

Laboratorio di Elettronica

Lezione 7:

Transistore bipolare a giunzione

Valentino Liberali, Alberto Stabile



UNIVERSITÀ DEGLI STUDI DI MILANO
Dipartimento di Fisica "Aldo Pontremoli"

E-mail: valentino.liberali@unimi.it, alberto.stabile@unimi.it

Milano, 18-19 maggio 2022

- 1 Transistore bipolare a giunzione
- 2 Transistore bipolare a giunzione in regione attiva
 - Correnti nel transistore bipolare a giunzione
 - Guadagno di corrente del transistore bipolare a giunzione
- 3 Transistore bipolare a giunzione in saturazione e in interdizione
- 4 Regioni di funzionamento del transistore bipolare a giunzione
- 5 Logica RTL
 - Inverter RTL
 - NOR RTL
 - NAND RTL

Transistore bipolare a giunzione

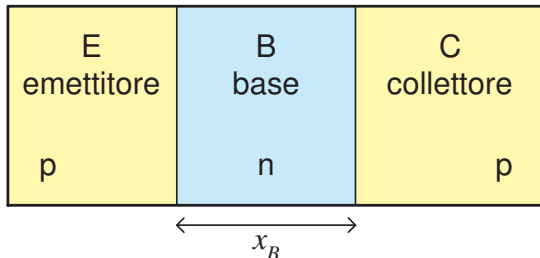
Il transistore bipolare a giunzione o **BJT** (**B**ipolar **J**unction **T**ransistor) è un dispositivo a semiconduttore costituito da *due* giunzioni p-n poste a distanza molto ravvicinata.

Il BJT può essere usato:

- come **amplificatore**: ad esempio, nell'amplificatore operazionale 741 gli elementi attivi sono BJT (l'utilizzo del BJT come amplificatore è uno degli argomenti di Elettronica I);
- come **interruttore** nei circuiti digitali (vedremo qualche esempio).

Struttura del transistor bipolare a giunzione

Il BJT è costituito da **DUE** giunzioni p-n separate da una distanza **minore** della lunghezza di diffusione dei portatori minoritari nella regione intermedia: $x_B < L_p$ per un transistor PNP (oppure $x_B < L_n$ per un transistor NPN)



Può essere di tipo **pn_p** (come nella figura), oppure **np_n**.

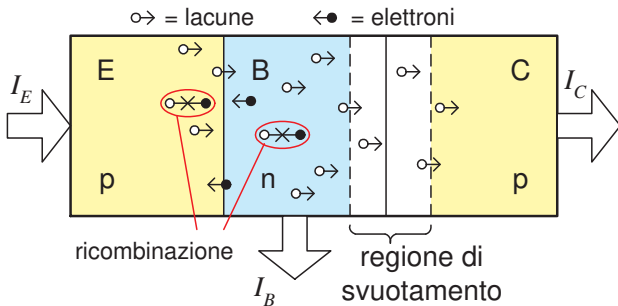
Il BJT ha tre terminali:

- E = emettitore (*emitter*)
- B = base (*base*)
- C = collettore (*collector*)

La base B è sempre drogata in modo opposto a collettore ed emettitore.

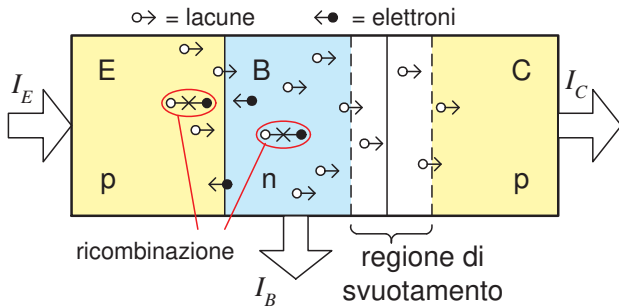
Funzionamento del transistor bipolare a giunzione (1/3)

Quando la **giunzione E-B** è polarizzata **direttamente** e la **giunzione C-B** è polarizzata **inversamente** si ha l'**effetto transistor**.



La giunzione E-B è polarizzata direttamente e c'è iniezione di portatori: in questo caso, le lacune vengono iniettate dall'emettore nella base, e gli elettroni dalla base verso l'emettitore.

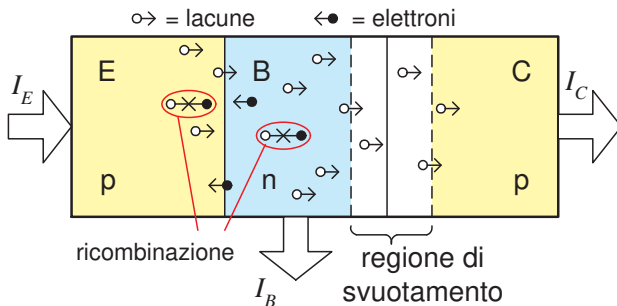
Funzionamento del transistor bipolare a giunzione (2/3)



La base sottile ($x_B \ll L_p$) viene attraversata dalla maggior parte delle lacune iniettate, che muovendosi per diffusione nella base, raggiunge la giunzione di collettore **senza ricombinarsi**.

Nella giunzione C-B, polarizzata inversamente, c'è un campo elettrico. Quando le lacune raggiungono la regione di svuotamento, le lacune vengono accelerate verso C dal campo elettrico (si muovono per deriva).

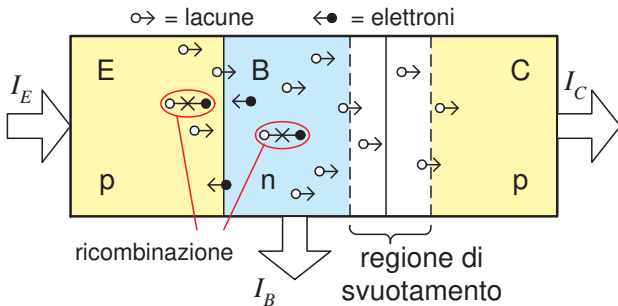
Funzionamento del transistor bipolare a giunzione (3/3)



Un buon transistor deve avere due caratteristiche:

- **EMETTITORE PIÙ DROGATO DELLA BASE**, per avere una corrente dovuta quasi esclusivamente ai portatori iniettati dall'emettitore (lacune per un transistor pnp; elettroni per un transistor npn);
- **BASE SOTTILE rispetto alla lunghezza di diffusione**, per avere poca ricombinazione di portatori nella base.

Correnti nel transistor bipolare a giunzione (1/2)

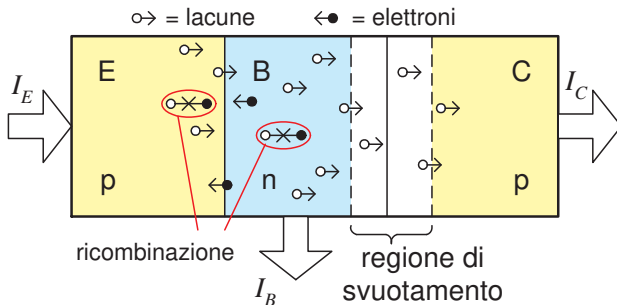


Quando la giunzione E-B è polarizzata direttamente e la giunzione C-B è polarizzata inversamente diciamo che il transistor lavora in **regione attiva**. In questa condizione, **quasi tutti i portatori iniettati dall'emettitore attraversano la base senza ricombinarsi e vengono raccolti dal collettore**. La relazione tra le correnti (con i versi indicati nella figura) è:

$$I_C = \alpha I_E$$

con α quasi uguale a 1 (ma $\alpha < 1$ perché essendo la giunzione E-B polarizzata direttamente abbiamo $I_B > 0$).

Correnti nel transistor bipolare a giunzione (2/2)



La KCL applicata al 'supernodo' costituito da tutto il BJT si può scrivere:

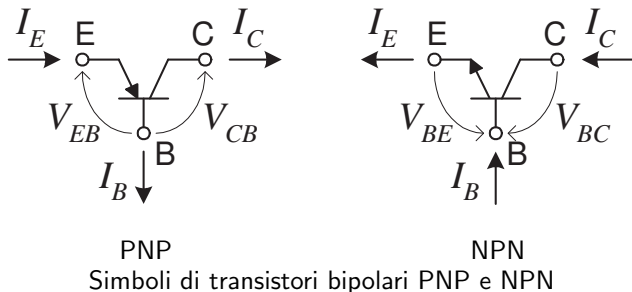
$$I_E = I_C + I_B$$

e siccome $I_C = \alpha I_E$, si ricava

$$I_B = (1 - \alpha) I_E$$

Poiché α è quasi uguale a 1, di solito in regione attiva I_B è trascurabile.

Simbolo del transistor bipolare



Nel simbolo, la freccia indica il terminale di emettitore (E) ed è diretta dalla regione p verso la regione n (come nel diodo). La corrente I_E è concorde con il verso della freccia nel simbolo; i versi delle altre due correnti vengono presi in modo da avere sempre $I_E = I_C + I_B$. In questo modo, in regione attiva tutte le correnti sono positive.

Le tensioni sono indicate come per le giunzioni p-n: il primo terminale è la parte drogata p, il secondo è la parte drogata n.

Transistori bipolari 2N3904 e 2N3906



2N3904: NPN

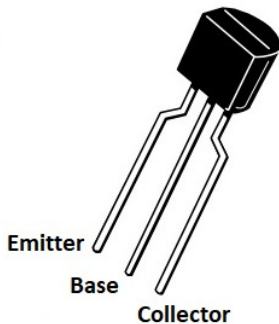
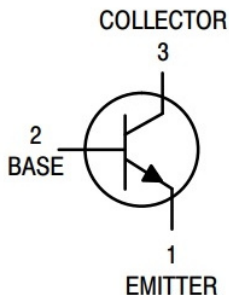


2N3906: PNP

2Nxxxx: "2N" significa 'dispositivo con 2 giunzioni p-n'

Transistore bipolare 2N3904

2N3904 NPN Transistor

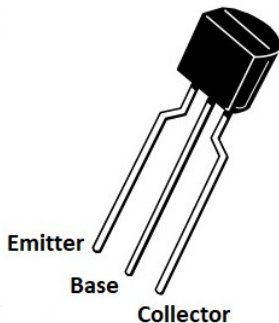
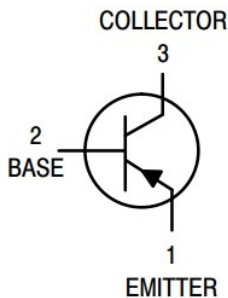


C-E Voltage: 40V
C-B Voltage: 60V
Collector Current: 200mA

AVVERTENZA: In Tinkercad il terminale 1 è il collettore e il terminale 3 è l'emettitore

Transistore bipolare 2N3906

2N3906 PNP Transistor



C-E Voltage: 40V
C-B Voltage: 40V
Collector Current: 200mA

Guadagno di corrente del transistor bipolare a giunzione

Combinando le due equazioni $I_C = \alpha I_E$ e $I_B = (1 - \alpha)I_E$, si ricava la relazione tra le correnti di collettore e di base:

$$I_C = \frac{\alpha}{1 - \alpha} I_B = \beta I_B \quad (1)$$

dove β è il **guadagno di corrente**. Normalmente, $\beta \gg 1$. Ad esempio, se $\alpha = 0.99$, $\beta \approx 100$.

Il transistor bipolare **polarizzato in regione attiva** (giunzione E-B in diretta, giunzione C-B in inversa) si comporta da **amplificatore di corrente** (generatore di corrente controllato in corrente).

- La corrente di ingresso è la corrente di base I_B
- La corrente di uscita è la corrente di collettore I_C
- Il guadagno di corrente è β :

$$\beta = \frac{\alpha}{1 - \alpha} \approx \frac{1}{1 - \alpha} \quad (\text{se } \alpha \approx 1)$$

Funzionamento del BJT in saturazione

Quando **entrambe le giunzioni sono polarizzate direttamente**, i portatori si possono muovere per diffusione attraverso il dispositivo; la corrente può scorrere in qualsiasi verso e dipende solo dalla tensione di alimentazione e dalle resistenze esterne.

Il transistor funziona in **SATURAZIONE**, cioè si comporta come un interruttore acceso e la sua corrente *satura* al valore massimo che la rete elettrica di alimentazione gli fornisce.

Indicando il potenziale di giunzione con V_γ (che per il silicio è ≈ 0.7 V), possiamo scrivere:

$$V_{EB} = V_\gamma; V_{CB} = V_\gamma$$

e quindi la differenza di potenziale tra collettore ed emettitore è:

$$V_{CE} \approx 0$$

(ma non è esattamente zero, perché il potenziale dipende dal drogaggio e l'emettitore è più drogato, quindi la V_γ per la giunzione base-emettitore è leggermente maggiore della V_γ per la giunzione base-collettore).

In prima approssimazione, il BJT in saturazione può essere considerato come un cortocircuito (interruttore acceso) tra C ed E.

Funzionamento del BJT in interdizione

Quando **entrambe le giunzioni sono polarizzate inversamente**, il transistor equivale ad una coppia di diodi in polarizzazione inversa.

Il transistor funziona in **INTERDIZIONE**, cioè si comporta come un interruttore spento e non permette il passaggio di corrente:

$$I_B = I_C = I_E = 0$$

Regioni di funzionamento del BJT

Ci sono quattro modi possibili di funzionamento del BJT.

giunzione E-B	giunzione C-B	funzionamento
inversa	inversa	interdizione (spento, "off")
diretta	inversa	regione attiva (diretta)
diretta	diretta	saturazione
inversa	diretta	regione attiva (inversa)

Nei circuiti logici (digitali), il transistor viene usato come **interruttore**, facendolo lavorare tra **interdizione (spento)** e **saturazione (acceso)**.

In **regione attiva**, invece, il BJT è un **amplificatore di corrente** con guadagno β :

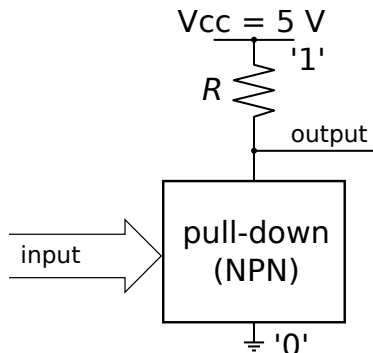
$$I_C = \beta I_B$$

Usando resistenze, è possibile convertire la tensione in corrente e viceversa, ottenendo amplificatori di tensione (ad esempio, l'amplificatore operazionale 741 usa al suo interno qualche decina di BJT in regione attiva, e resistenze).

Di solito, la **regione attiva inversa** non viene usata, perché il BJT funziona peggio. Infatti, nonostante l'apparente simmetria, il transistore non è simmetrico perché il drogaggio *non* è simmetrico. In regione attiva inversa, il collettore viene usato come emettitore e viceversa; ma il collettore, non essendo molto drogato, ha un'efficienza più bassa e il guadagno di corrente è molto minore.

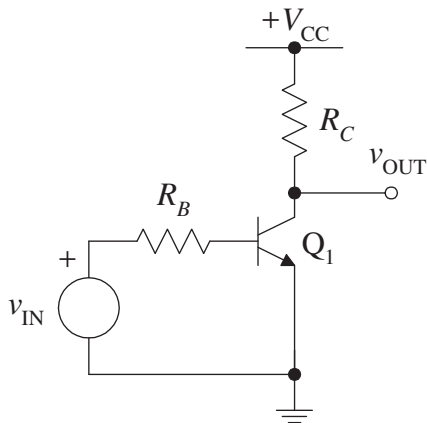
Logica RTL

La logica RTL (Resistor-Transistor Logic), come indica il nome, fa uso di transistori (di solito NPN) e resistenze.



La parte con i transistori NPN ha uno schema che dipende dalla funzione logica che il circuito deve realizzare, e si chiama “pull-down” perché la sua accensione porta a zero l'uscita. La resistenza R costituisce il “pull-up”; quando il pull-down è spento, la corrente nel circuito va a zero e la resistenza porta l'uscita al valore alto ($+V_{CC}$).

Inverter RTL (1/5)



L'inverter (o porta logica "NOT") in tecnologia RTL ha un solo transistor (Q_1).

- Q_1 in saturazione (interruttore acceso): la tensione di uscita scende a ≈ 0
- Q_1 in interdizione (interruttore spento): la tensione di uscita sale a $+V_{CC}$

Livelli logici

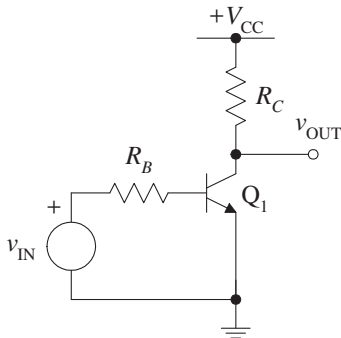
Anzitutto, attribuiamo un valore logico, cioè binario, ai valori di tensione. Ci interessa solo l'informazione a due valori (alto/basso, vero/falso); questi due livelli corrispondono ai valori binari '1' e '0'.

Una grandezza in cui osserviamo solo il livello (alto o basso) codifica un **bit** di informazione.

La parola **bit** è l'abbreviazione di “**binary digit**”, cioè una cifra nel sistema di numerazione in base 2).

In *logica positiva*, la tensione alta corrisponde al bit '1', mentre la tensione bassa corrisponde al bit '0'.

Inverter RTL (2/5)

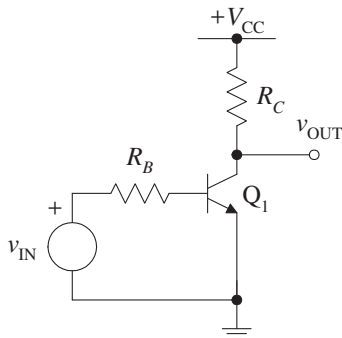


Il transistore Q_1 ha una tensione di accensione $V_\gamma = 0.7 \text{ V}$, e un guadagno di corrente $\beta = 200$ in regione attiva.

La tensione di alimentazione è $V_{CC} = 5 \text{ V}$; le resistenze sono $R_C = 2.2 \text{ k}\Omega$ e $R_B = 22 \text{ k}\Omega$.

Il segnale di ingresso v_{IN} è un'onda quadra a frequenza relativamente bassa (dell'ordine del kilohertz) con valore basso 0 V e valore alto 5 V . Vogliamo studiare il funzionamento del circuito.

Inverter RTL (3/5)



Quando $v_{IN} = 0$ V, nella maglia di ingresso il generatore è spento; quindi nella resistenza R_B non può scorrere corrente.

Siccome la corrente di base è nulla, Q_1 è spento e abbiamo $I_B = I_C = I_E = 0$. Nel circuito non passa corrente; $V_B = 0$ e $V_C = V_{CC} = 5$ V.

Di conseguenza, la tensione di uscita è $v_{OUT} = V_C = 5$ V.

Inverter RTL (4/5)

Consideriamo il caso $v_{IN} = 5\text{ V}$.

Nella maglia di ingresso abbiamo una differenza di tensione maggiore del potenziale di giunzione, e quindi la giunzione B-E di Q_1 è polarizzata direttamente; ne consegue che Q_1 può essere in regione attiva oppure in saturazione.

In ogni caso, al nodo di base la tensione è

$V_B = 0.7\text{ V}$ e la corrente è

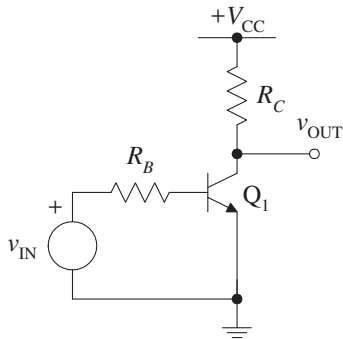
$$I_B = \frac{V_{in} - V_B}{R_B} \approx 0.2\text{ mA}.$$

Se Q_1 fosse in regione attiva, la corrente di collettore dovrebbe essere $I_C = \beta I_B \approx 40\text{ mA}$ e la caduta di tensione sulla resistenza R_C sarebbe $R_C I_C = 88\text{ V}$ (impossibile!).

Quindi Q_1 è in saturazione: $V_{BE} = V_{BC} = V_\gamma = 0.7\text{ V}$.

$V_B = 0.7\text{ V}$; $V_C = 0$; $I_B = \frac{V_{in} - V_B}{R_B} = 0.2\text{ mA}$; $I_C = \frac{V_{CC} - V_C}{R_C} = 2.3\text{ mA}$.

La tensione di uscita è $v_{OUT} = V_C = 0$.



Inverter RTL (5/5)

Se i valori di tensione 0 e 5 V corrispondono rispettivamente ai bit “0” e “1”, possiamo riepilogare il funzionamento del circuito con la tabella (X = bit di ingresso; Y = bit di uscita)

X	v_{IN}	Q_1	v_{OUT}	Y
0	0 V	interdizione (“off”)	5 V	1
1	5 V	saturazione	0 V	0

Leggendo la prima e l’ultima colonna, si ricava che il circuito realizza la funzione di una porta logica **NOT** (inverter):

X	Y
0	1
1	0

“Tabella della verità” della porta logica NOT

Inverter RTL – simulazione con SPICE

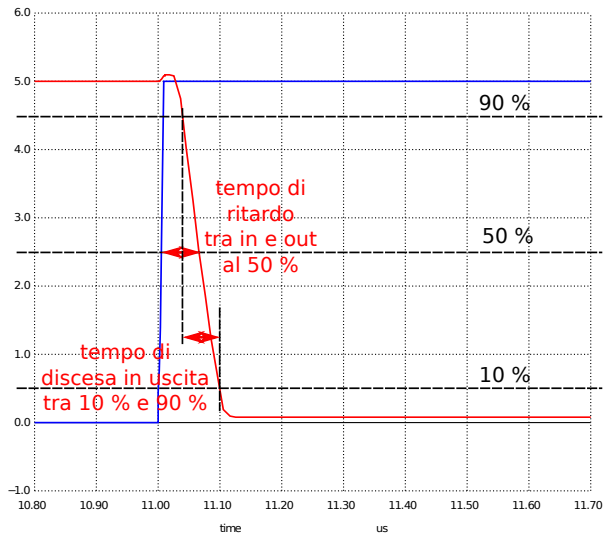
Netlist SPICE:

```
* NOT GATE
*
.INCLUDE BJT.SPI
VCC 1 0 5V
RC 1 2 1.8K
VIN 3 0 PULSE(0 5 1U 10N 10N 4.99U 10U)
RB 3 4 18K
Q1 2 4 0 2N3904
.OP
.TRAN 10N 20U
.PLOT TRAN V(3) V(2)
.END
```

Modello del BJT per SPICE

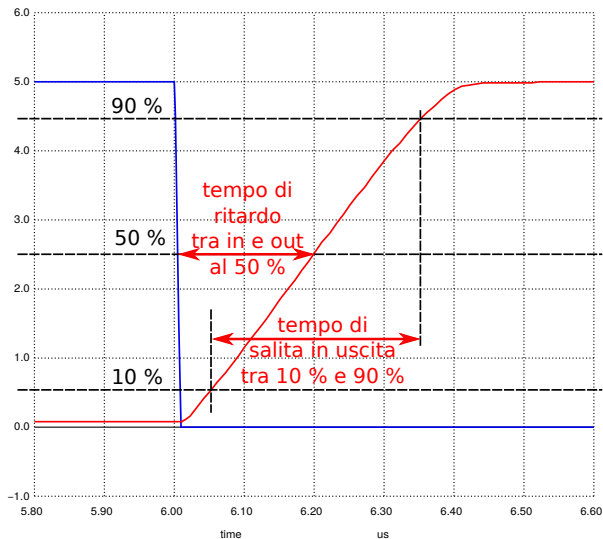
```
.MODEL 2N3904 NPN (  
+ IS=4.9148E-15 BF=191.70 VAF=100 IKF=.28579  
+ ISE=11.882E-15 NE=1.4422  
+ BR=5.6808 VAR=100 IKR=61.753E-3 ISC=71.145E-12  
+ NC=1.6595 NK=.8296 RB=5.8072 RC=.70808  
+ CJE=6.9435E-12 VJE=.61872 MJE=.27802  
+ CJC=3.7572E-12 VJC=1.2237 MJC=.28886  
+ TF=523.89E-12 XTF=83.066 VTF=67.769 ITF=1.8804  
+ TR=10.000E-9 )
```

Inverter RTL – risultati della simulazione con SPICE (1/3)



blu = ingresso (con salita = 10 ns); rosso = uscita

Inverter RTL – risultati della simulazione con SPICE (2/3)



blu = ingresso (con discesa = 10 ns); rosso = uscita

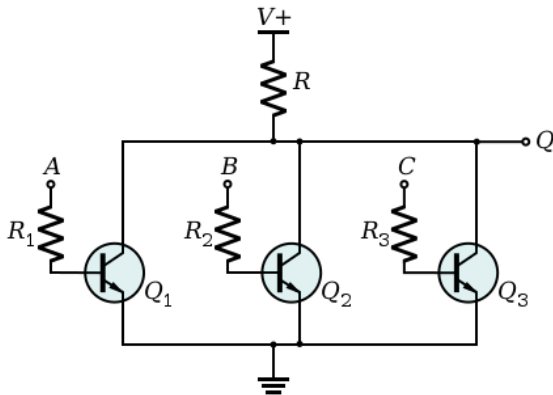
Inverter RTL – risultati della simulazione con SPICE (3/3)

La tensione in uscita a una porta logica NOT in tecnologia RTL ha un andamento non simmetrico:

- in **discesa** viene pilotata dal transistor bipolare Q acceso (PULL-DOWN), che funziona come un generatore di corrente
→ la capacità della giunzione base-collettore viene scaricata a corrente elevata e costante
- in **salita** viene pilotata dalla resistenza R_C (PULL-UP)
→ la capacità della giunzione base-collettore viene caricata con una costante di tempo $R_C \cdot C$ (la salita è più lenta)

NOR RTL

Con questa tecnologia si possono realizzare porte logiche anche più complesse come ad esempio una NOR.



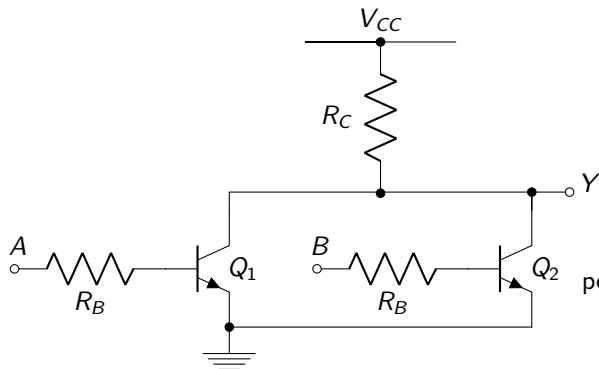
Porta logica NOR in tecnologia RTL
(da Wikipedia)

A	B	C	Q
0	0	0	1
0	0	1	0
0	1	0	0
0	1	1	0
1	0	0	0
1	0	1	0
1	1	0	0
1	1	1	0

“Tabella della verità” della
porta logica NOR

L'uscita è al livello logico alto solo se tutti gli ingressi sono bassi.

NOR RTL



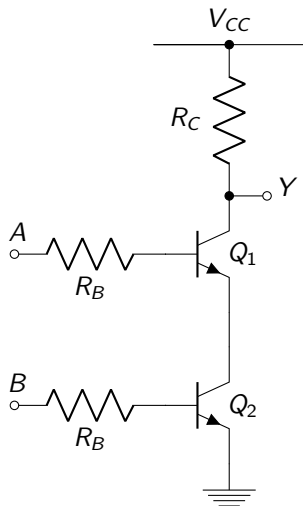
A	B	Y
0	0	1
0	1	0
1	0	0
1	1	0

“Tabella della verità” della
porta logica NOR a 2 ingressi

Se tutti gli ingressi sono bassi, tutti i transistori sono spenti, non passa corrente, e l'uscita è alla tensione alta.

Se almeno un ingresso è alto, allora c'è almeno un transistor acceso, passa corrente, e l'uscita si porta ad una tensione bassa (prossima a zero).

NAND RTL



A	B	Y
0	0	1
0	1	1
1	0	1
1	1	0

“Tabella della verità” della
porta logica NAND a 2 ingressi

Se tutti gli ingressi sono alti, tutti i transistori sono accesi, passa corrente, e l'uscita si porta ad una tensione bassa (prossima a zero).

Se almeno un ingresso è basso, il PULL-DOWN è spento e l'uscita si porta a V_{CC} .