

# **Laboratorio II, modulo 2**

## **2016-2017**

### **Transistor**

**(cfr. <http://studenti.fisica.unifi.it/~carla/appunti/2008-9/cap.4.pdf>**

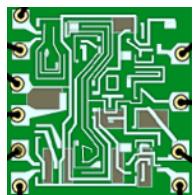
**[http://ume.gatech.edu/mechatronics\\_course/Transistor\\_F04.ppt](http://ume.gatech.edu/mechatronics_course/Transistor_F04.ppt))**

# Storia del Transistor

- Inventati nel **1947**, ai Bell Laboratories.
- John Bardeen, Walter Brattain, and William Shockley 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?

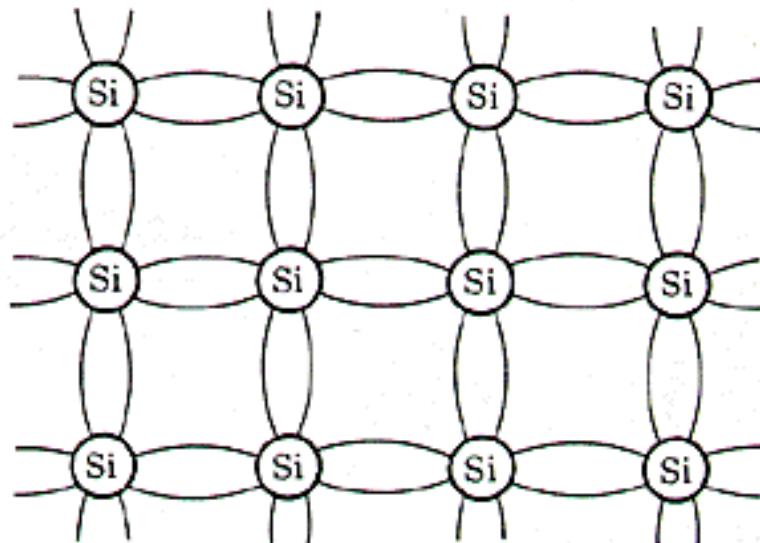
- Il transistor è un dispositivo a semiconduttore a 3 terminali
- E' possibile, con un transistor, controllare la corrente elettrica o il voltaggio fra due terminali applicando una corrente elettrica o un voltaggio al terzo. E' un componente "attivo".
- Con il transistor possiamo fare dispositivi amplificanti 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 di 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

# Semiconduttori: dopaggio

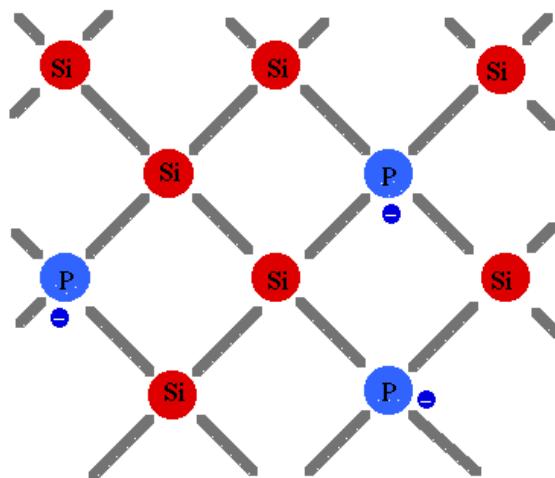
Due tipi di dopaggio

## 1. *N-type* (negativo)

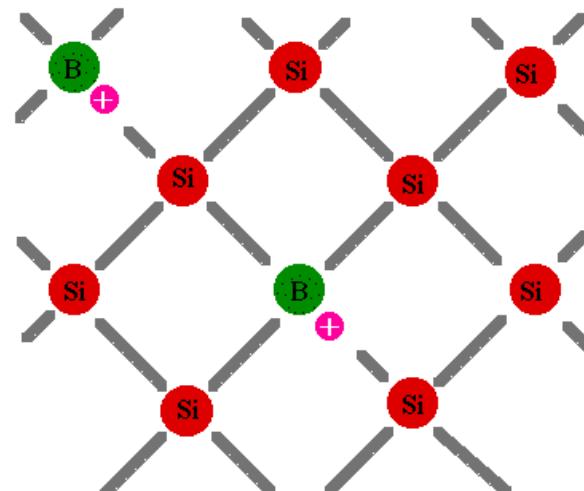
- impurità di **donori** (dal Gruppo V) aggiunte al reticolo cristallino del Si
- portatori di carica dominante: **elettroni negativi**
- elementi del **Gruppo V** come **Fosforo, Arsenico e Antimonio**

## 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**



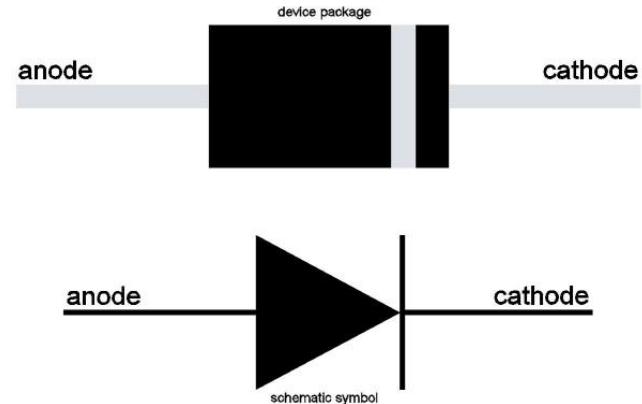
*N-type*



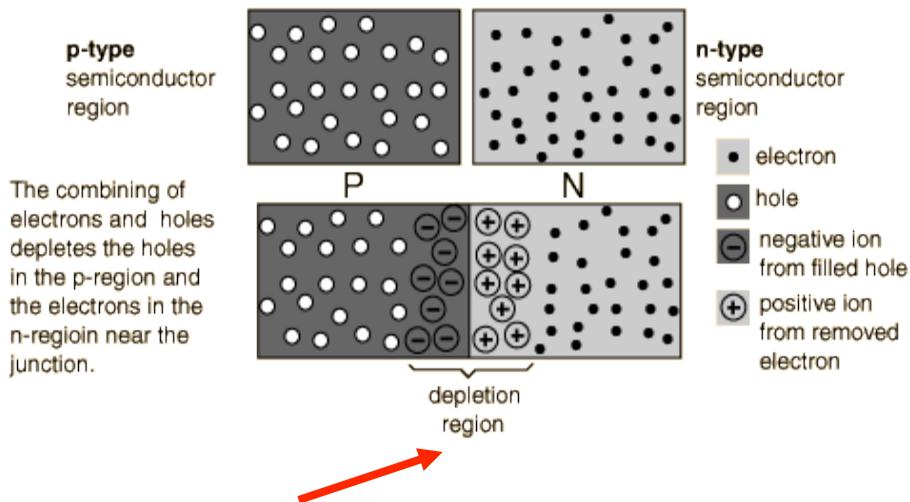
*P-type*

# Costituente base: la giunzione p-n

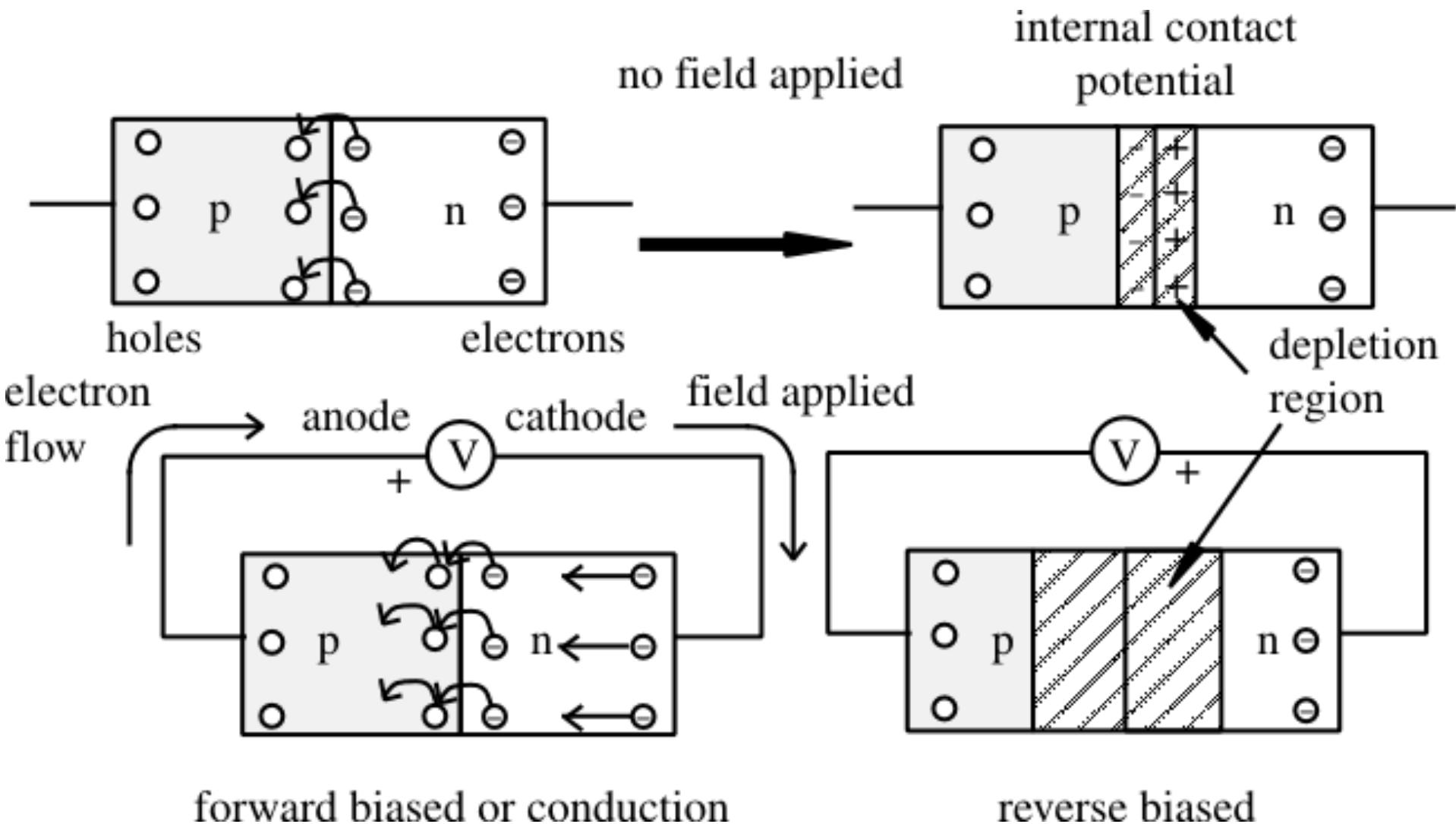
- chiamata anche **diodo**
- permette alla corrente, idealmente, di scorrere solamente da *p* verso *N*



- A causa del gradiente di densità gli 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



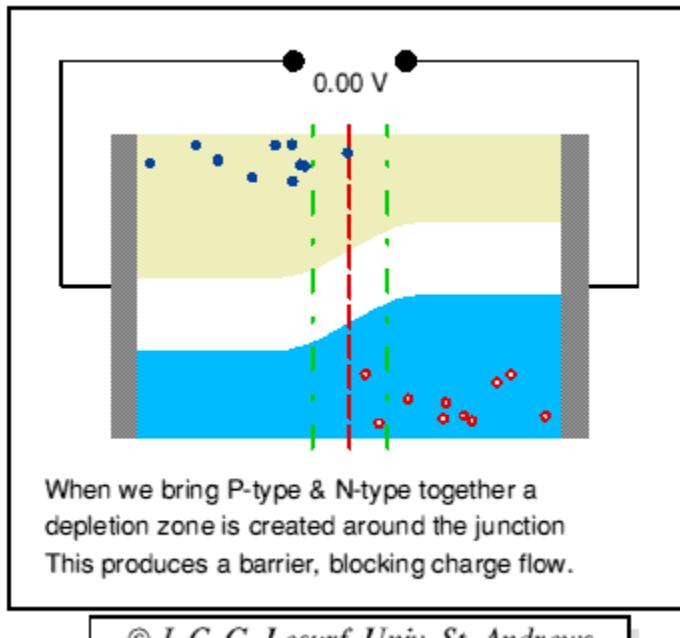
# Bias esterno



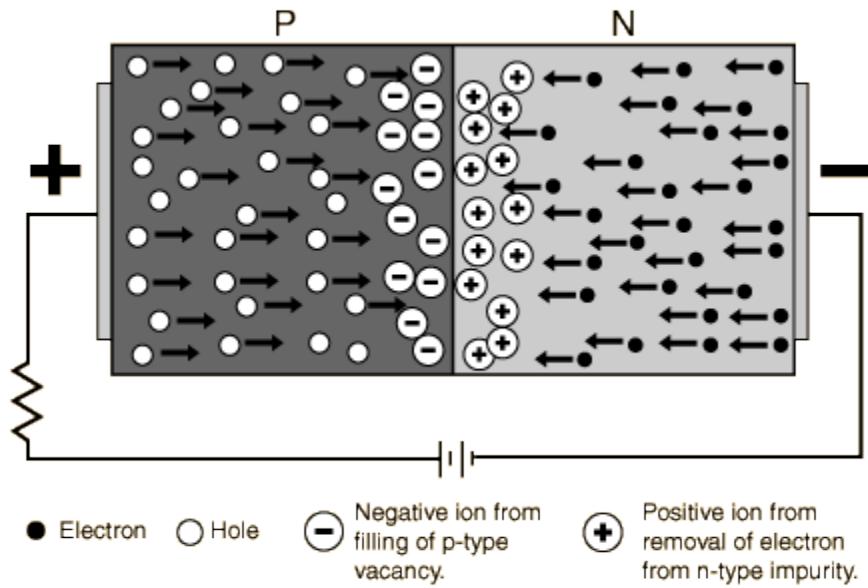
# Polarizzazione (bias) diretta

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



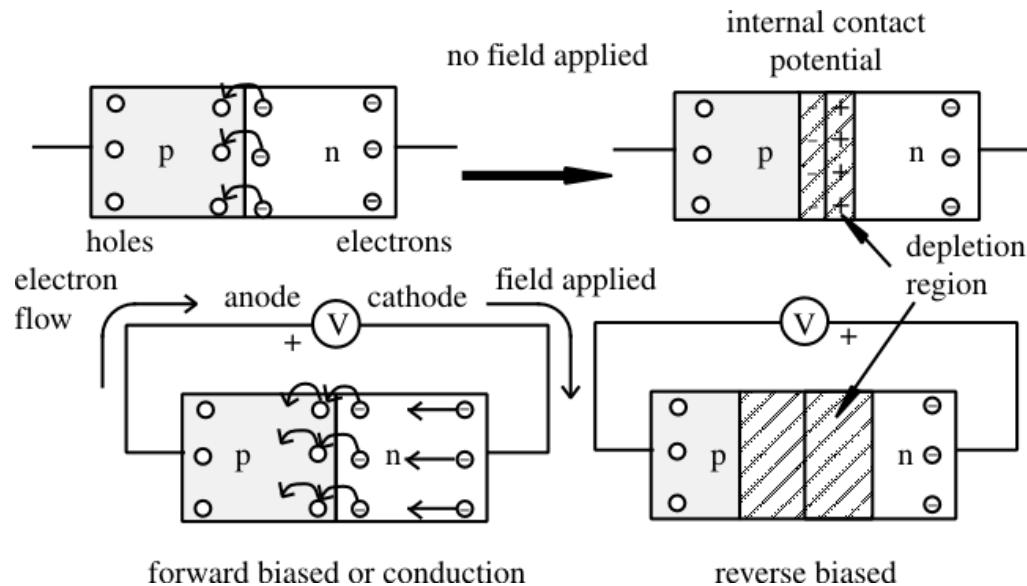
© J. C. G. Lesurf Univ. St. Andrews



# Polarizzazione inversa

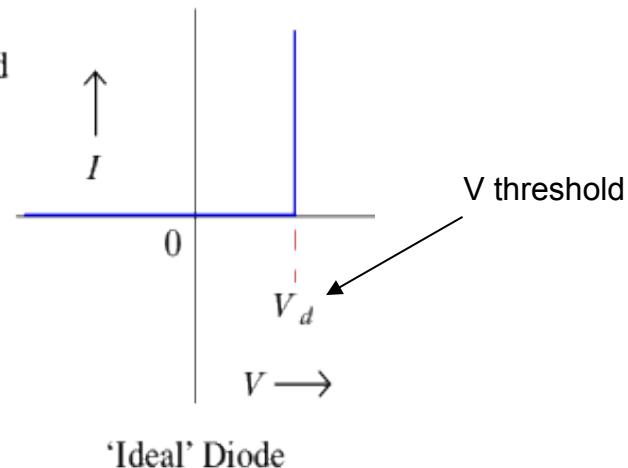
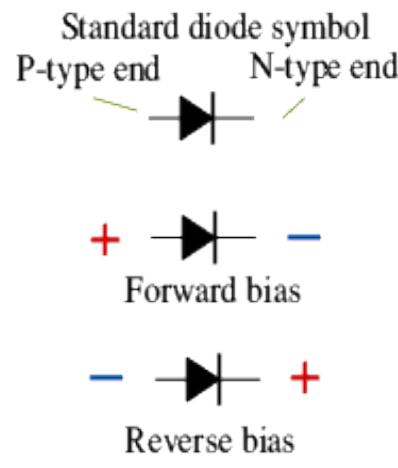
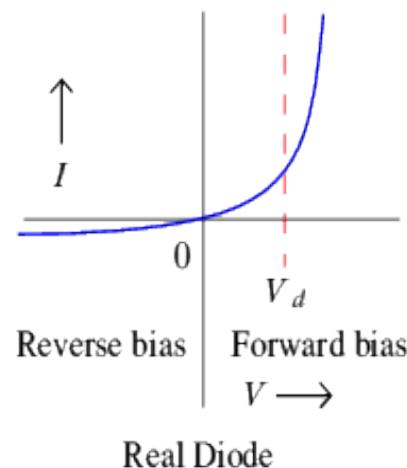
polarizzazione inversa:

- 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 egualia il voltaggio esterno applicato la corrente transiente si ferma (ad eccezione di una piccola corrente "termica")



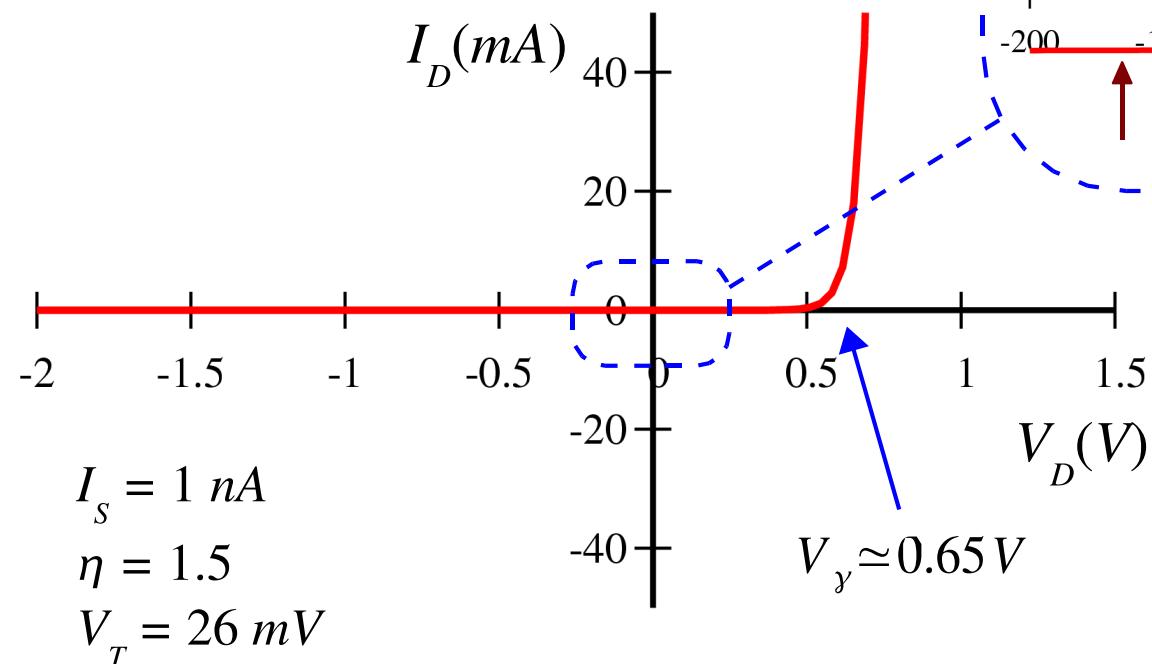
# Caratteristica del diodo

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

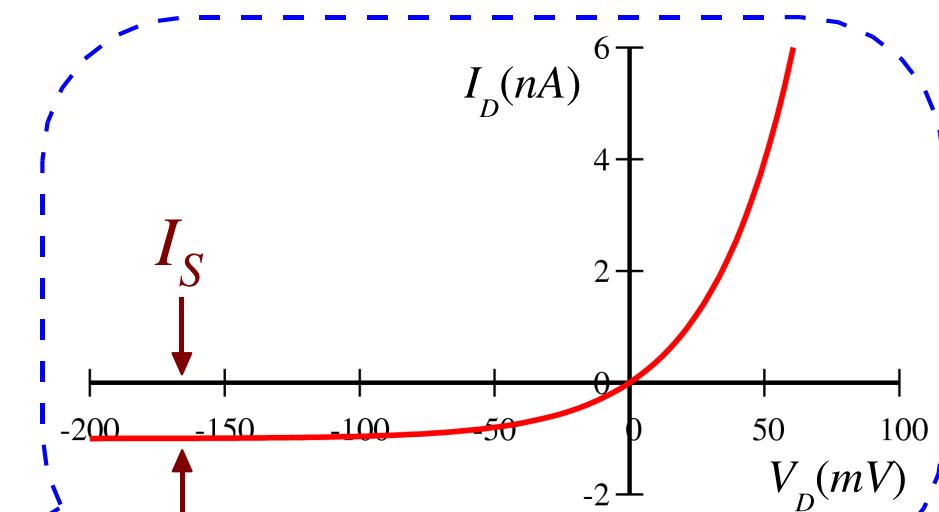
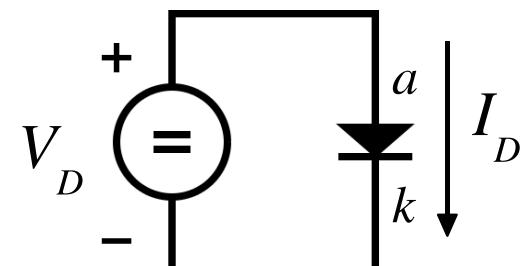


# Caratteristica del diodo

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



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



# Il diodo come rivelatore di particelle

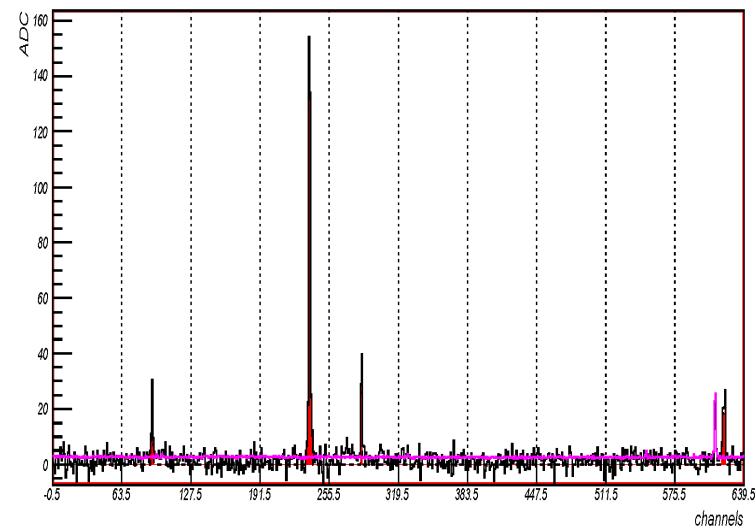
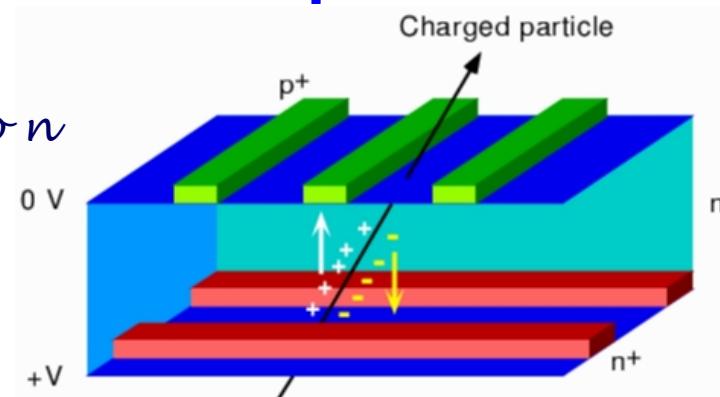
→ Una particella carica attraversa un sottile strato ( $300\mu m$ ) di silicio drogato n ed interagendo con il materiale libera 24000 coppie e/h ( $\propto Z^2$ )

→ Sulla superficie del silicio sono impiantate delle sottili strisce di drogaggio p+ ( $6\mu m$  ogni  $108\mu m$ ) ed il sistema p+-n è mantenuto in condizioni di polarizzazione inversa

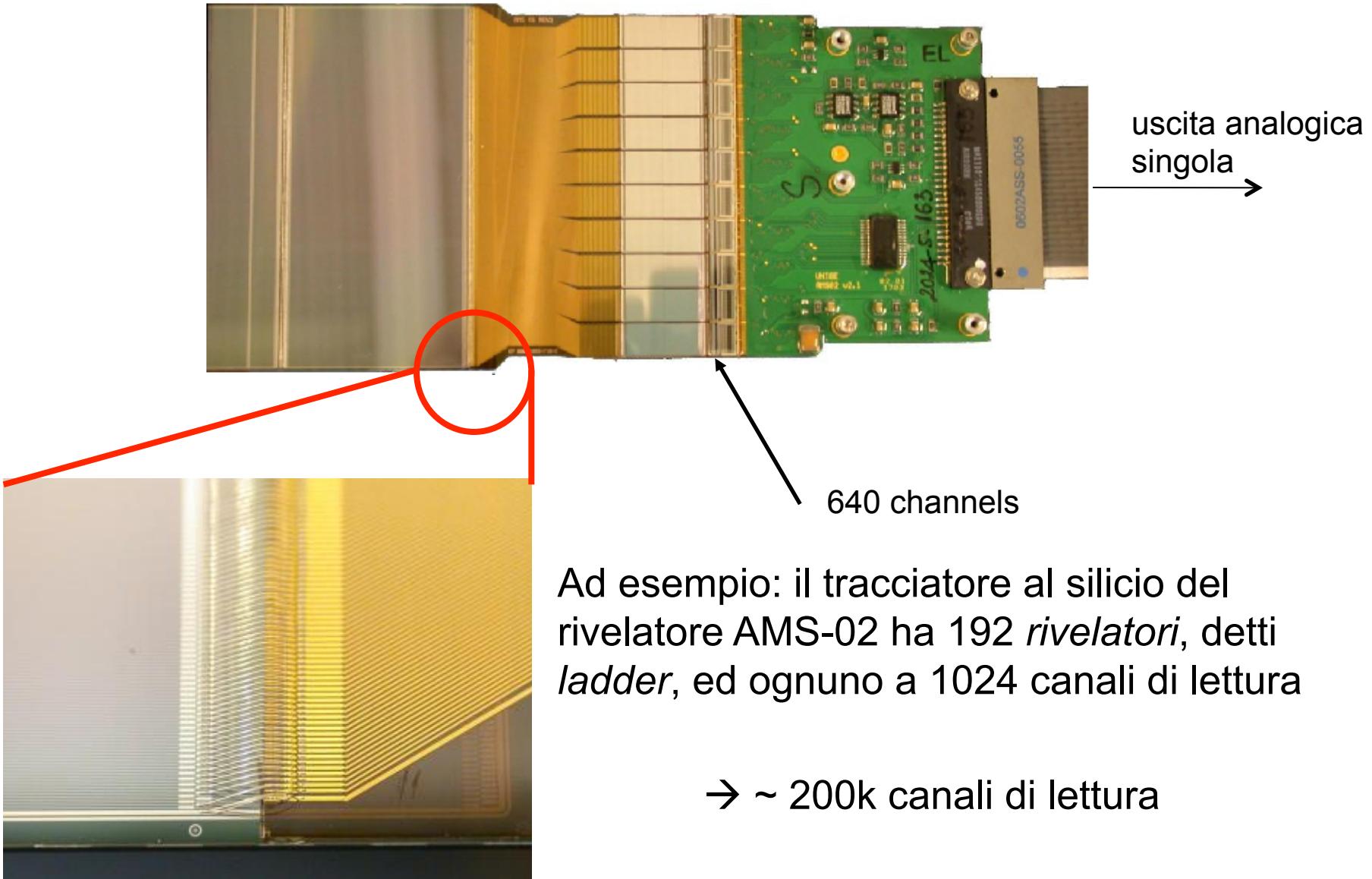
→ Le cariche e/h generate vengono raccolte dalle due parti della giunzione sulle strisce p+ e su delle strisce n+ dirette in senso ortogonale tramite contatti metallici

→ L'ampiezza del segnale rilasciato ci permette di valutare la carica Z della particella

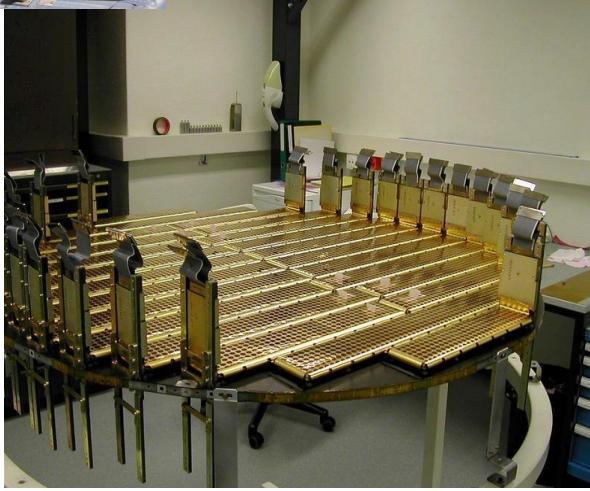
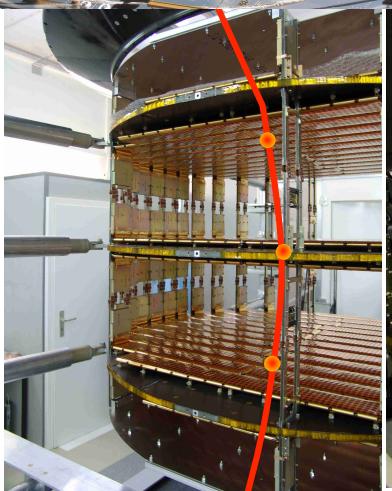
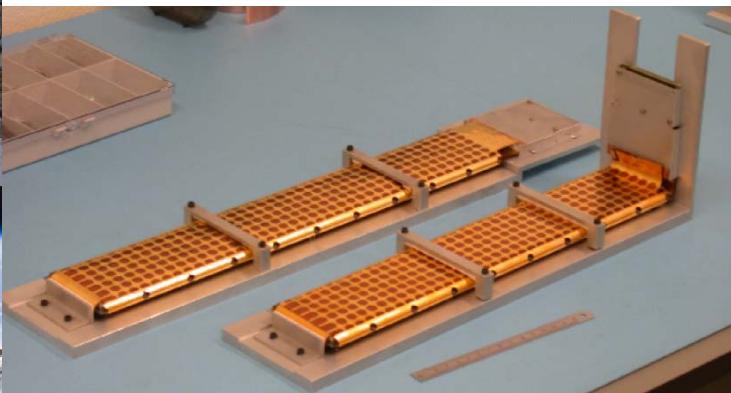
→ La posizione della striscia colpita permette di risalire alla posizione di passaggio della particella



# Rivelatore di particelle

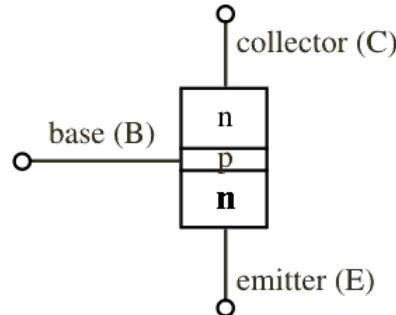


# Tracciatore al Si - AMS-02

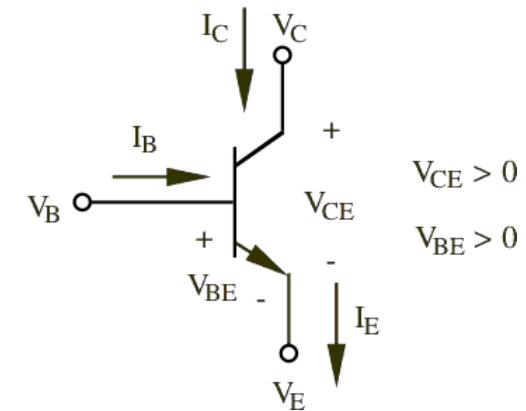


# Bipolar Junction Transistor (BJT)

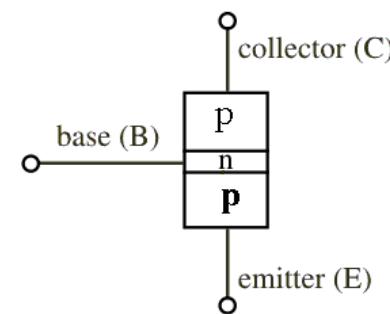
- 3 zone adiacenti di Si dopato (ognuna connessa ad un filo):
  - Base (sottile, poco dopata).
  - Collettore
  - Emettitore
- 2 tipi di BJT:
  - npn
  - pnp
- più comune: npn



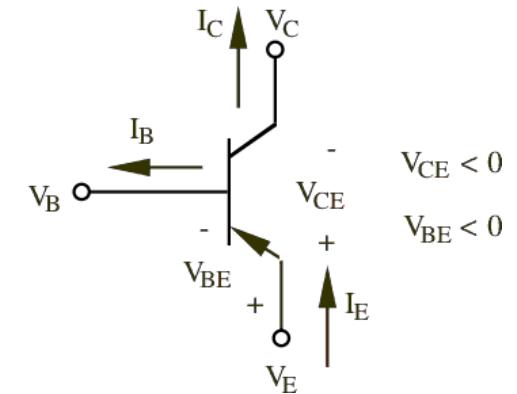
npn bipolar junction transistor



$$V_{CE} > 0$$
$$V_{BE} > 0$$



pnp bipolar junction transistor

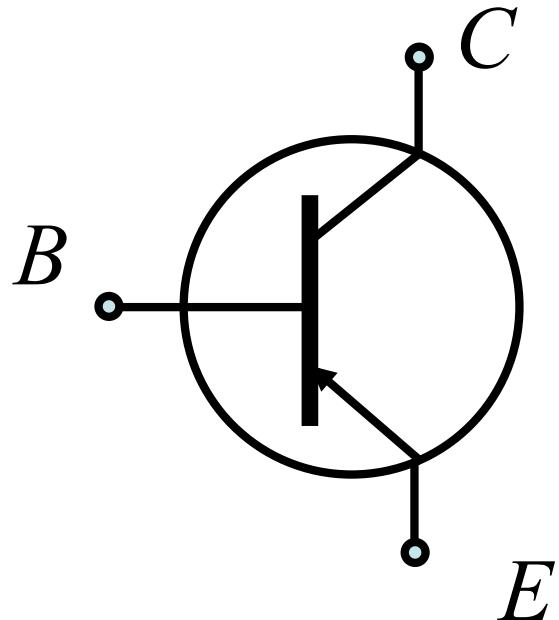


$$V_{CE} < 0$$
$$V_{BE} < 0$$

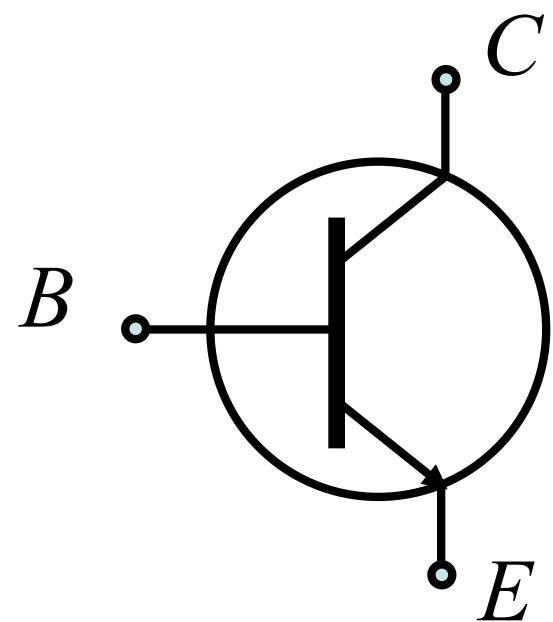
Sviluppato da  
Shockley (1949)

# Bipolar Junction Transistor (BJT)

*pnp*

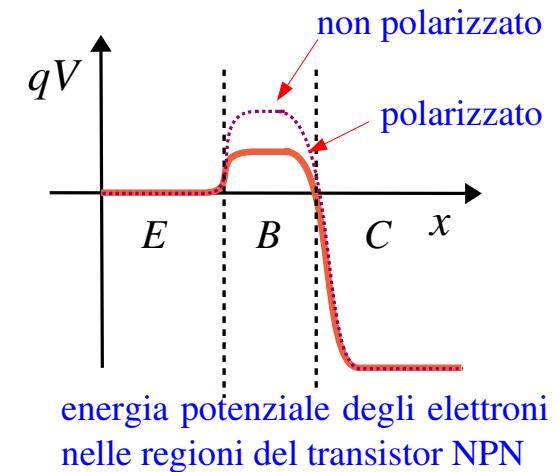
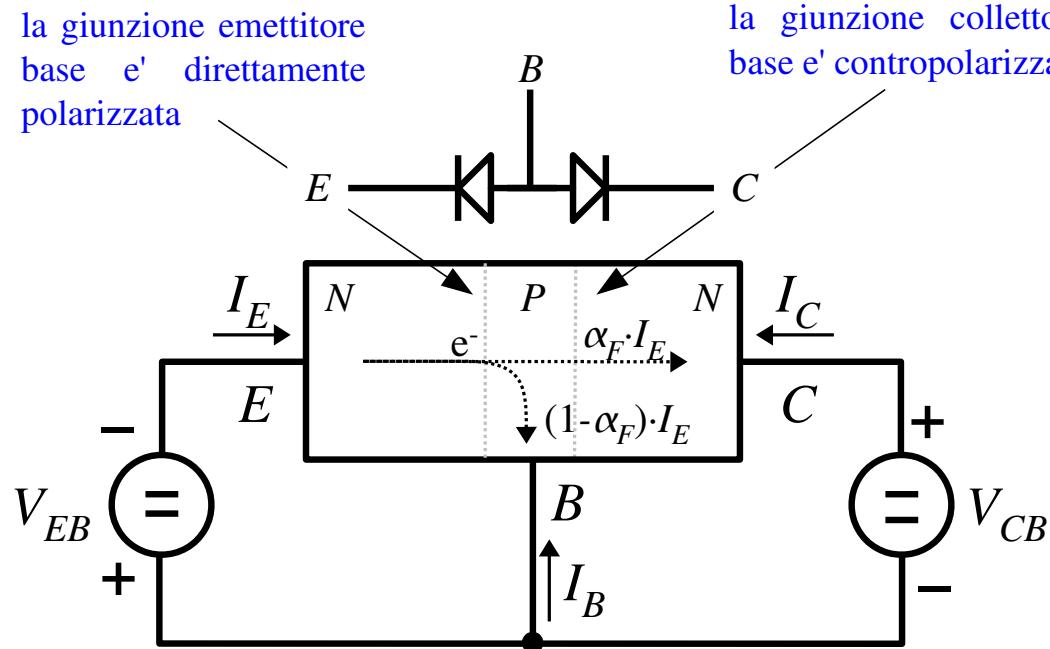


*npn*



# 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:

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

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

La corrente di base  $I_B$  controlla una corrente di collettore  $I_C$  che è  $\beta_F$  volte più grande:

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

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

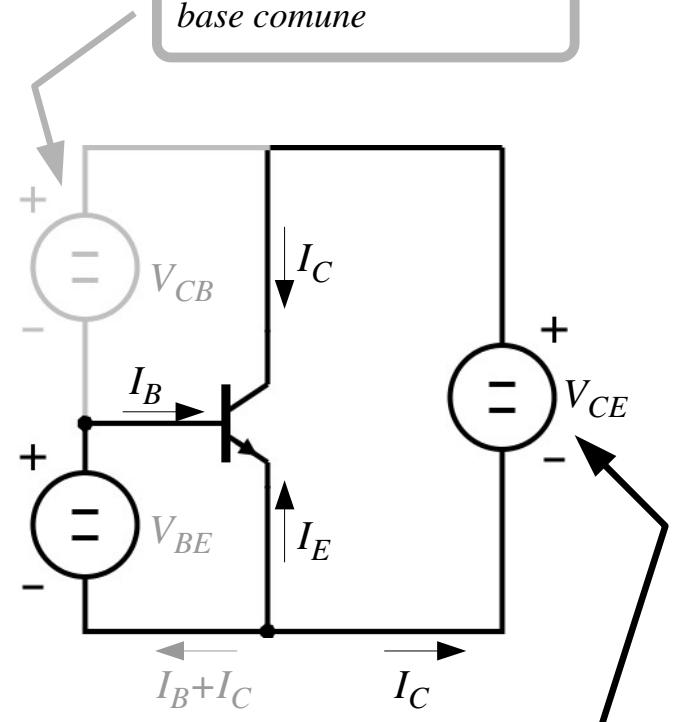
coeffienti di amplificazione di corrente:

$\alpha_F = 0.95 \dots 0.999$  a base comune

$\beta_F = 20 \dots 1000$  a emettitore comune

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

Polarizzazione collettore-base nella configurazione *base comune*



rapporto fra  $I_C$  e  $I_E$

rapporto fra  $I_C$  e  $I_B$

Polarizzazione collettore-emettitore nella configurazione *emettitore comune*

# 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 inversa

corrente di collettore proporzionale a quella di base

Parte una produzione a valanga di coppie elettron-iacuna: da evitare

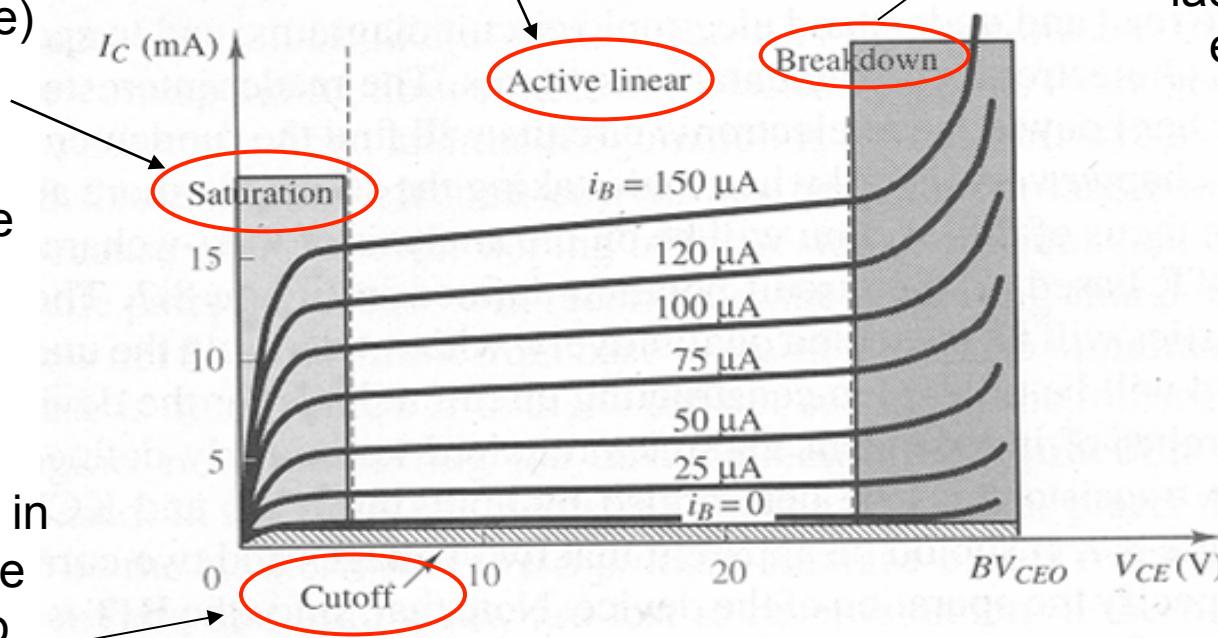
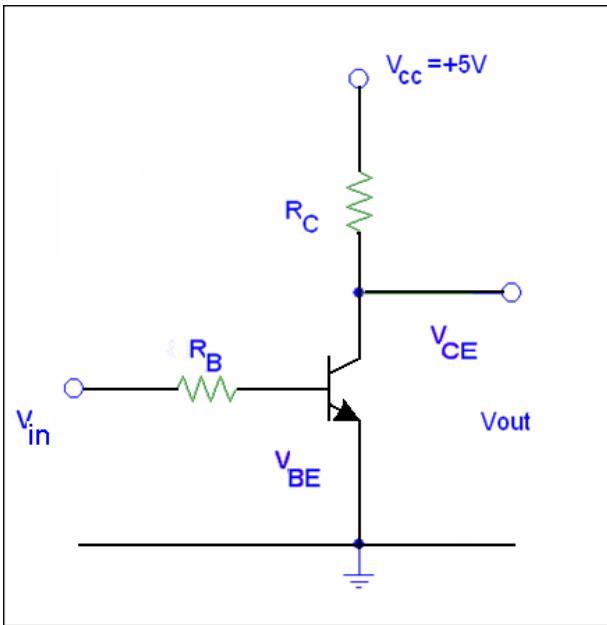


Figure 8.9(b) The collector-emitter output characteristics of a BJT

# BJT come interruttore

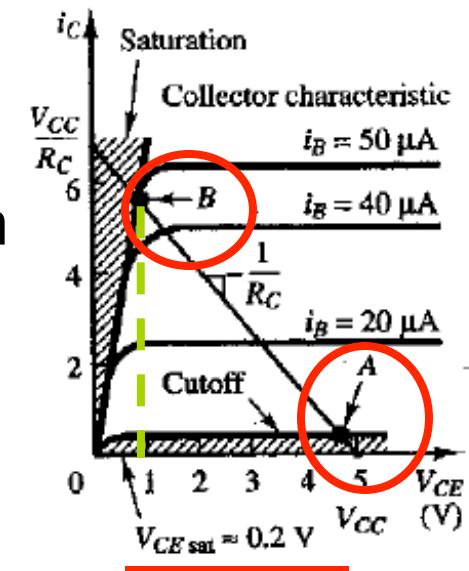


$V_{in}$  ("bassa") < 0.7 V

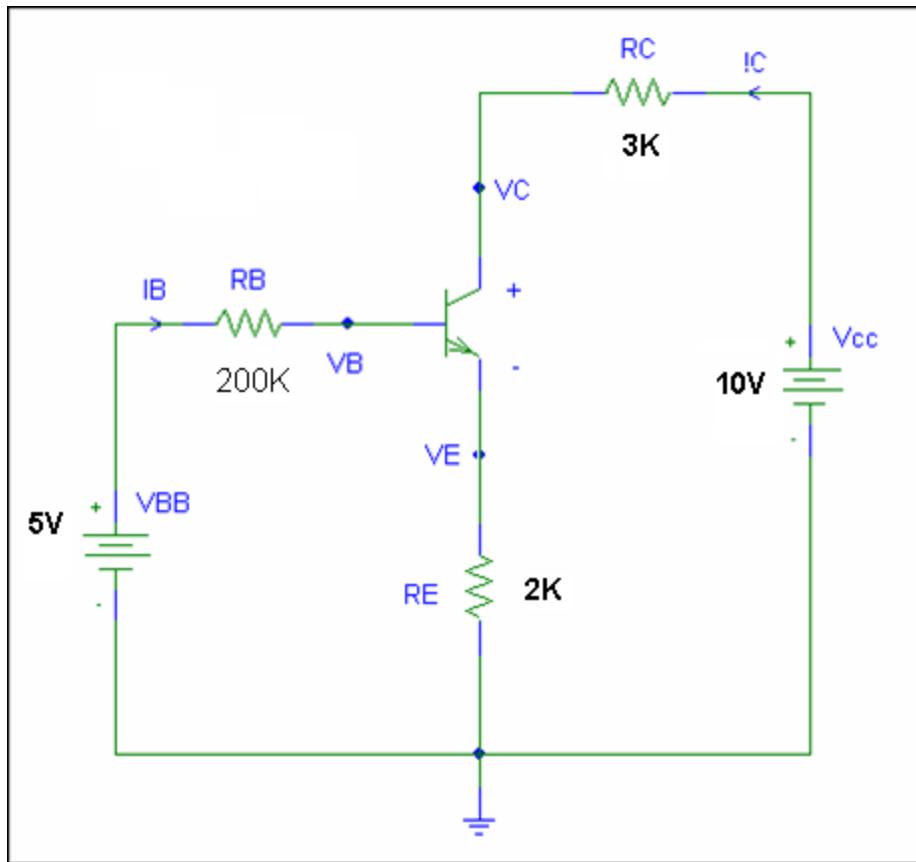
- B-E non polarizzata direttamente
  - regione di **cutoff** → non fluisce corrente
  - $V_{out} = V_{CE} = V_{cc}$
- $V_{out}$  = "alta"

$V_{in}$  ("alta")

- B-E polarizzata direttamente ( $V_{BE} > 0.7V$ )
  - $I_c$  massima →  $V_{CE}$  minima ( $\sim 0.2$  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)

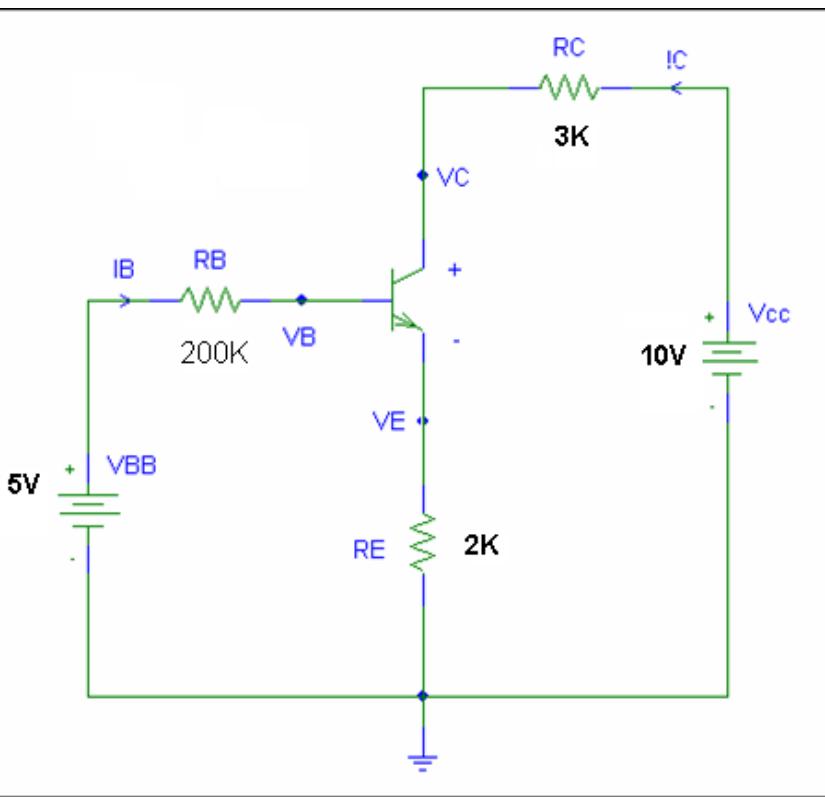


- Emettitore comune
- Regione di linearità
- Guadagno elevato

Esempio:

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

# BJT come amplificatore (zona attiva)



$$V_{BE} = 0.7V$$

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

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

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

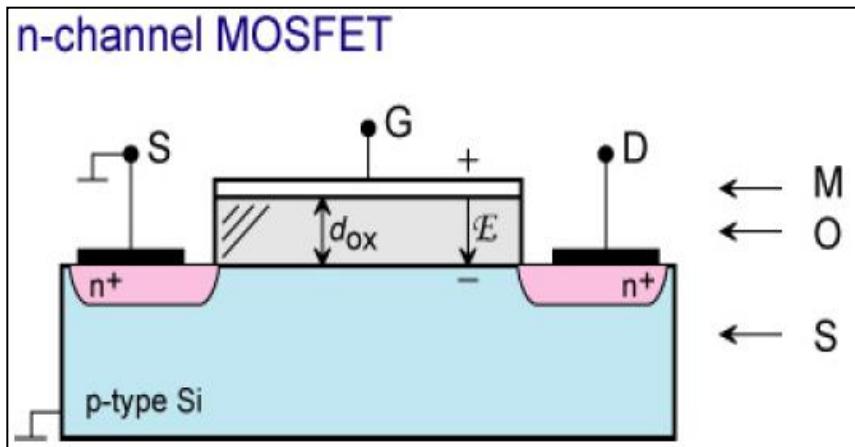
$$\begin{aligned} V_{CB} &= V_{CC} - I_C * R_C - I_E * R_E - V_{BE} = \\ &= 10 - (3)(1.07) - (2)(101 * 0.0107) - 0.7 = \\ &= 3.93V \end{aligned}$$

$V_{CB} > 0$  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