

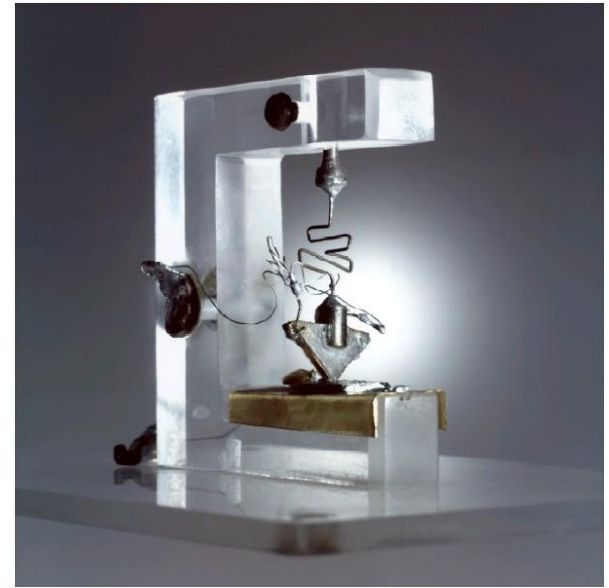
Laboratorio di Elettronica e Tecniche di Acquisizione Dati 2025-2026

Transistor

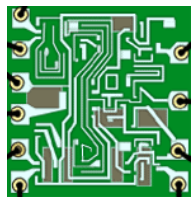
(cfr. [https://inst.eecs.berkeley.edu/~ee105/fa15/lectures/Lecture06-pn%20Junction%20\(with%20appendix\).pdf](https://inst.eecs.berkeley.edu/~ee105/fa15/lectures/Lecture06-pn%20Junction%20(with%20appendix).pdf)
<http://studenti.fisica.unifi.it/~carla/appunti/2008-9/cap.4.pdf>
http://ume.gatech.edu/mechatronics_course/Transistor_F04.ppt)

Storia del Transistor

- Inventati nel **1947**, ai Bell Laboratories.
- John Bardeen, Walter Brattain, and William Schockly sviluppano il primo modello di transistor (fatto in Germanio)
- Hanno ricevuto il premio Nobel in Fisica nel 1956 “per le loro ricerche sui semiconduttori e per la loro scoperta dell’effetto transistor”
- Prima applicazione: rimpiazzare i tubi a vuoto (valvole), grandi e iniefficienti
- Oggi si realizzano milioni di transistor su un singolo wafer di silicio e sono utilizzati su praticamente tutti i dispositivi elettronici



primo modello di transistor



Cosa è un transistor?

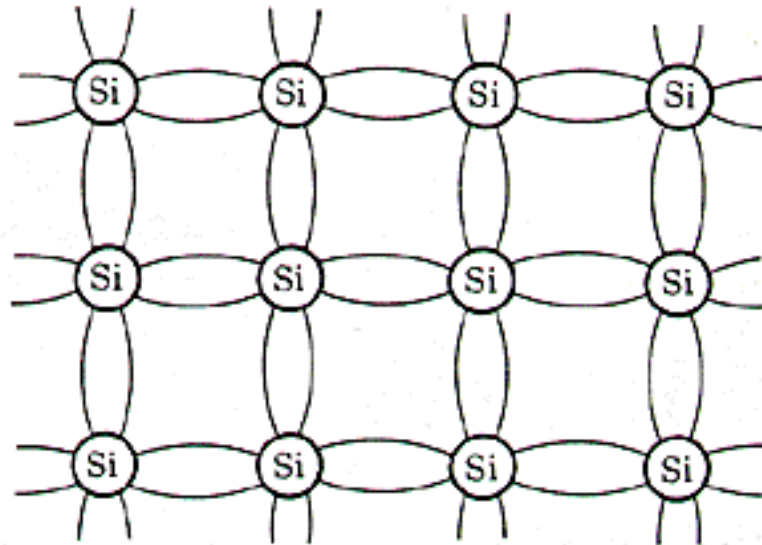
- Il transistor è un dispositivo a semiconduttore a 3 terminali
- E' possibile, con un transistor, controllare la corrente elettrica o il voltaggio fra due terminali applicando una corrente elettrica o un voltaggio al terzo. E' un componente "attivo".
- Con il transistor possiamo fare dispositivi amplificanti o interruttori elettrici. La configurazione del circuito determina se il funzionamento è quello dell'amplificatore o quello dell'interruttore.
- Nel caso di interruttore (miniaturizzato) ha due "posizioni" di funzionamento: "1" o "0". Questo permette le funzionalità *binarie* e permette di processare le informazioni in un microprocessore.



Semiconduttori

Semiconduttore comunemente utilizzato:

- Silicio
 - è il materiale di base per la maggior parte dei circuiti integrati
 - ha 4 elettroni di valenza, nel reticolo ci sono 4 legami covalenti
 - il cristallo di silicio, normalmente, è un isolante: non ci sono elettroni “liberi”
 - la concentrazione intrinseca di portatori di carica (n_i) è funzione della temperatura (a temperatura ambiente, 300K, $n_i = 10^{10}/\text{cm}^3$)



Semiconduttori

- si può aumentare la conducibilità elettrica, nel cristallo di silicio, aumentando la temperatura (poco utile) e con il *dopaggio*
- il dopaggio consiste nell'aggiungere piccole percentuali degli elementi vicini

Periodic Table of the Elements																						
Representative (main group) elements										Representative (main group) elements												
IA		VIII A																				
1	H																					
2	Li	Be															B	C	N	O	F	Ne
3	Na	Mg															Al	Si	P	S	Cl	Ar
4	K	Ca	Sc	Ti	V	Cr	Mn	Fe	Co	Ni	Cu	Zn	Ga	Ge	As	Se	Br	Kr				
5	Rb	Sr	Y	Zr	Nb	Mo	Tc	Ru	Rh	Pd	Ag	Cd	In	Sn	Sb	Te	I	Xe				
6	Cs	Ba	La	Hf	Ta	W	Re	Os	Ir	Pt	Au	Hg	Tl	Pb	Bi	Po	At	Rn				
7	Fr	Ra	Ac	Rf	Db	Sg	Bh	Hs	Mt	Uun	Uuu	Uub										
Transition metals																						
Rare earth elements																						
Lanthanides																						
Actinides																						

Semiconduttori: dopaggio

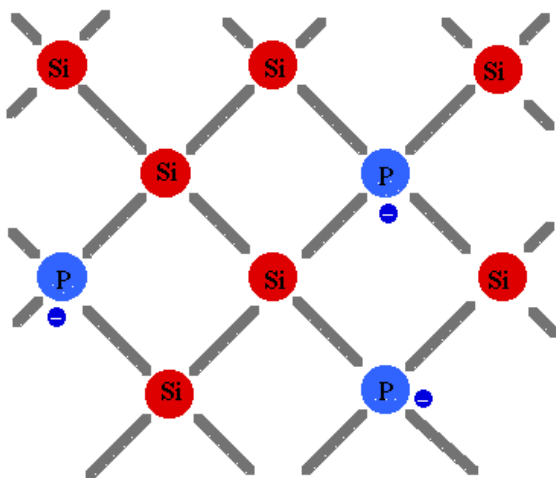
Due tipi di dopaggio

1. *N-type* (negativo)

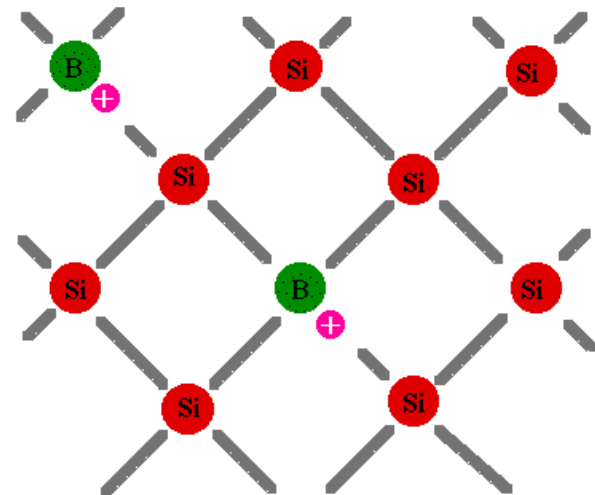
- impurità di **donori** (dal Gruppo V) aggiunte al reticolo cristallino del Si
- portatori di carica dominante: **elettroni negativi**
- elementi del **Gruppo V** come **Fosforo, Arsenico e Antimonio**

2. *P-type* (positivo)

- impurità di **accettori** (dal Gruppo III) aggiunte al reticolo cristallino del Si
- portatori di carica dominante: **lacune (holes) positive**
- elementi del **Gruppo III** come **Boro, Alluminio e Gallio**



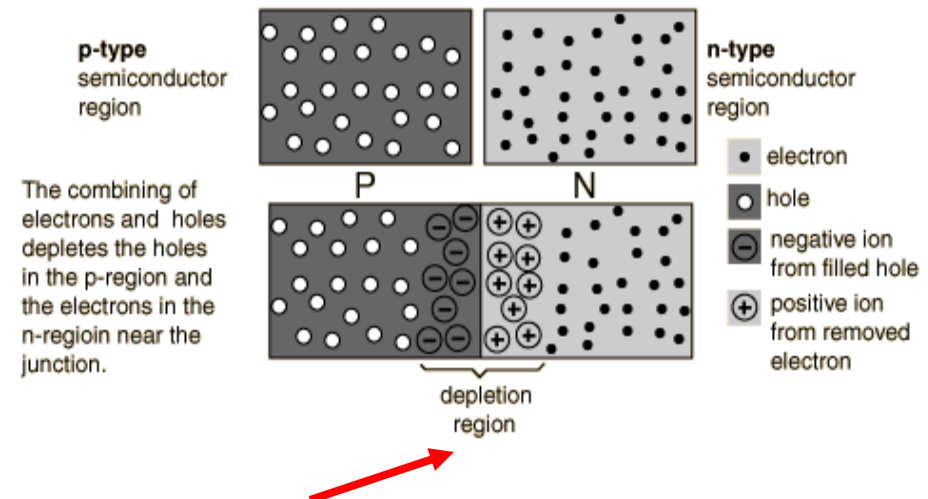
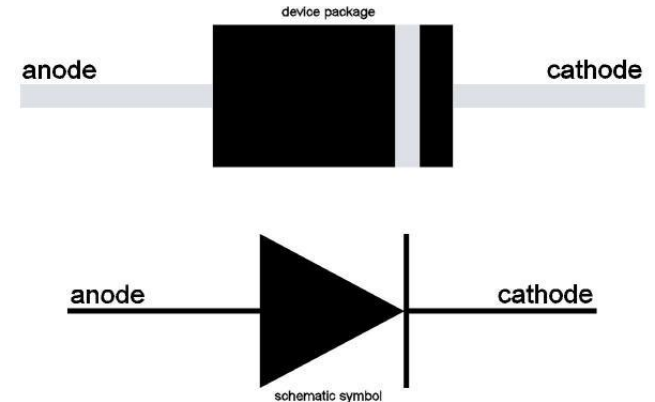
N-type



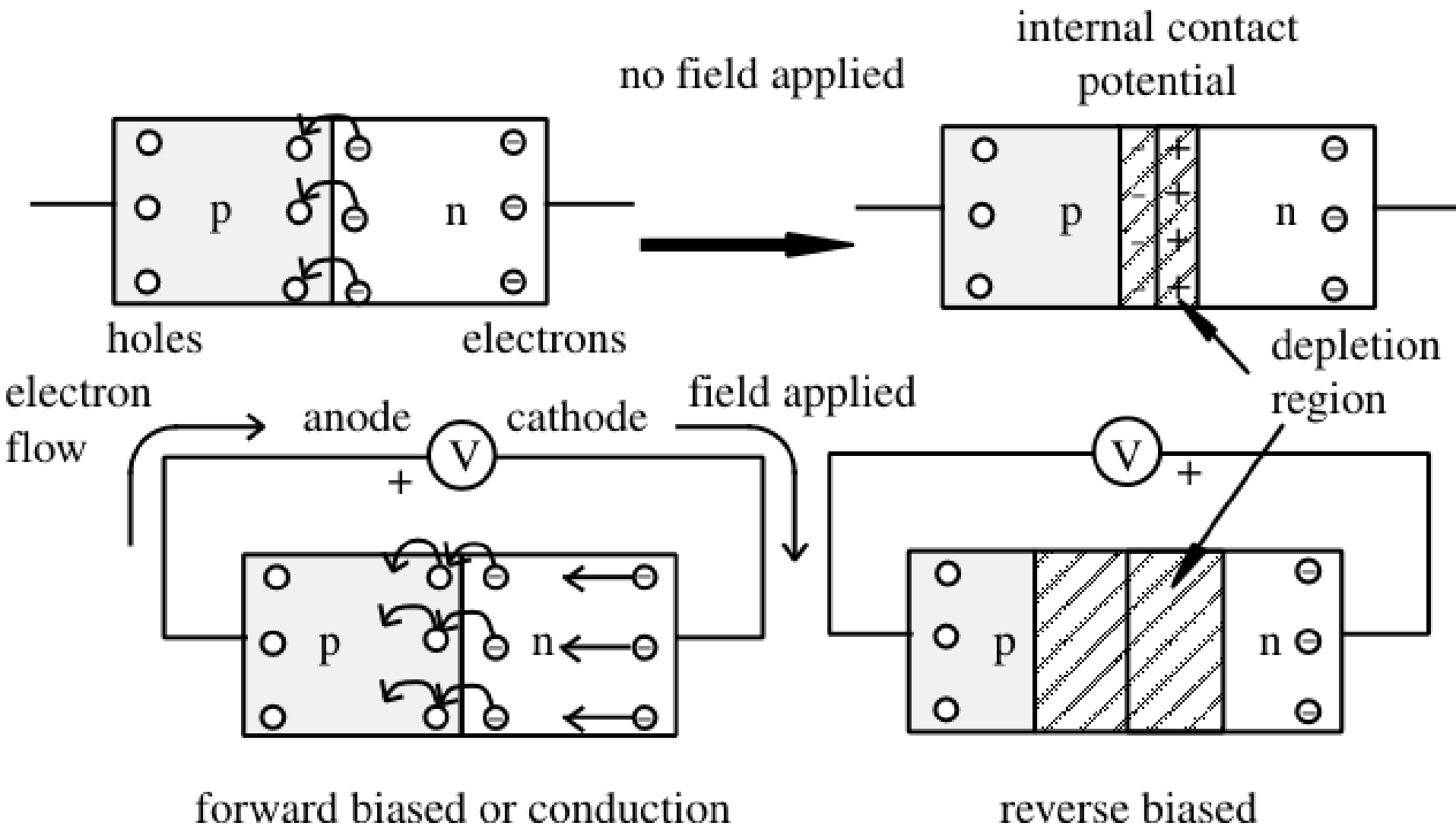
P-type

Costituente base: la giunzione p-n

- chiamata anche **diodo**
- permette alla corrente, idealmente, di scorrere solamente da p verso n
- a causa del gradiente di densità gli elettroni diffondono nella regione p e le lacune in quella n
- questi portatori di carica si **ricombinano**. La regione intorno alla giunzione è **svuotata** di cariche mobili
- due tipi di comportamenti possibili: inverso e diretto



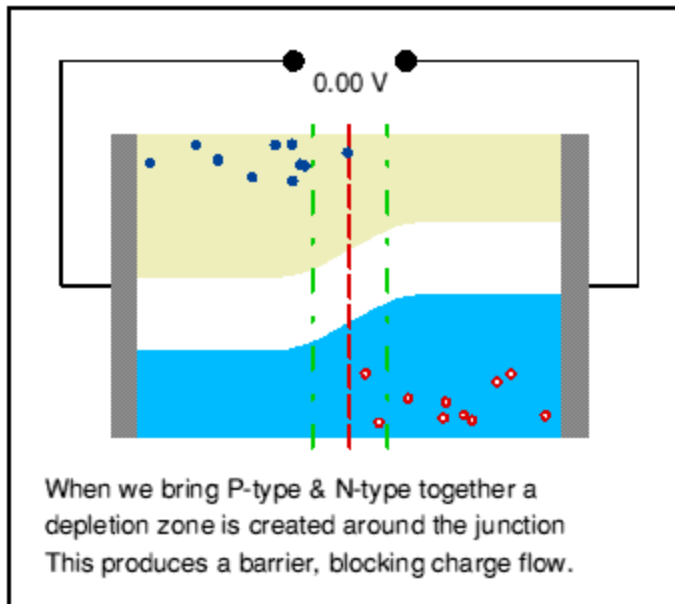
Bias esterno



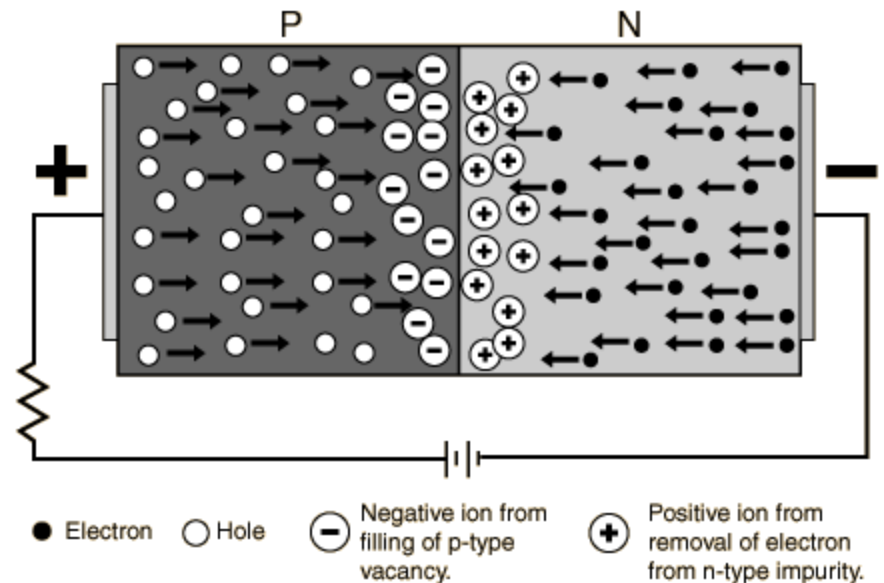
Polarizzazione (bias) diretta

polarizzazione diretta:

- il potenziale esterno abbassa la barriera di potenziale alla giunzione
- le lacune (dal materiale *p*-type) e gli elettroni (dal materiale *n*-type) sono spinte verso la giunzione
- Una corrente di *elettroni* fluisce verso *p* (sinistra nel disegno) e una di *lacune* verso *n* (destra). La corrente totale è la somma delle due correnti



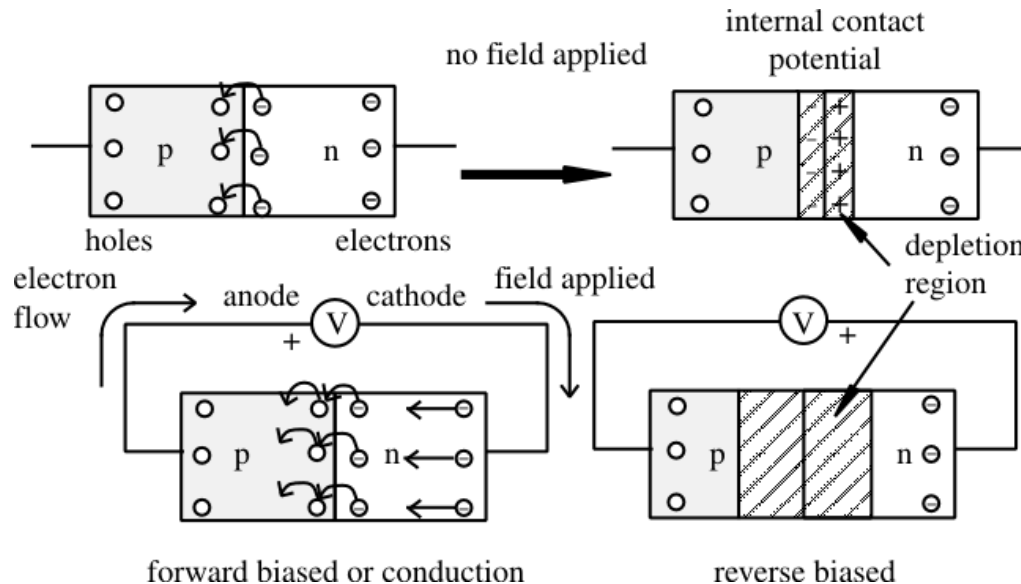
© J. C. G. Lesurf Univ. St. Andrews



Polarizzazione inversa

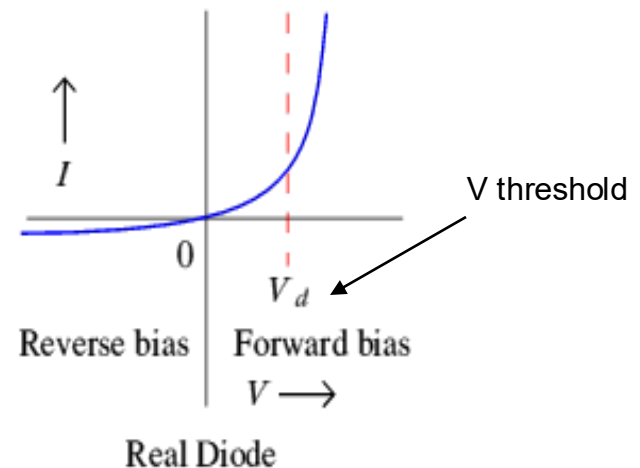
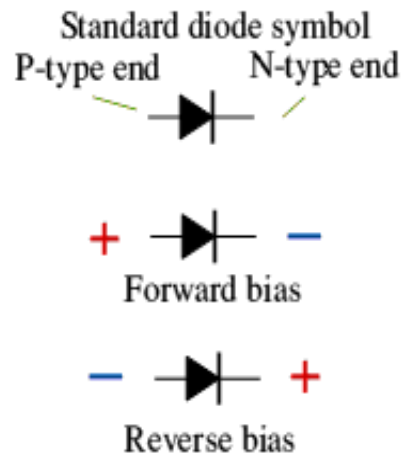
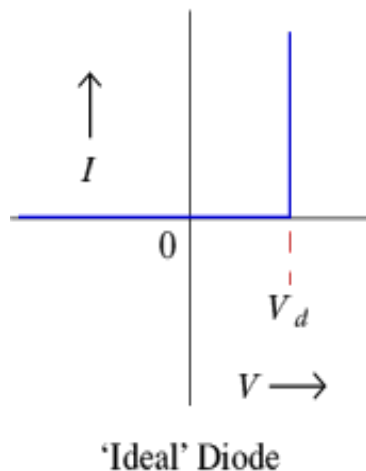
polarizzazione inversa:

- il potenziale esterno alza la barriera di potenziale della giunzione
- c'è una corrente transiente che fluisce fintanto che gli elettroni e le lacune sono tirate via dalla giunzione
- quando il potenziale formato dall'allargamento della zona di svuotamento eguaglia il voltaggio esterno applicato la corrente transiente si ferma (ad eccezione di una piccola corrente "termica")



Caratteristica del diodo

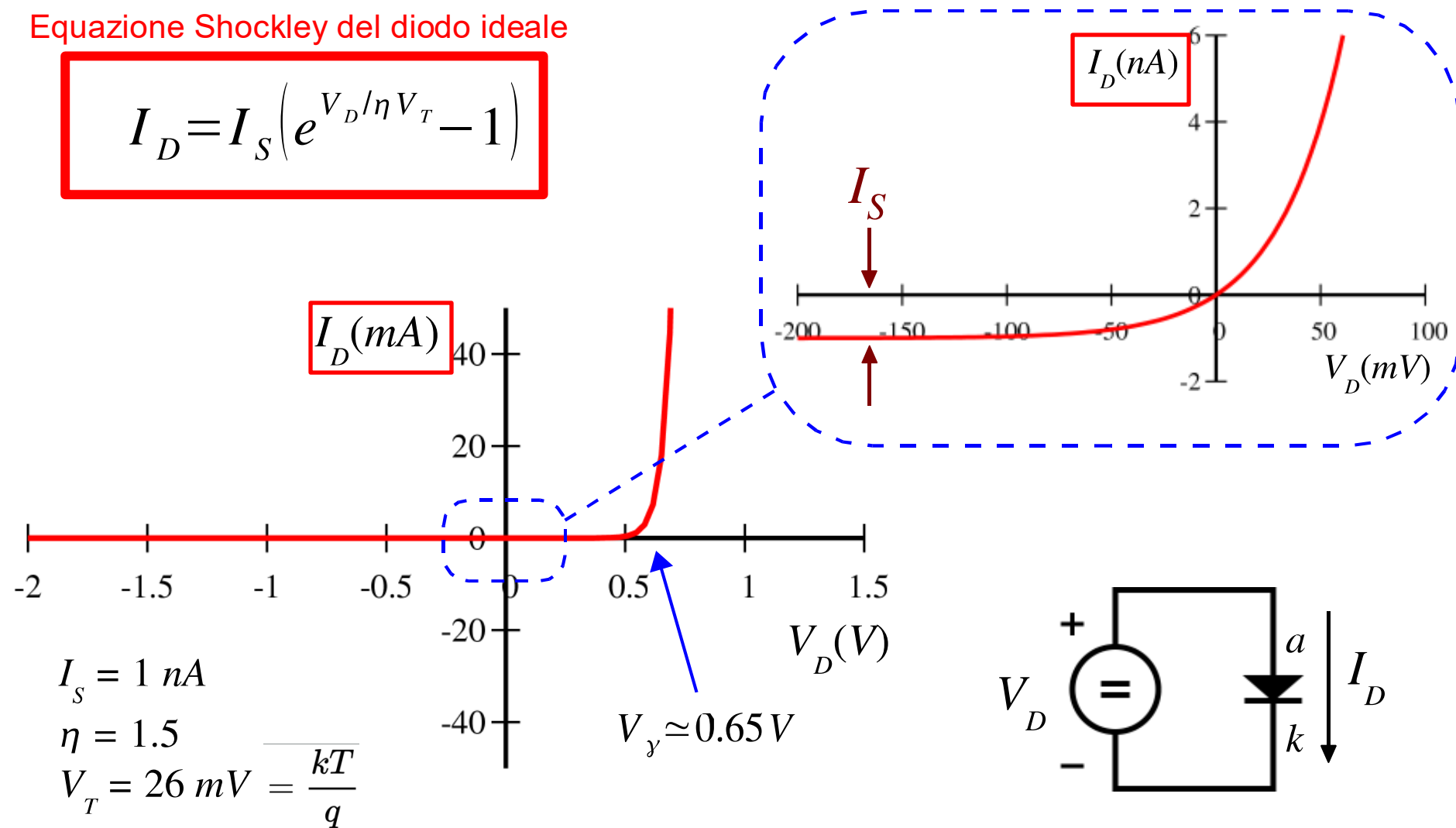
- Polarizzazione diretta: la corrente passa
 - sono necessari $\sim 0.7\text{V}$ (nel Si) per iniziare la conduzione (“vincendo” il potenziale di contatto, V_d)
- Polarizzazione inversa: il diodo blocca la corrente
 - ideale: corrente = 0
 - reale : $I_{\text{flow}} = 10^{-9} \text{ A}$



Caratteristica del diodo

Equazione Shockley del diodo ideale

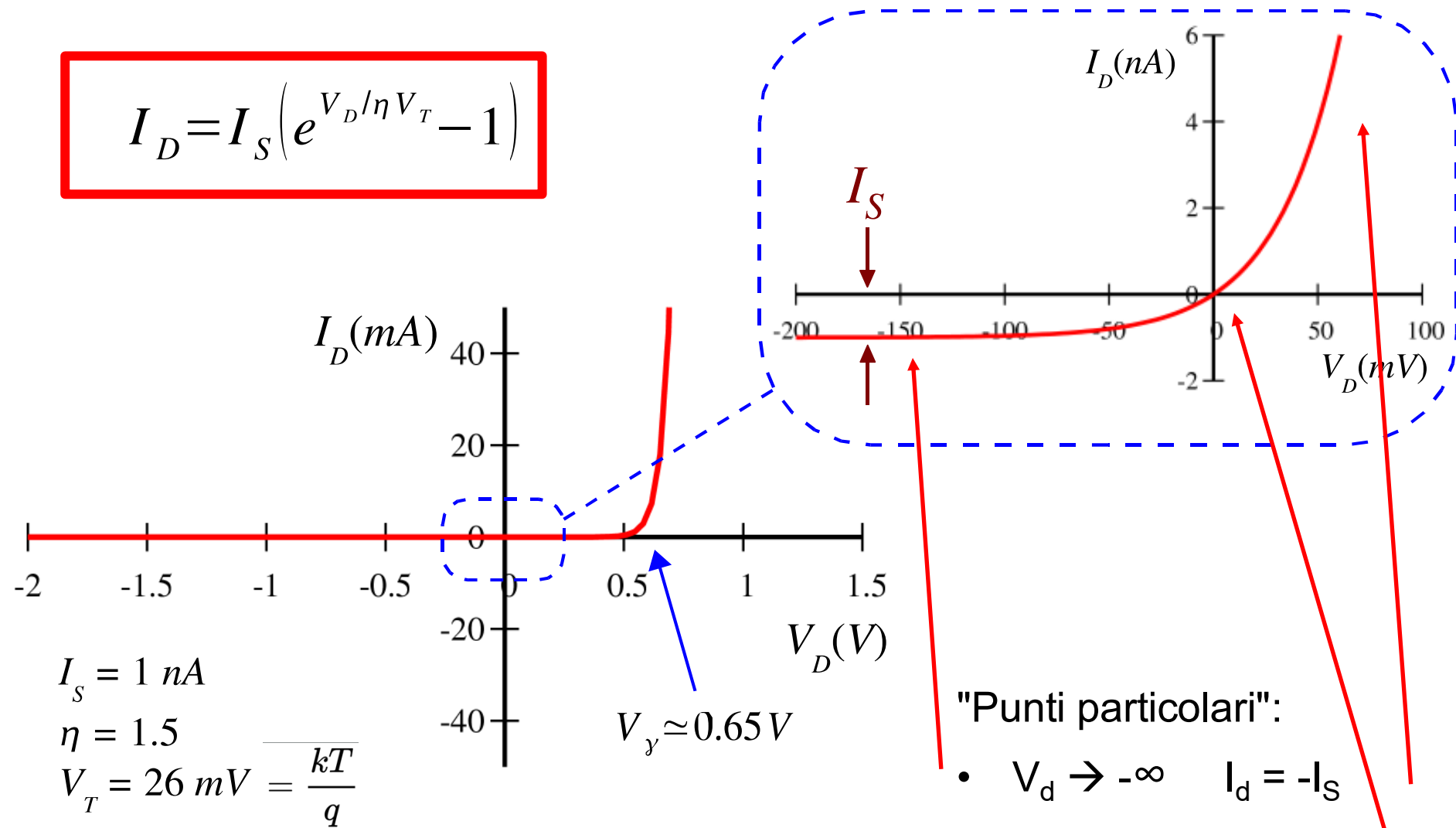
$$I_D = I_S \left(e^{V_D / \eta V_T} - 1 \right)$$



I_S è la **corrente di saturazione inversa** che, asintoticamente, fluisce in regime di contropolarizzazione (bastano poche centinaia di mV)

Caratteristica del diodo

$$I_D = I_S \left(e^{V_D / \eta V_T} - 1 \right)$$



$$I_S = 1 \text{ nA}$$

$$\eta = 1.5$$

$$V_T = 26 \text{ mV} = \frac{kT}{q}$$

"Punti particolari":

- $V_D \rightarrow -\infty$ $I_D = -I_S$
- $V_D \rightarrow \infty$ $I_D \rightarrow \infty$
- $V_D = 0$ $I_D = 0$

Caratteristica del diodo

$$I_D = I_S \left(e^{V_D / \eta V_T} - 1 \right)$$

$$V_Y = V_0 = V_T \ln \left(\frac{N_A N_D}{n_i^2} \right)$$

soglia di conduzione
in diretta

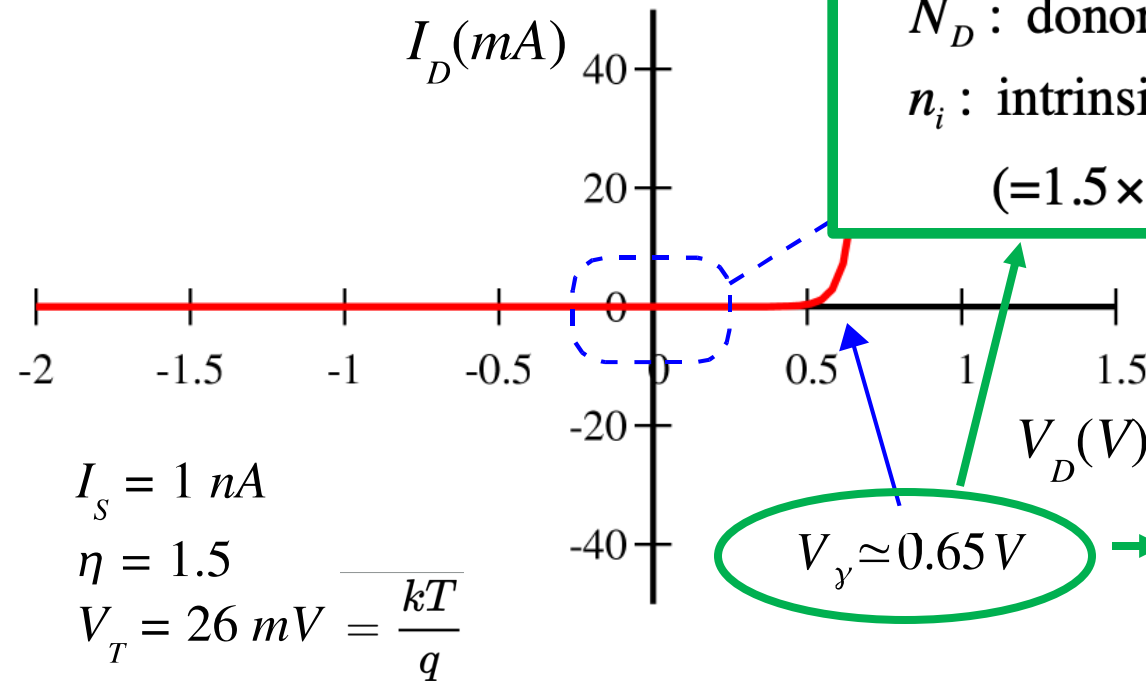
V_T : thermal voltage (= 26 mV at room temp)

N_A : acceptor concentration on p-side

N_D : donor concentration on n-side

n_i : intrinsic carrier concentration

($= 1.5 \times 10^{10} \text{ cm}^{-3}$ at room temp)

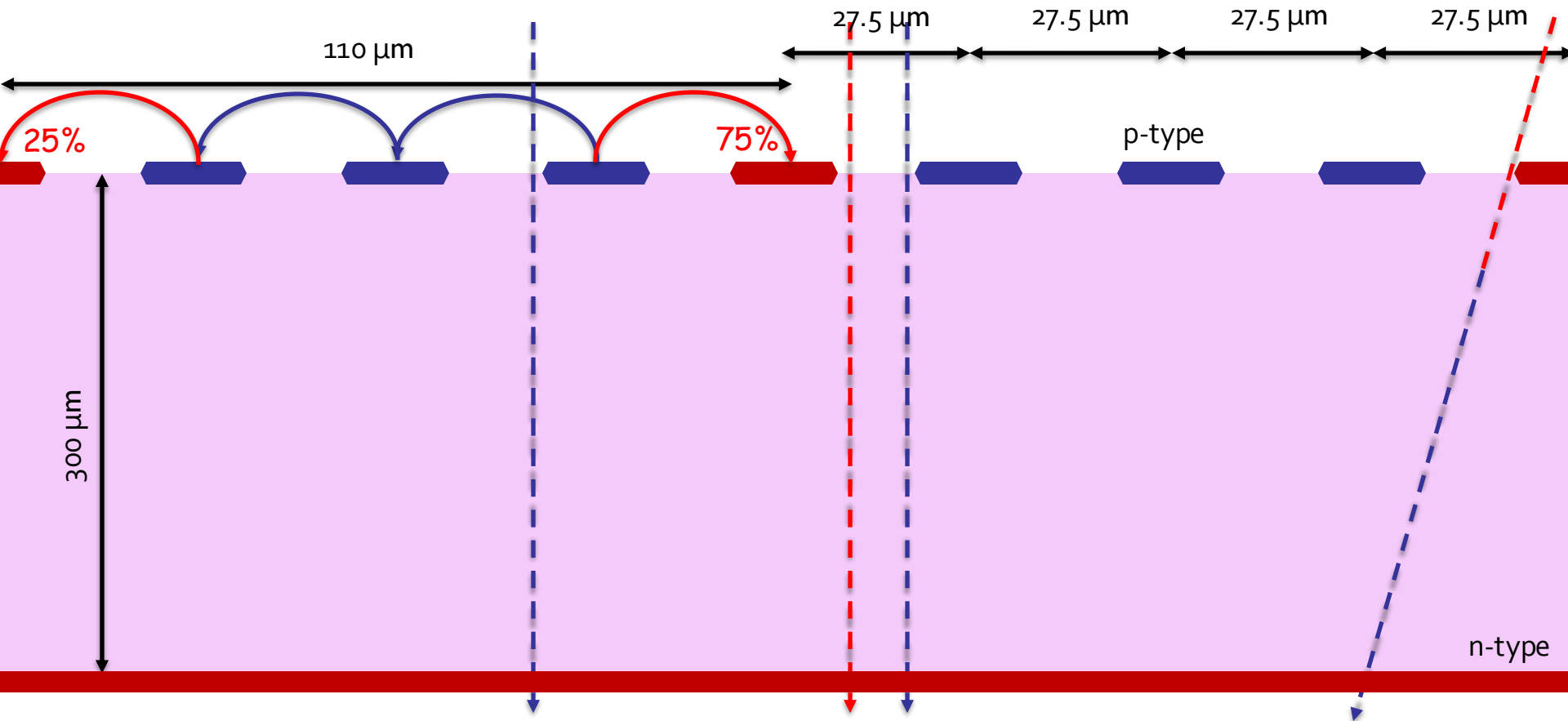


I_S è la **corrente di saturazione inversa** che, regime di contropolarizzazione (bastano poche centinaia di mV)

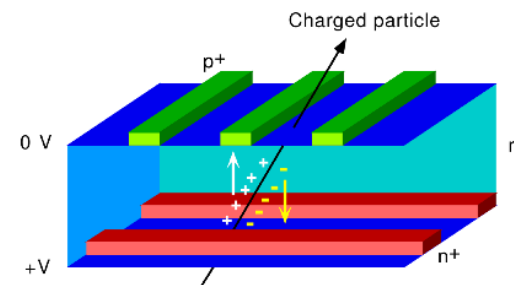
Example: A pn junction with
n-doping of 10^{17} cm^{-3} and
p-doping of 10^{18} cm^{-3}

$$V_0 = V_T \ln \left(\frac{N_A N_D}{n_i^2} \right) = 0.88 \text{ V}$$

Il diodo come rivelatore di particelle

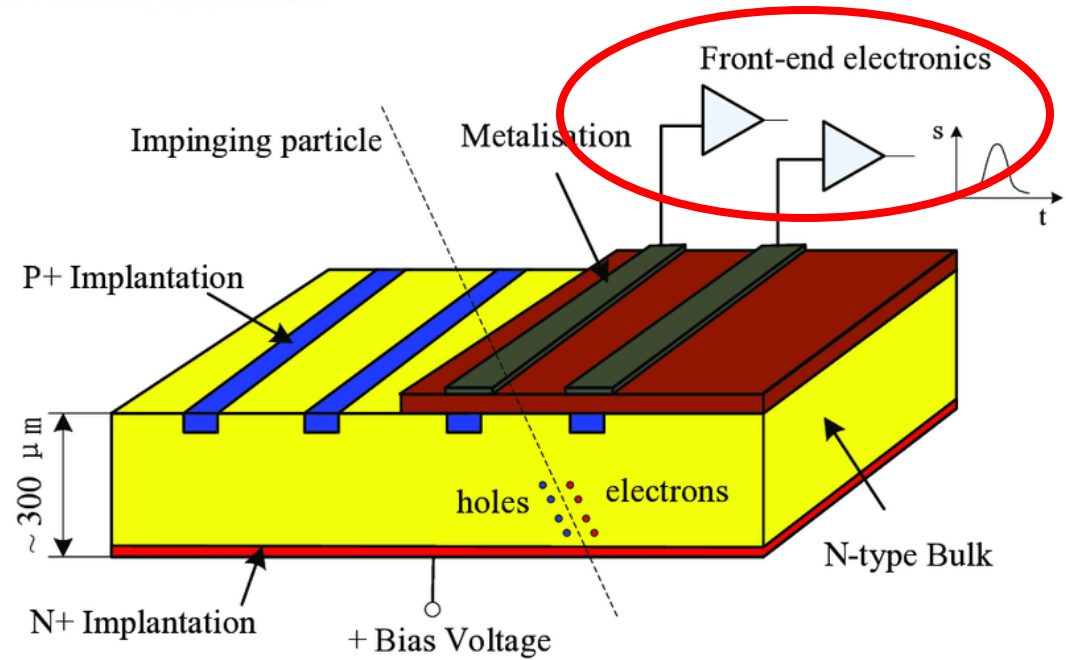
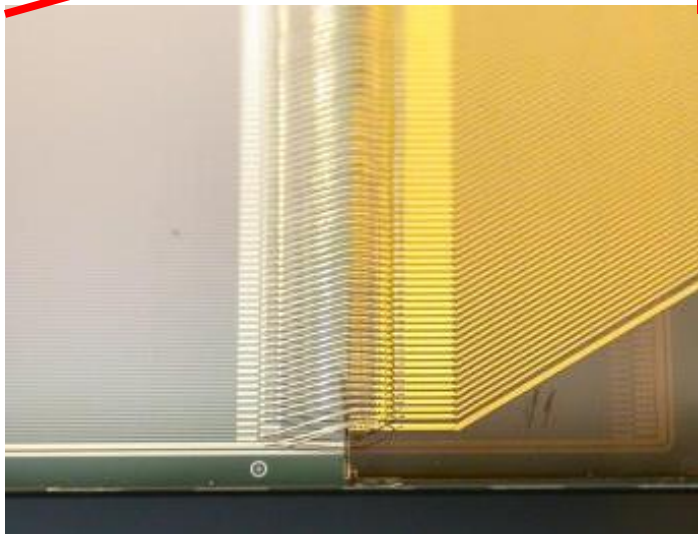


- "substrato" ($300\text{ }\mu\text{m}$, ad esempio) tutto completamente svuotato ($V_d \sim 100\text{ V}$)
- se passa una particella carica ionizza il materiale, oppure un fotone "promuove" un elettrone in conduzione per effetto fotoelettrico
- i portatori liberi migrano verso le "strip" sotto l'effetto del campo elettrico
- è possibile realizzare strutture 2D (misura di X e Y)
- è possibile non leggere tutte le strip ma avere comunque risoluzioni spaziali di $\sim 10\text{ }\mu\text{m}$ grazie al "travaso di carica" (accoppiamento capacitivo fra le strip)

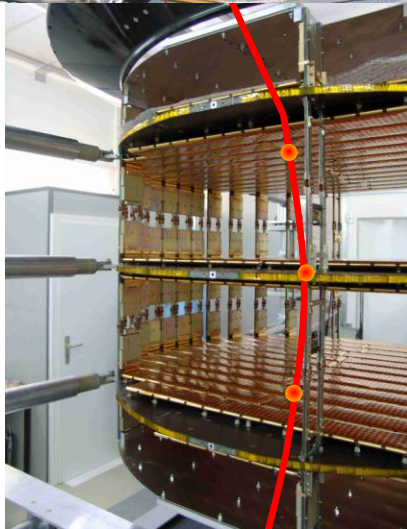
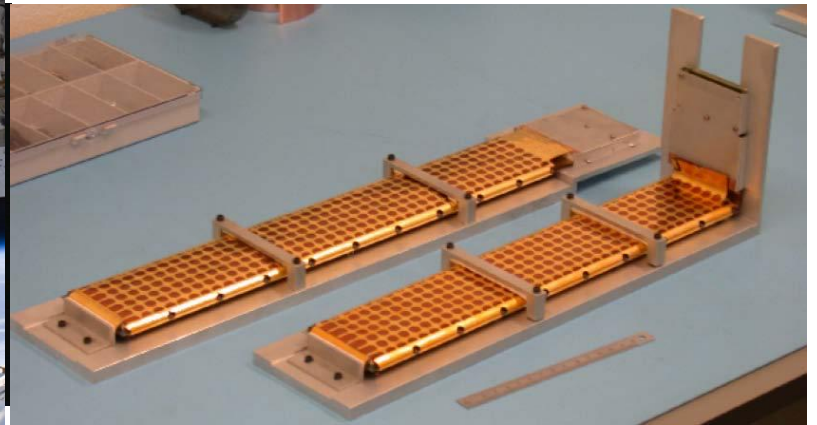


Rivelatore di particelle

Rivelatore microstrip
al silicio di AMS-02

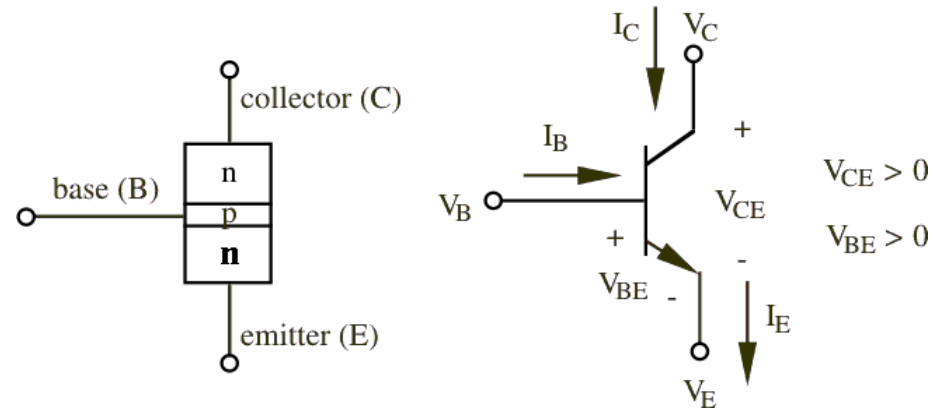


Tracciatore al Si – AMS-02

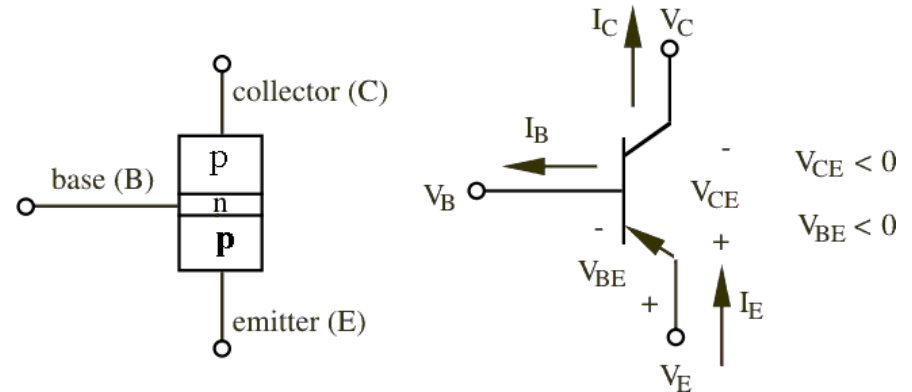


Bipolar Junction Transistor (BJT)

- 3 zone adiacenti di Si dopato (ognuna connessa ad un filo):
 - Base (sottile, poco dopata).
 - Collettore
 - Emettitore
- 2 tipi di BJT:
 - npn
 - pnp
- più comune: npn



npn bipolar junction transistor

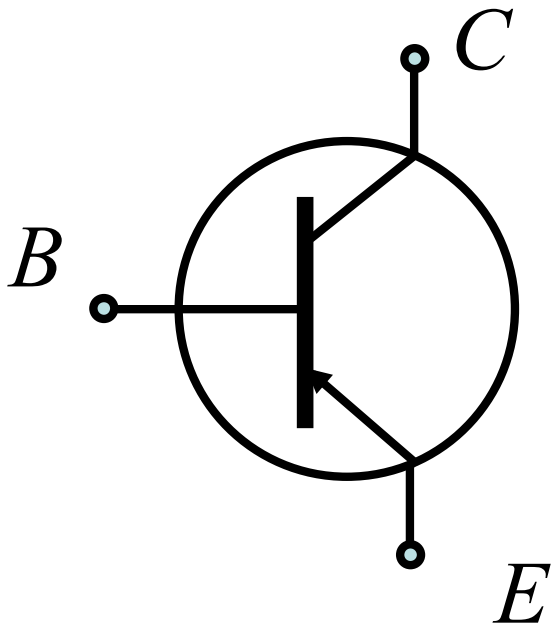


pnp bipolar junction transistor

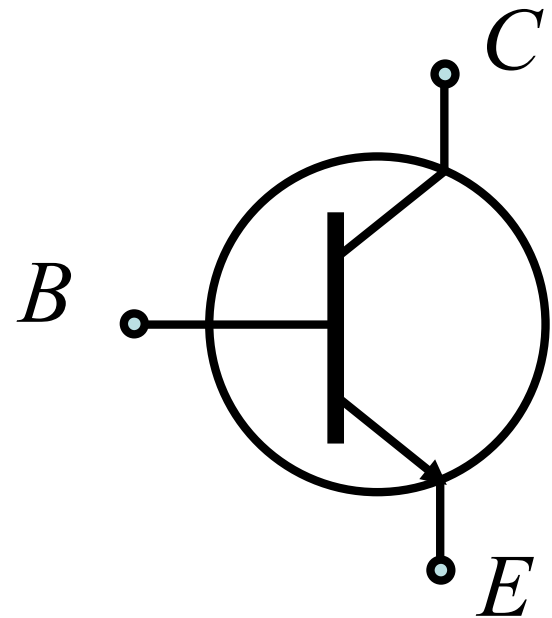
Sviluppato da
Shockley (1949)

Bipolar Junction Transistor (BJT)

pnp

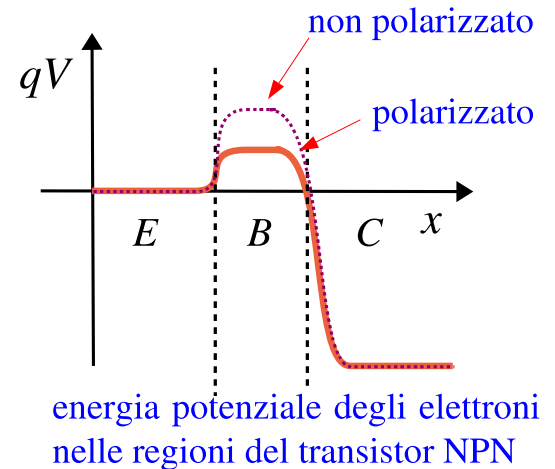
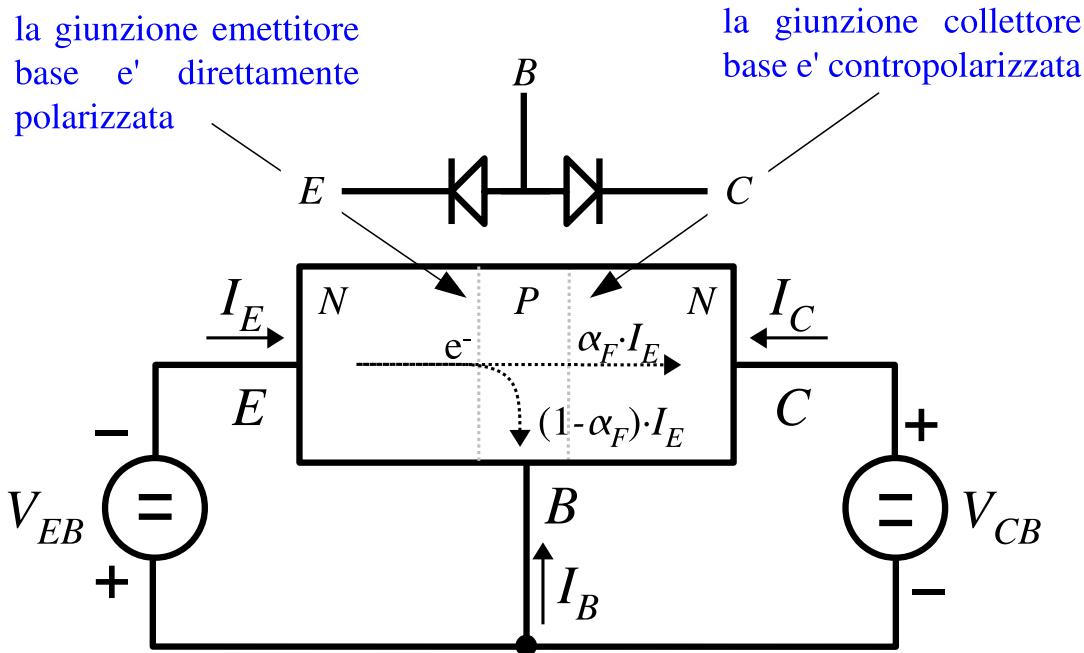


npn



Transistor BJT npn

- 1 strato sottile di p-type, fra 2 strati di n-type
- il n-type dell'Emettitore è più dopato (n^+) di quello del Collettore
- con $V_C > V_B > V_E$:
 - la giunzione B-E è polarizzata direttamente, la B-C inversamente
 - gli elettroni diffondono da E verso B (da n verso p)
 - c'è una zona di svuotamento della giunzione B-C → flusso di e^- non permesso
 - ma la B è sottile e E è n^+ → gli elettroni hanno abbastanza momento per attraversare B, verso C e quindi la maggior parte fluirà proprio verso C
 - la corrente di base, I_B (piccola), controlla quella di collettore, I_C (più grande)



Caratteristica del BJT (zona attiva)

Equazioni di Ebers-Moll semplificate:

$$I_E = -I_{ES} \cdot (e^{V_{BE}/\eta V_T} - 1)$$

$$I_C = \alpha_F I_{ES} \cdot (e^{V_{BE}/\eta V_T} - 1) = -\alpha_F I_E$$

La corrente di base I_B controlla una corrente di collettore I_C che è β_F volte più grande:

$$I_B = -I_E - I_C = \frac{I_C}{\alpha_F} - I_C = I_C \frac{1 - \alpha_F}{\alpha_F}$$

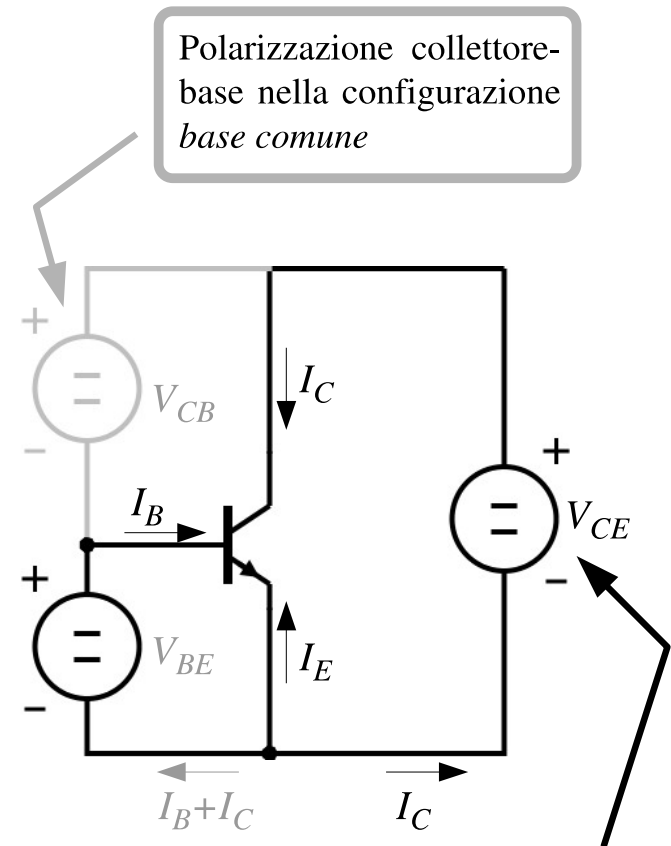
$$I_C = \frac{\alpha_F}{1 - \alpha_F} I_B = \beta_F I_B$$

coefficienti di amplificazione di corrente:

$$\alpha_F = 0.95 \dots 0.999 \quad \text{a base comune}$$

$$\beta_F = 20 \dots 1000 \quad \text{a emettitore comune}$$

$$I_E = -(\beta_F + 1) I_B$$



rapporto fra I_C e I_E
rapporto fra I_C e I_B

Polarizzazione collettore-emettitore nella configurazione emettitore comune

Materiale aggiuntivo non discusso
a lezione

Caratteristica con Emettitore Comune

la corrente di collettore è determinata dal circuito sul collettore (comportamento a interruttore)

in piena saturazione $V_{CE}=0.2V$

entrambe le giunzioni sono in interdizione: le correnti sono solo quelle di saturazione inversa

corrente di collettore proporzionale a quella di base

Parte una produzione a valanga di coppie elettrone-lacuna: da evitare

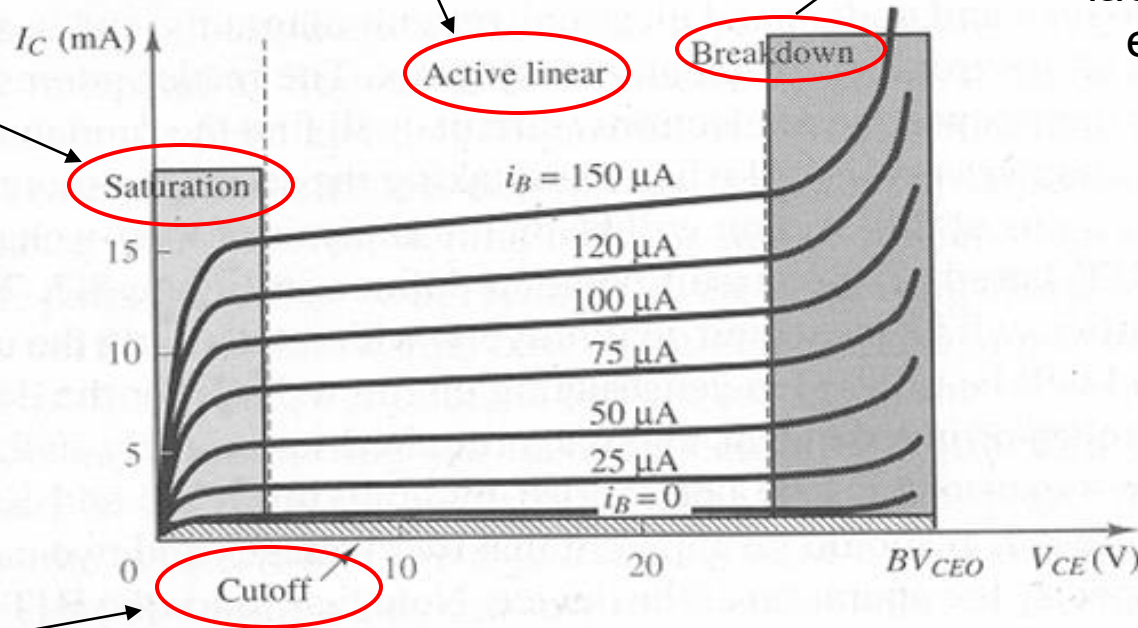
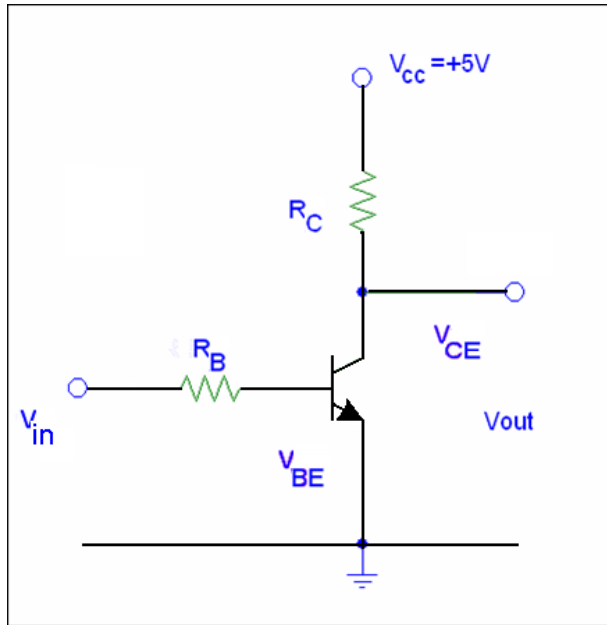


Figure 8.9(b) The collector-emitter output characteristics of a BJT

BJT come interruttore

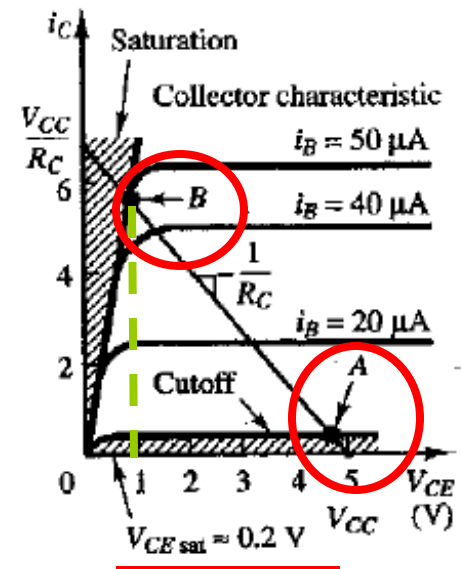


V_{in} (“bassa”) $< 0.7\text{ V}$

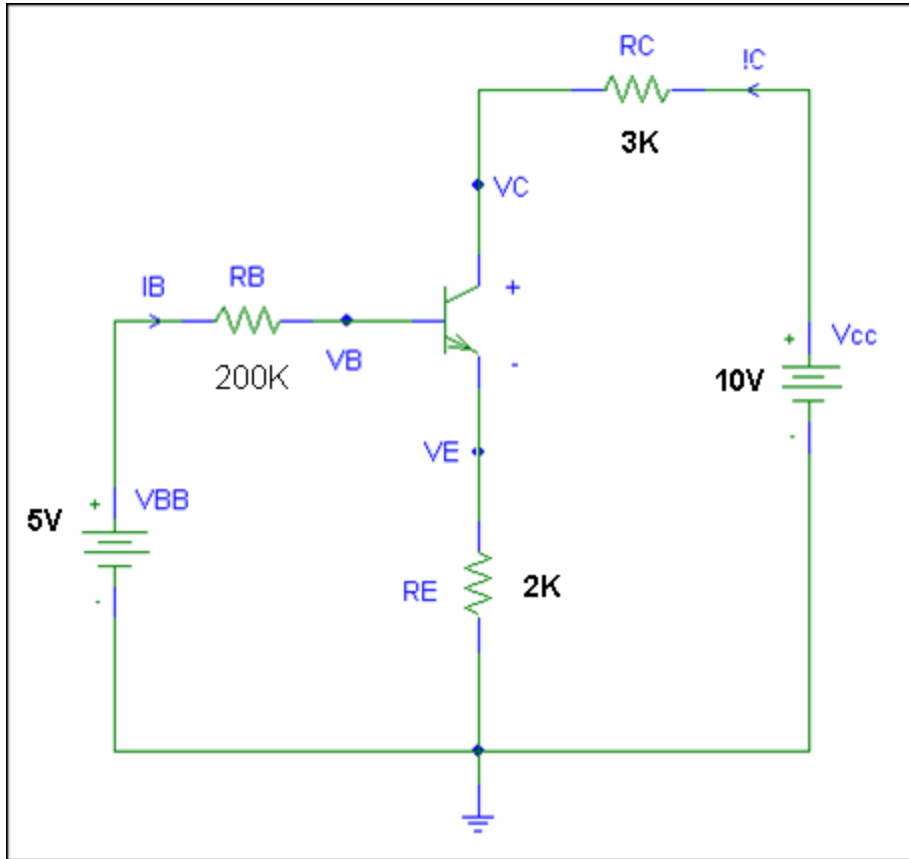
- B-E non polarizzata direttamente
- regione di **cutoff** → non fluisce corrente
- $V_{out} = V_{CE} = V_{cc}$
→ V_{out} = “alta”

V_{in} (“alta”)

- B-E polarizzata direttamente ($V_{BE} > 0.7\text{V}$)
- I_C massima → V_{CE} minima ($\sim 0.2\text{ V}$, BJT in saturazione) → regione di **saturazione**
- V_{out} = piccola
- $I_B = (V_{in} - V_B)/R_B$
→ V_{out} = “bassa”



BJT come amplificatore (zona attiva)

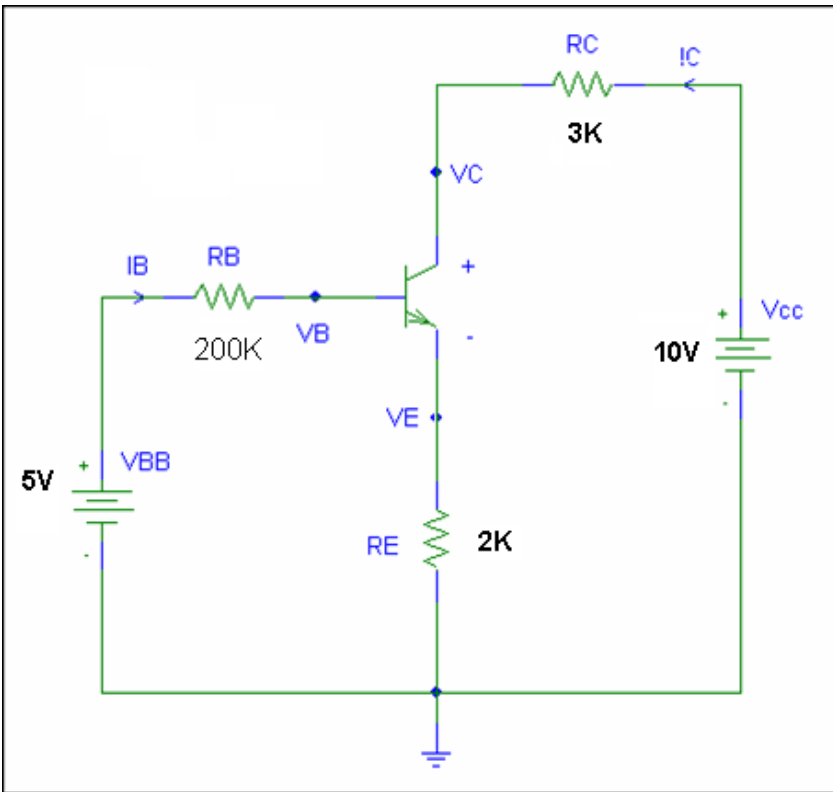


- Emettitore comune
- Regione di linearità
- Guadagno elevato

Esempio:

- guadagno, $\beta = 100$
- $V_{BE} = 0.7V$

BJT come amplificatore (zona attiva)



$$V_{BE} = 0.7V$$

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

$$I_B = \frac{V_{BB} - V_{BE}}{R_B + R_E * 101} = \frac{5 - 0.7}{402} = 0.0107mA$$

$$I_C = \beta * I_B = 100 * 0.0107 = 1.07mA$$

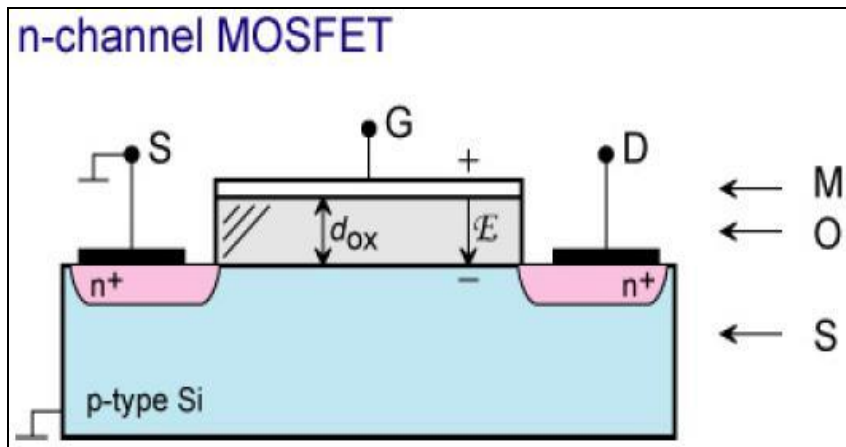
$$\begin{aligned} V_{CB} &= V_{CC} - I_C * R_C - I_E * R_E - V_{BE} = \\ &= 10 - (3)(1.07) - (2)(101 * 0.0107) - 0.7 = \\ &= 3.93V \end{aligned}$$

$V_{CB} > 0$ quindi il BJT è nella zona attiva

Field Effect Transistors - FET

- 1955 : the first Field effect transistor works
- Similar to the BJT:
 - Three terminals,
 - Control the output current

BJT Terminal	FET Terminal
Base	Gate
Collector	Drain
Emitter	Source



Enhancement mode

MOSFET: Metal-Oxide Semiconductor
Field Effect Transistor