
Polarizzazione dei circuiti amplificatori con BJT e MOS

Circuiti di polarizzazione

In ogni amplificatore è necessario preliminarmente fissare il punto di lavoro o punto Q dei dispositivi attivi con opportuni circuiti detti di polarizzazione.

Negli esempi che seguono studieremo dei circuiti di polarizzazione per BJT e MOS e ne calcoleremo il punto Q, definito dalla coppia di valori (V_{CE}, I_C) oppure (V_{DS}, I_D) .

Circuiti di polarizzazione

I circuiti di polarizzazione hanno il compito di fissare il punto Q ad un valore desiderato.

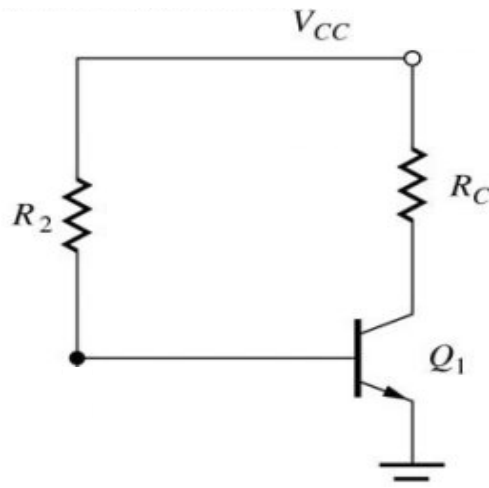
Un circuito di polarizzazione ben realizzato deve essere in grado di **minimizzare le variazioni del punto Q** a **fronte delle inevitabili variazioni dei parametri del dispositivo** (tolleranze costruttive, variazioni della temperatura ecc.).

Approccio per lo studio della polarizzazione

- Ipotizzare un regione di funzionamento per i dispositivi (regione attiva diretta per il BJT / regione di pinch-off per il MOS)
- Sostituire al dispositivo il modello semplificato, valido per la regione di funzionamento ipotizzata al punto precedente
- Risolvere il circuito
- Verificare se l'ipotesi iniziale sulla regione di funzionamento del dispositivo è verificata.

Polarizzazione del BJT

Polarizzazione del BJT



$$\begin{aligned} V_{CC} &= 10V; \\ R_C &= 3.3K; \\ R_2 &= 155K \\ \beta &= 25 \end{aligned}$$

Consideriamo inizialmente il circuito semplificato a sinistra. È il più semplice circuito di polarizzazione che, purtroppo, rende il punto Q fortemente dipendente dai parametri del dispositivo.

La maglia di ingresso fissa il valore di I_B

$$I_B = (V_{CC} - V_{BE}) / R_2 = 60 \mu A$$

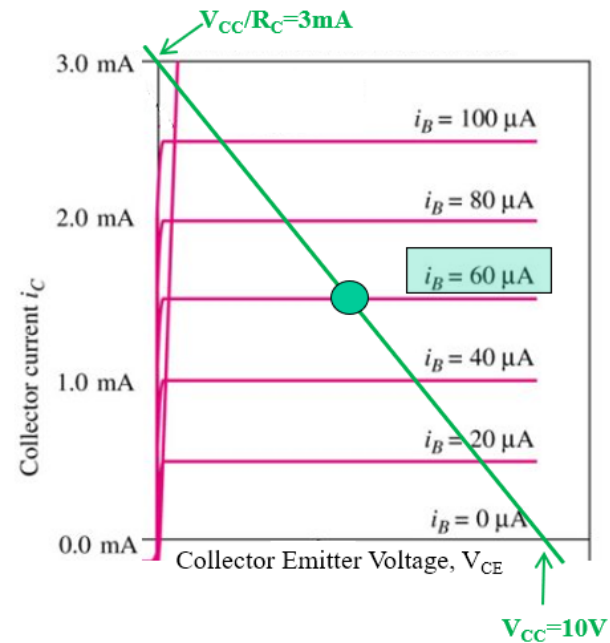
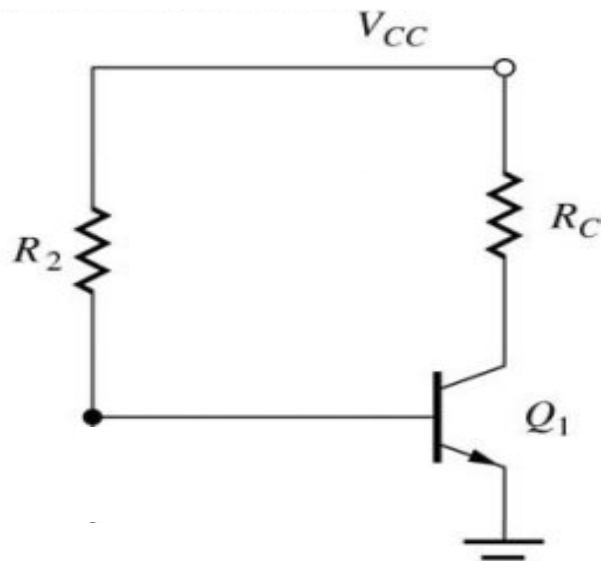
Per la maglia di uscita mettiamo a sistema le caratteristiche del BJT con la relazione imposta dal carico (**retta di carico**)

$$V_{DD} = R_C I_C + V_{CC} \quad \text{retta di carico}$$

$$I_C = f(I_B, V_{CE}) \quad \text{caratteristica del BJT}$$

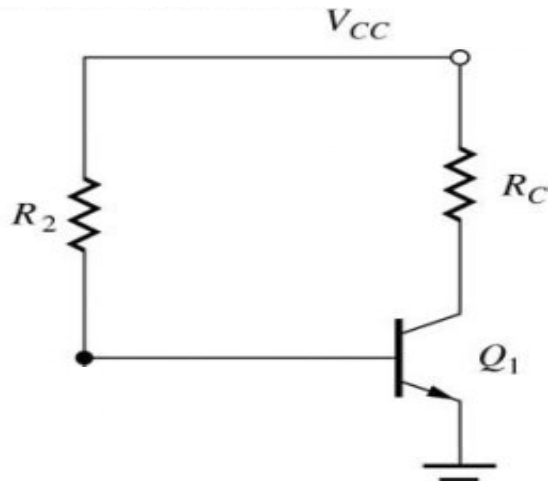
Polarizzazione: Analisi Grafica

Un primo modo per studiare la polarizzazione è l'analisi grafica



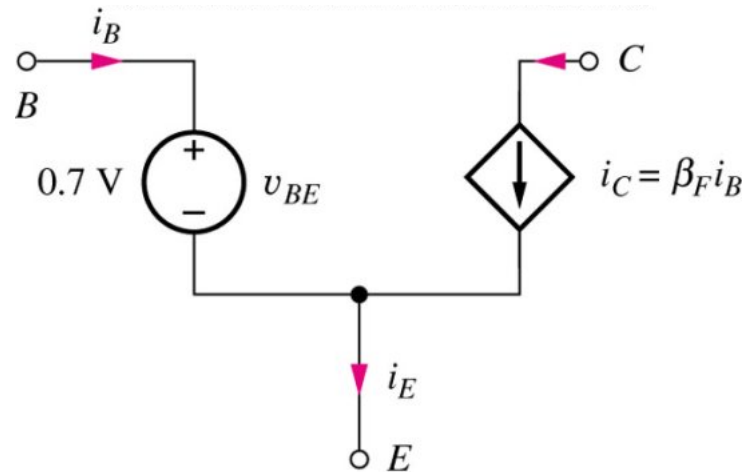
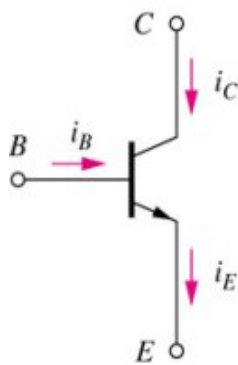
$Q=(1.5\text{mA}, 5\text{V})$ Il punto di lavoro è ben posizionato, è al centro della zona attiva. Come vedremo a breve il circuito purtroppo *non* è in grado di stabilizzare il punto Q

Polarizzazione – utilizzo del modello semplificato del BJT

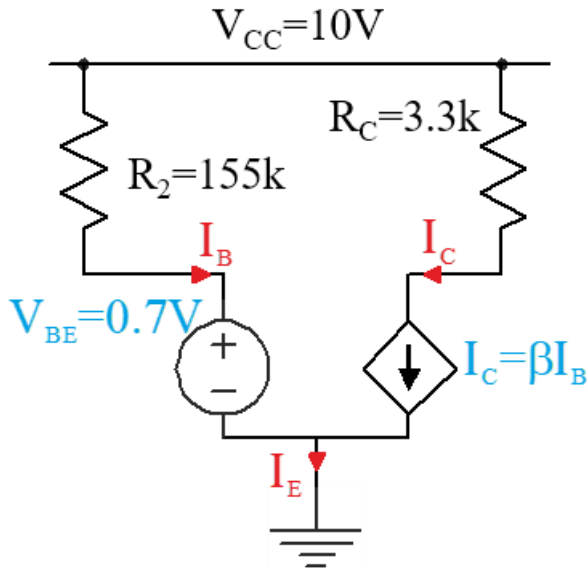


$$V_{CC}=10V; R_C=3.3K; R_2=155K; \beta=25$$

Ipotizziamo che il dispositivo operi in regione attiva diretta e sostituiamolo con il suo modello semplificato.



Polarizzazione – utilizzo del modello semplificato del BJT



Ipotizziamo che il dispositivo operi in regione attiva diretta:

$$V_{BE} = 0.7\text{V}$$

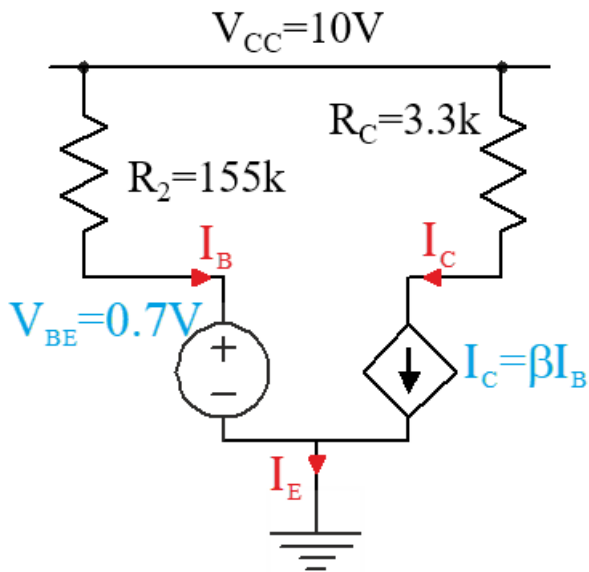
$$I_C = \beta I_B$$

$$I_B = (V_{CC} - V_{BE}) / R_2 = 60\mu\text{A}$$

$$I_C = \beta I_B = 1.5\text{mA}$$

$$V_{CE} = V_{CC} - R_C I_C = 5\text{V}$$

Polarizzazione – utilizzo del modello semplificato del BJT



Si è affermato in precedenza che questo circuito di polarizzazione ha lo svantaggio di rendere il punto Q fortemente dai parametri del dispositivo.

Cosa accade se $\beta=40$ (invece di 25)?

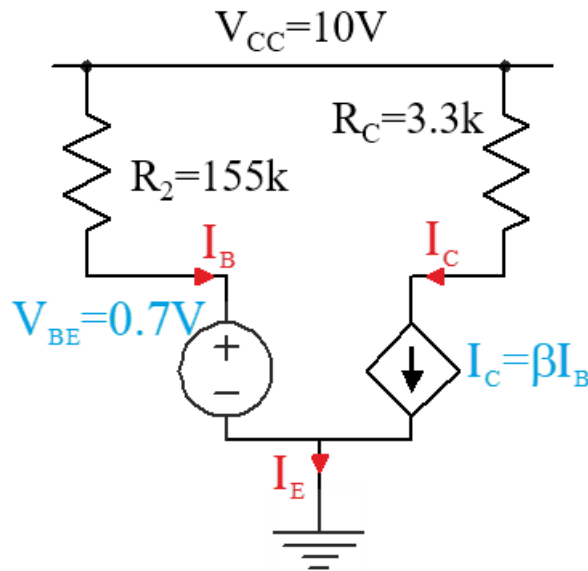
$$I_B = V_{CC} - V_{BE} / R_2 = 60 \mu A \quad (\text{resta inalterata})$$

$$I_C = \beta I_B = 2.4 mA \quad (\text{aumenta})$$

$$V_{CE} = V_{CC} - R_C I_C = 2.4 V \quad (\text{si riduce})$$

La variazione del β comporta un sensibile aumento di I_C ed una riduzione di V_{CE} . Il punto Q varia significativamente ed il BJT si avvicina alla regione di saturazione.

Polarizzazione – utilizzo del modello semplificato del BJT



Cosa accade se $\beta=100$?

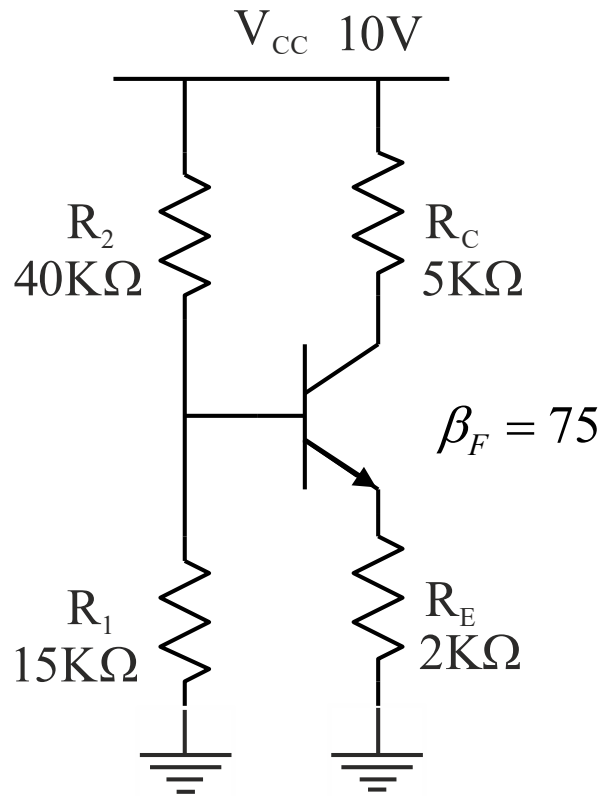
$$I_B = V_{CC} - V_{BE} / R_2 = 60 \mu A \quad (\text{resta inalterata})$$

$$I_C = \beta I_B = 6mA \quad (\text{aumenta})$$

$$V_{CE} = V_{CC} - R_C I_C = -9.8V \quad (\text{negativa! impossibile!})$$

I calcoli, realizzati nell'ipotesi di BJT in regione attiva, producono una V_{CE} negativa (fisicamente impossibile). È facile verificare che il transistor con $\beta=100$ opera in regione di saturazione ed il circuito non opera correttamente come amplificatore.

Circuito di polarizzazione con quattro resistori



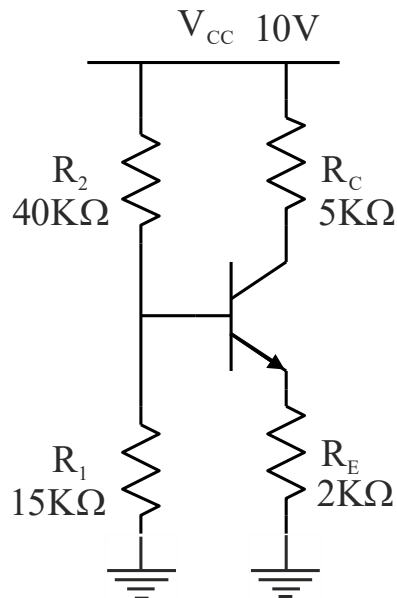
La resistenza R_E introduce una retroazione negativa che stabilizza il punto Q

Supponiamo, ad esempio, che il β del dispositivo aumenti rispetto al suo valore nominale.

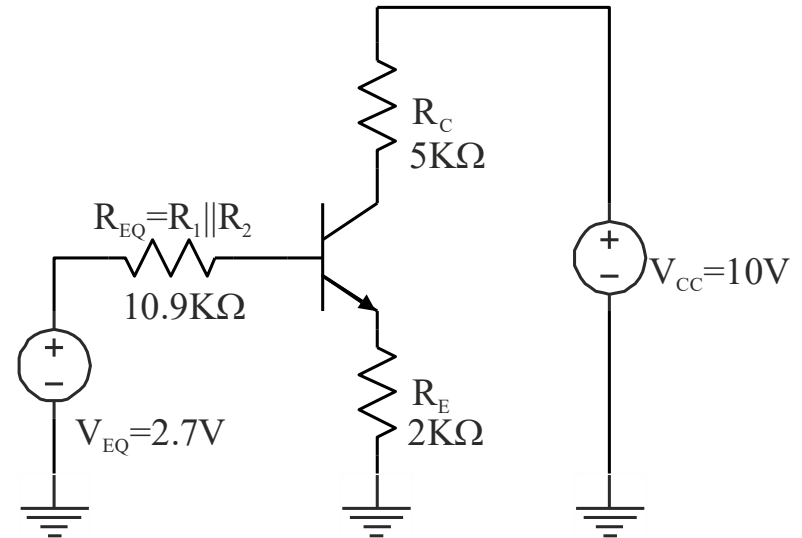
L'incremento di β tende a far aumentare I_C ed $I_E \Rightarrow$ la caduta su R_E aumenta \Rightarrow l'aumento di I_C ed I_E viene contrastato.

Circuito di polarizzazione con quattro resistori

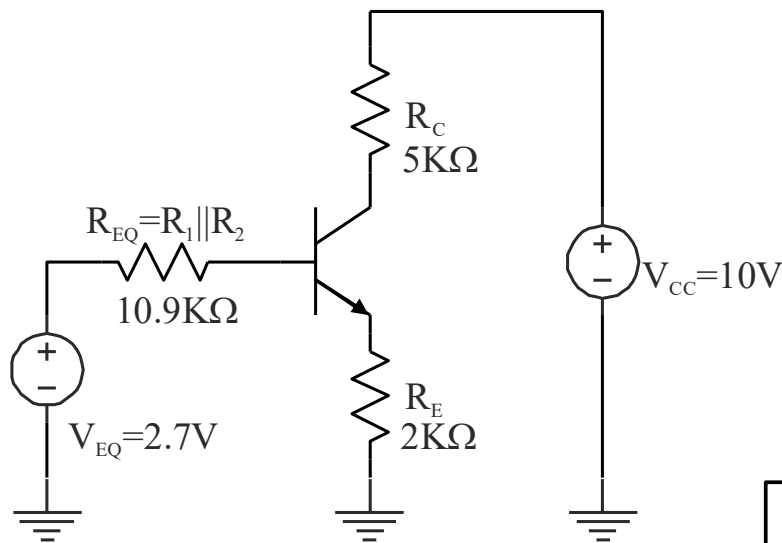
Procediamo all'analisi del circuito di polarizzazione con quattro resistenze.



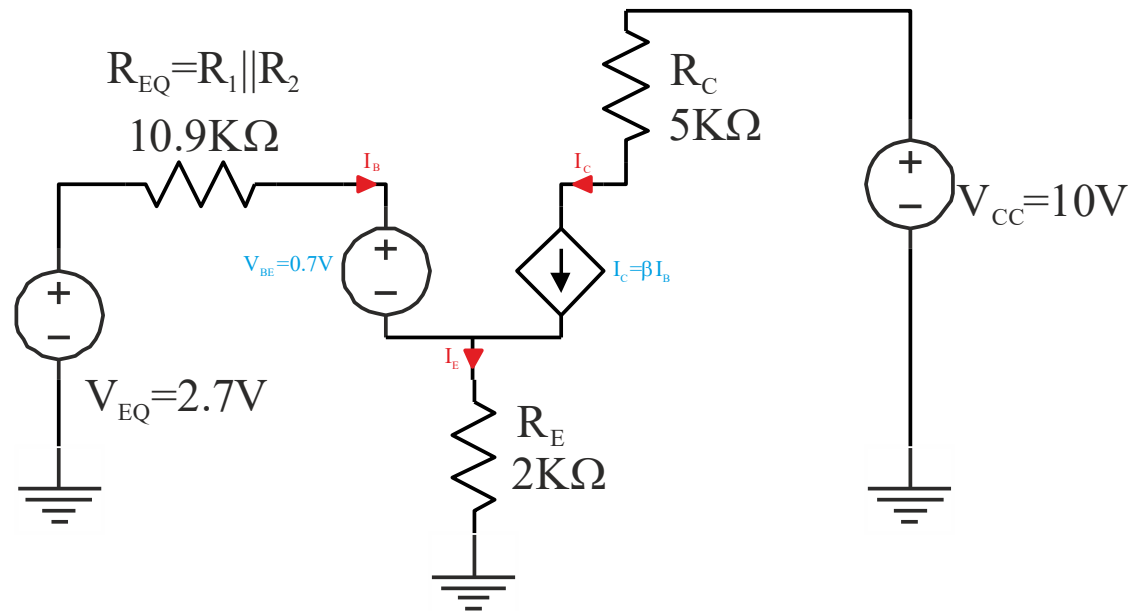
Applichiamo
Thevenin



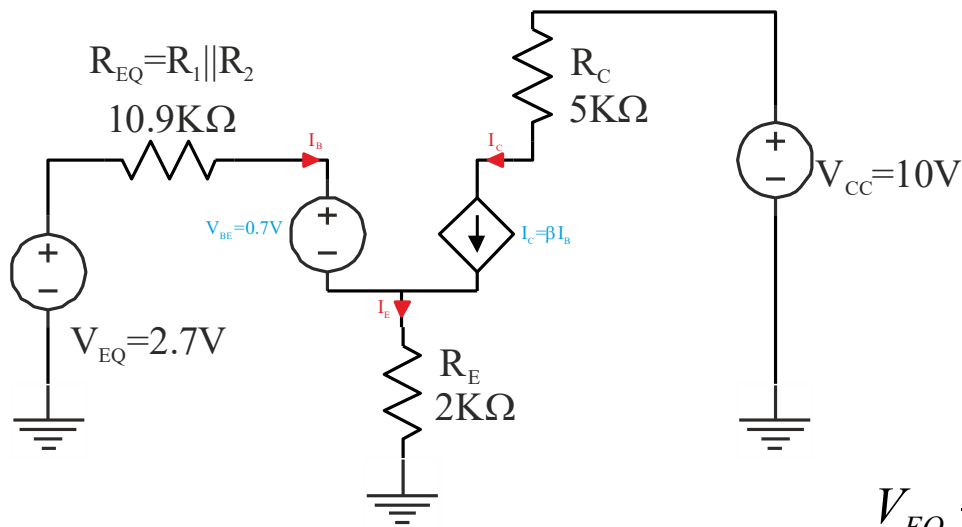
Circuito di polarizzazione con quattro resistori



Sostituiamo il modello semplificato del BJT in regione attiva



Circuito di polarizzazione con quattro resistori



Dall'equazione alla maglia che include V_{EQ} e V_{BE} otteniamo:

$$V_{EQ} = R_{EQ}I_B + V_{BE} + R_E I_E$$

$$\approx R_{EQ} \frac{I_C}{\beta} + V_{BE} + R_E I_C$$

$$I_C = \frac{V_{EQ} - V_{BE}}{\frac{R_{EQ}}{\beta} + R_E}; \quad V_{CE} = V_{CC} - (R_C + R_E)I_C$$

se: $\begin{cases} R_E \gg R_{EQ} / \beta \\ V_{EQ} \gg V_{BE} \end{cases}$ si ha: $I_C \approx V_{EQ} / R_E$ I_C (e quindi anche V_{CE}) diventano indipendenti da β e V_{BE}

Circuito di polarizzazione con quattro resistori: stabilizzazione del punto Q

$$\text{se: } \begin{cases} R_E \gg R_{EQ} / \beta \\ V_{EQ} \gg V_{BE} \end{cases} \quad \text{si ha: } I_C \approx V_{EQ} / R_E$$

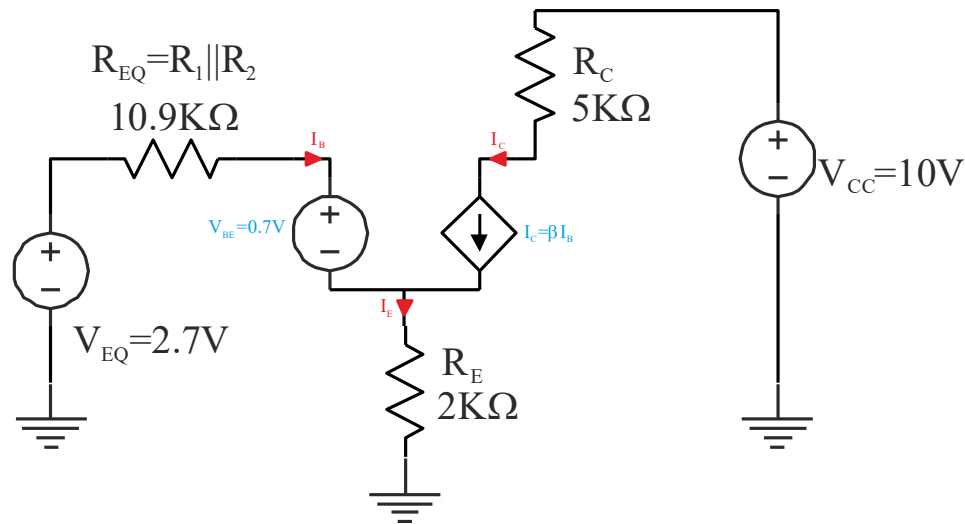
Se V_{EQ} ed R_E sono sufficientemente grandi:

- **Il punto-Q è indipendente dal guadagno di corrente β e da incertezze relative al valore di V_{BE}**

(ricordiamo che la condizione $V_{BE} \approx 0.7V$ è solo una approssimazione e V_{BE} è compresa tipicamente fra 0.6V e 0.8V)

Circuito di polarizzazione con quattro resistori: stabilizzazione del punto Q

Esempio numerico per $\beta=75$:

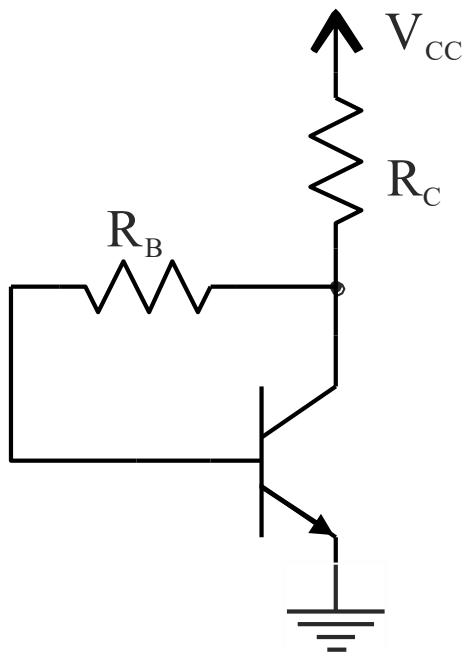


$$I_C = \frac{V_{EQ} - V_{BE}}{\frac{R_{EQ}}{\beta} + R_E} = 0.92\text{mA}; \quad V_{CE} = V_{CC} - (R_C + R_E)I_C = 3.5\text{V}$$

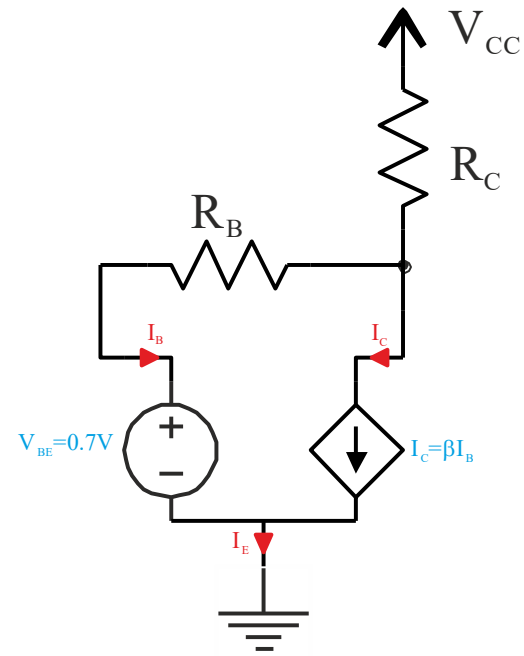
$$\text{Se } \beta=100: \quad I_C = 0.95\text{mA}; \quad V_{CE} = 3.35\text{V}$$

Polarizzazione con resistore Collettore – Base

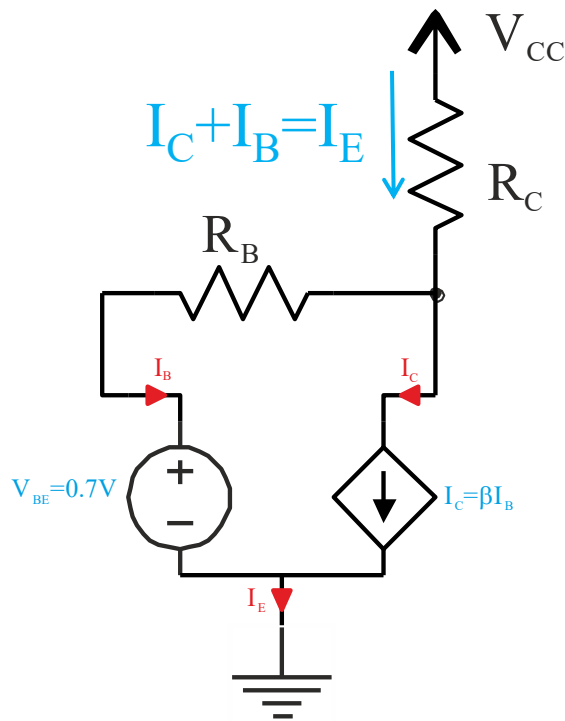
Consideriamo un altro schema di polarizzazione, più semplice di quello a 4 resistenze. Il circuito stabilizza il punto Q, ma in modo meno efficace rispetto allo schema a 4 resistenze.



Sostituiamo il modello del BJT



Polarizzazione con resistore Collettore – Base



$$V_{CC} = I_E R_C + I_B R_B + V_{BE}$$

$$\approx I_C R_C + \frac{I_C}{\beta} R_B + V_{BE}$$

$$I_C = \frac{V_{CC} - V_{BE}}{R_C + \frac{R_B}{\beta}}; \quad V_{CE} = V_{CC} - R_C I_C$$

Anche in questo caso potremmo pensare di scegliere:
 $R_B/\beta \ll R_C$ in modo di rendere il punto Q
 indipendente da β (osserviamo che $V_{CC} \gg V_{BE}$).
 In questo caso avremmo:

$$I_C \approx \frac{V_{CC}}{R_C}; \quad V_{CE} \approx 0$$

Il BJT opererebbe in regione di saturazione

Polarizzazione con resistore Collettore – Base

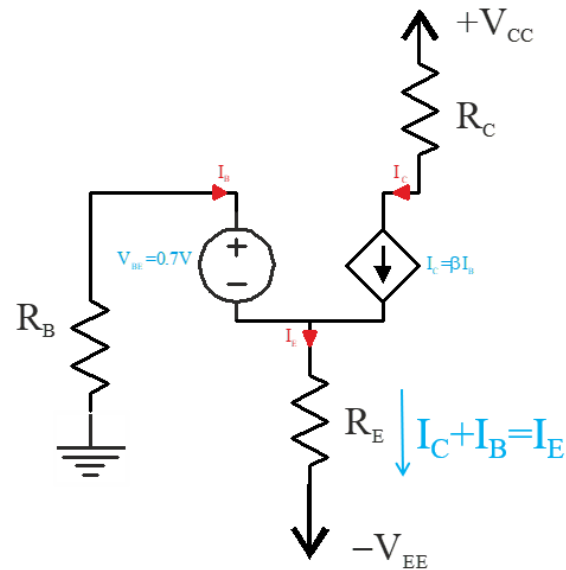
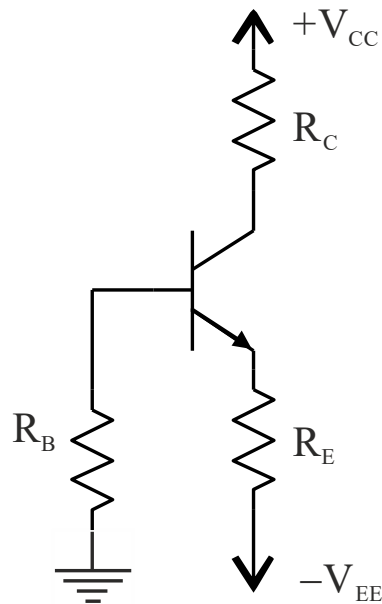
In definitiva, non possiamo scegliere $R_B/\beta \ll R_C$

Il punto Q resta dipendente da β ,

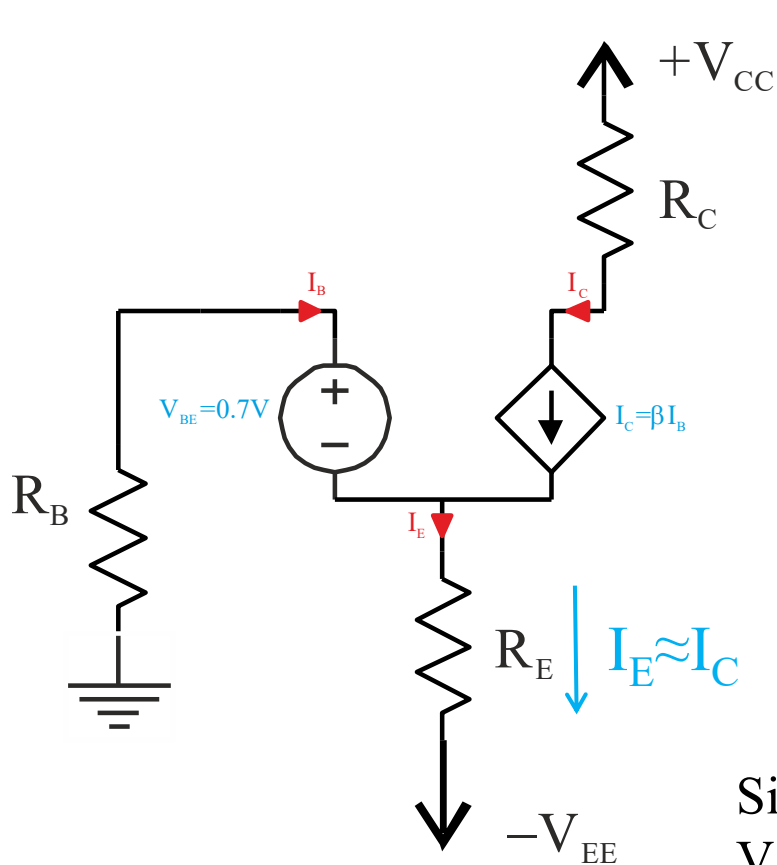
La variazione del punto Q al variare di β sarà comunque meno evidente rispetto al primo circuito studiato.

Polarizzazione con due Alimentazioni

Consideriamo un ultimo schema di polarizzazione, che richiede la presenza di due alimentazioni, una positiva, V_{CC} ed una negativa, V_{EE} .



Polarizzazione con due Alimentazioni



$$V_{EE} = I_B R_B + V_{BE} + I_E R_E$$

$$\approx \frac{I_C}{\beta} R_B + V_{BE} + I_C R_E$$

$$I_C = \frac{V_{EE} - V_{BE}}{R_E + \frac{R_B}{\beta}}$$

$$V_{CC} + V_{EE} = R_C I_C + V_{CE} + R_E I_E$$

$$V_{CE} = \frac{V_{CC} + V_{EE}}{(R_C + R_E) I_C}$$

Si può rendere il punto Q indipendente da β e V_{BE} , in modo analogo al circuito con quattro resistenze.

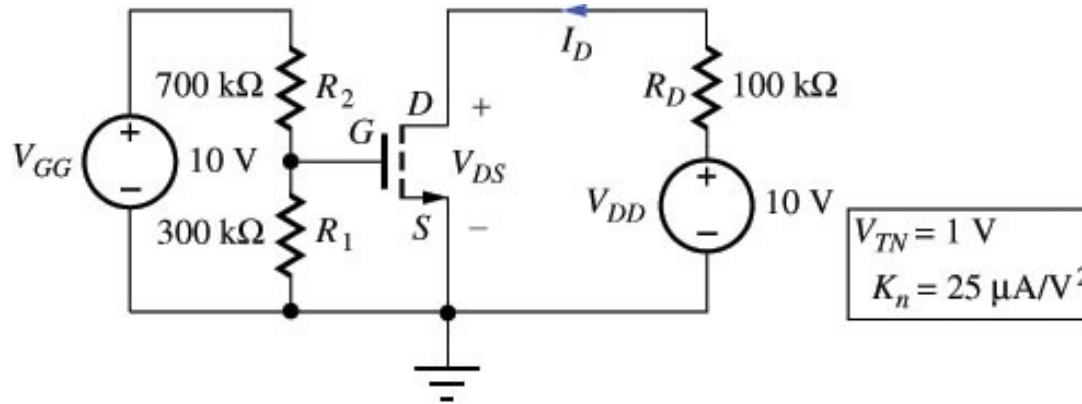
Polarizzazione per il MOS

Circuiti di polarizzazione per MOS

I circuiti di polarizzazione per il MOS che studieremo sono del tutto analoghi a quelli visti per i BJT.

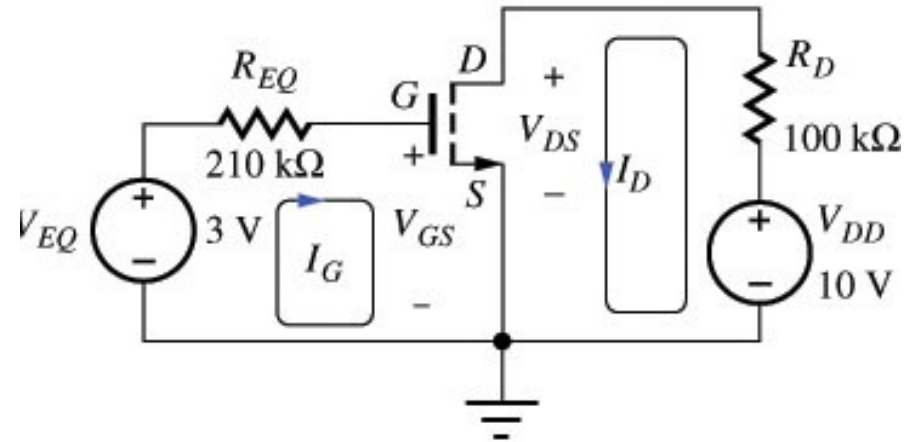
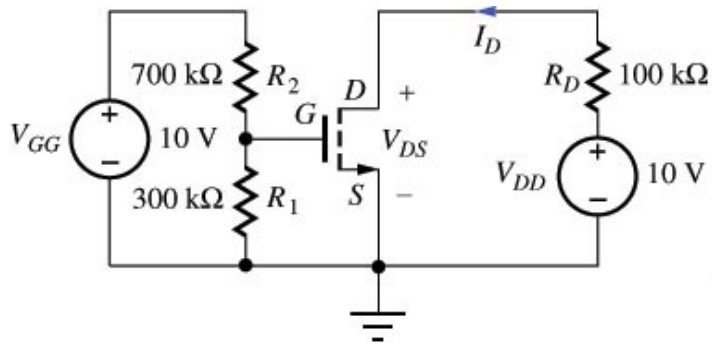
Cambiano, ovviamente, le equazioni del dispositivo!

Polarizzazione con V_{GS} costante



Il circuito riportato in alto è il più semplice schema di polarizzazione per il MOS che, purtroppo, rende il punto Q fortemente dipendente dai parametri del dispositivo.

Polarizzazione con V_{GS} costante



Applichiamo Thevenin alla maglia di ingresso, ottenendo il circuito a destra. Come si vede, il MOS opera con V_{GS} costante: $V_{GS} = V_{EQ}$
Per la maglia di uscita mettiamo a sistema le caratteristiche del MOS con la relazione imposta dal carico (**retta di carico**)

$$V_{DD} = R_D I_D + V_{DS} \quad \text{retta di carico}$$

$$I_D = f(V_{GS}, V_{DS}) \quad \text{caratteristica del MOS}$$

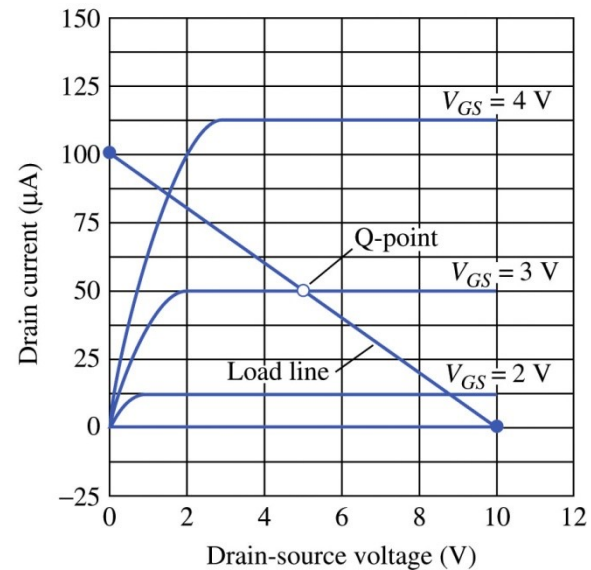
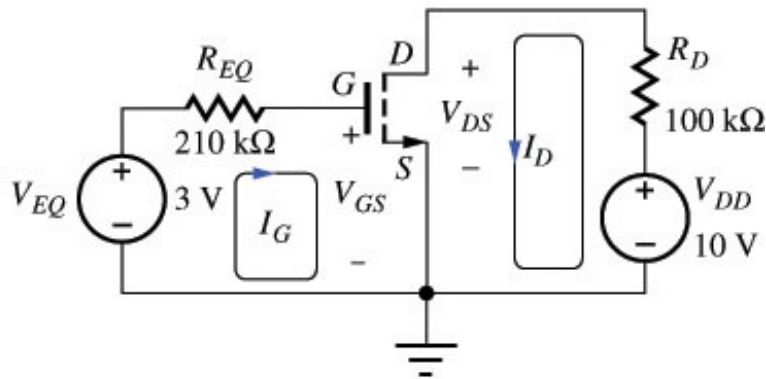
Polarizzazione con V_{GS} costante

Analisi grafica:

$$\text{Retta di carico: } V_{DD} = R_D I_D + V_{DS} \Rightarrow I_D = (V_{DD}/R_D) - (V_{DS}/R_D)$$

$$\text{per: } V_{DS} = 0 \Rightarrow I_D = (V_{DD}/R_D) = 100 \mu\text{A}$$

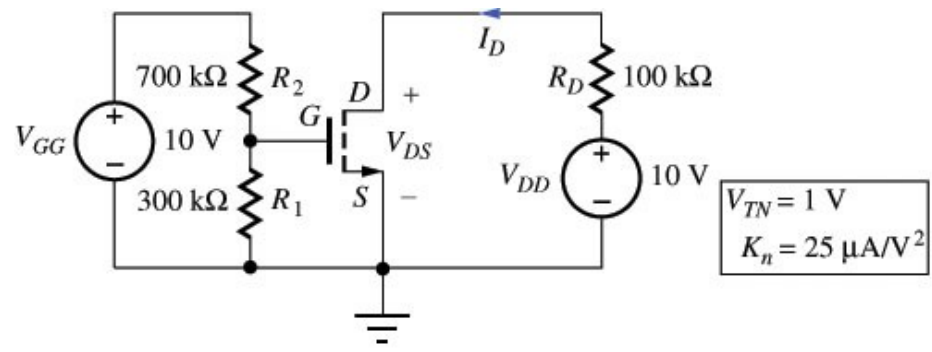
$$\text{per: } I_D = 0 \Rightarrow V_{DS} = V_{DD} = 10\text{V}$$



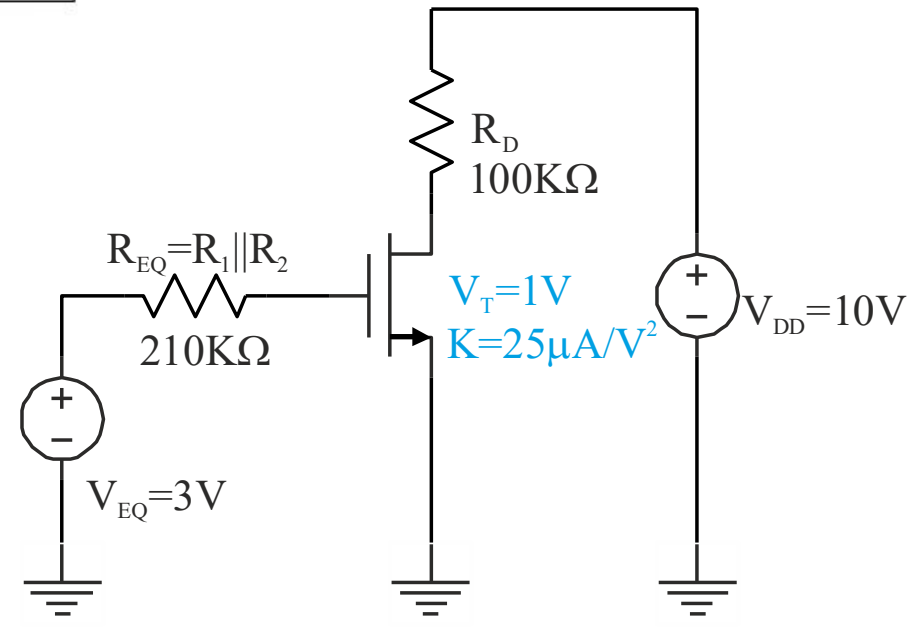
L'analisi grafica fornisce il punto Q all'intersezione fra la retta di carico e la caratteristica del MOS per $V_{GS} = 3\text{V}$

Q: ($I_D = 50.0 \mu\text{A}$, $V_{DS} = 5.00 \text{V}$) con $V_{GS} = 3.00 \text{V}$

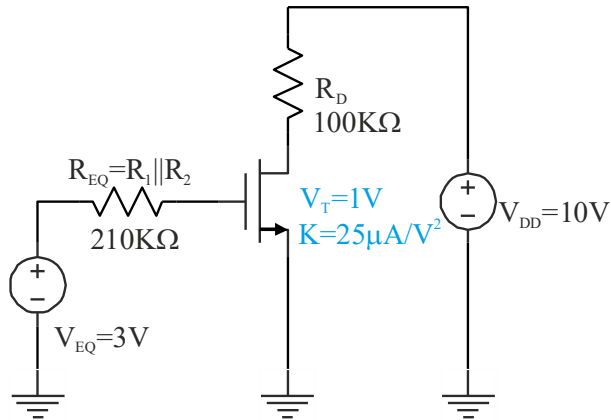
Analisi utilizzando il modello del MOS



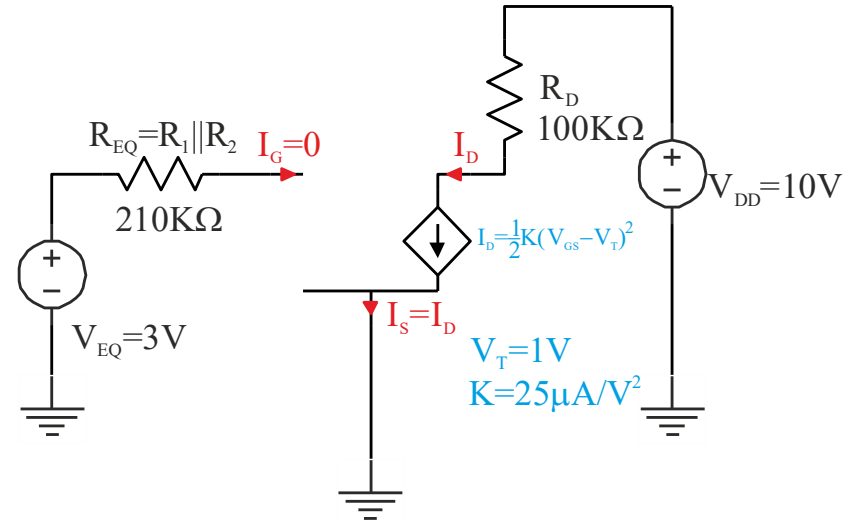
Applichiamo
Thevenin



Analisi della polarizzazione



Sostituiamo
il modello
del MOS



$$I_D = \frac{K}{2} (V_{EQ} - V_T)^2 = 50 \mu A$$

$$V_{DD} = I_D R_D + V_{DS}$$

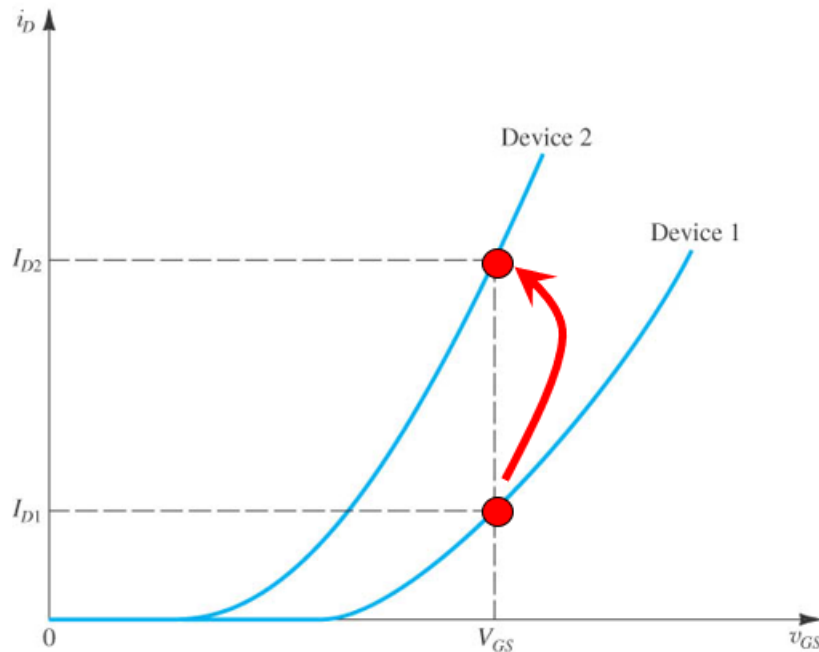
$$V_{DS} = 10V - (50 \mu A)(100K) = 5.00 V$$

Controllo: $V_{DS} > V_{GS} - V_T$. OK!

Q-pt: (50.0 μA , 5.00 V) con
 $V_{GS} = 3.00 V$

Polarizzazione con V_{GS} costante

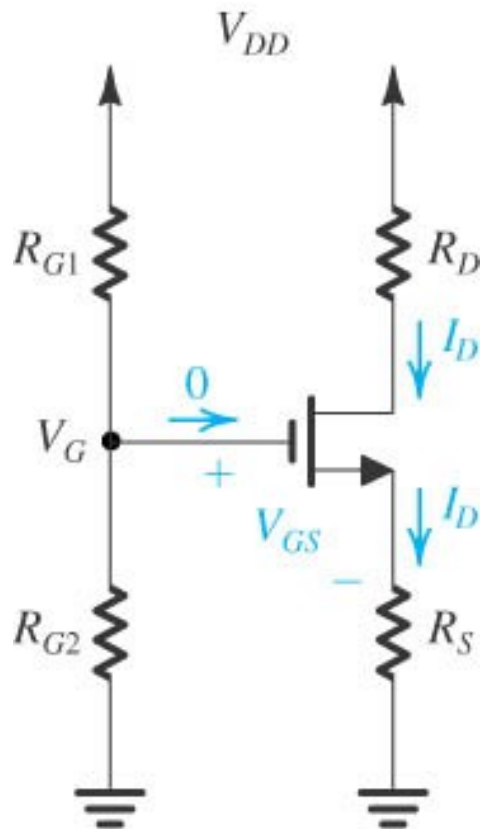
È facile convincersi che la polarizzazione a V_{GS} costante non consente di stabilizzare il punto Q. Consideriamo infatti l'equazione del MOS in regione di pinch-off e vediamo cosa accade se cambia V_T oppure K



$$I_D = \frac{1}{2} K (V_{GS} - V_T)^2$$

Se cambiano i parametri del dispositivo mentre V_{GS} resta costante, il punto Q varia sensibilmente.

Polarizzazione con 4 resistori



(c)

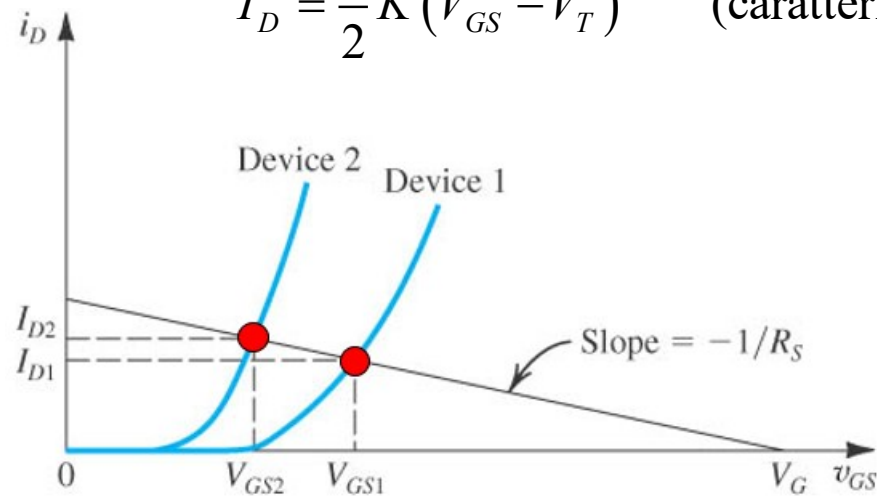
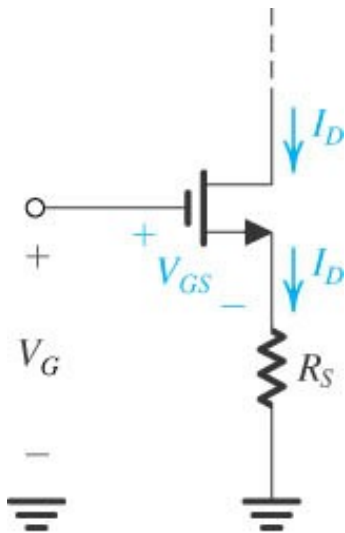
La resistenza in serie al source stabilizza il punto di lavoro. Se I_D tende ad aumentare $\Rightarrow V_{GS}$ si riduce \Rightarrow l'aumento di I_D viene contrastato

Polarizzazione con 4 resistori

Vediamo graficamente in che modo la polarizzazione a quattro resistori stabilizza il punto Q. Dobbiamo mettere a sistema due equazioni:

$$V_{GS} = V_G - R_S I_D \quad (\text{retta nel piano } I_D - V_{GS})$$

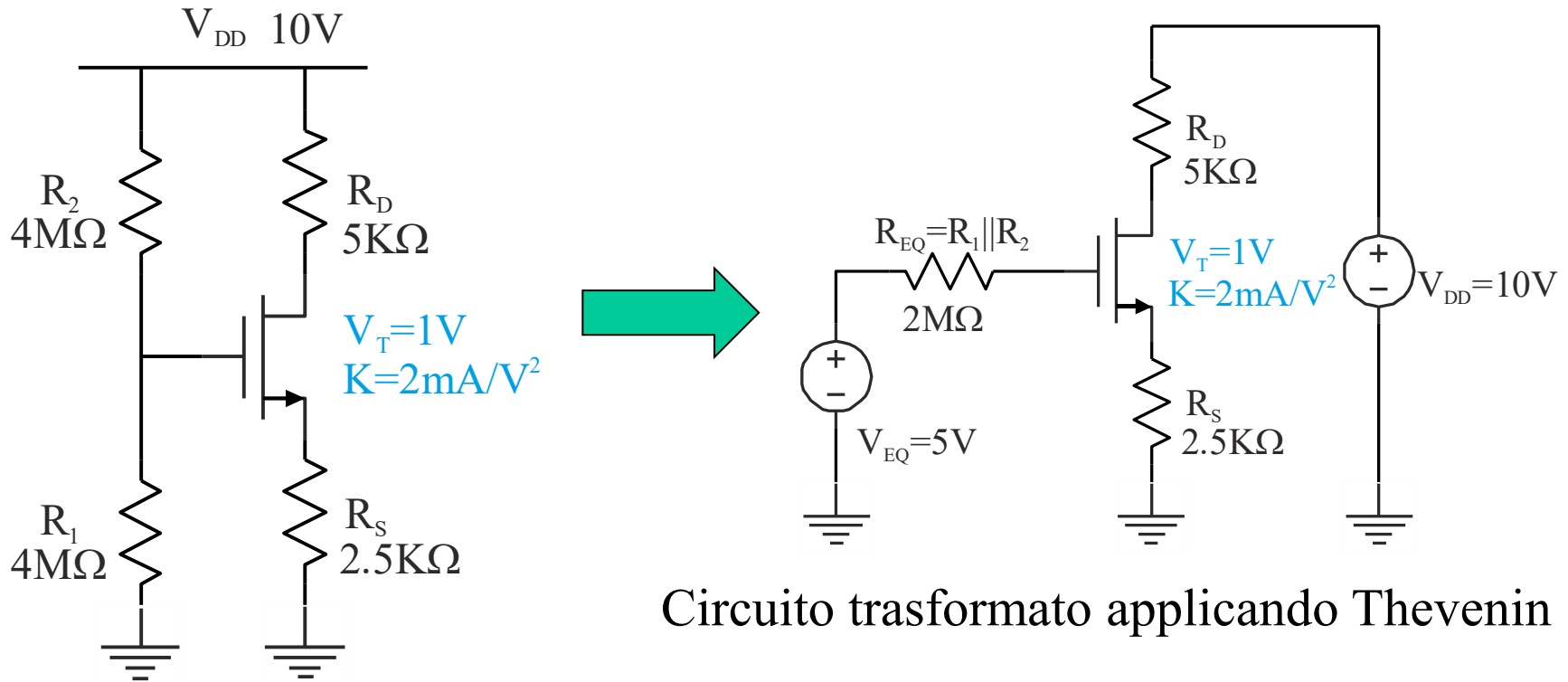
$$I_D = \frac{1}{2} K (V_{GS} - V_T)^2 \quad (\text{caratteristica del MOS})$$



Al variare dei parametri del MOS la I_D varia di poco

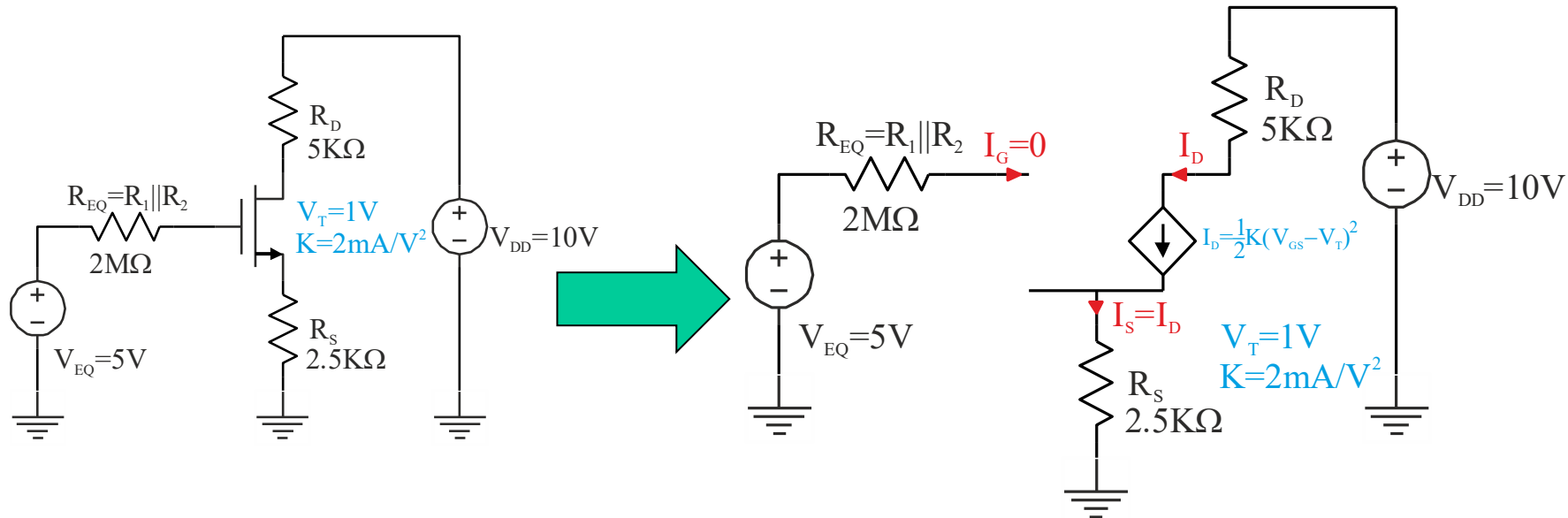
Polarizzazione con 4 Resistori

Studio analitico della polarizzazione con quattro resistori



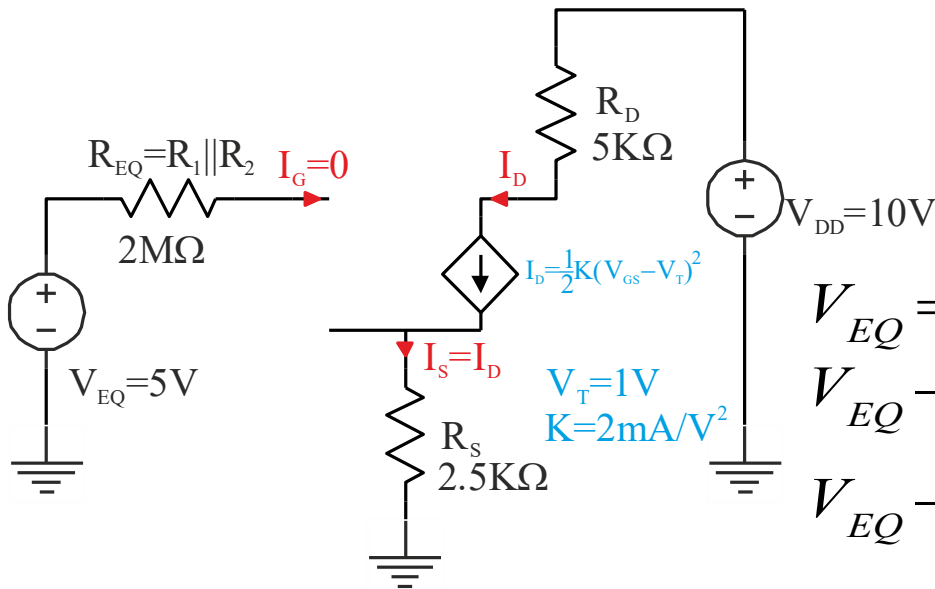
Circuito trasformato applicando Thevenin

Polarizzazione con 4 R (cont.)



Sostituiamo il MOS con il suo modello equivalente

Polarizzazione con 4 R (cont.)



$$V_{EQ} = V_{GS} + R_S I_D$$

$$V_{EQ} - V_T = V_{GS} - V_T + R_S I_D$$

$$V_{EQ} - V_T = (V_{GS} - V_T) + R_S \frac{1}{2} K (V_{GS} - V_T)^2$$

Equazione di secondo grado in $(V_{GS} - V_T)$.

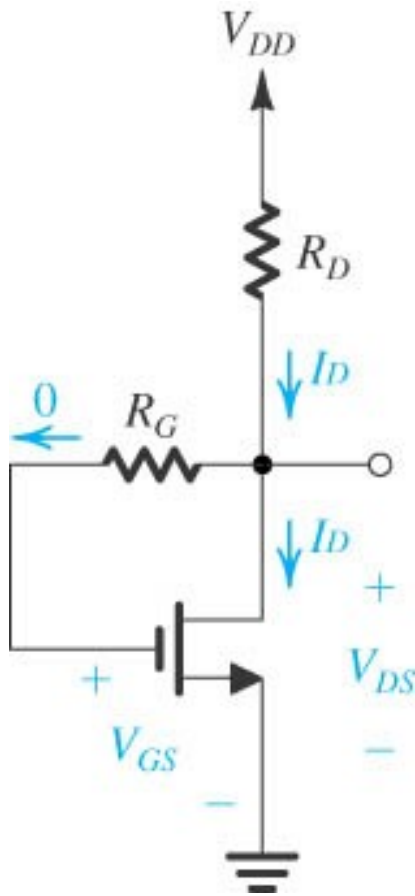
Ha senso fisico solo la soluzione con $V_{GS} - V_T > 0$.

Sostituendo i valori numerici:

$$V_{GS} - V_T = 1.08V; I_D \approx 1mA; V_{DS} = V_{DD} - (R_D + R_S)I_D \approx 2.5V$$

$$V_{DS} > V_{GS} - V_T$$

Polarizzazione con resistenza fra Gate e Drain

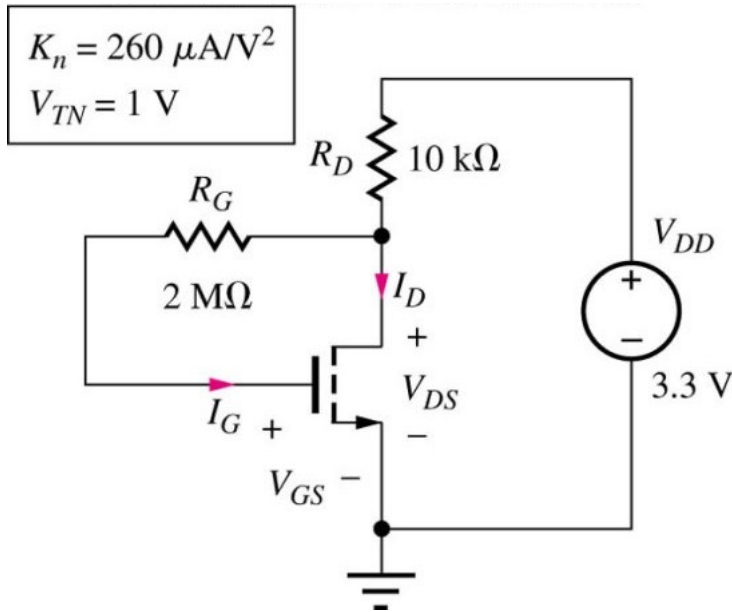


Applichiamo l'equazione di Kirchhoff alla maglia che include R_D ed R_G :

$$V_{GS} = V_{DD} - R_D I_D$$

L'espressione è analoga a quella ottenuta per la rete di polarizzazione con 4 Resistenze. La rete con resistenza fra Gate e Drain consente quindi di stabilizzare il punto Q.

Polarizzazione del MOS: esempio numerico



$$V_{DS} = V_{DD} - I_D R_D$$

$$V_{GS} = V_{DD} - \frac{K_n R_D}{2} (V_{GS} - V_{TN})^2$$

$$\therefore V_{GS} = 3.3 - \frac{(2.6 \times 10^{-4}) (10^4)}{2} (V_{GS} - 1)^2$$

$$\therefore V_{GS} = -0.769 \text{ V}, +2.00 \text{ V}$$

L'unica soluzione accettabile è

$$V_{GS} = 2 \text{ V}$$

$$V_{GS} = +2.00 \text{ V e } I_D = 130 \mu\text{A}$$

$V_{DS} > V_{GS} - V_{TN}$. L'ipotesi di funzionamento in regione di saturazione è verificata

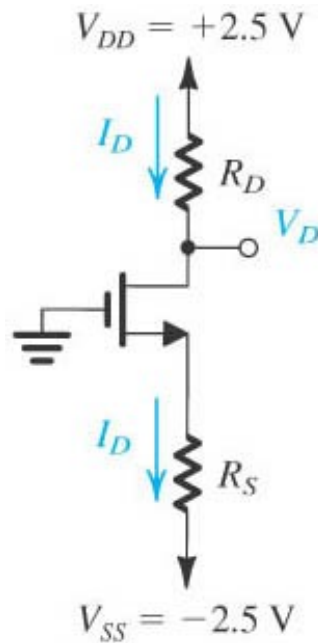
Q-pt: (130 μA, 2.00 V)

fine

Polarizzazione con due alimentazioni

Consideriamo lo schema di polarizzazione che richiede la presenza di due alimentazioni, una positiva, V_{DD} ed una negativa, V_{SS} .
Dall'applicazione dell'equazione di Kirchhoff alla maglia:

$$V_{GS} = V_{SS} - R_S I_D$$



Anche in questo caso, l'espressione è analoga a quella ottenuta per la rete di polarizzazione con 4 Resistenze.

La rete consente quindi di stabilizzare il punto Q.