DC finita.
- Se non interessa il comportamento a frequenze molto basse, gli stadi possono essere polarizzati indipendentemente ed accoppiati solo per il segnale (**accoppiamento in AC**)
- Ciò si realizza mediante **condensatori di accoppiamento** (DC blocking capacitors) di valore **sufficientemente elevato** da potersi considerare come corto circuiti nella banda del segnale.



Amplificatori a più stadi (III)

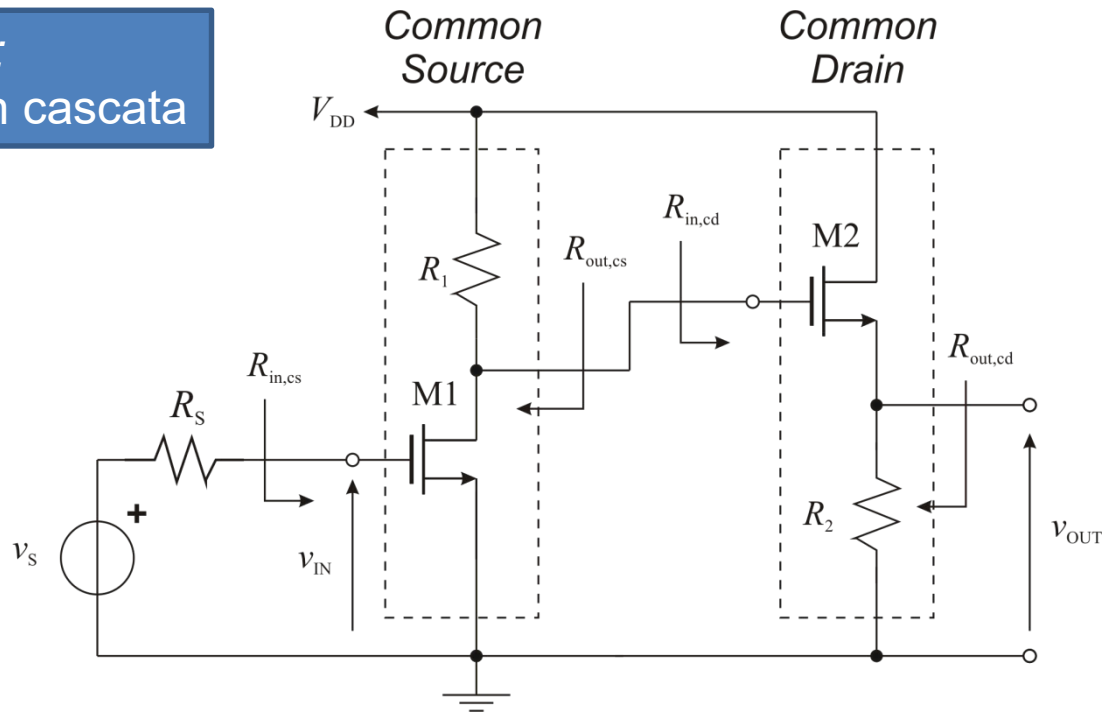
- Per la polarizzazione (DC): i condensatori si comportano come **circuiti aperti**
 - gli stadi amplificatori, la sorgente e l'uscita sono elettricamente separati e non si influenzano tra loro
- Per il segnale (in banda): i condensatori si comportano come **corto circuiti**
 - gli stadi sono collegati tra di loro come voluto per l'elaborazione del segnale
- Visto che i condensatori non sono di capacità infinita, vi sarà una transizione tra il comportamento in DC e quello per il segnale, che influenza la risposta dell'amplificatore alle basse frequenze.



Amplificatori a più stadi (I)

- Gli stadi elementari non coprono tutte le esigenze (ad esempio: nessuno stadio elementare può essere considerato un buon amplificatore di tensione con $A_v > 1$).
- E' possibile ottenere amplificatori con caratteristiche diverse collegando in cascata (o in altro modo...) più stadi elementari.

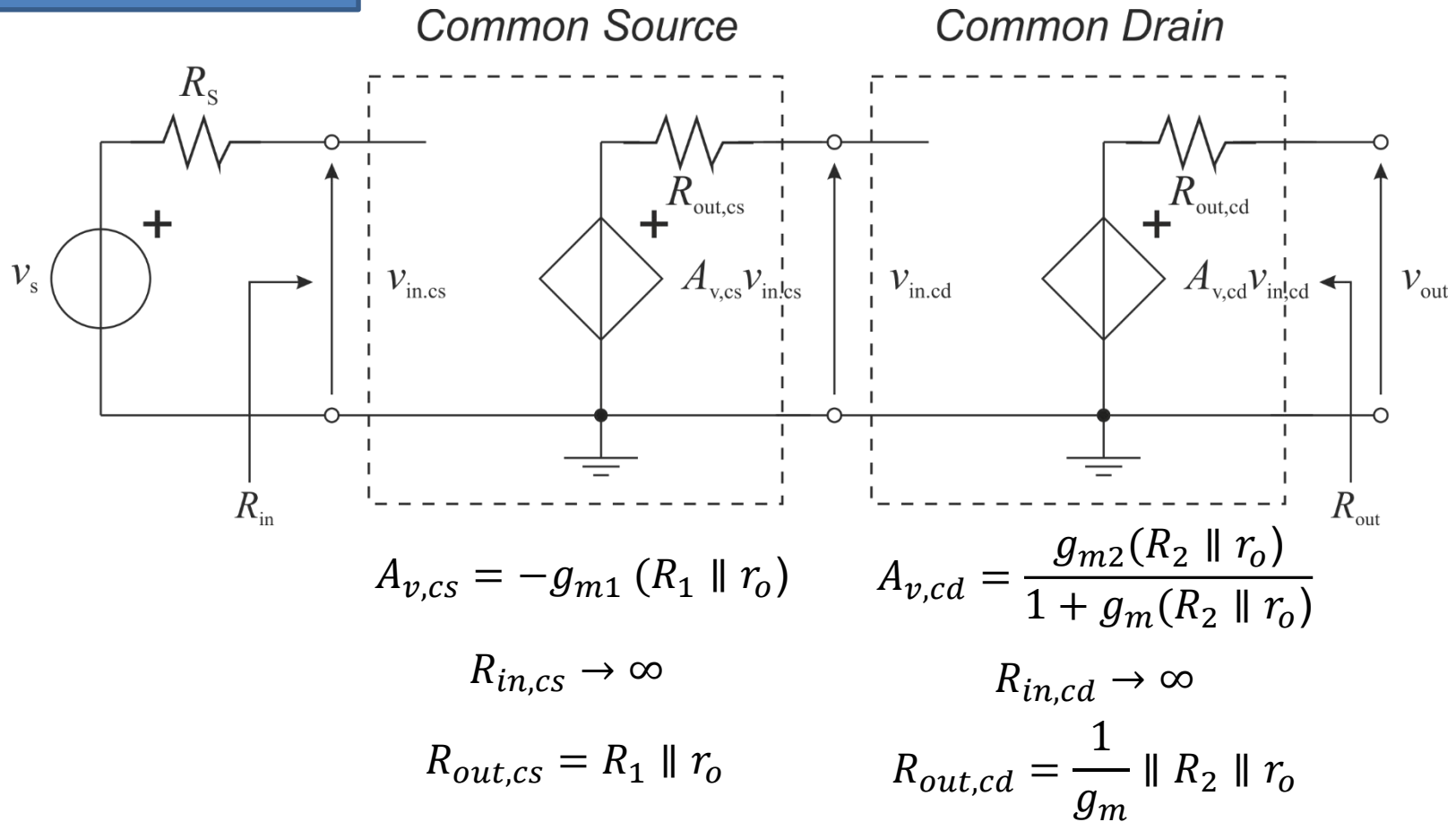
Esempio:
CS-CD in cascata



Amplificatori a più stadi (II)

Esempio:
CS-CD in cascata

Circuito equivalente (a blocchi) per il piccolo segnale



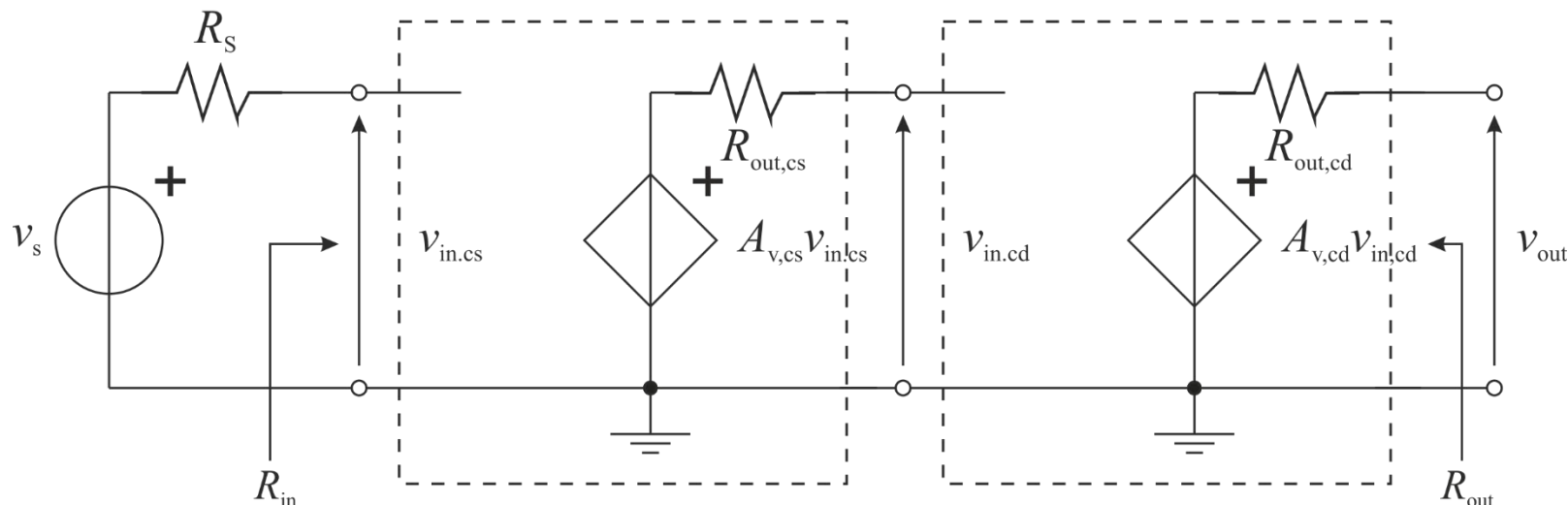
Amplificatori a più stadi (III)

Esempio:
CS-CD in cascata

Circuito equivalente (a blocchi) per il piccolo segnale

Common Source

Common Drain



Con i valori numerici considerati come esempio:

$$A_{v,cs} = -g_{m1} (R_1 \parallel r_o) = -40$$

$$R_{in,cs} \rightarrow \infty$$

$$R_{out,cs} = R \parallel r_o = 40k\Omega$$

$$A_{v,cd} = \frac{g_{m2} (R_2 \parallel r_o)}{1 + g_{m2} (R_2 \parallel r_o)} = 0.975$$

$$R_{in,cd} \rightarrow \infty$$

$$R_{out,cd} = \frac{1}{g_{m2}} \parallel R_2 \parallel r_o = 975\Omega$$



POLITECNICO
DI TORINO

DET
Department of Electronics and Telecommunications

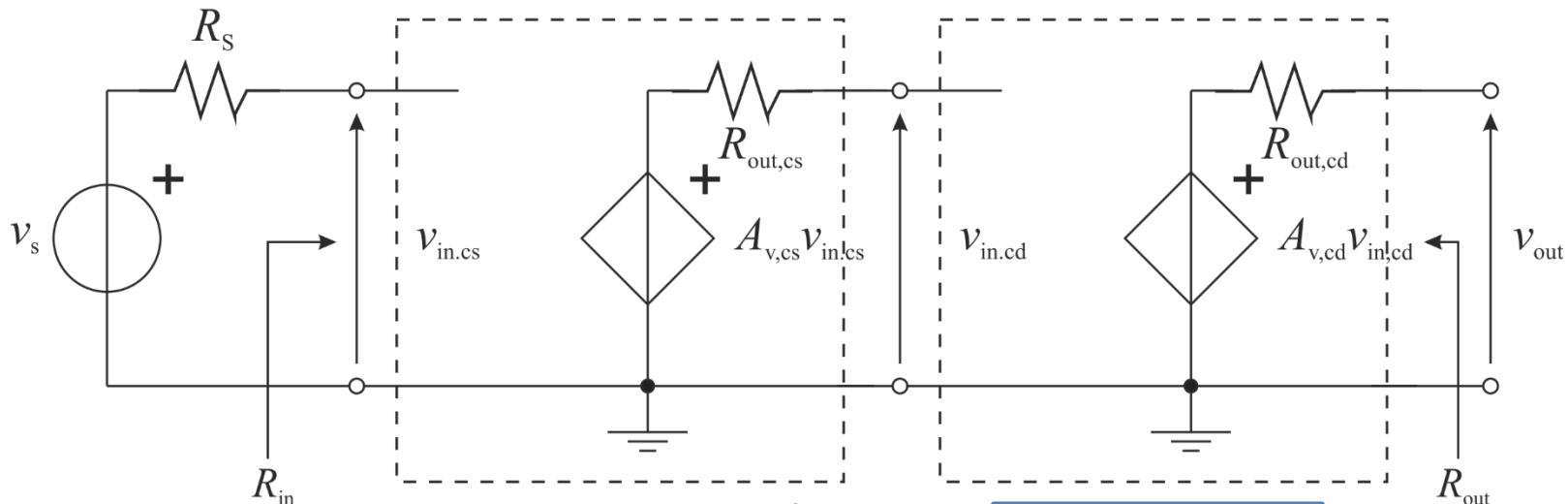
Amplificatori a più stadi (IV)

Esempio:
CS-CD in cascata

Circuito equivalente (a blocchi) per il piccolo segnale

Common Source

Common Drain



$$A_v = A_{v,cs} A_{v,cd} = -g_{m1} (R_1 \parallel r_o) \frac{g_{m2} (R_2 \parallel r_o)}{1 + g_{m2} (R_2 \parallel r_o)} = -39$$

$\gg 1$ in modulo $\simeq 1$

$$R_{in} = R_{in,cs} \rightarrow \infty$$

$$R_{out} = R_{in,cd} = \frac{1}{g_m} \parallel R_2 \parallel r_o = 975 \Omega$$

A_v invertente $\gg 1$ in modulo (come CS)

elevata come CS

bassa come CD

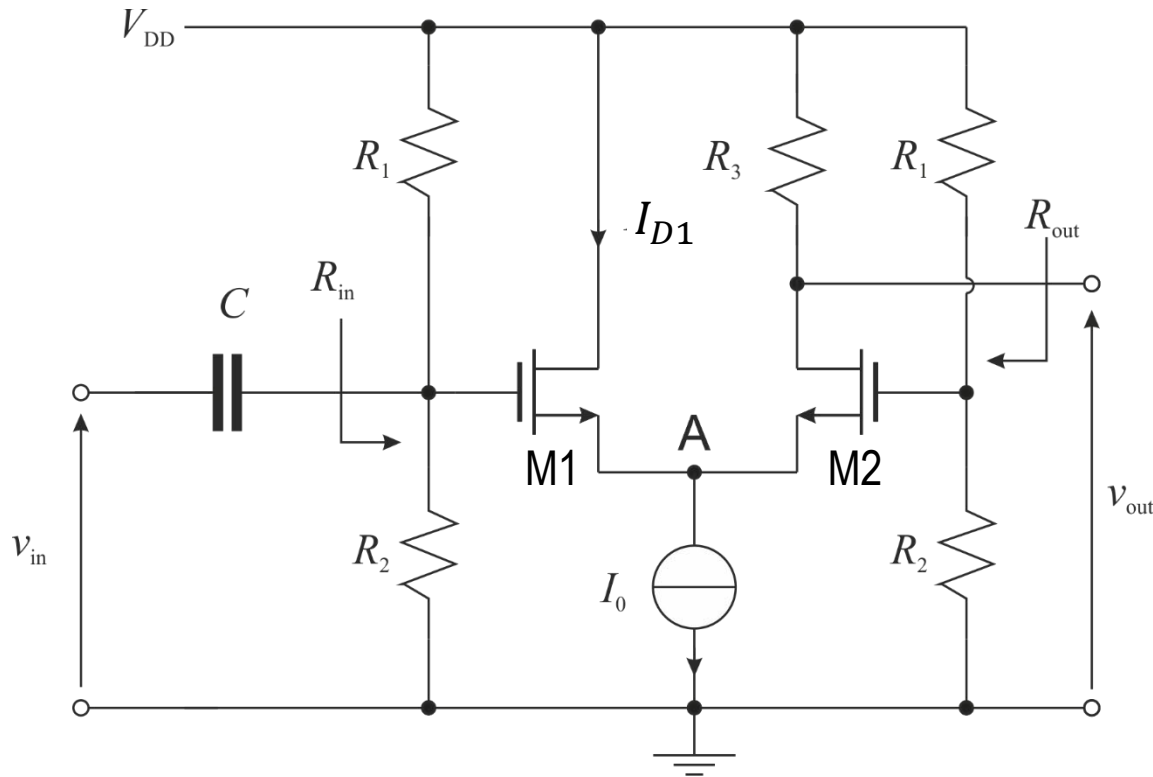
CS-CD: buon amplificatore di tensione con $|A_v| > 1$



POLITECNICO
DI TORINO

DET
Department of Electronics and Telecommunications

Coppia differenziale (I)



$$\begin{aligned}
 R_1 &= 300\text{k}\Omega & \text{per M1, M2:} \\
 R_2 &= 200\text{k}\Omega & \beta = 5\text{mA/V}^2 \\
 R_3 &= 25\text{k}\Omega & V_{TH} = 0.5\text{V} \\
 I_0 &= 200\mu\text{A} & \lambda = 0 \\
 I_{D1} &= 100\mu\text{A} \\
 R_5 &= 50\text{k}\Omega \\
 R_6 &= 10\text{k}\Omega \\
 V_A &= 1.3\text{V} \\
 V_{DD} &= 5\text{V}
 \end{aligned}$$

Con riferimento al circuito in figura:

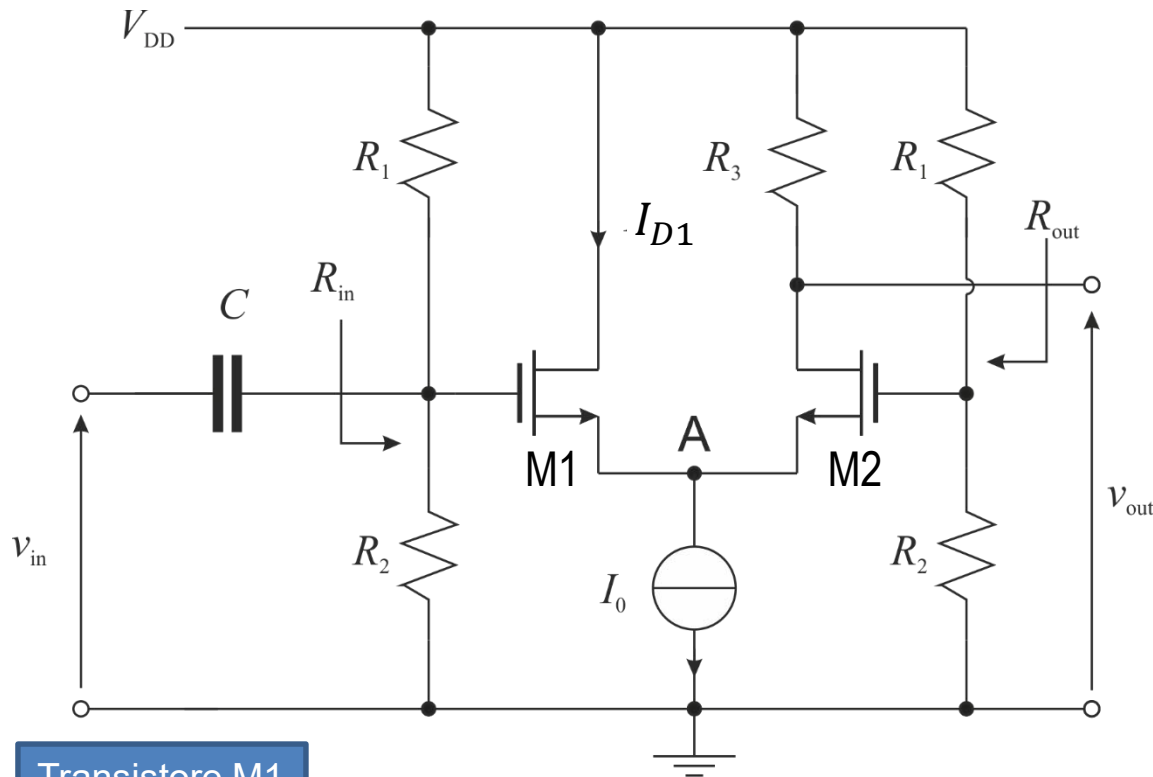
- Verificare la regione di funzionamento di M1 ed M2 e calcolarne i parametri di piccolo segnale.
- Determinare $A_v = \frac{v_{out}}{v_{in}}$, R_{in} ed R_{out} in condizioni di piccolo segnale, considerando C come un corto circuito



POLITECNICO
DI TORINO

DET
Department of Electronics and Telecommunications

Coppia differenziale (II)



$R_1 = 300\text{k}\Omega$
 $R_2 = 200\text{k}\Omega$
 $R_3 = 25\text{k}\Omega$
 $I_0 = 200\mu\text{A}$
 $I_{D1} = 100\mu\text{A}$
 $R_5 = 50\text{k}\Omega$
 $R_6 = 10\text{k}\Omega$
 $V_A = 1.3\text{V}$
 $V_{DD} = 5\text{V}$

per M1, M2:
 $\beta = 5\text{mA/V}^2$
 $V_{TH} = 0.5\text{V}$
 $\lambda = 0$

Transistore M1

$$V_G = V_{DD} \frac{R_2}{R_1 + R_2} = 2\text{V}$$

$$V_D = V_{DD} = 5\text{V}$$

$$V_S = V_A = 1.3\text{V}$$

$$V_{GS} = 2\text{V} - 1.3\text{V} = 0.7\text{V} > V_{TH}$$

$$V_{DS} = 5\text{V} - 1.3\text{V} = 3.7\text{V} > V_{GS} - V_{TH} = 0.2\text{V}$$

$$g_m = \frac{2I_{D1}}{V_{GS} - V_{TH}} = 1\text{mS} \quad g_o = \lambda I_{D1} = 0$$

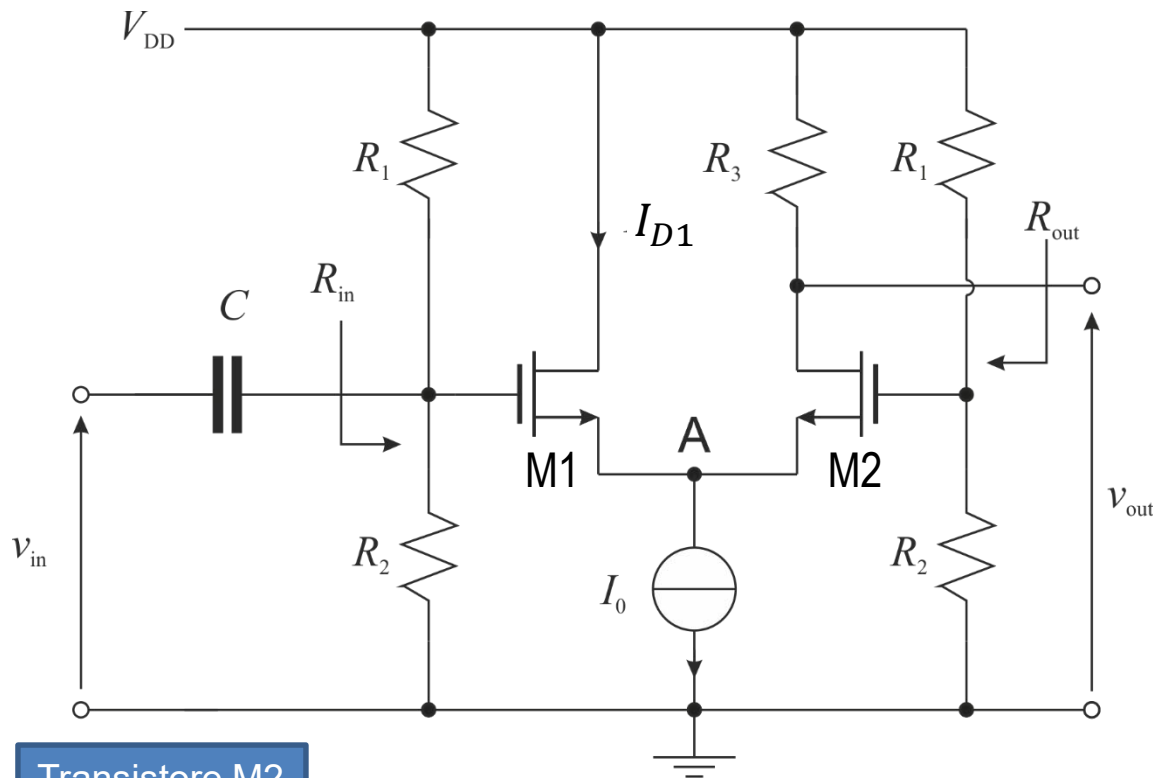
SATURAZIONE



POLITECNICO
DI TORINO

DET
Department of Electronics and Telecommunications

Coppia differenziale (III)



$$\begin{aligned}
 R_1 &= 300\text{k}\Omega & \text{per M1, M2:} \\
 R_2 &= 200\text{k}\Omega & \beta = 5\text{mA/V}^2 \\
 R_3 &= 25\text{k}\Omega & V_{TH} = 0.5\text{V} \\
 I_0 &= 200\mu\text{A} & \lambda = 0 \\
 I_{D1} &= 100\mu\text{A} \\
 R_5 &= 50\text{k}\Omega \\
 R_6 &= 10\text{k}\Omega \\
 V_A &= 1.3\text{V} \\
 V_{DD} &= 5\text{V}
 \end{aligned}$$

Transistore M2

$$V_G = V_{DD} \frac{R_2}{R_1 + R_2} = 2\text{V}$$

$$I_{D2} = I_0 - I_{D1} = 100\mu\text{A}$$

$$V_D = V_{DD} - I_{D2}R_3 = 2.5\text{V}$$

$$V_S = V_A = 1.3\text{V}$$

$$\begin{aligned}
 V_{GS} &= 2\text{V} - 1.3\text{V} = 0.7\text{V} > V_{TH} \\
 V_{DS} &= 2.5\text{V} - 1.3\text{V} = 1.2\text{V} > V_{GS} - V_{TH} = 0.2\text{V}
 \end{aligned}$$

$$g_m = \frac{2I_{D2}}{V_{GS} - V_{TH}} = 1\text{mS} \quad g_o = \lambda I_{D2} = 0$$

SATURAZIONE



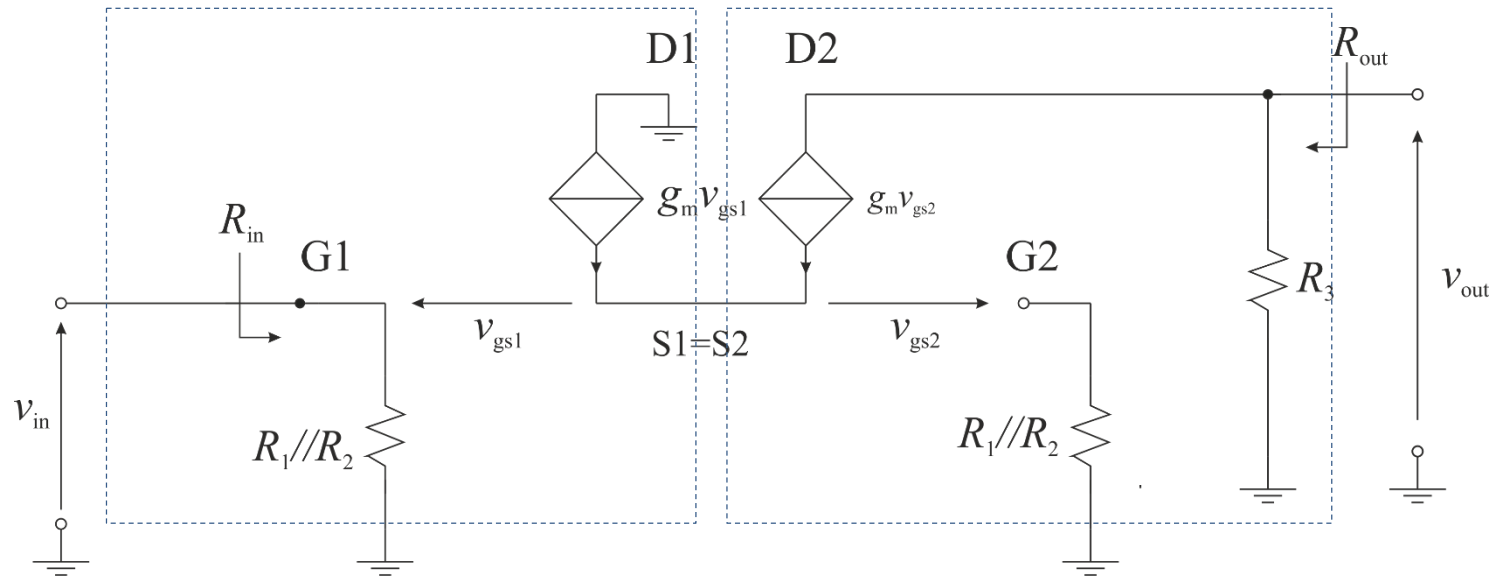
POLITECNICO
DI TORINO

DET
Department of Electronics and Telecommunications

Coppia differenziale (IV)

stadio CD

stadio CG



$$i_{d2} = -i_{d1}$$

$$g_m v_{gs2} = -g_m v_{gs1}$$

$$v_{gs2} = -v_{gs1}$$

$$v_{in} = v_{gs1} - v_{gs2} = v_{gs1} - (-v_{gs1}) = 2v_{gs1}$$

$$v_{gs1} = \frac{v_{in}}{2} \quad v_{gs2} = -\frac{v_{in}}{2}$$

$$v_{out} = -R_3 g_m v_{gs2} = +\frac{g_m R_3 v_{in}}{2}$$

$$A_v = \frac{g_m R_3}{2}$$

$$R_{in} = R_1 \parallel R_2$$

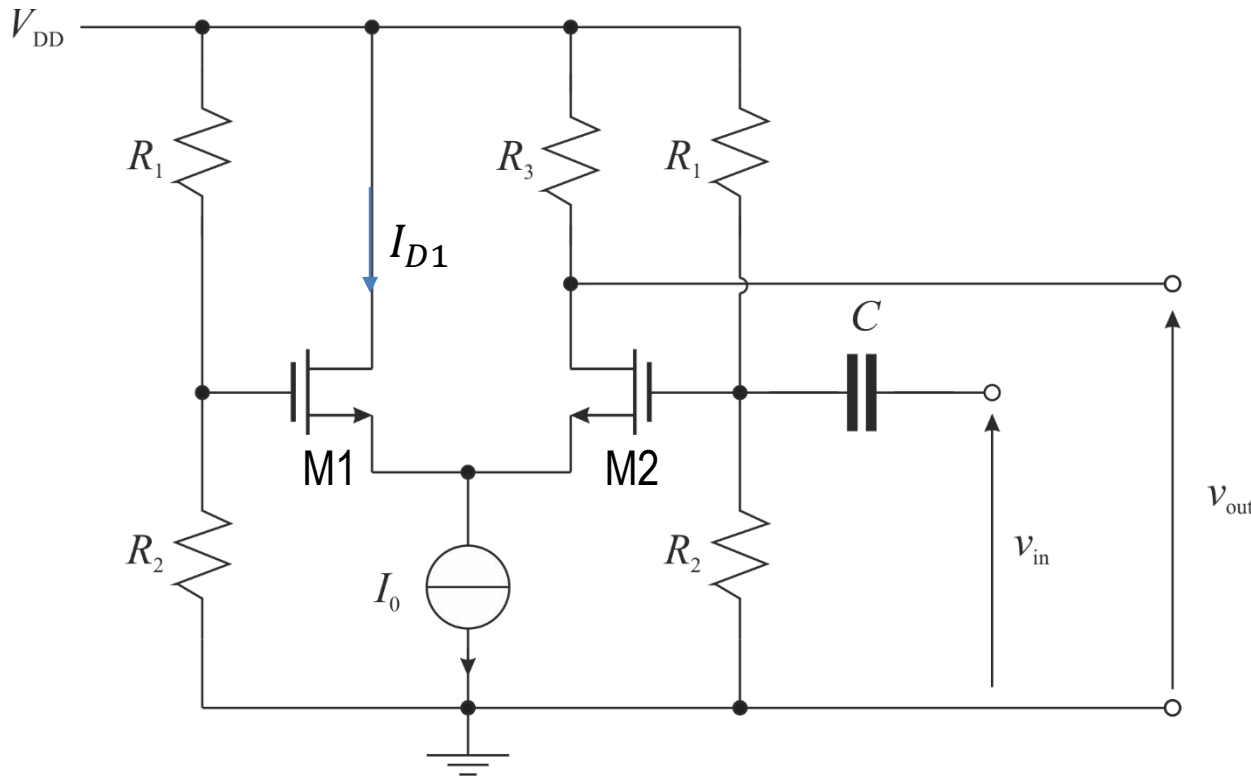
$$R_{out} = R_3$$



POLITECNICO
DI TORINO

DET
Department of Electronics and Telecommunications

Coppia differenziale (V)

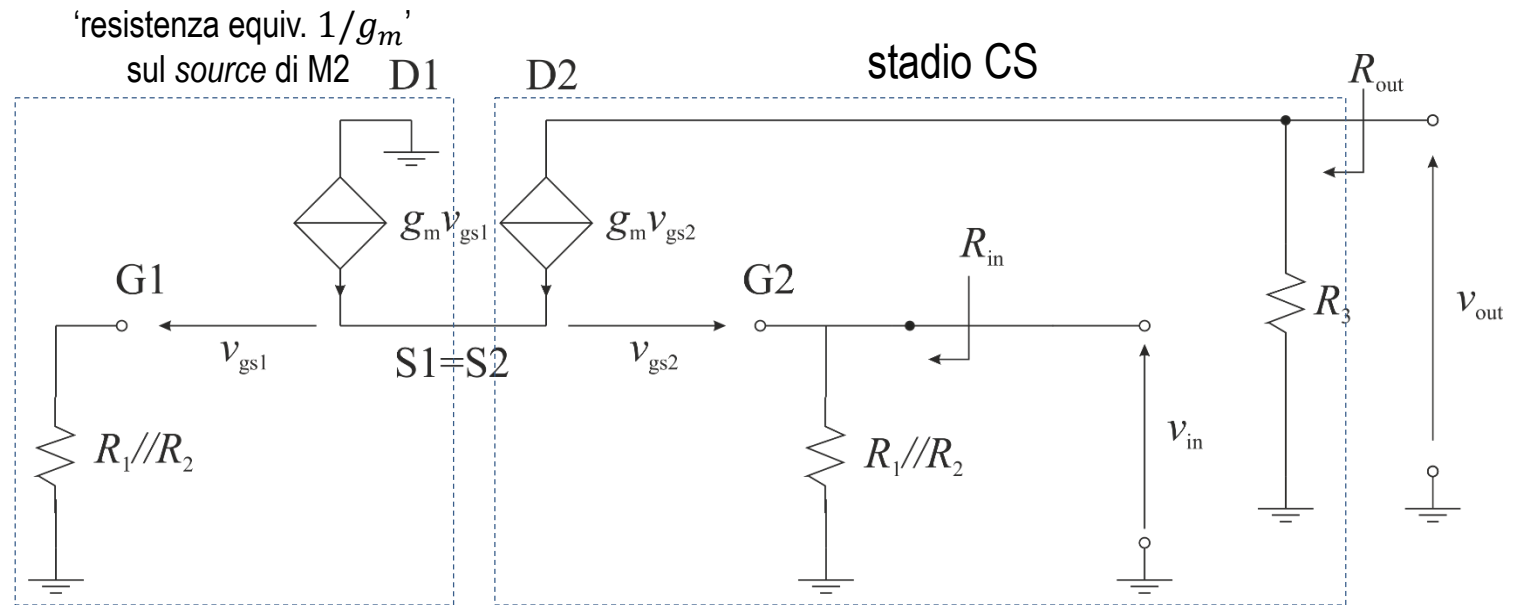


$$\begin{aligned}
 R_1 &= 300\text{k}\Omega & \text{per M1, M2:} \\
 R_2 &= 200\text{k}\Omega & \beta = 5\text{mA/V}^2 \\
 R_3 &= 25\text{k}\Omega & V_{TH} = 0.5\text{V} \\
 I_0 &= 200\mu\text{A} & \lambda = 0 \\
 I_{D1} &= 100\mu\text{A} \\
 R_5 &= 50\text{k}\Omega \\
 R_6 &= 10\text{k}\Omega \\
 V_A &= 1.3\text{V} \\
 V_{DD} &= 5\text{V}
 \end{aligned}$$

- Verificare la regione di funzionamento di M1 ed M2 e calcolarne i parametri di piccolo segnale (identico ad a))
- Determinare $A_v = \frac{v_{out}}{v_{in}}$, R_{in} ed R_{out} in condizioni di piccolo segnale, considerando C come un corto circuito



Coppia differenziale (M)



$$i_{d2} = -i_{d1}$$

$$g_m v_{gs2} = -g_m v_{gs1}$$

$$v_{gs2} = -v_{gs1}$$

$$v_{in} = v_{gs2} - v_{gs1} = v_{gs2} - (-v_{gs2}) = 2v_{gs2}$$

$$v_{gs2} = \frac{v_{in}}{2}$$

$$v_{out} = -R_3 g_m v_{gs2} = -\frac{g_m R_3 v_{in}}{2}$$

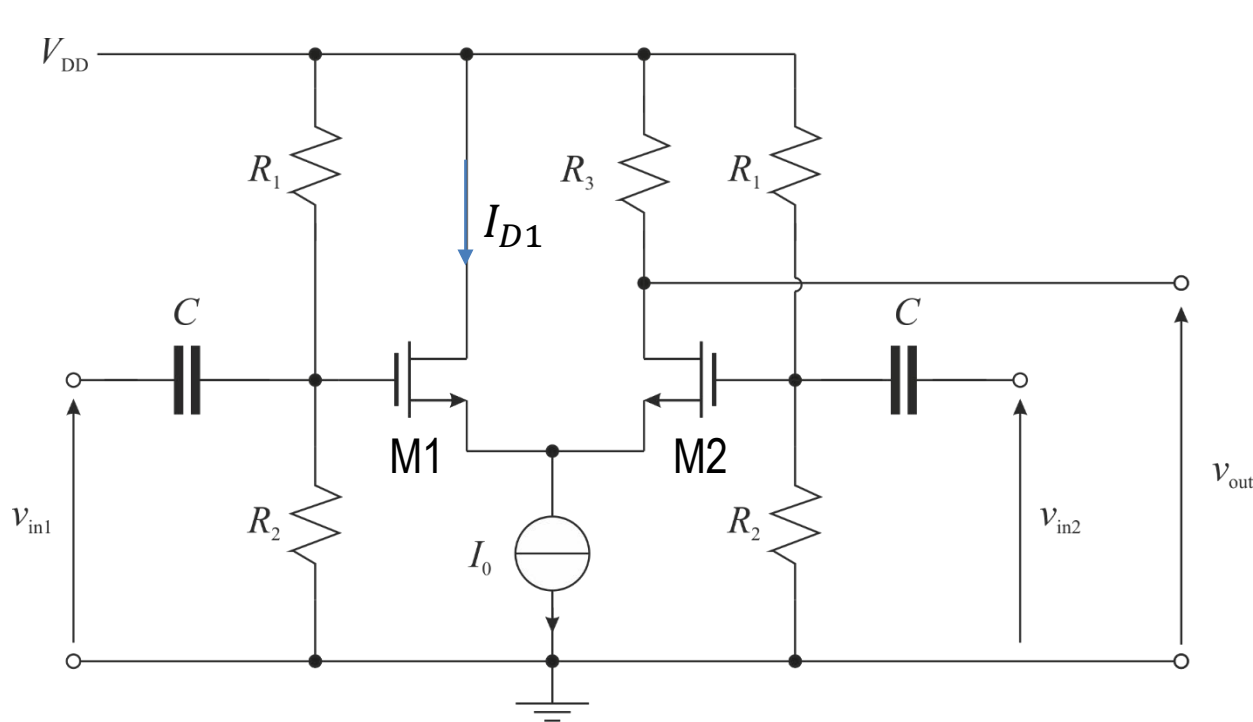
$$A_v = -\frac{g_m R_3}{2}$$

$$R_{in} = R_1 \parallel R_2$$

$$R_{out} = R_3$$



Coppia differenziale (M1)



$R_1=300\text{k}\Omega$
 $R_2=200\text{k}\Omega$
 $R_3=25\text{k}\Omega$
 $I_0=200\mu\text{A}$
 $I_{D1}=100\mu\text{A}$
 $R_5=50\text{k}\Omega$
 $R_6=10\text{k}\Omega$
 $V_A=1.3\text{V}$
 $V_{DD}=5\text{V}$

per M1,M2:
 $\beta=5\text{mA/V}^2$
 $V_{TH}=0.5\text{V}$
 $\lambda=0$

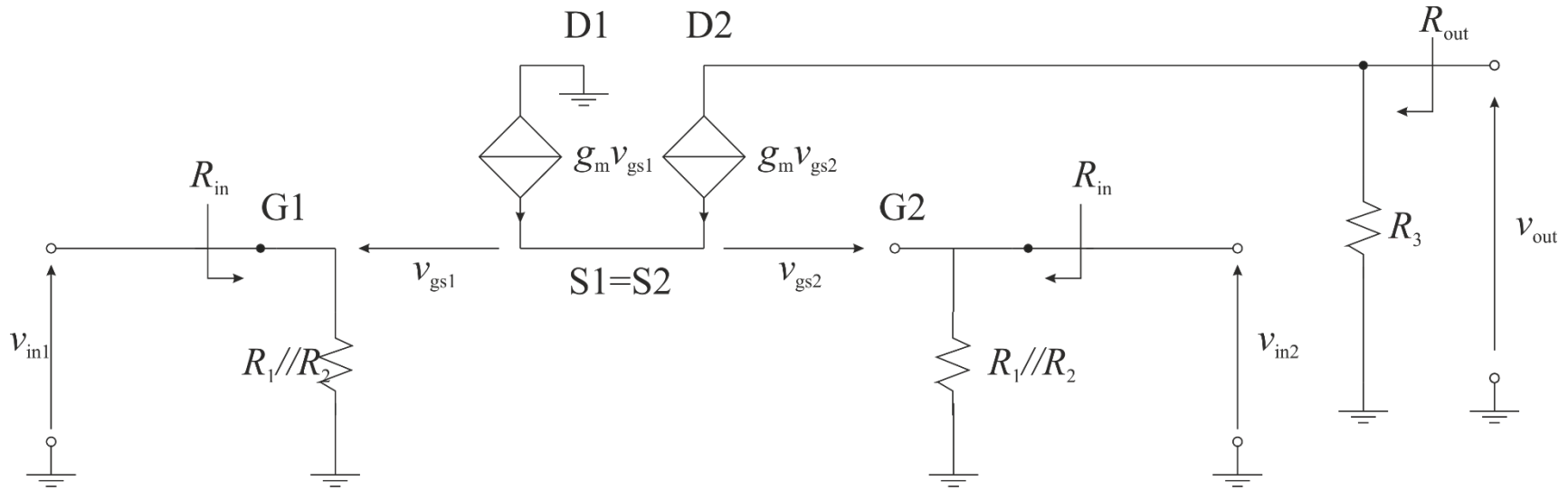
- Verificare la regione di funzionamento di M1 ed M2 e calcolarne i parametri di piccolo segnale (identico ad a) e b))
- Determinare v_{out} in condizioni di piccolo segnale, considerando C come un corto circuito



POLITECNICO
DI TORINO

DET
Department of Electronics and Telecommunications

Coppia differenziale (MII)



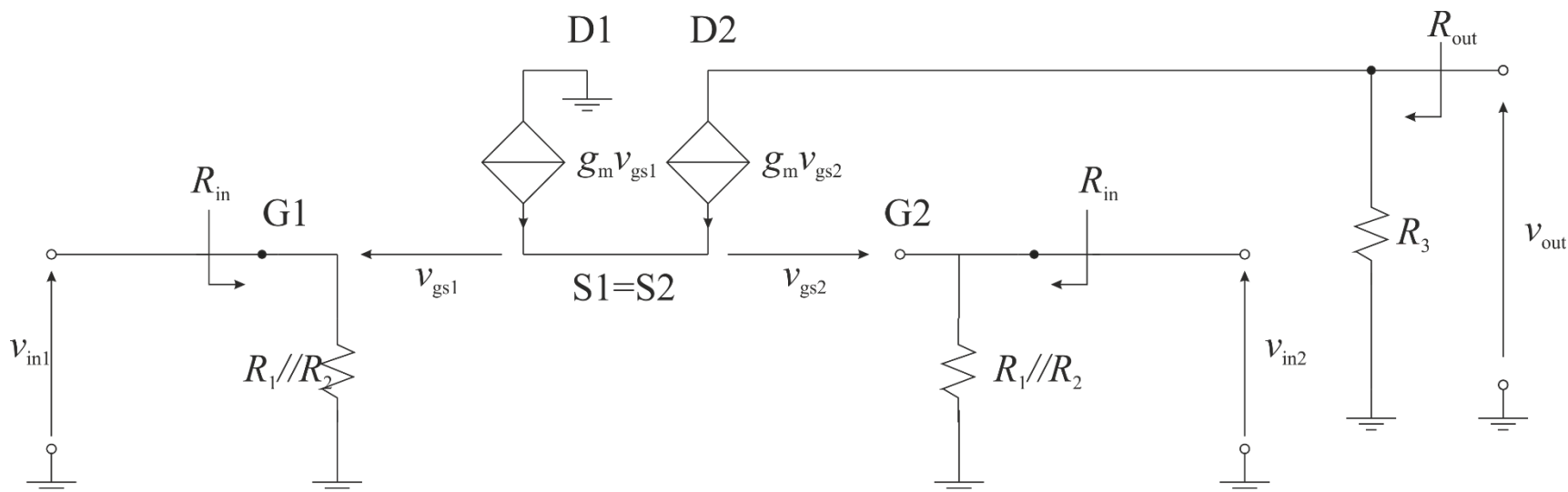
- ci sono due ingressi v_{in1} e v_{in2}
- Il circuito di segnale è lineare \rightarrow si può ricavare v_{out} sovrapponendo gli effetti di v_{in1} e v_{in2}

$$v_{out} = v_{out}^{(1)} + v_{out}^{(2)}$$

- Effetto di v_{in1} : il circuito è analogo a quello della parte 2a): $v_{out}^{(1)} = \frac{R_3 g_m}{2} v_{in1}$
- Effetto di v_{in2} : il circuito è analogo a quello della parte 2b): $v_{out}^{(2)} = -\frac{R_3 g_m}{2} v_{in2}$



Coppia differenziale (IX)



$$v_{out}^{(1)} = \frac{R_3 g_m}{2} v_{in1} \quad v_{out}^{(2)} = -\frac{R_3 g_m}{2} v_{in2}$$

sovrapponendo gli effetti:

$$v_{out} = v_{out}^{(1)} + v_{out}^{(2)} = \frac{R_3 g_m}{2} (v_{in1} - v_{in2})$$

L'uscita solo dipende dalla *differenza* dei due ingressi: *tensione differenziale* $v_d = v_{in1} - v_{in2}$

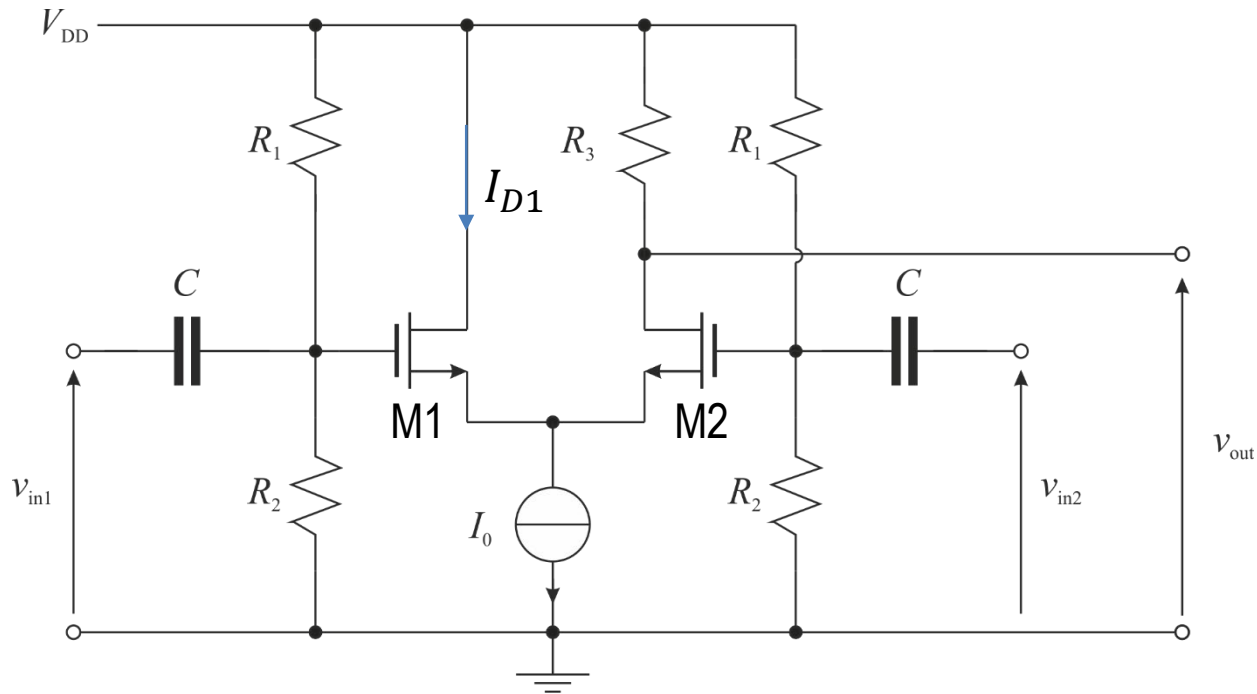
$$v_{out} = \frac{g_m R_3}{2} v_d = A_d v_d$$

$$A_d = \frac{g_m R_3}{2}$$

A_d : amplificazione differenziale



Coppia Differenziale



L'uscita solo dipende dalla *differenza* dei due ingressi: *tensione differenziale* $v_d = v_{in1} - v_{in2}$

$$v_{out} = A_d v_d$$

$$A_d = \frac{g_m R_3}{2}$$

Se i segnali v_{in1} e v_{in2} sono uguali (*ingresso di modo comune*) $v_{in1} = v_{in2} = v_{cm}$, il segnale in uscita è nullo

Questo circuito riveste un'importanza particolare perchè è alla base dell'**amplificatore operazionale** di cui si parlerà nel seguito del corso.

