

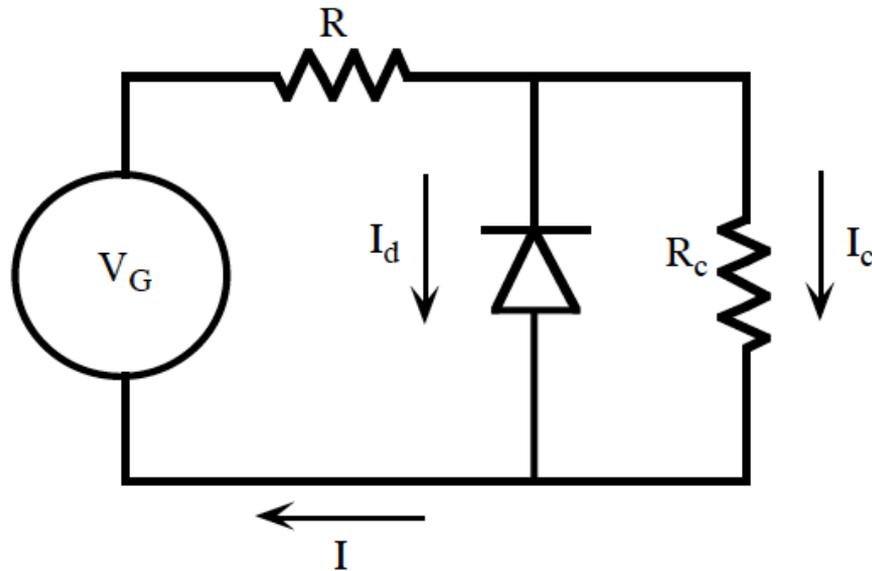
Brevissima introduzione all'elettronica analogica (transistor, etc. ...)

Edoardo Milotti

Corso di Metodi di Trattamento dei Segnali

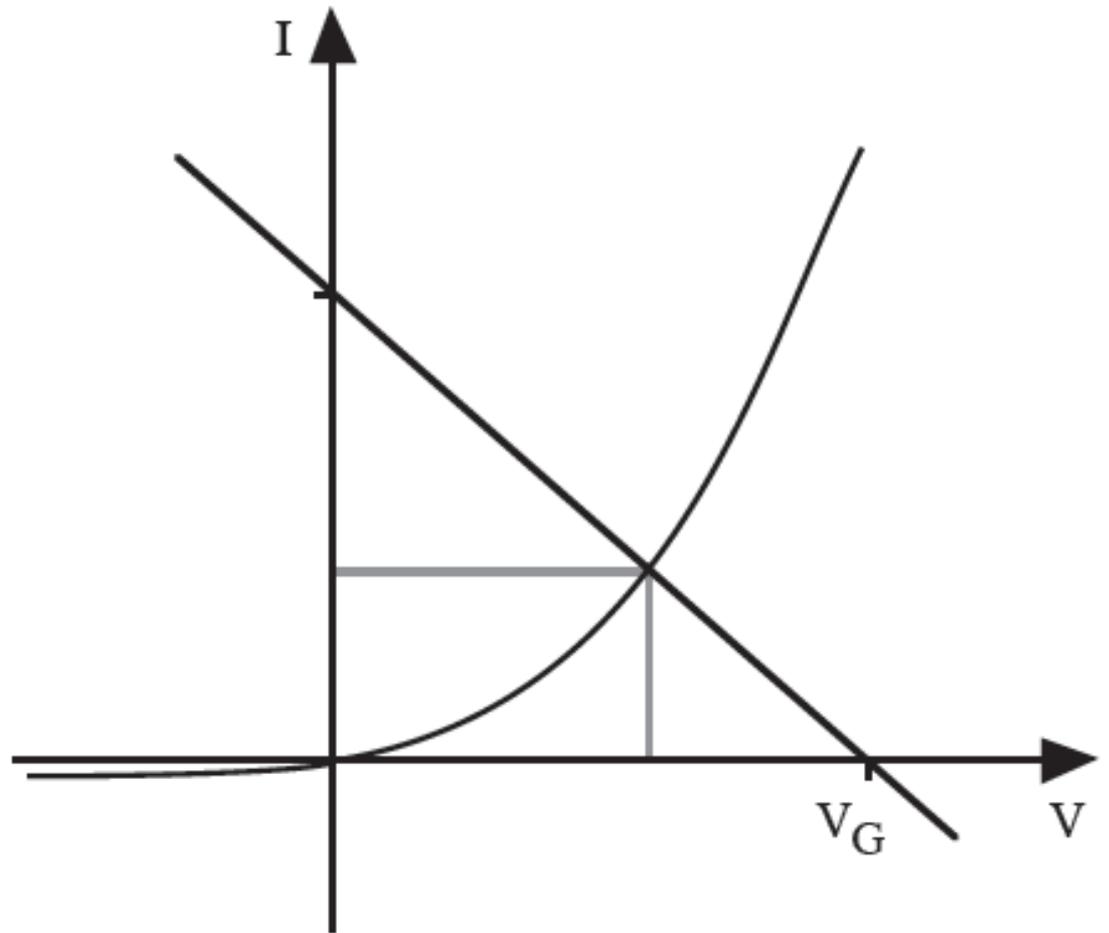
A.A. 2012-13

Soluzione di problemi non lineari in elettronica: il metodo della retta di carico



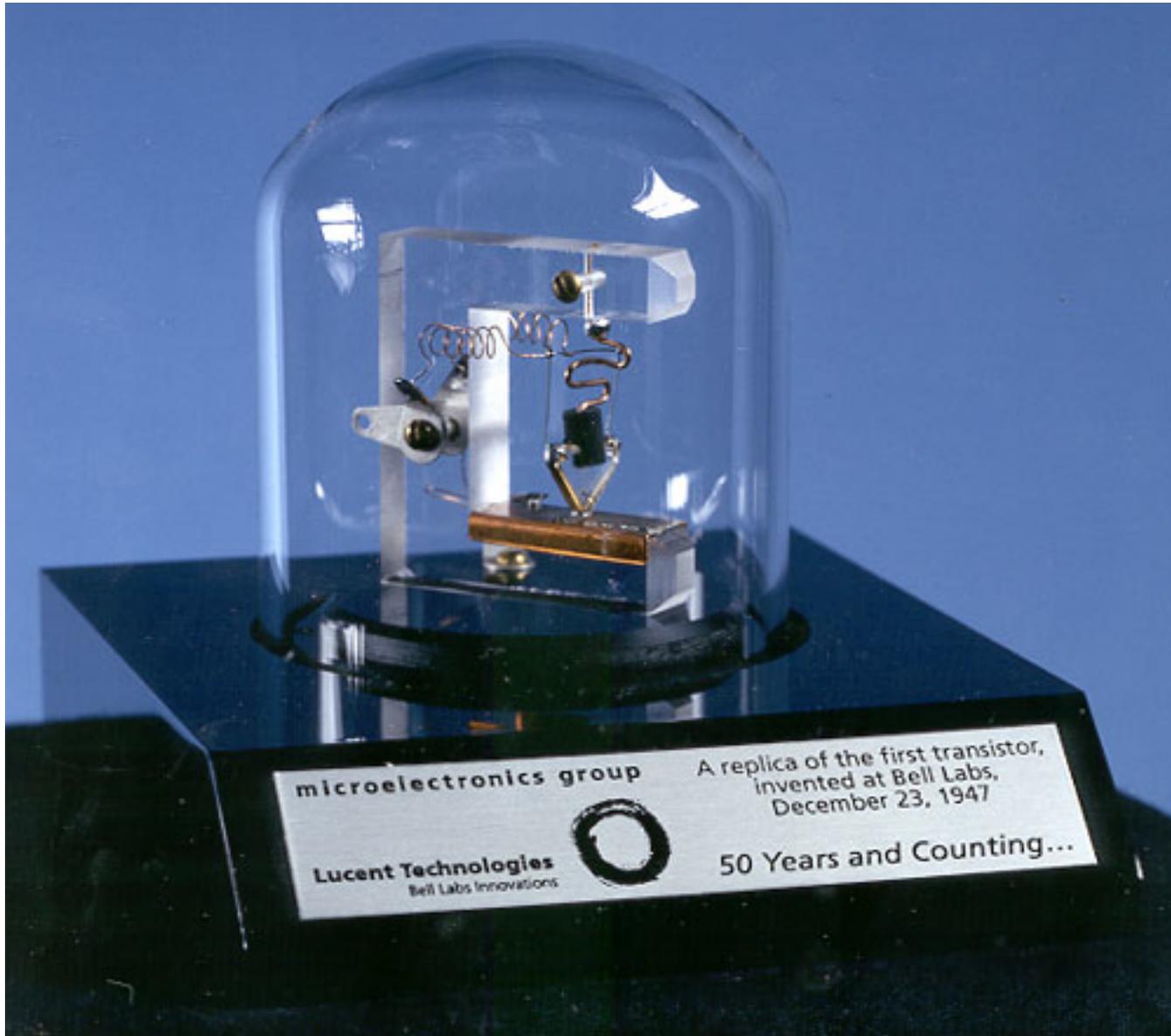
$$\left\{ \begin{array}{l} V_G = IR + V_d \\ V_d = I_c R_c \\ I = I_d + I_c \\ V_d = V_d(I_d) \end{array} \right.$$

$$\left\{ \begin{array}{l} V_G = I_d R + V_d \left(1 + \frac{R}{R_c} \right) \\ V_d = V_d(I_d) \end{array} \right.$$

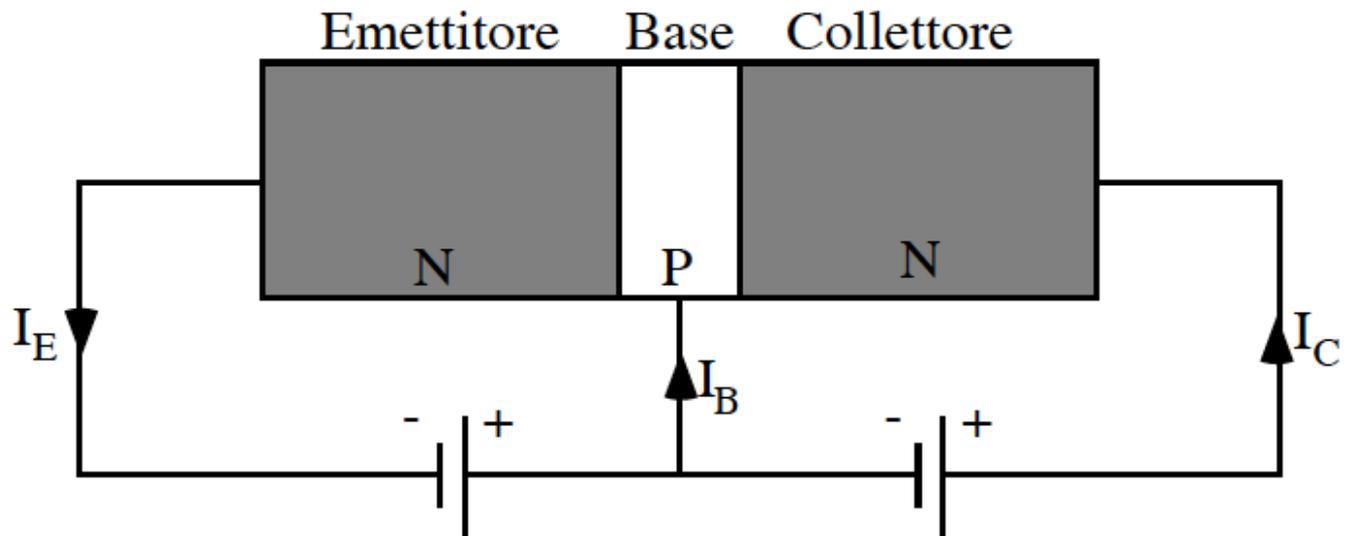




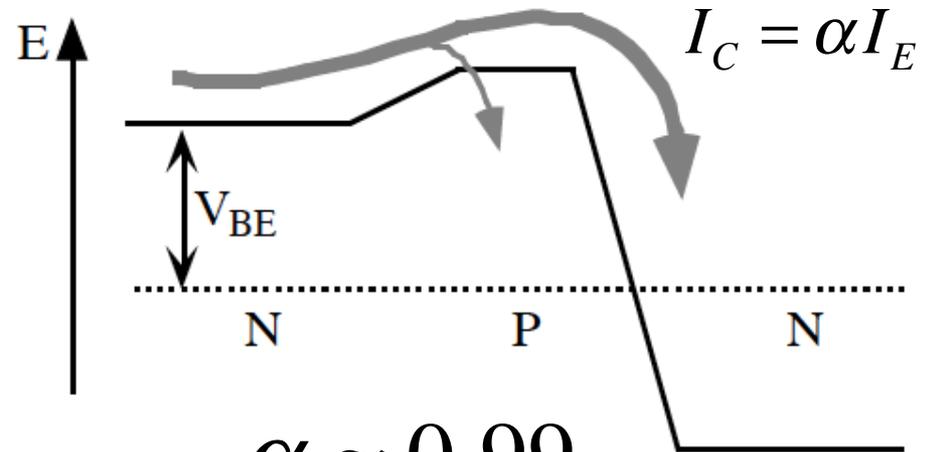
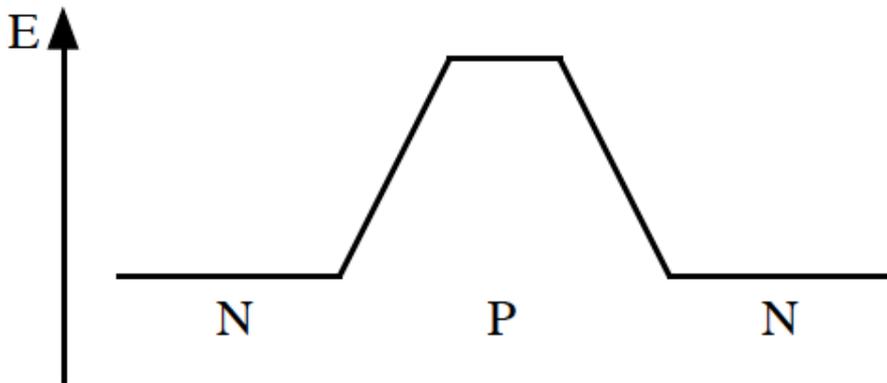
Gli inventori del transistor bipolare (premi Nobel nel 1956): da sinistra; e John Bardeen, William P. Shockley, e Walter H. Brattain (il primo ha vinto un secondo premio Nobel nel 1972 insieme a Cooper e Schrieffer per la teoria della superconduttività).



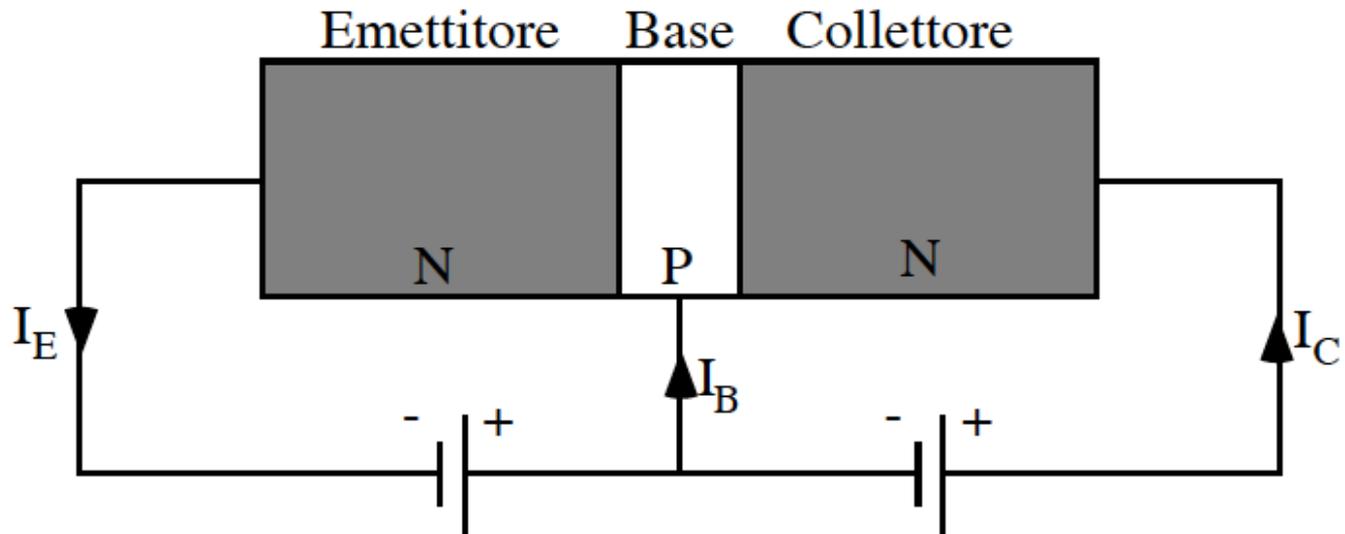
Edoardo Milotti - Breve introduzione all'elettronica



Buona parte della corrente di emettitore va nel collettore

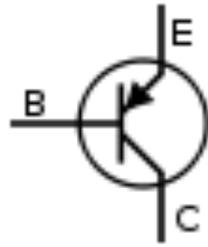


$$\alpha \approx 0.99$$

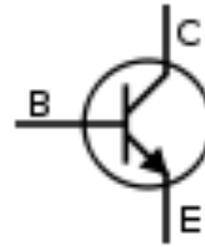


$$I_E = I_B + I_C \quad \text{e inoltre} \quad I_C = \alpha I_E$$

$$\Rightarrow I_E = \frac{1}{1-\alpha} I_B \quad \text{e} \quad I_C = \frac{\alpha}{1-\alpha} I_B = \beta I_B$$



transistor bipolare
PNP

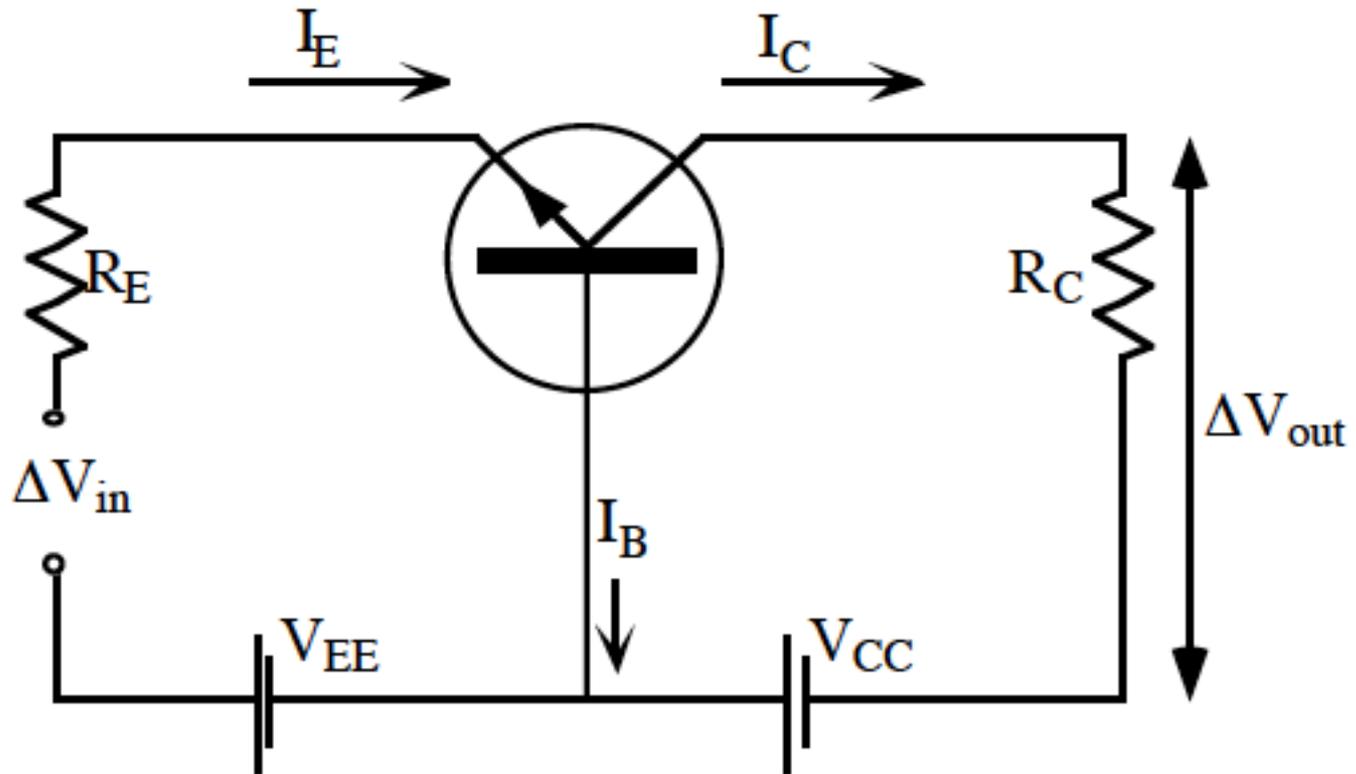


transistor bipolare
NPN

Le regole basilari del funzionamento dei transistor *npn* sono le seguenti:

1. Il collettore deve essere "più positivo" dell'emettitore
2. Le giunzioni base-emettitore e base collettore sono due diodi (e quindi $V_B \approx V_E + 0.6$ Volt)
3. I_B , I_C , I_E hanno dei valori massimi che non possono superare, pena la distruzione del transistor
4.
$$I_C = \frac{\alpha}{1 - \alpha} I_B = \beta I_B$$

Configurazione a base comune

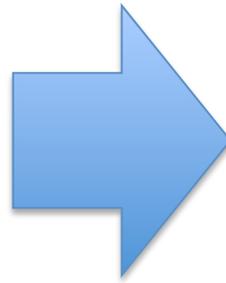


$$V_{in} + V_{EE} = R_E I_E + V_{BE}$$

$$V_{out} = R_C I_C$$

$$R_C I_C - V_{BC} = V_{CC}$$

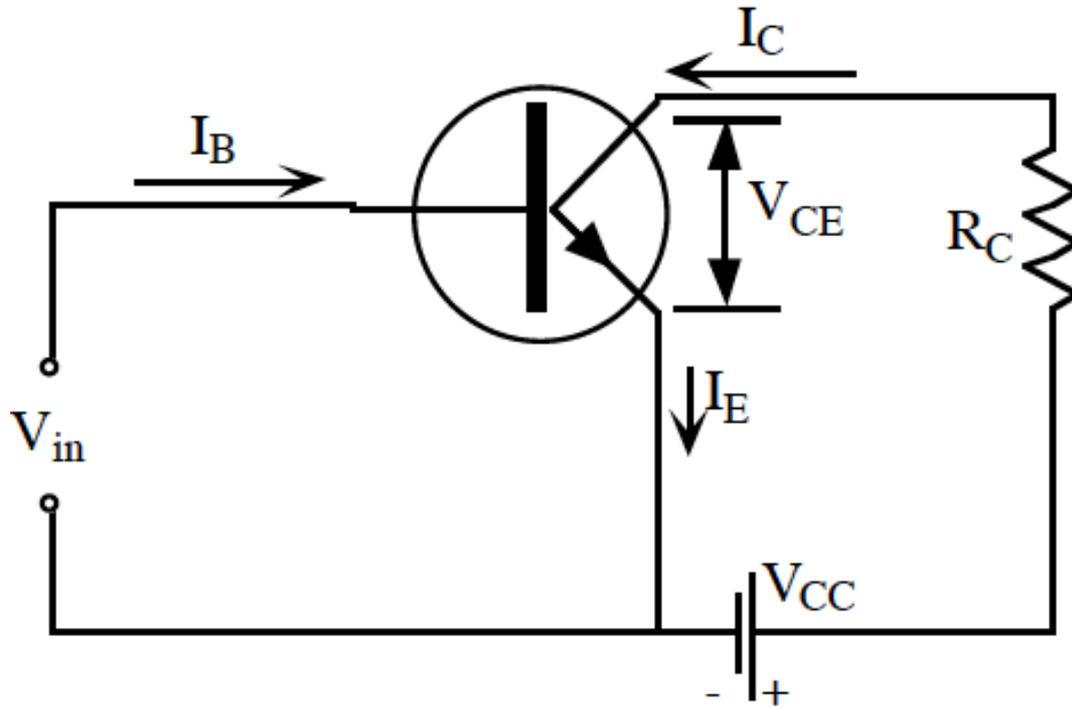
$$I_C = I_E - I_B = \alpha I_E$$



$$\Delta I_C = \alpha \Delta I_E = \alpha \frac{\Delta V_{in}}{R_E}$$

$$\Delta V_{out} = R_C \Delta I_C = \alpha \frac{R_C}{R_E} \Delta V_{in}$$

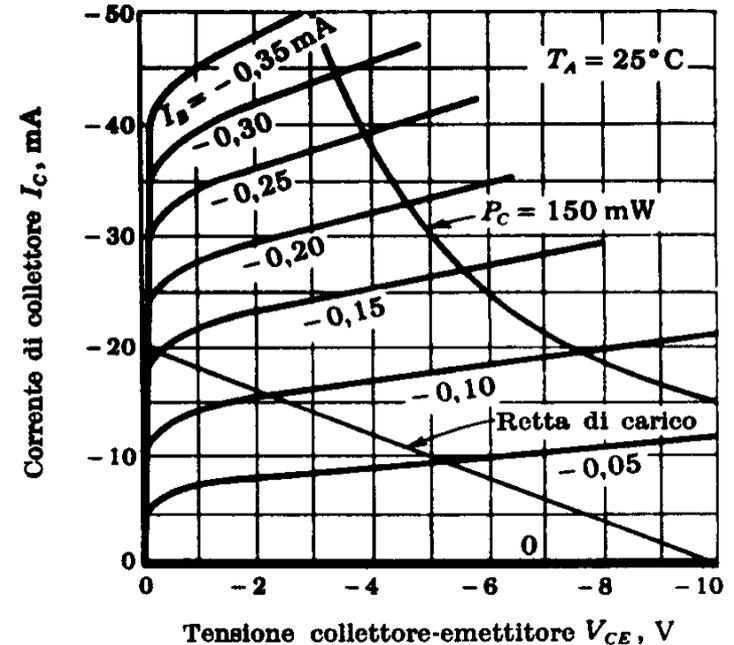
Configurazione a emettitore comune e curve caratteristiche



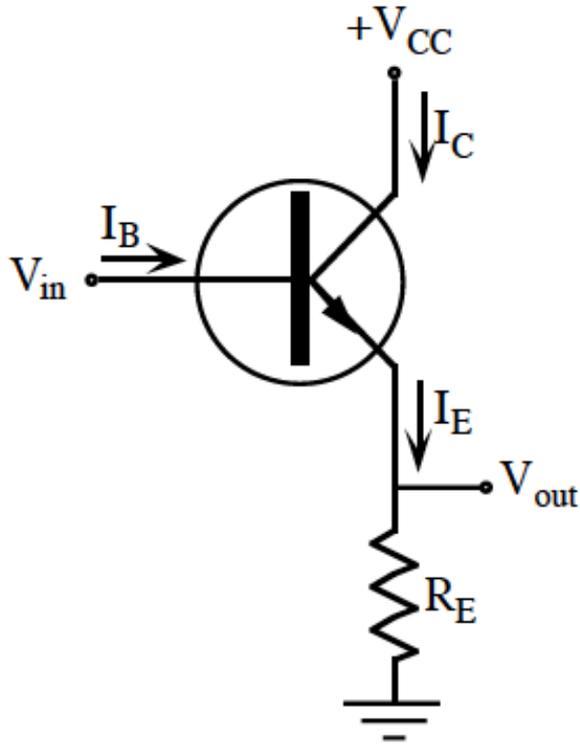
$$V_{CC} = V_{CE} + I_C R_C$$

$$I_C = I_C(I_B, V_{CE})$$

soluzione con il metodo della
retta di carico



Emitter follower



$$V_{in} - V_{out} = V_{BE} \approx 0.6V$$

$$I_E = I_B + I_C = (1 + \beta) I_B$$



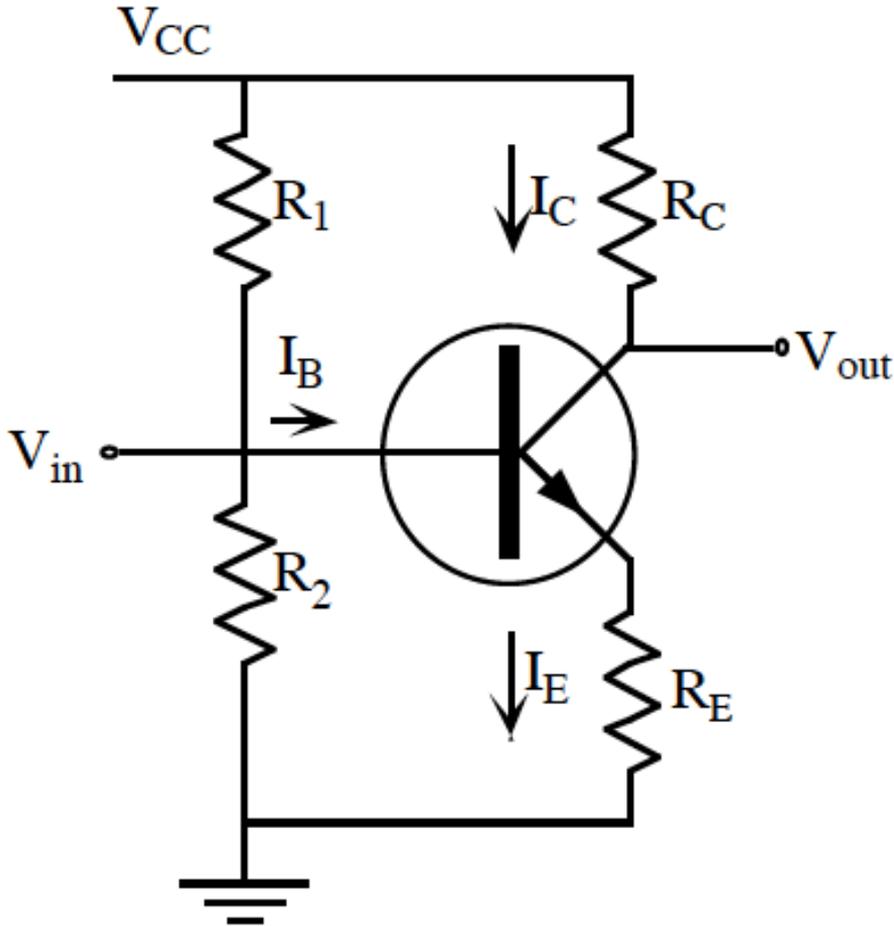
$$\Delta V_{in} \approx \Delta V_{out}$$

$$\Delta I_E = (1 + \beta) \Delta I_B$$

$$Z_{in} = \frac{\Delta V_{in}}{\Delta I_B} \approx (1 + \beta) \frac{\Delta V_{out}}{\Delta I_E} = (1 + \beta) Z_{out}$$

 applicazioni: adattamento di impedenza, aumento della potenza del segnale

Amplificatore ad emettitore comune



amplificatore invertente!

$$V_{out} = V_C = V_{CC} - I_C R_C$$

$$\Delta V_{in} = \Delta V_B \approx \Delta V_E$$

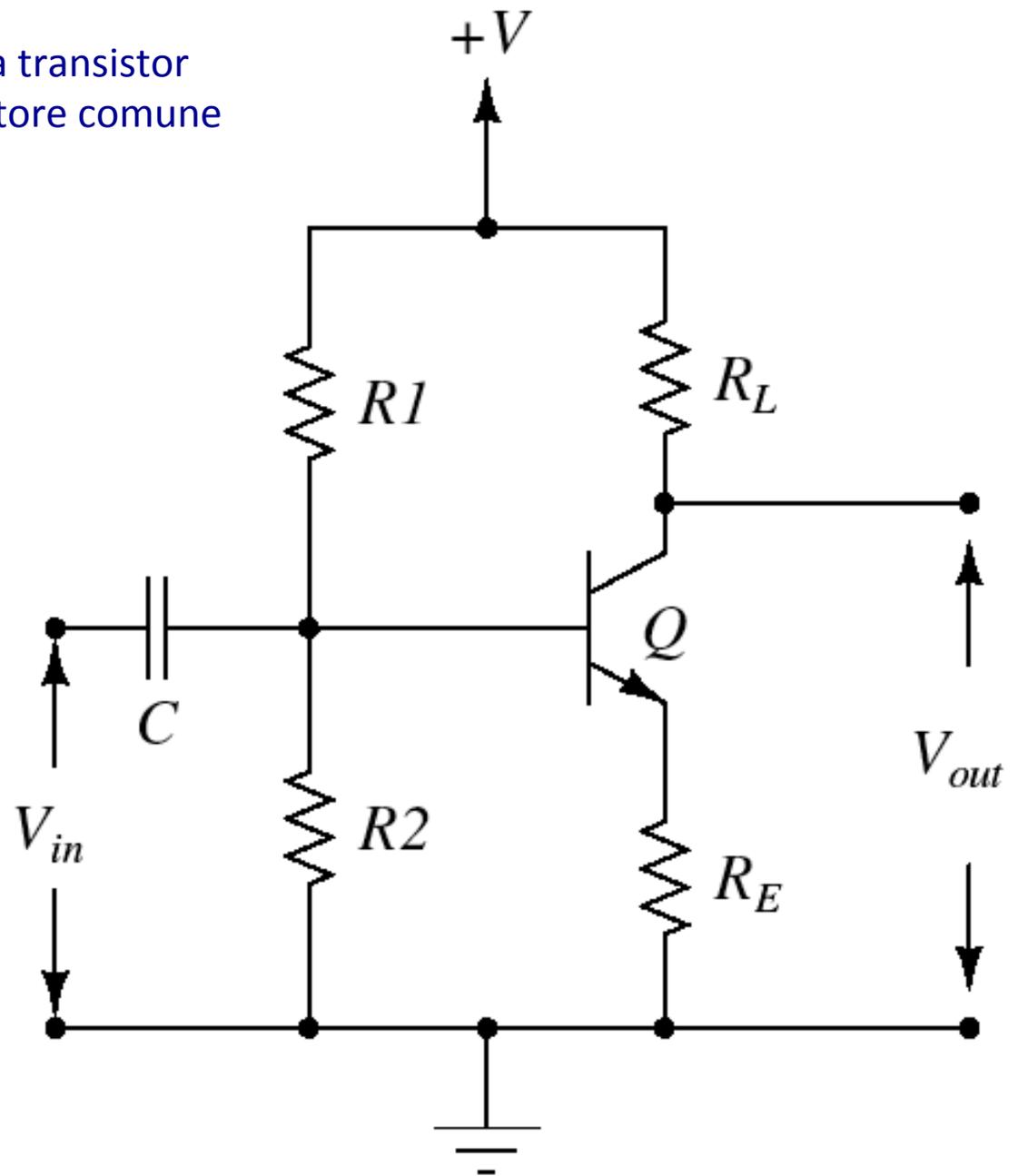
$$\Delta V_E = R_E \Delta I_E \approx R_E \Delta I_C$$

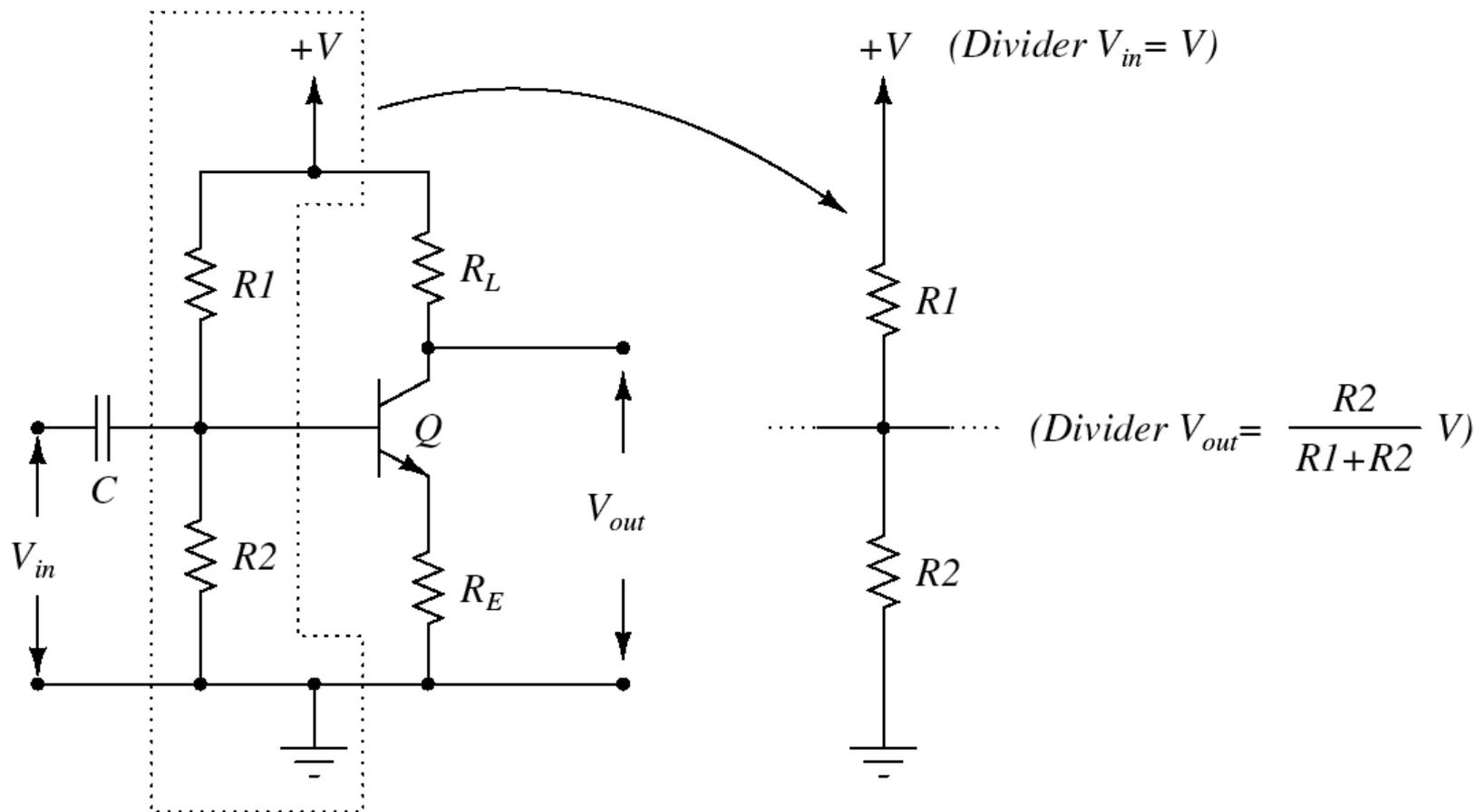


$$\Delta V_{out} = \Delta V_C = -R_C \Delta I_C$$

$$G = \frac{\Delta V_{out}}{\Delta V_{in}} \approx -\frac{R_C}{R_E}$$

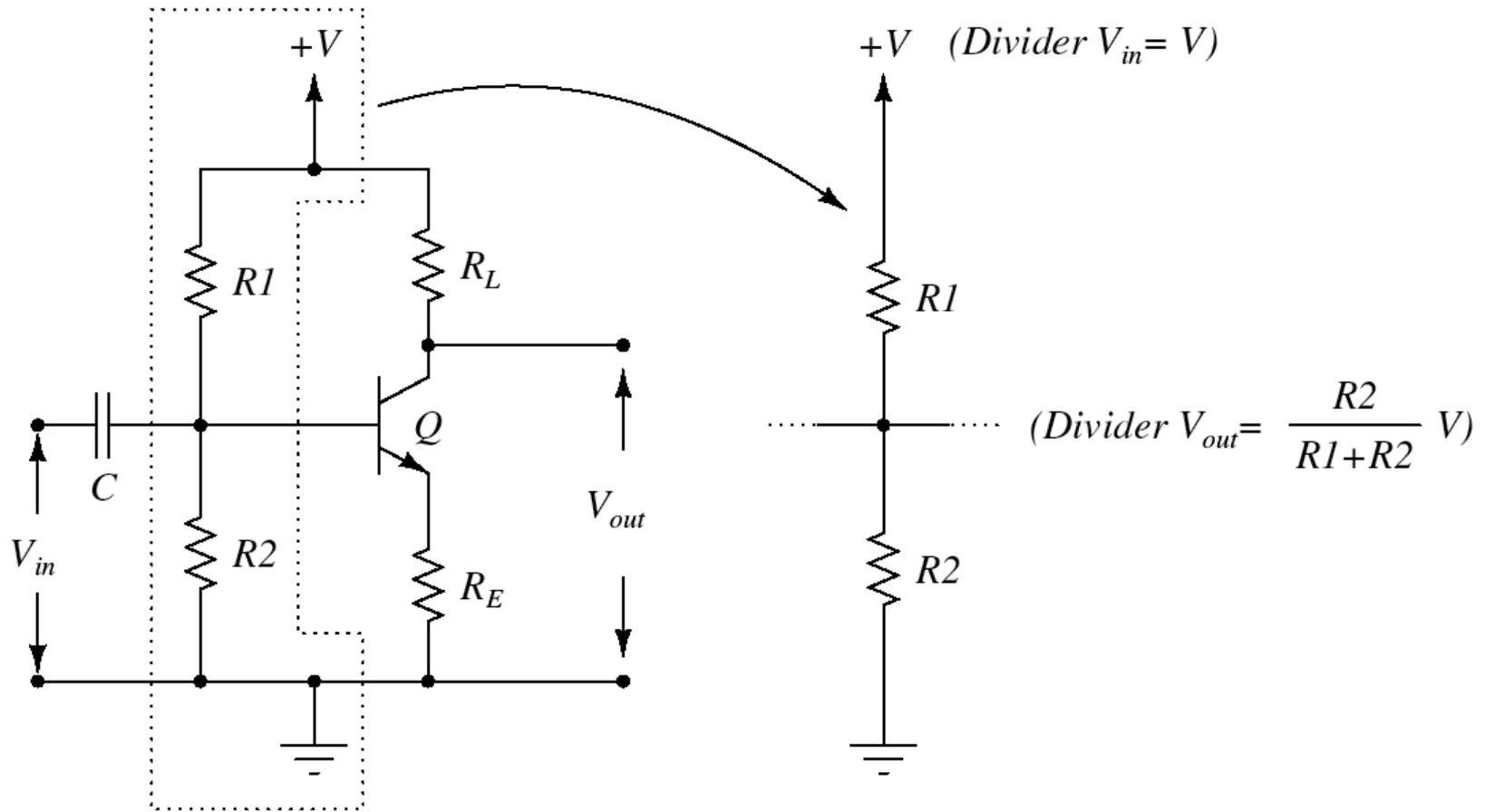
Progetto di un amplificatore a transistor
nella configurazione a emettitore comune





Nel circuito possiamo isolare una parte (segnata nel tratteggio) che rappresenta un partitore che costituisce la rete di polarizzazione della base: la scelta delle resistenze del partitore seleziona il punto di lavoro dell'amplificatore.

In modo del tutto analogo le resistenze R_L , R_E e il transistor costituiscono una specie di partitore con una resistenza variabile (il transistor): la conseguenza è che la tensione di uscita può variare tra 0V e la tensione di alimentazione $+V$.



$$\Delta V_{in} = \Delta V_B \approx \Delta V_E = R_E \Delta I_E \approx R_E \Delta I_C$$

$$\Delta V_{out} = \Delta V_C = -R_L \Delta I_C$$

$$G = \frac{\Delta V_{out}}{\Delta V_{in}} \approx -\left(\frac{R_L}{R_E}\right)$$

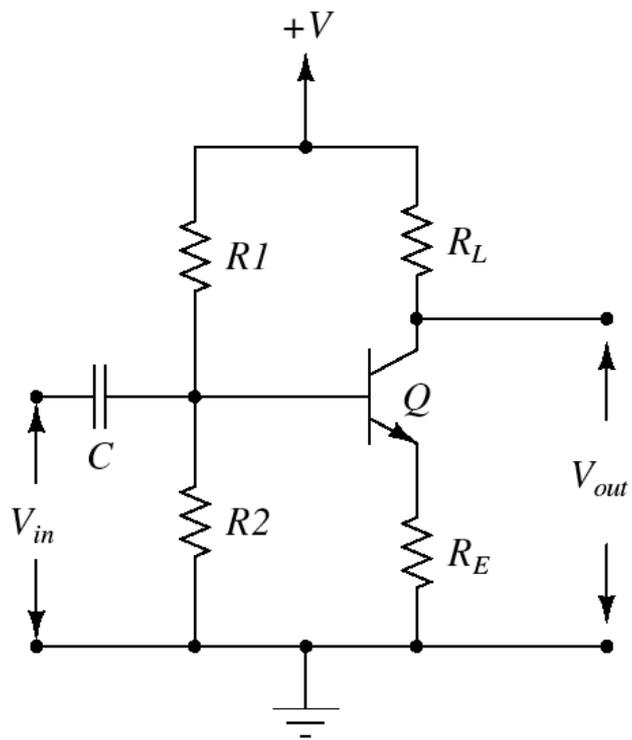
Definizione dei parametri del circuito

- la prima scelta l'abbiamo già fatta: abbiamo preso una configurazione di amplificatore a emettitore comune.
- a questo punto scegliamo la tensione di alimentazione: come si è visto questo determina l'escursione massima in tensione del segnale amplificato. Questa scelta dipende da molti fattori, tra cui il tipo di alimentatore disponibile e le caratteristiche dei transistor che abbiamo a disposizione: in pratica si tratta sempre di una tensione dell'ordine della decina di volt. Noi scegliamo una tensione di 10V che è compatibile con la tensione massima emettitore-collettore di questo transistor (40V) ed è facile da ottenere con gli alimentatori normalmente disponibili in laboratorio.

- **scegliamo ora la corrente quiescente della maglia di uscita.** Questa corrente viene determinata a partire dalle caratteristiche del transistor. In questo caso la corrente di collettore massima accettabile è di 200 mA, mentre la dissipazione termica in condizioni ordinarie è di 0.6 W circa. Così con una tensione (massima) emettitore-collettore di 10V si ottiene la dissipazione (massima) di 0.6W con una corrente di 60 mA.

Questo sta all'interno del limite di 200 mA, ma è una corrente piuttosto alta se prendiamo delle resistenze di polarizzazione dell'ordine del kOhm (non possiamo prendere delle resistenze troppo piccole se non vogliamo che un carico tra quelli ordinariamente disponibili modifichi eccessivamente la rete di polarizzazione del transistor). Infatti la dissipazione di potenza su 1 kOhm diventa in questo caso 3.6 W, una potenza piuttosto elevata, che comporta l'utilizzo di componenti meccanicamente piuttosto grandi.

Se vogliamo utilizzare le normali resistenze da 1/4 W o da 1/2 W, dobbiamo abbassare la corrente: prendiamo un valore di un fattore 15 più piccolo, $I_c = 4$ mA. Con questa corrente il "partitore" di uscita si comporta in modo che la resistenza equivalente totale abbia $10V/4mA = 2.5$ kOhm. La tensione quiescente di uscita viene posta allora a $V/2$ (=5V) se si prende $R_L = 2.5$ kOhm /2 = 1.25 kOhm.



È buona pratica prendere la resistenza di emettitore grande almeno $R_L/10$: qui noi prendiamo $R_E = R_L/3$, vale a dire $R_E \approx 417 \text{ Ohm}$. Questo significa che l'amplificatore ha guadagno $G=3$ e che la tensione di emettitore è

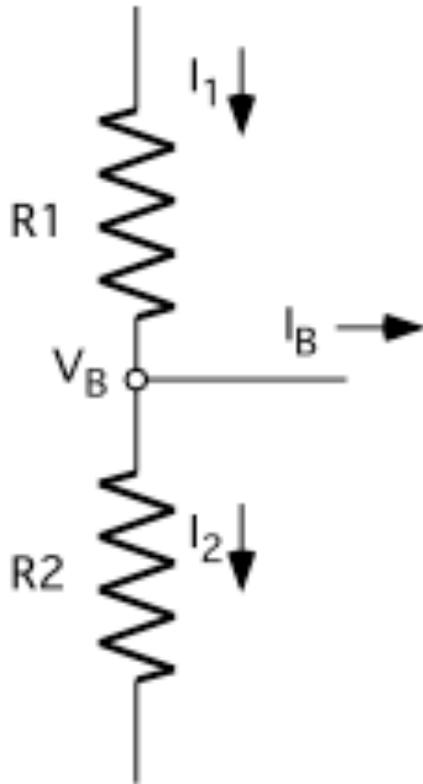
$$V_E \approx 417\Omega \cdot 4\text{mA} \approx 1.7\text{V}$$

e la tensione di base è circa 0.6V più alta, vale a dire circa $V_B \approx 2.3\text{V}$.

- per completare la scelta delle resistenze dobbiamo determinare i valori delle resistenze R1 e R2: per farlo in modo corretto dovremmo conoscere l'esatto valore di *beta* del nostro transistor, ma dal datasheet si trova che esso varia tipicamente tra 70 e 300, e per questo noi prendiamo il valore *beta* = 100.

Questo vuol dire che la corrente di base è 100 volte più piccola della corrente di collettore, e quindi vale 40μA.

La figura mostra come si divide la corrente nel partitore di ingresso; devono valere quindi le seguenti equazioni:



$$I_1 = I_2 + I_B$$

$$I_1 R_1 = V - V_B$$

$$I_2 R_2 = V_B$$



$$I_1 = \frac{V_B}{R_2} + I_B$$

$$I_1 = \frac{V - V_B}{R_1}$$

$$I_2 = \frac{V_B}{R_2}$$

Il sistema non si può risolvere per trovare le correnti e le resistenze a meno che non si imponga una condizione aggiuntiva. Adesso però si può notare che la corrente nella resistenza R_2 deve essere molto maggiore della corrente di base, in modo che un cambiamento della corrente di base non influenzi il comportamento della rete: prendiamo dunque $I_2 = 10 I_B$, allora

$$I_1 = \frac{V_B}{R_2} + I_B$$

$$I_1 = \frac{V - V_B}{R_1}$$

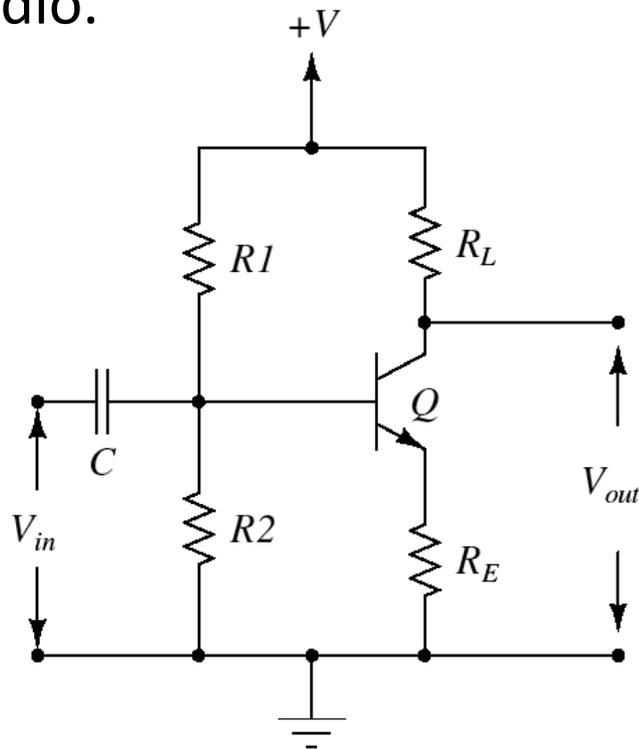
$$I_2 = \frac{V_B}{R_2}$$

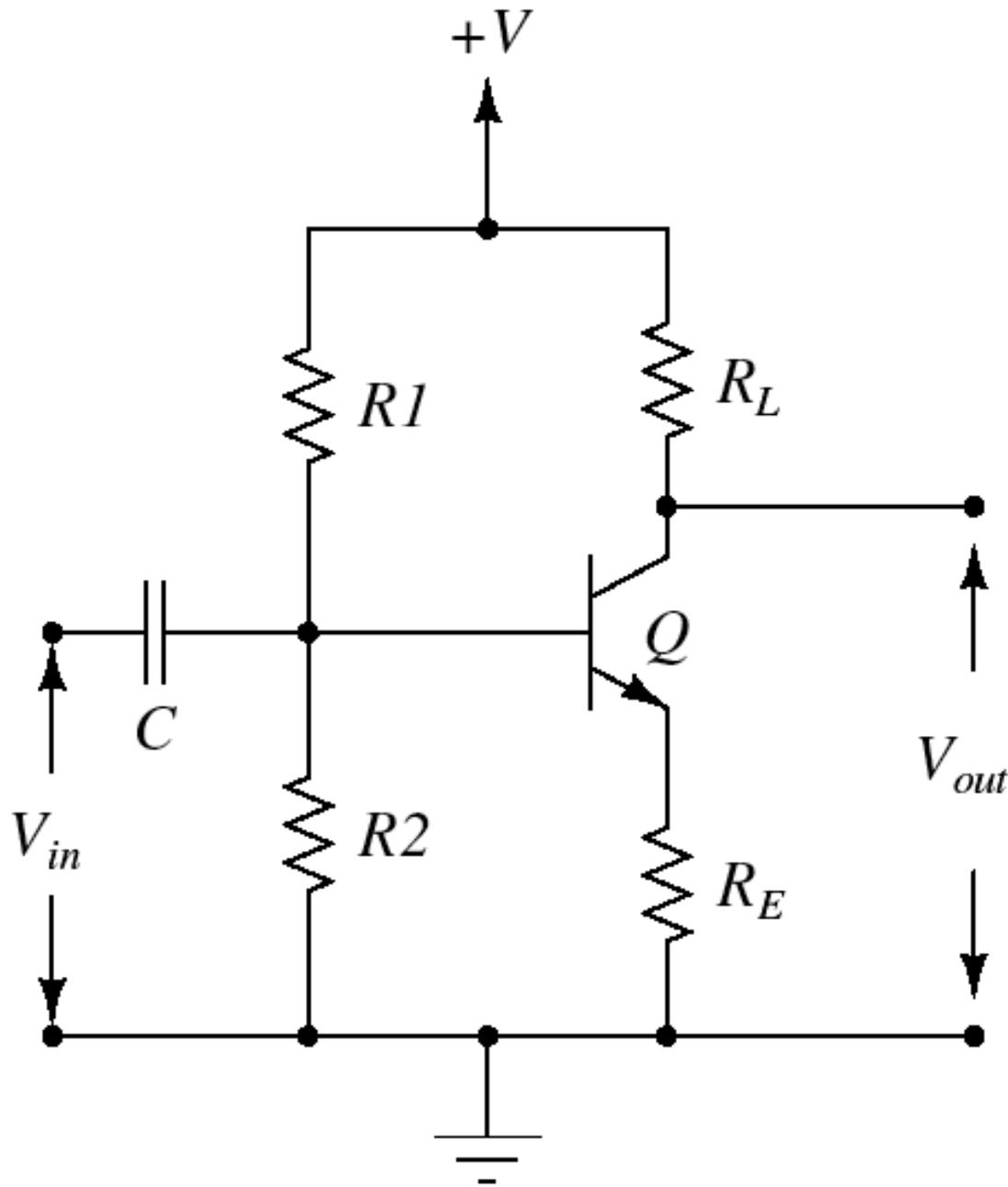


$$\frac{V_B}{R_2} \approx \frac{2.3V}{R_2} \approx 0.4mA; \quad R_2 \approx 5.75k\Omega$$

$$I_1 \approx 0.44mA \approx \frac{V - V_B}{R_1} = \frac{10V - 2.3V}{R_1} = \frac{7.7V}{R_1}; \quad R_1 \approx 17.5k\Omega$$

- la scelta del condensatore di disaccoppiamento dipende dalla resistenza R_2 (che mette a terra il segnale in ingresso): insieme il condensatore e R_2 costituiscono un filtro RC passa alto con una frequenza di taglio $1/R_2C$; ad esempio, se si prende un comune condensatore (non polarizzato) da $4.7 \mu\text{F}$ si ottiene una frequenza di taglio di 12 Hz ; questa frequenza è adeguata per un amplificatore audio.





$$R_1 = 18 \text{ k}\Omega$$

$$R_2 = 6 \text{ k}\Omega$$

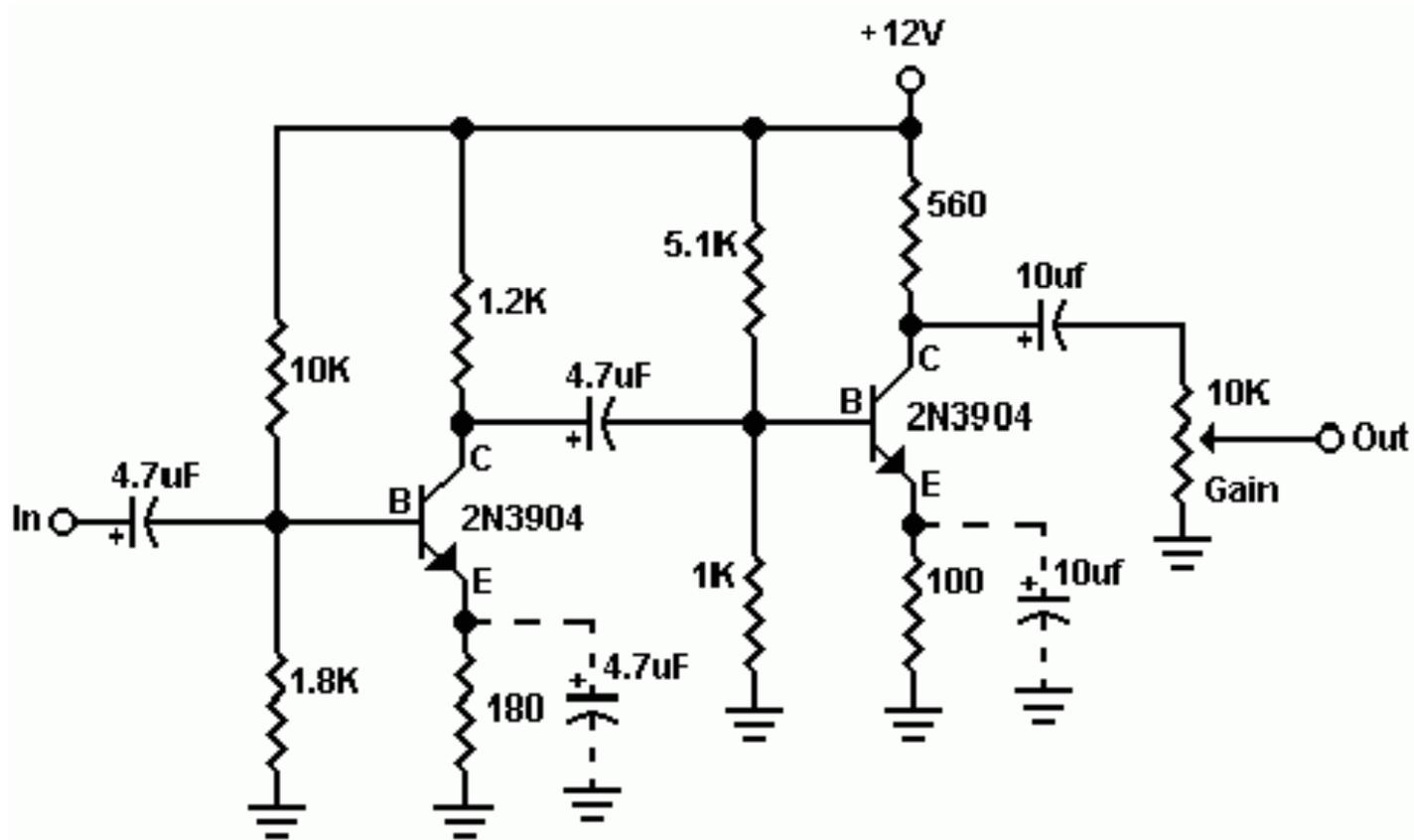
$$R_L = 1.25 \text{ k}\Omega$$

$$R_E = 420 \text{ }\Omega$$

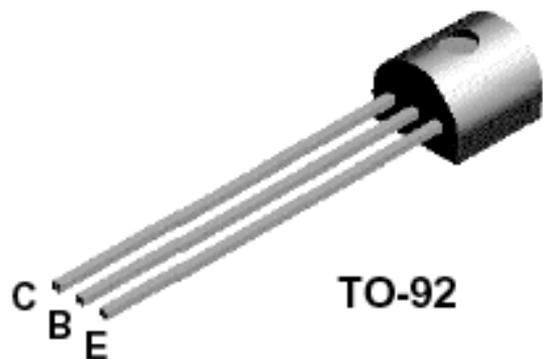
$$C = 4.7 \text{ }\mu\text{F}$$

$$Q = 2\text{N}3904$$

L'amplificazione non è elevata e potrebbe essere necessario aggiungere degli ulteriori stadi di amplificazione, come nella figura seguente, simile al circuito che abbiamo discusso, che mostra due emitter follower in cascata

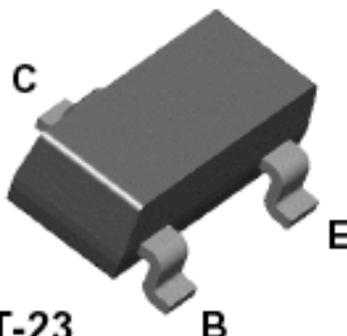


2N3904



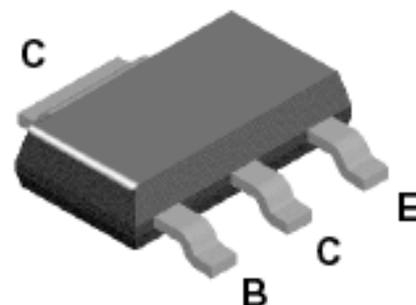
TO-92

MMBT3904



SOT-23
Mark: 1A

PZT3904

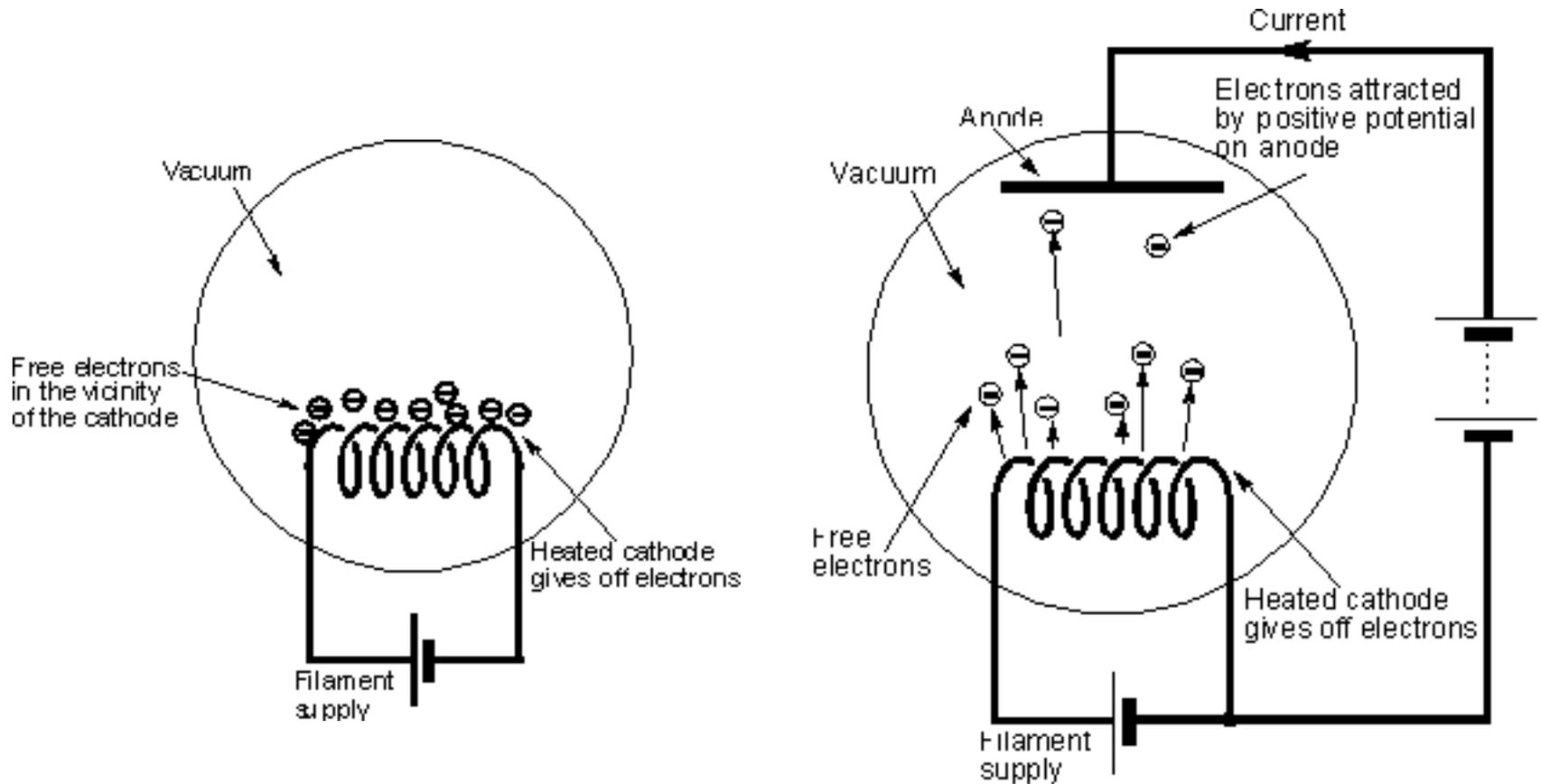


SOT-223

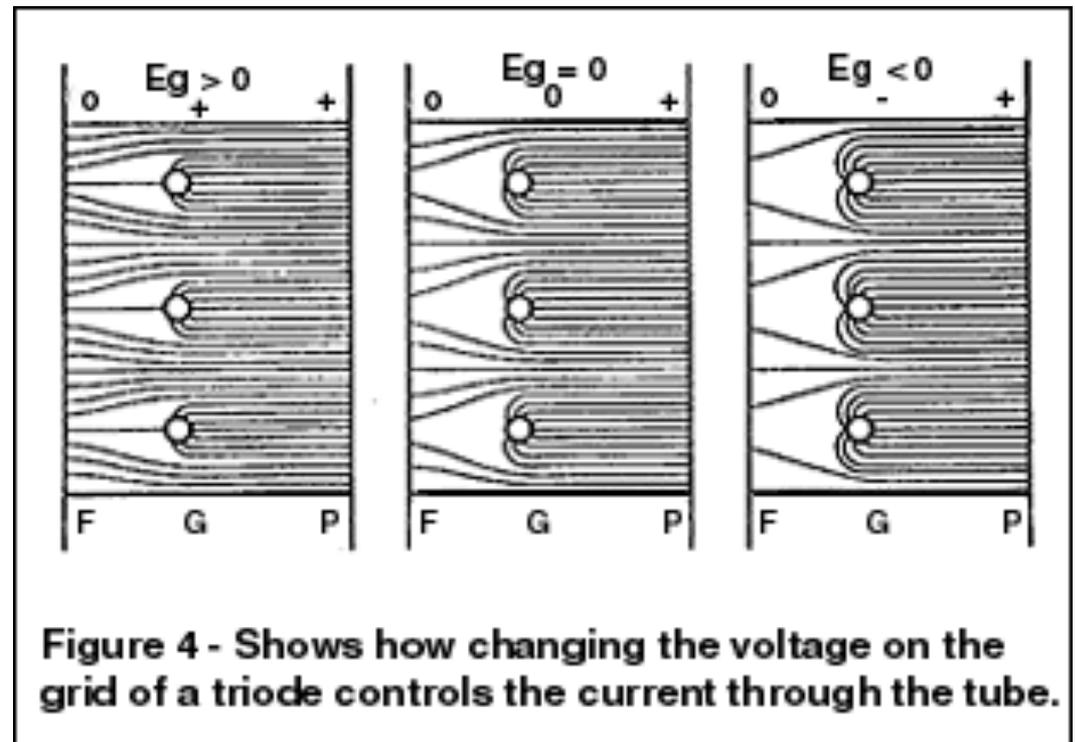
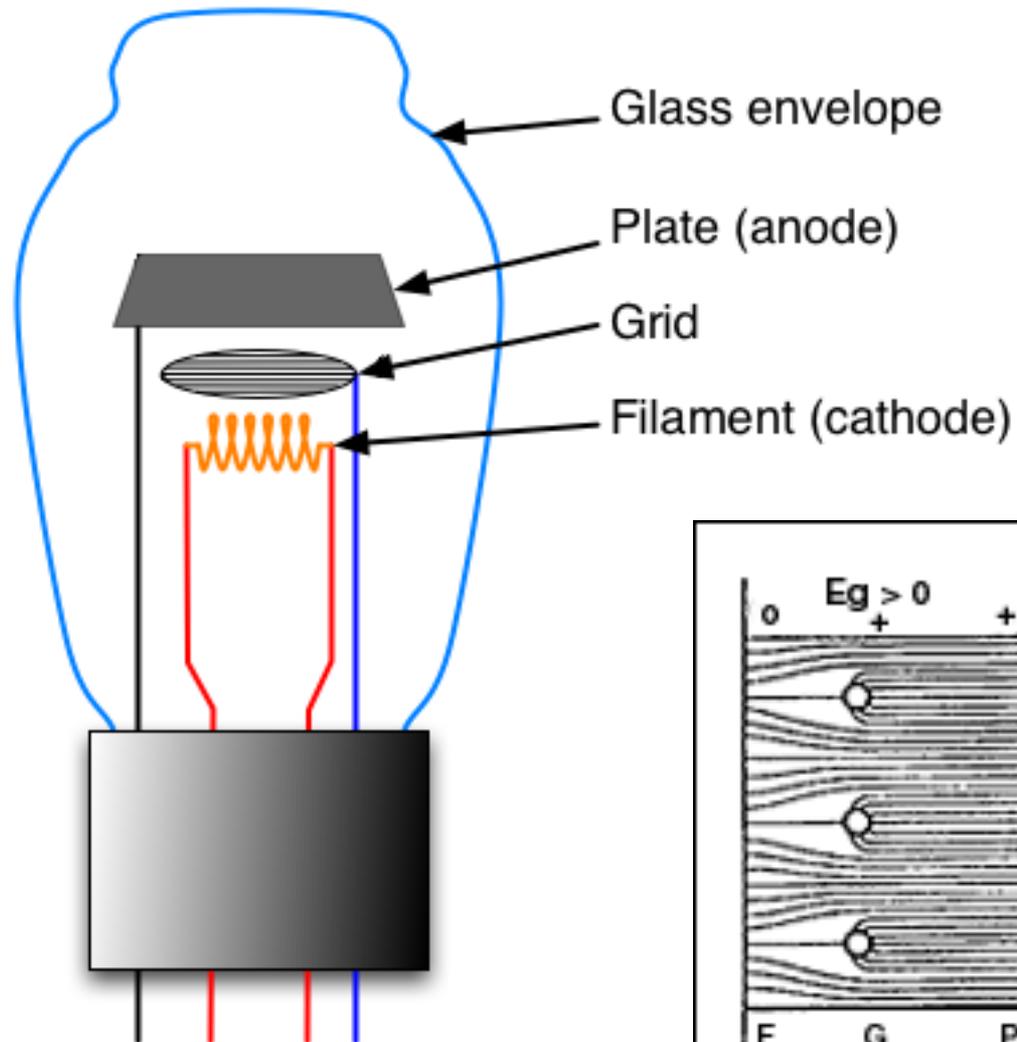
NPN General Purpose Amplifier

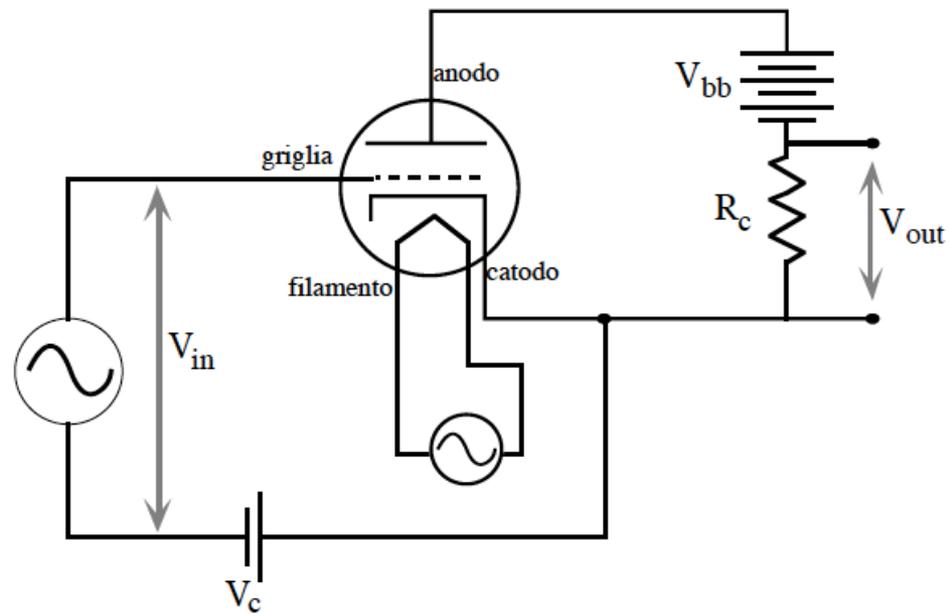
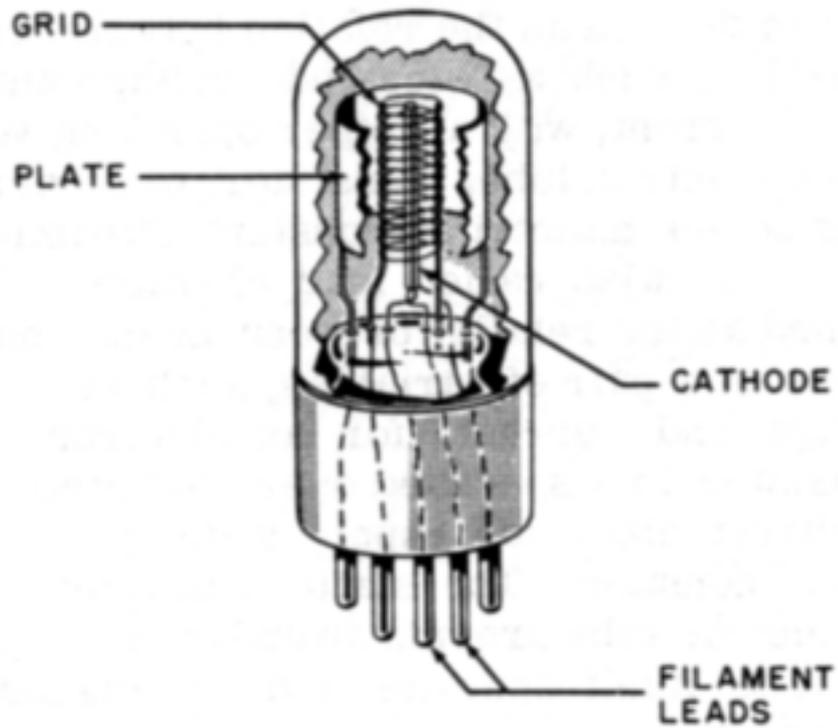
This device is designed as a general purpose amplifier and switch. The useful dynamic range extends to 100 mA as a switch and to 100 MHz as an amplifier.

Diodo a vuoto



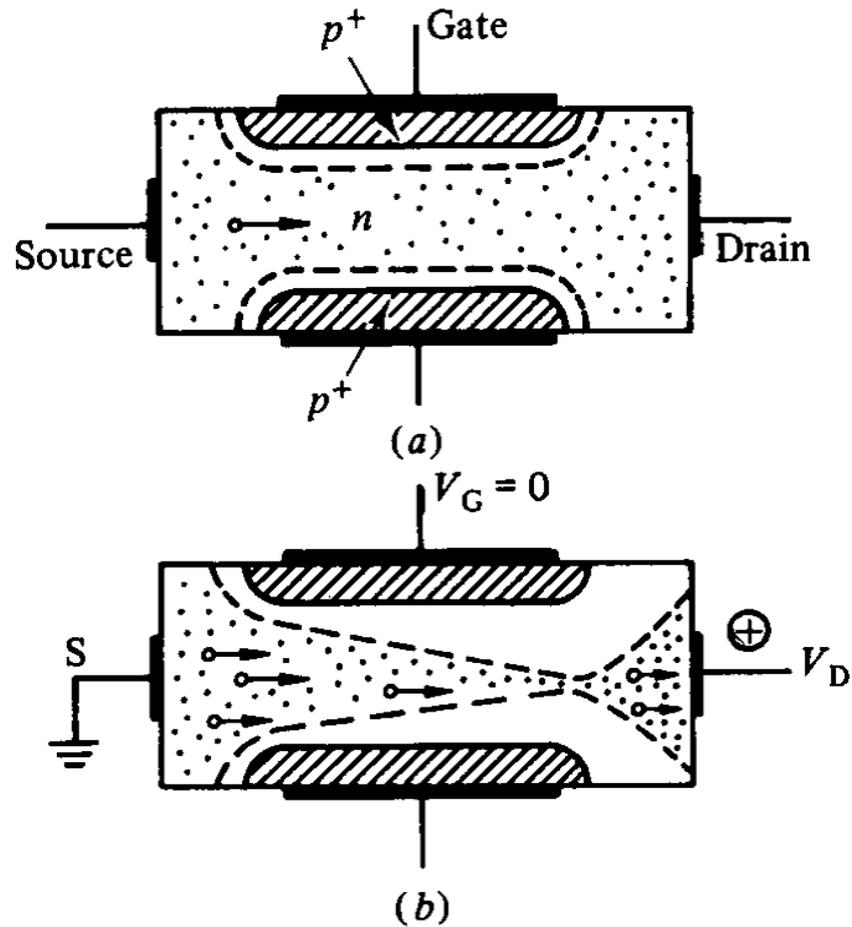
Triodo

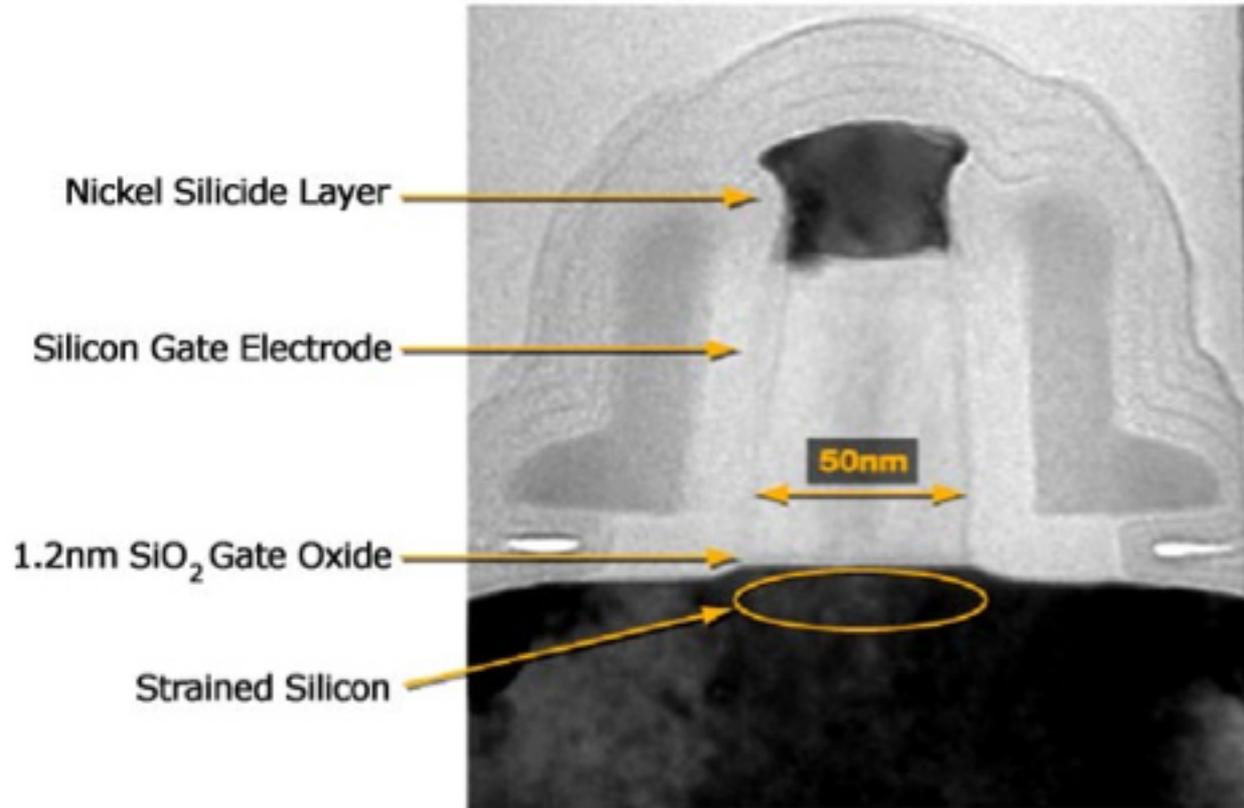




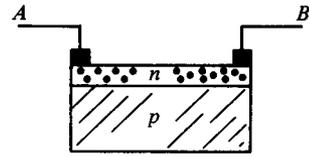


I transistor a effetto di campo (FET)

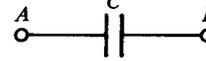
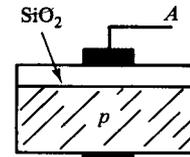




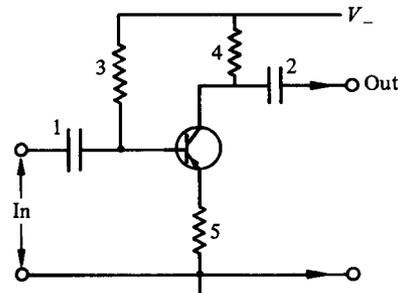
50nm transistor dimension is ~2000x smaller than diameter of human hair



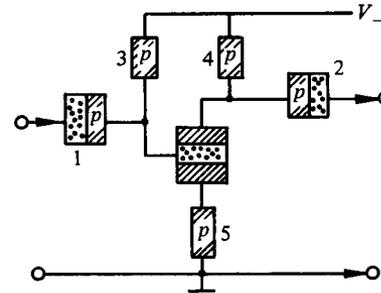
(a)



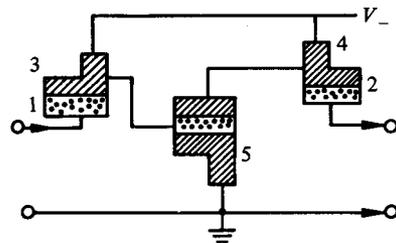
(b)



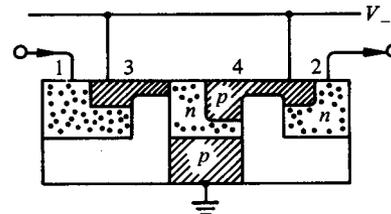
(a)



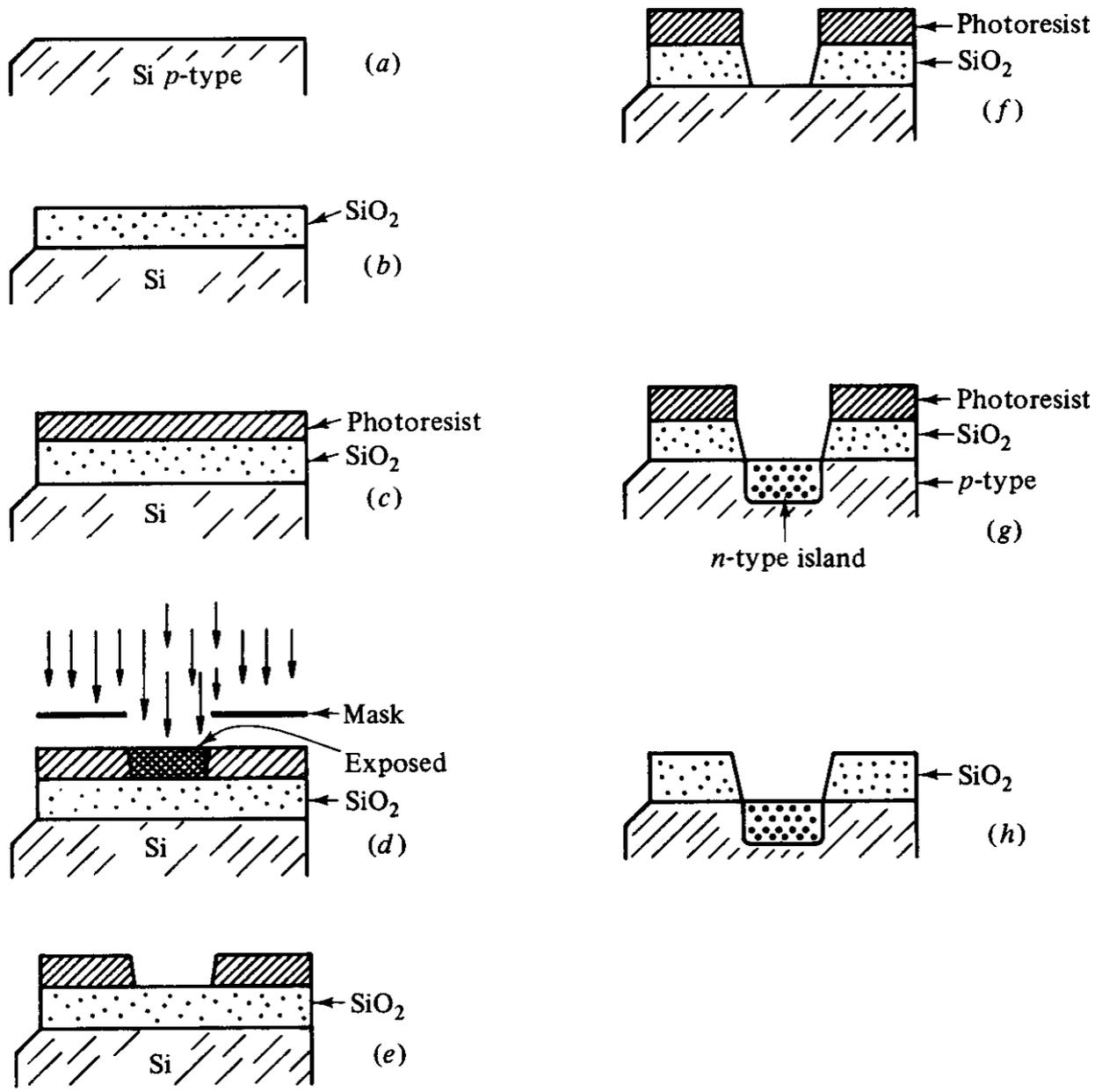
(b)

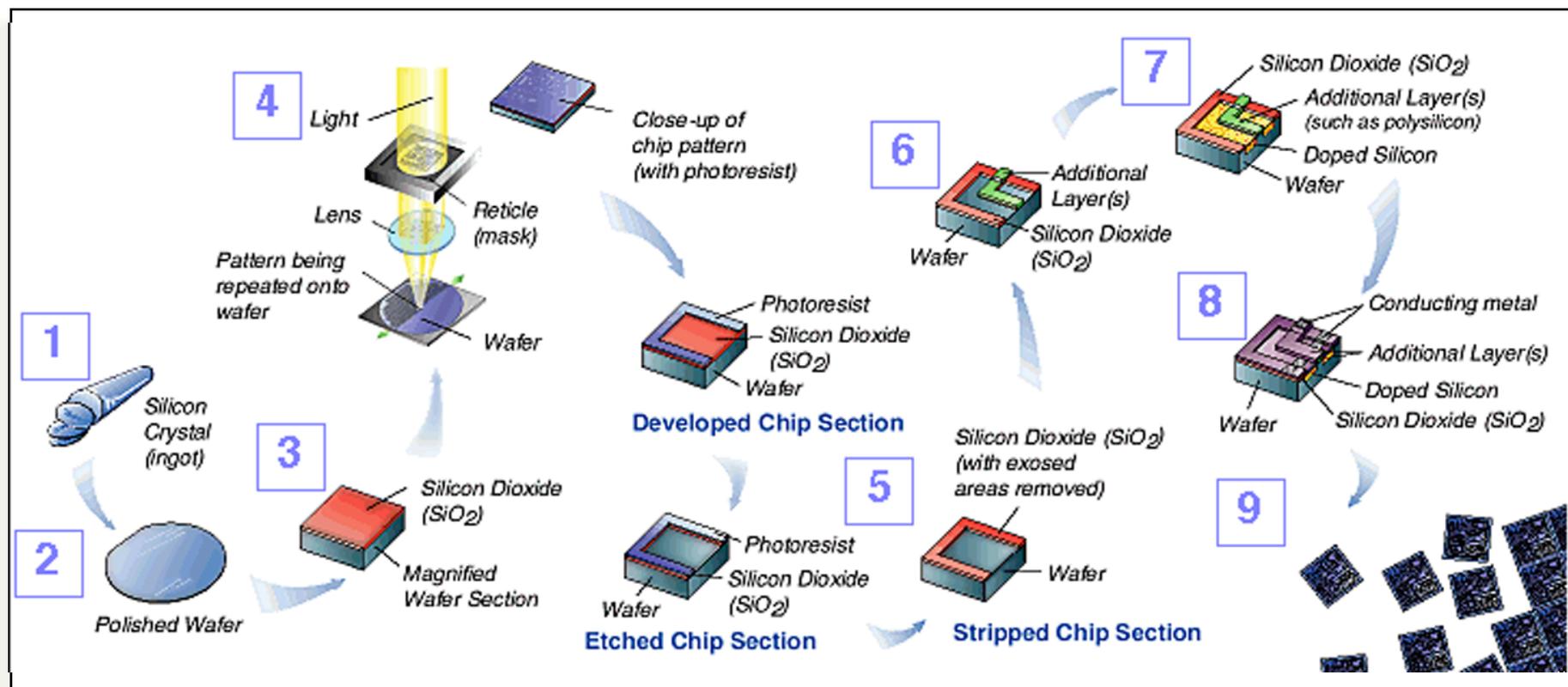
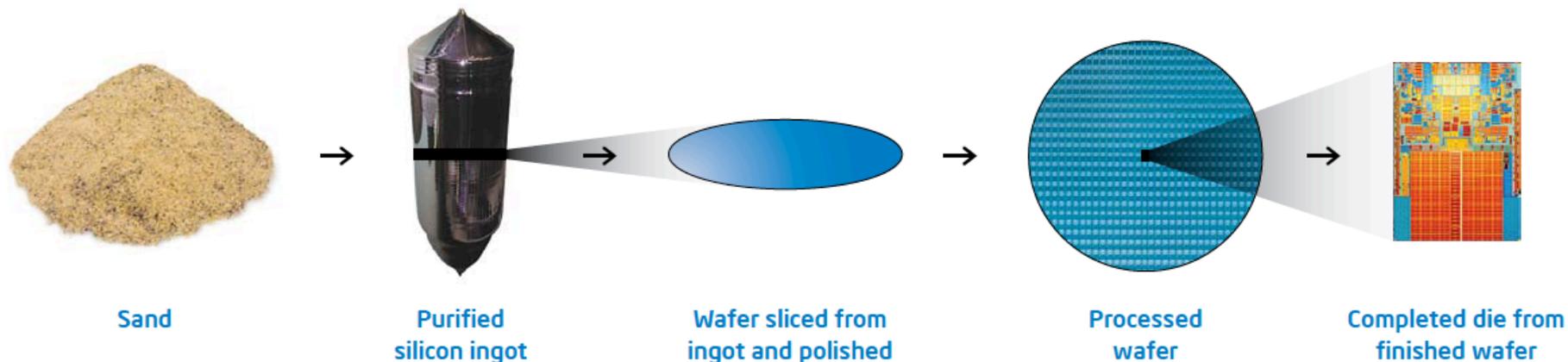


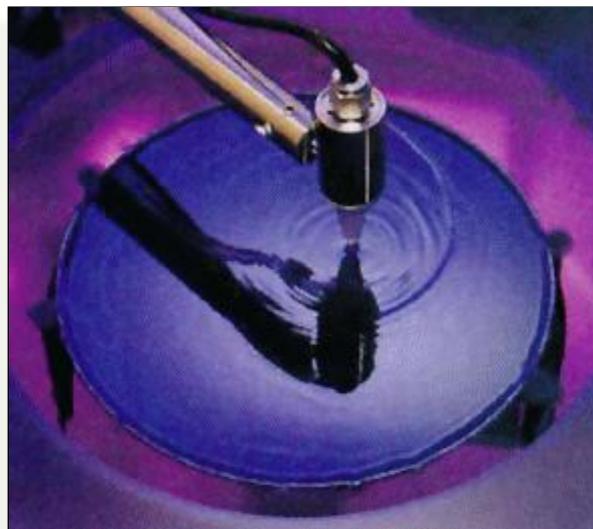
(c)



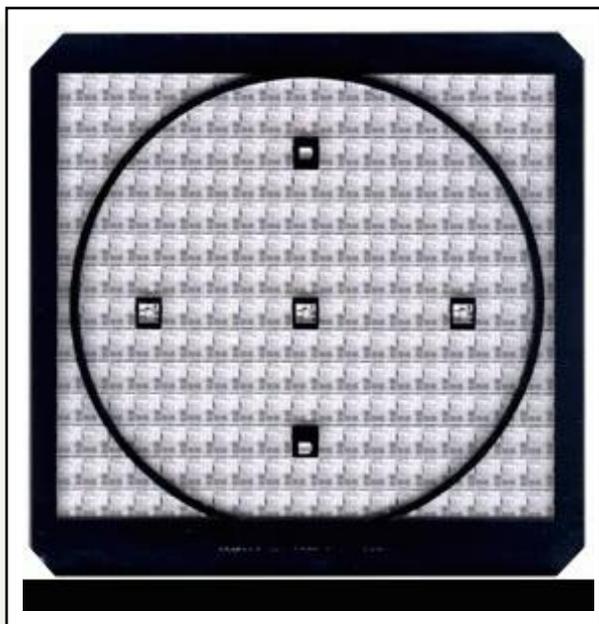
(d)



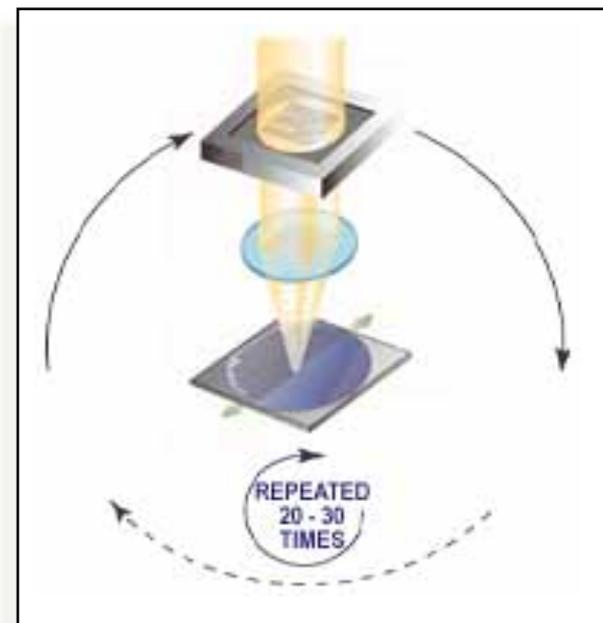




Il fotoresist
viene depositato
sul wafer



La maschera da proiettare

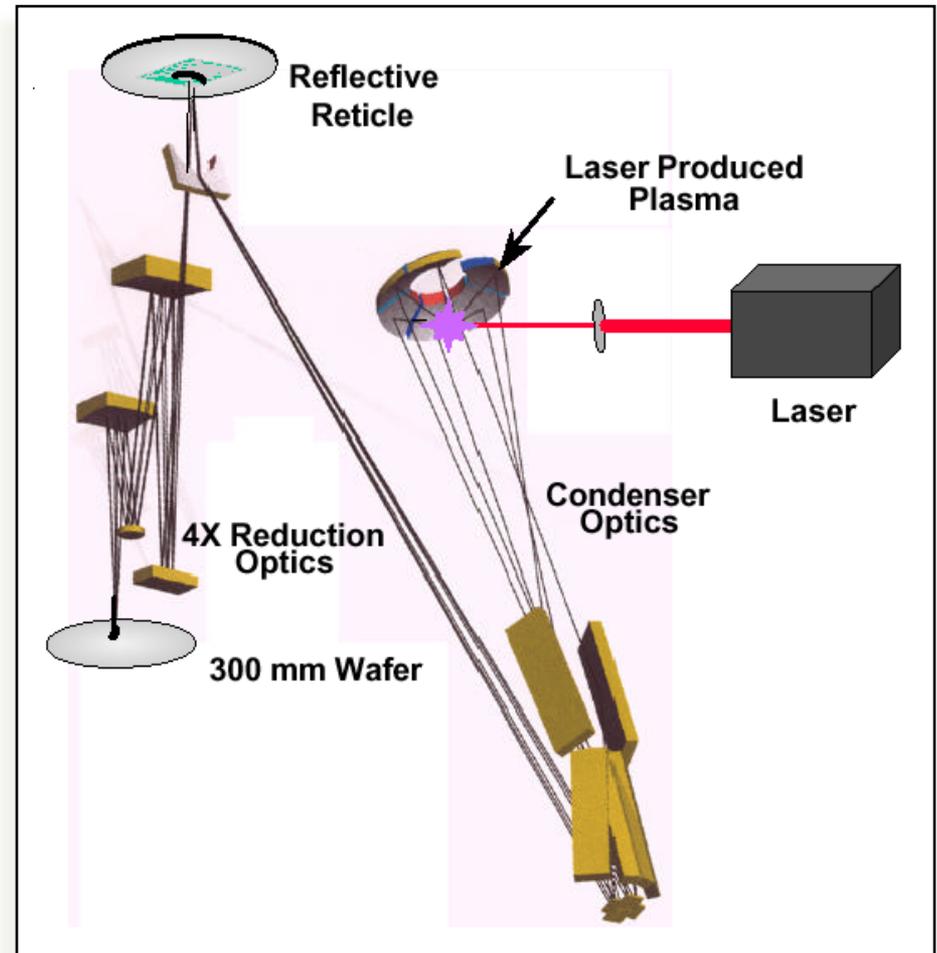


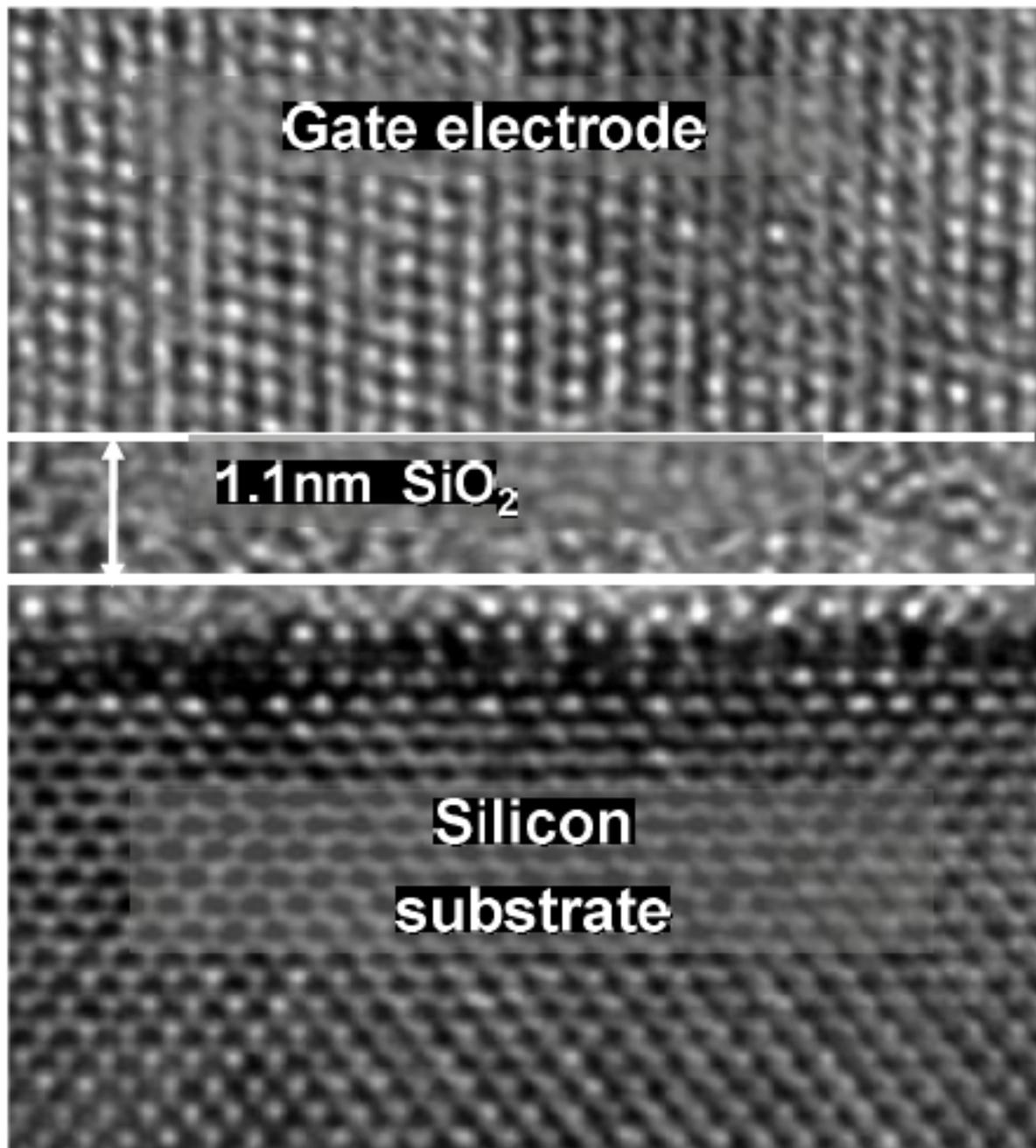
Proiezione della
maschera

Litografia ad alta risoluzione

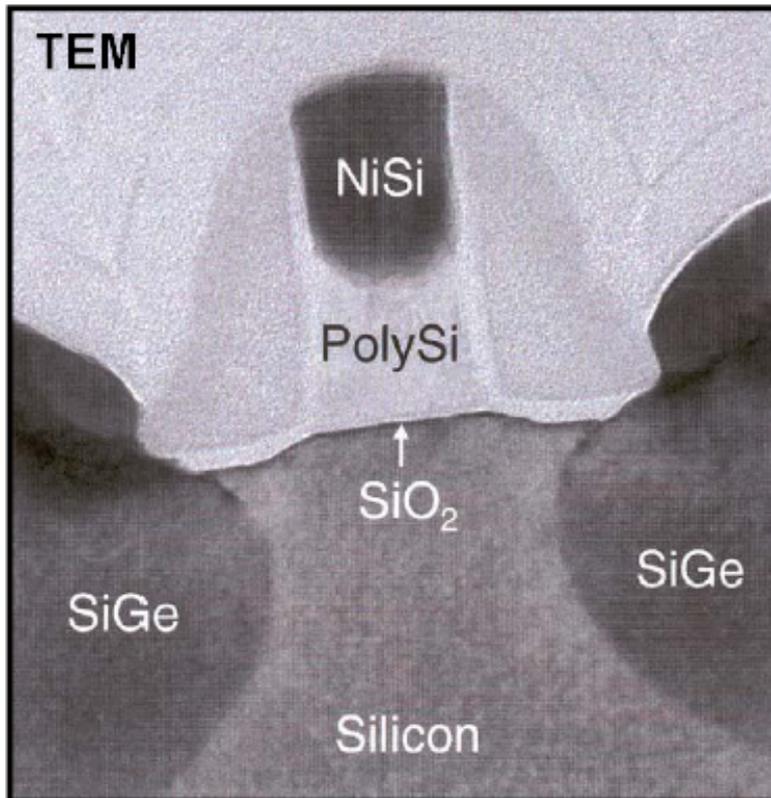
richiede l'uso di sorgenti ultraviolette a piccola lunghezza d'onda ($< 200 \text{ nm}$)

- laser ad eccimeri oppure lampada a plasma
- focalizzazione per mezzo di elementi ottici riflettenti asferici
- nel caso di radiazione EUV (11-13 nm) gli specchi devono essere lavorati con una tolleranza di $\sim 0.1 \text{ nm}$

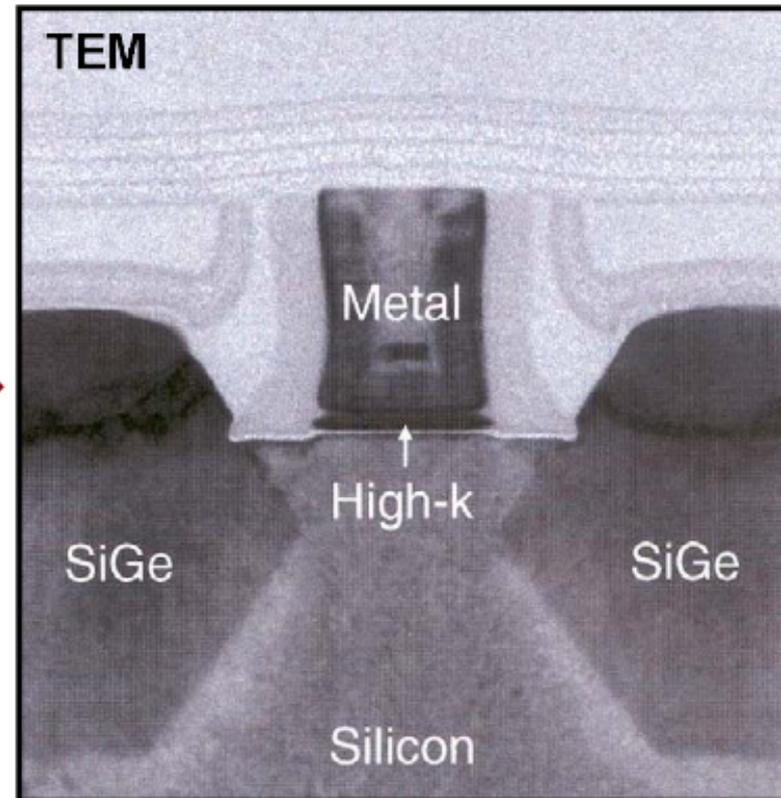




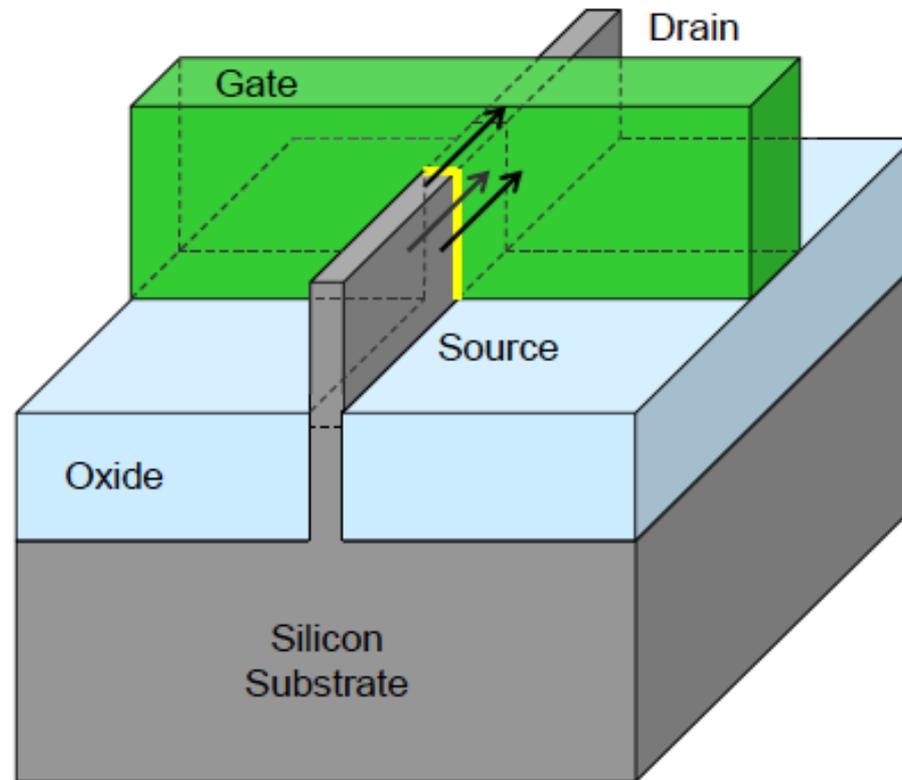
65 nm Transistor



45 nm HK + MG



22 nm Tri-Gate Transistor

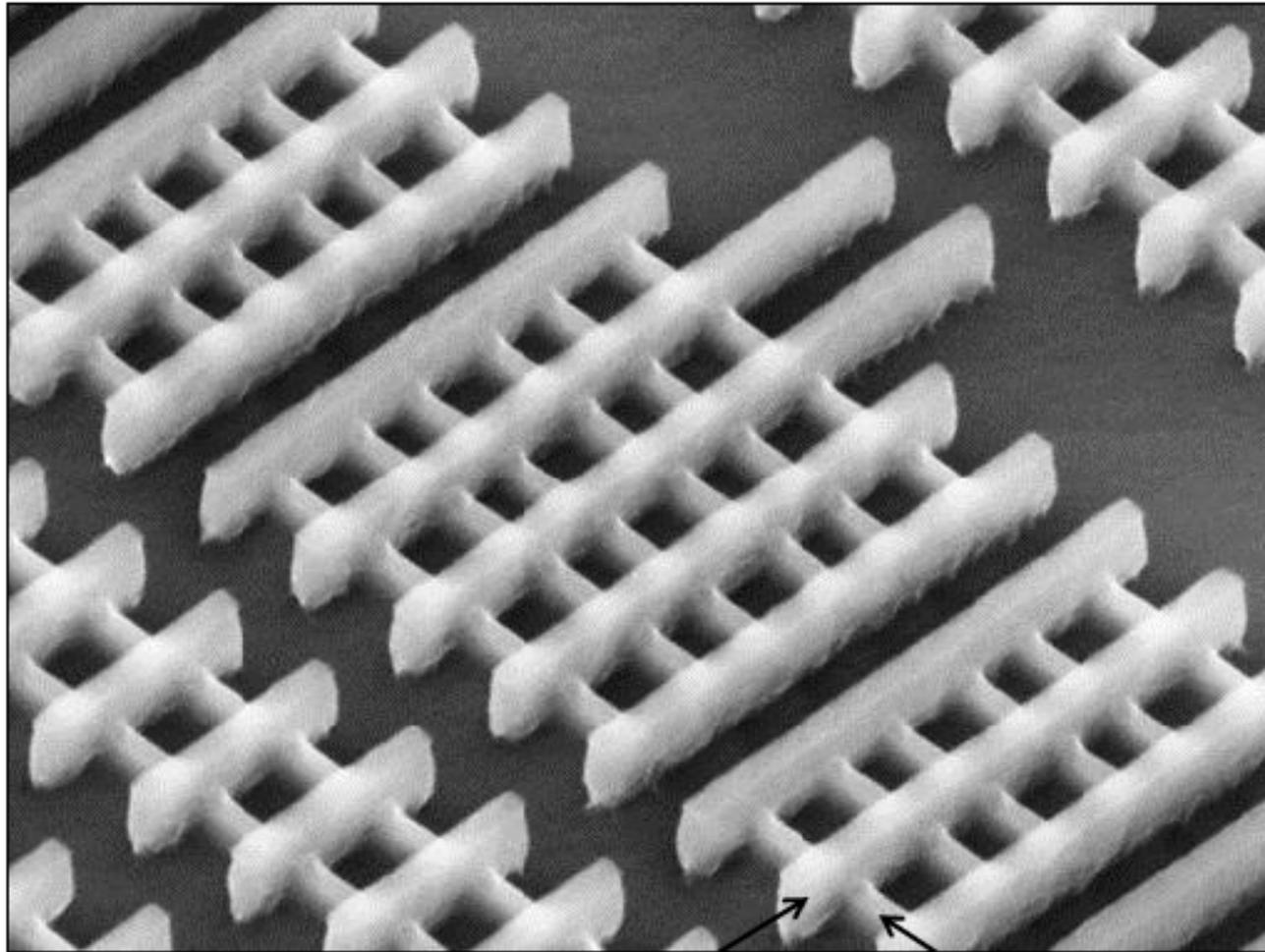


3-D Tri-Gate transistors form conducting channels on three sides of a vertical fin structure, providing “fully depleted” operation

Transistors have now entered the third dimension!



22 nm Tri-Gate Transistor



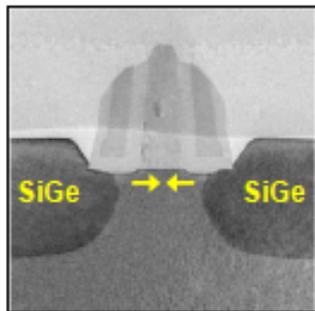
Gates

Fins

Intel Transistor Leadership

2003

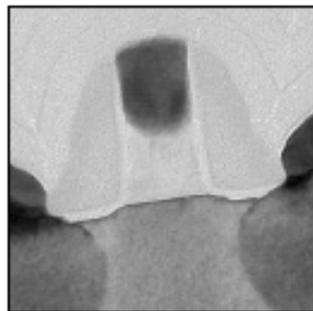
90 nm



Invented
SiGe
Strained Silicon

2005

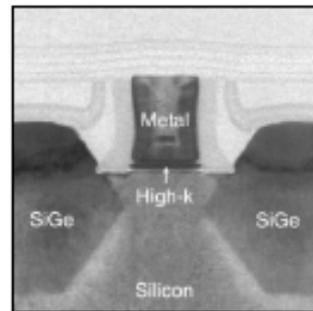
65 nm



2nd Gen.
SiGe
Strained Silicon

2007

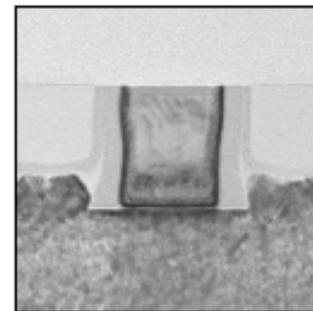
45 nm



Invented
Gate-Last
High-k
Metal Gate

2009

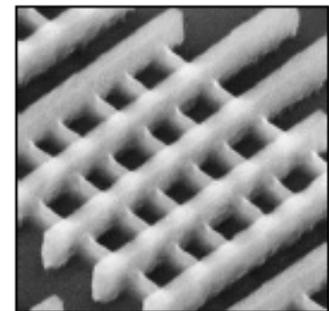
32 nm



2nd Gen.
Gate-Last
High-k
Metal Gate

2011

22 nm



First to
Implement
Tri-Gate

Strained Silicon

High-k Metal Gate

Tri-Gate

Intel Technology Roadmap

Process Name	<u>P1266</u>	<u>P1268</u>	<u>P1270</u>	<u>P1272</u>	<u>P1274</u>
Lithography	45 nm	32 nm	22 nm	14 nm	10 nm
1 st Production	2007	2009	2011	2013	2015

The experts look ahead

Cramming more components onto integrated circuits

With unit cost falling as the number of components per circuit rises, by 1975 economics may dictate squeezing as many as 65,000 components on a single silicon chip

By Gordon E. Moore

**Director, Research and Development Laboratories, Fairchild Semiconductor
division of Fairchild Camera and Instrument Corp.**

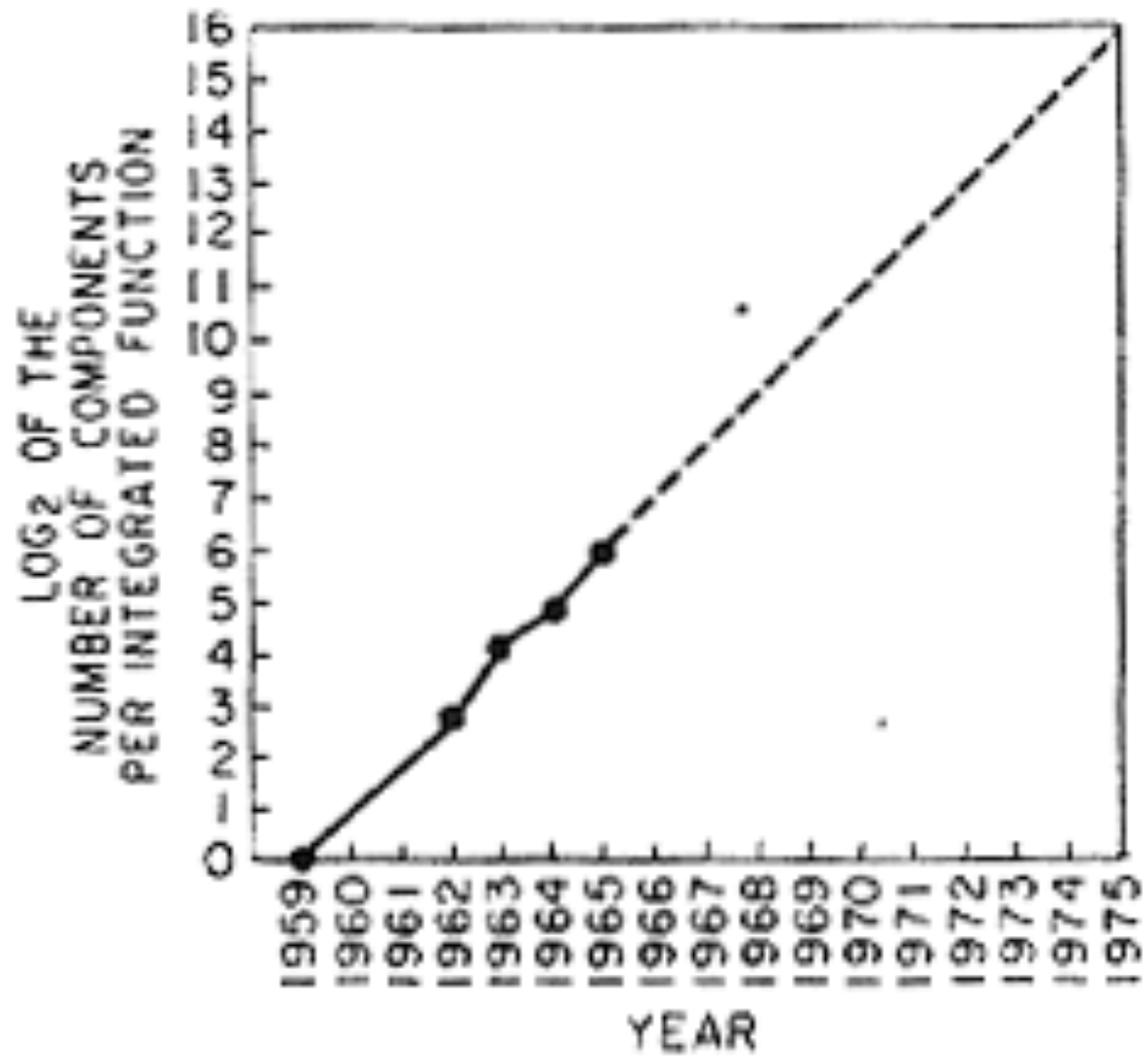
Electronics, Volume 38, Number 8, April 19, 1965

The future of integrated electronics is the future of electronics itself. The advantages of integration will bring about a proliferation of electronics, pushing this science into many new areas.

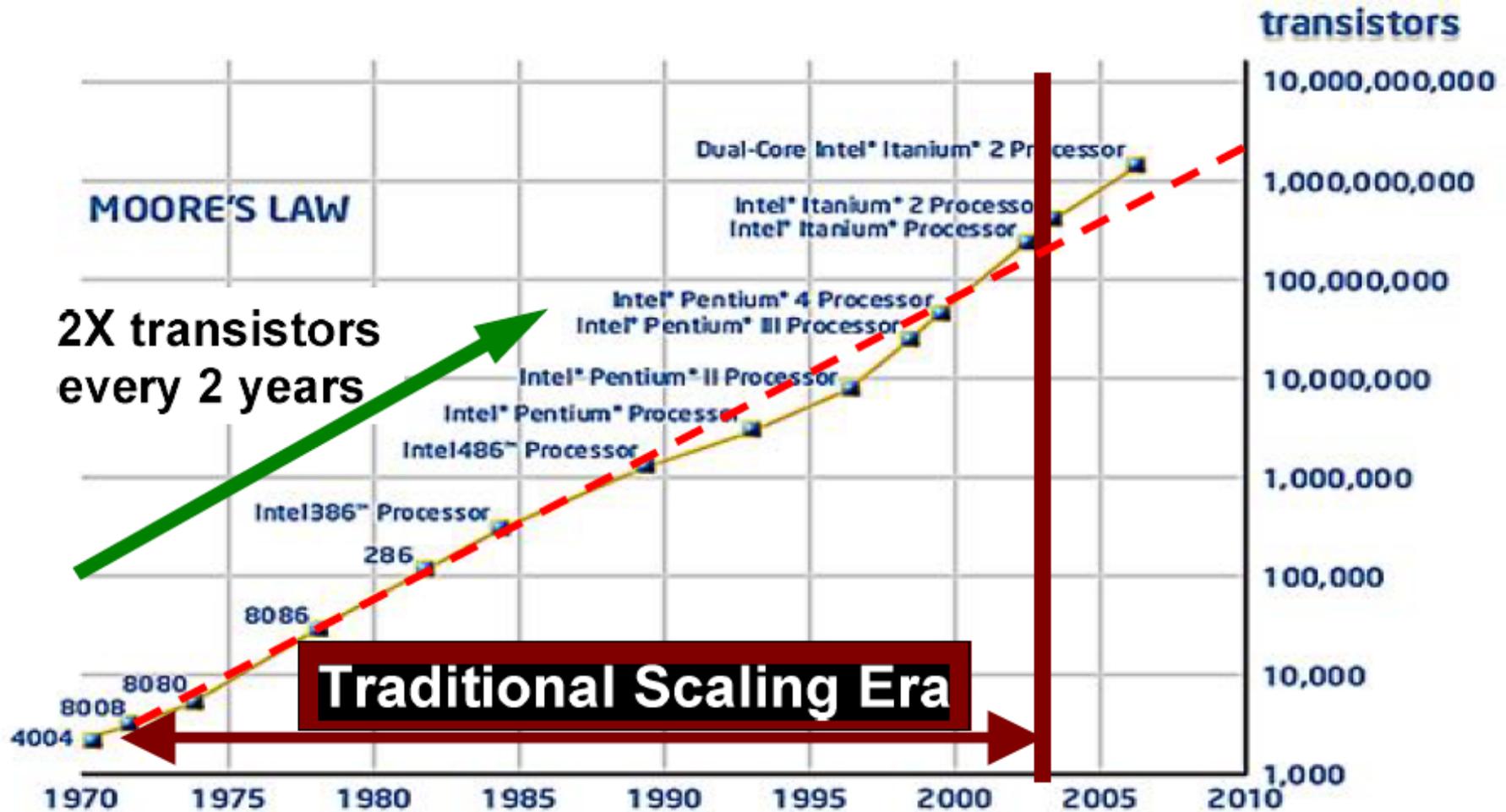
Integrated circuits will lead to such wonders as home computers—or at least terminals connected to a central computer—automatic controls for automobiles, and personal portable communications equipment. The electronic wrist-watch needs only a display to be feasible today.

But the biggest potential lies in the production of large systems. In telephone communications, integrated circuits in digital filters will separate channels on multiplex equipment. Integrated circuits will also switch telephone circuits and perform data processing.

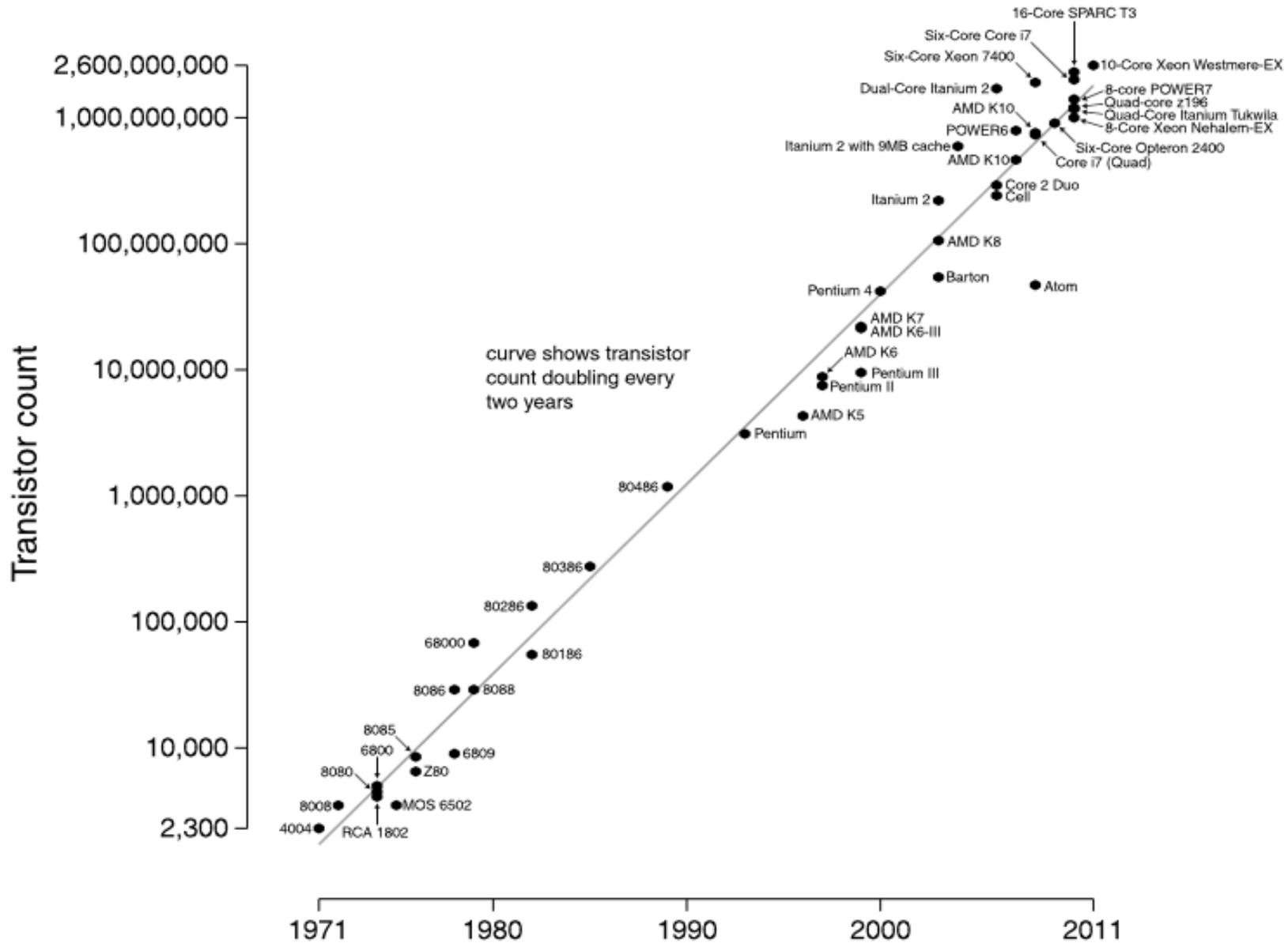
Computers will be more powerful, and will be organized in completely different ways. For example, memories built of integrated electronics may be distributed throughout the machine instead of being concentrated in a central unit. In addition, the improved reliability made possible by integrated circuits will allow the construction of larger processing units. Machines similar to those in existence today will be built at lower costs and with faster turn-around.



40+ Years of Moore's Law at INTEL: From Few to Billions of Transistors



Microprocessor Transistor Counts 1971-2011 & Moore's Law



VISUALIZING PROGRESS

If transistors were people

If the transistors in a microprocessor were represented by people, the following timeline gives an idea of the pace of Moore's Law.



2,300
Average music hall capacity



134,000
Large stadium capacity



32 Million
Population of Tokyo



1.3 Billion
Population of China

1970

Intel 4004

1980

Intel 286

1990

2000

Pentium III

2011

Core i7 Extreme Edition