

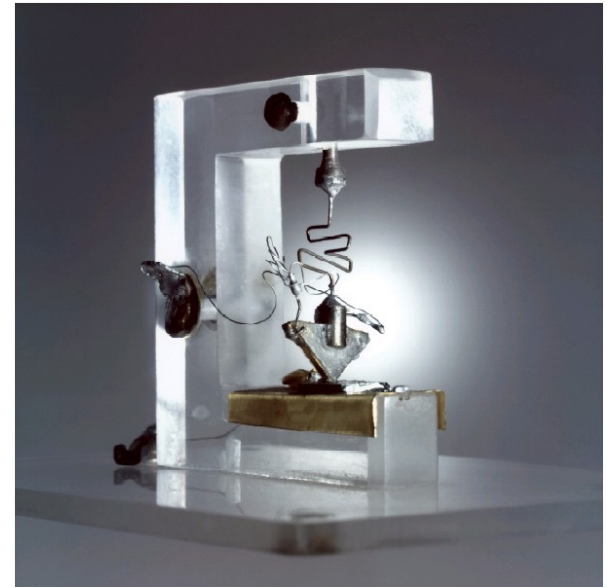
# **Laboratorio di Elettronica e Tecniche di Acquisizione Dati 2022-2023**

## **Transistor**

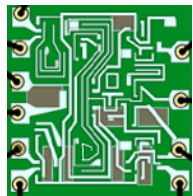
(cfr. <http://studenti.fisica.unifi.it/~carla/appunti/2008-9/cap.4.pdf>  
[http://ume.gatech.edu/mechatronics\\_course/Transistor\\_F04.ppt](http://ume.gatech.edu/mechatronics_course/Transistor_F04.ppt))

# Storia del Transistor

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

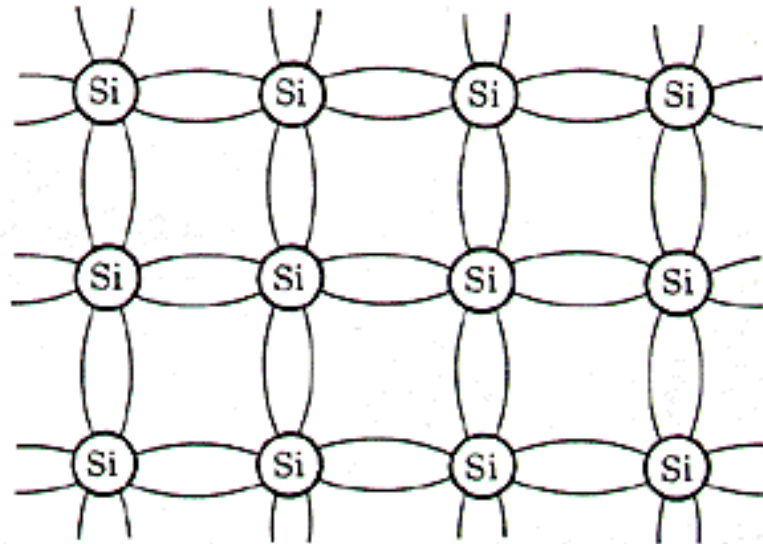


# Semiconduttori

Semiconduttore comunemente utilizzato:

- Silicio

- è il materiale di base per la maggior parte dei circuiti integrati
- ha 4 elettroni di valenza, nel reticolo 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

**Periodic Table of the Elements**

Representative (main group) elements		Transition metals										Representative (main group) elements							
IA												IIIA	IVA	VA	VIA	VIIA	VIIIA		
1	<b>H</b> 1.0079											<b>B</b> 10.811	<b>C</b> 12.011	<b>N</b> 14.007	<b>O</b> 15.999	<b>F</b> 18.998	<b>Ne</b> 20.180		
2	<b>Li</b> 6.941	<b>Be</b> 9.012											<b>Al</b> 26.982	<b>Si</b> 28.086	<b>P</b> 30.974	<b>S</b> 32.066	<b>Cl</b> 35.453	<b>Ar</b> 39.948	
3	<b>Na</b> 22.990	<b>Mg</b> 24.305											<b>Ga</b> 69.723	<b>Ge</b> 72.61	<b>As</b> 74.922	<b>Se</b> 78.96	<b>Br</b> 79.904	<b>Kr</b> 83.8	
4	<b>K</b> 39.098	<b>Ca</b> 40.078	<b>Sc</b> 44.956	<b>Ti</b> 47.88	<b>V</b> 50.942	<b>Cr</b> 51.996	<b>Mn</b> 54.938	<b>Fe</b> 55.845	<b>Co</b> 58.933	<b>Ni</b> 58.69	<b>Cu</b> 63.546	<b>Zn</b> 65.39	<b>In</b> 114.82	<b>Sn</b> 118.71	<b>Sb</b> 121.76	<b>Te</b> 127.60	<b>I</b> 126.905	<b>Xe</b> 131.29	
5	<b>Rb</b> 85.468	<b>Sr</b> 87.62	<b>Y</b> 88.906	<b>Zr</b> 91.224	<b>Nb</b> 92.906	<b>Mo</b> 95.94	<b>Tc</b> 98	<b>Ru</b> 101.07	<b>Rh</b> 102.906	<b>Pd</b> 106.42	<b>Ag</b> 107.868	<b>Cd</b> 112.411	<b>Bi</b> 208.980	<b>Po</b> 209	<b>At</b> 210	<b>Rn</b> 222			
6	<b>Cs</b> 132.905	<b>Ba</b> 137.327	<b>La</b> 138.906	<b>Hf</b> 178.49	<b>Ta</b> 180.948	<b>W</b> 183.84	<b>Re</b> 186.207	<b>Os</b> 190.23	<b>Ir</b> 192.22	<b>Pt</b> 195.08	<b>Au</b> 196.967	<b>Hg</b> 200.59	<b>Tl</b> 204.383	<b>Pb</b> 207.2	<b>Bi</b> 208.980	<b>Po</b> 209	<b>At</b> 210	<b>Rn</b> 222	
7	<b>Fr</b> 223	<b>Ra</b> 226.025	<b>Ac</b> 227.028	<b>Rf</b> 261	<b>Db</b> 262	<b>Sg</b> 263	<b>Bh</b> 262	<b>Hs</b> 265	<b>Mt</b> 266	<b>Uun</b> 269	<b>Uuu</b> 272	<b>Uub</b> 277							
			Rare earth elements																
Lanthanides			<b>Ce</b> 140.115	<b>Pr</b> 140.908	<b>Nd</b> 144.24	<b>Pm</b> 145	<b>Sm</b> 150.36	<b>Eu</b> 151.964	<b>Gd</b> 157.25	<b>Tb</b> 158.925	<b>Dy</b> 162.5	<b>Ho</b> 164.93	<b>Er</b> 167.26	<b>Tm</b> 168.934	<b>Yb</b> 173.04	<b>Lu</b> 174.967			
Actinides			<b>Th</b> 232.038	<b>Pa</b> 231.036	<b>U</b> 238.029	<b>Np</b> 237.048	<b>Pu</b> 244	<b>Am</b> 243	<b>Cm</b> 247	<b>Bk</b> 247	<b>Cf</b> 251	<b>Es</b> 252	<b>Fm</b> 257	<b>Md</b> 258	<b>No</b> 259	<b>Lr</b> 262			

# Semiconduttori: dopaggio

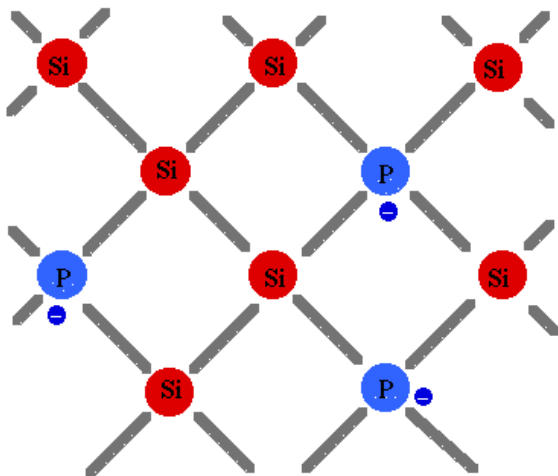
Due tipi di dopaggio

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

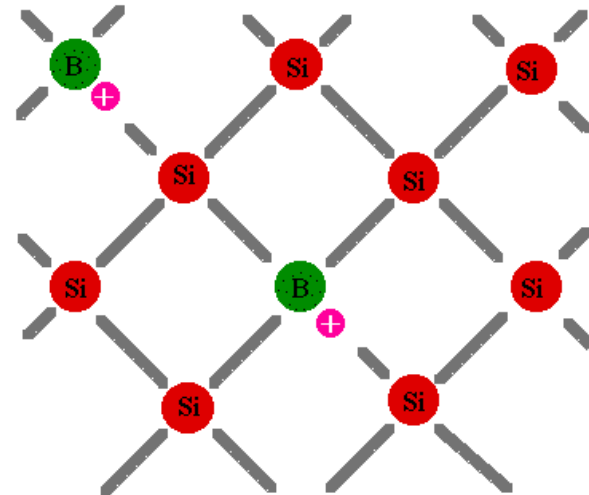
- impurità di **donori** (dal Gruppo V) aggiunte al reticolo cristallino del Si
- portatori di carica dominante: **elettroni negativi**
- elementi del **Gruppo V** come **Fosforo, Arsenico e Antimonio**

## 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**



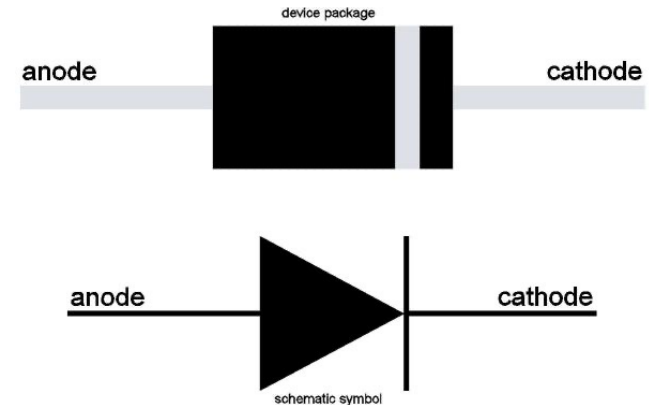
*N-type*



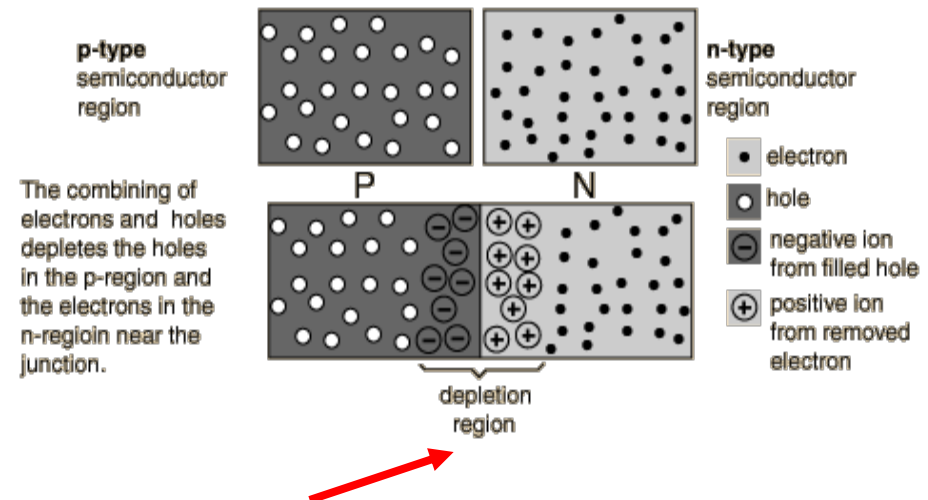
*P-type*

# Costituente base: la giunzione p-n

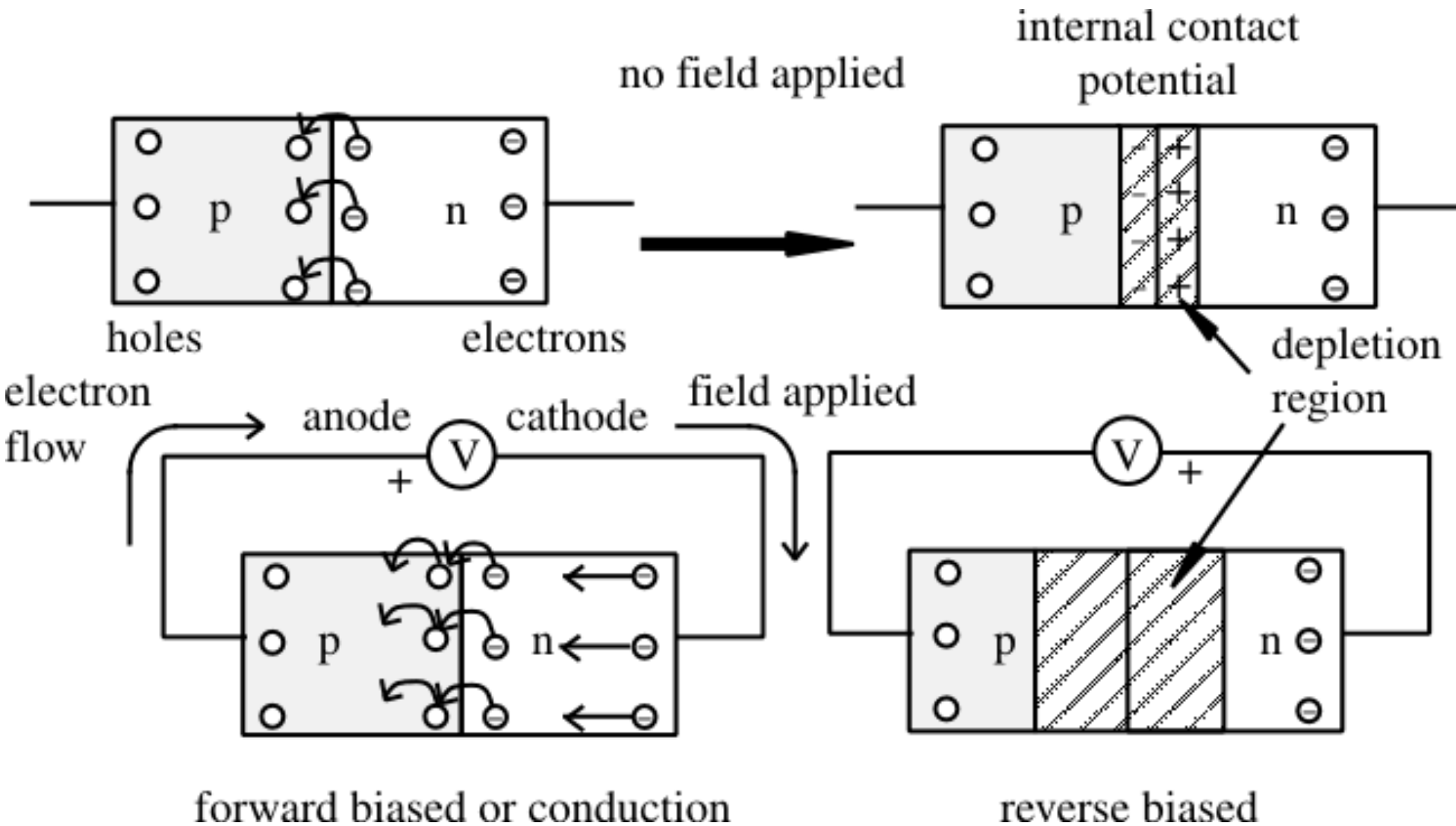
- chiamata anche **diodo**
- permette alla corrente, idealmente, di scorrere solamente da *p* verso *N*



- 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

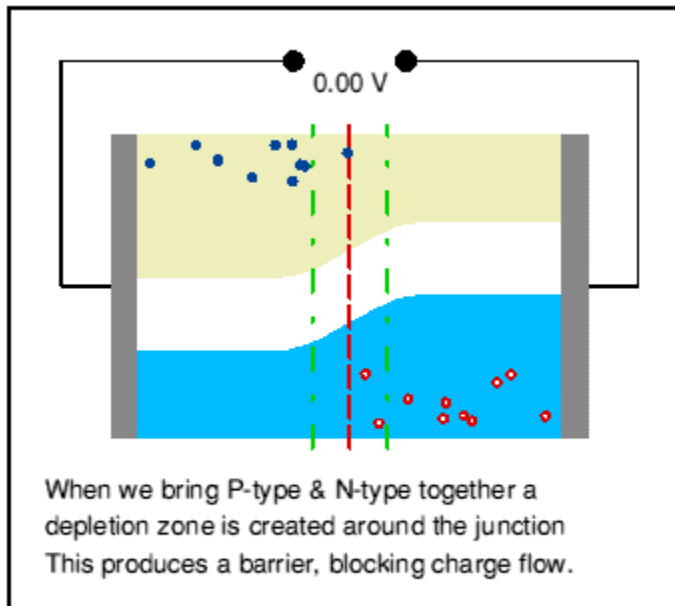




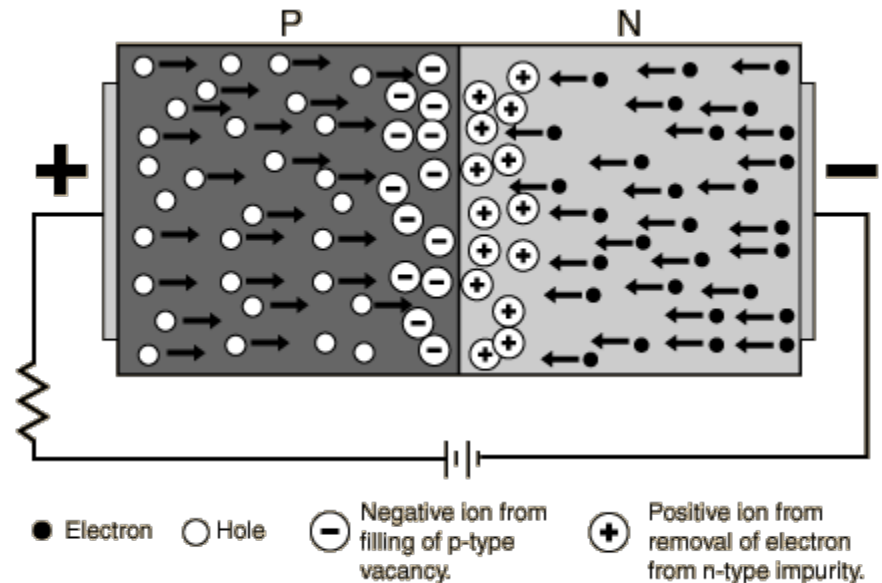
# Polarizzazione (bias) diretta

## 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



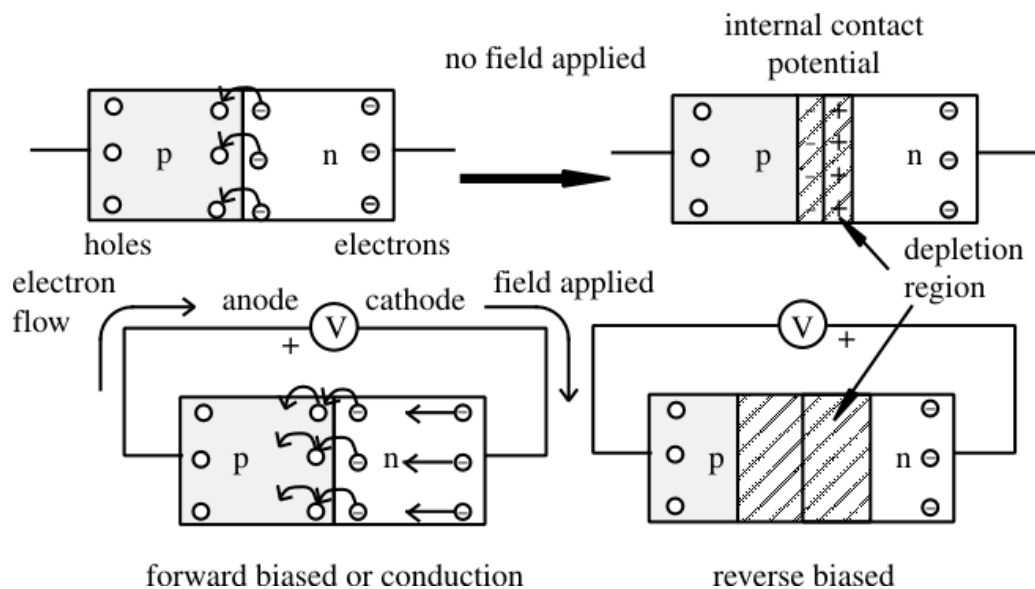
© J. C. G. Lesurf Univ. St. Andrews



# Polarizzazione inversa

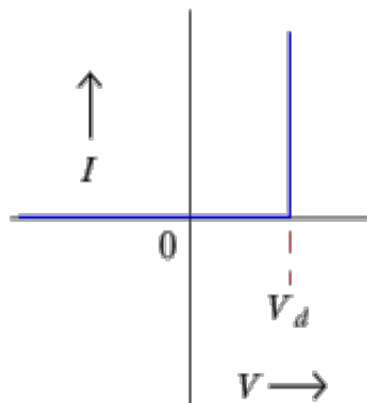
polarizzazione inversa:

- 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")

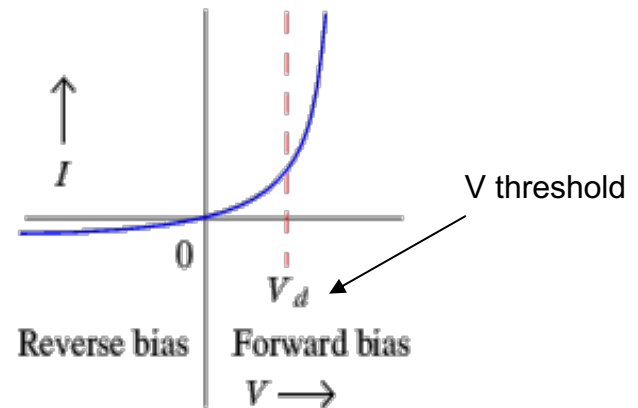
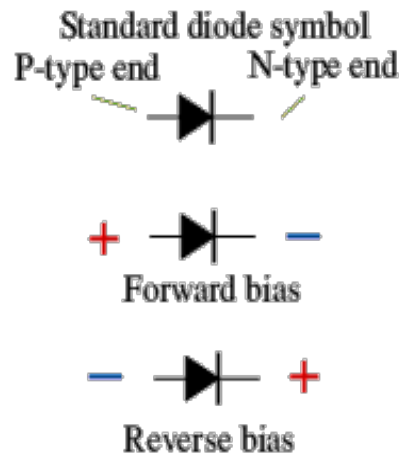


# Caratteristica del diodo

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



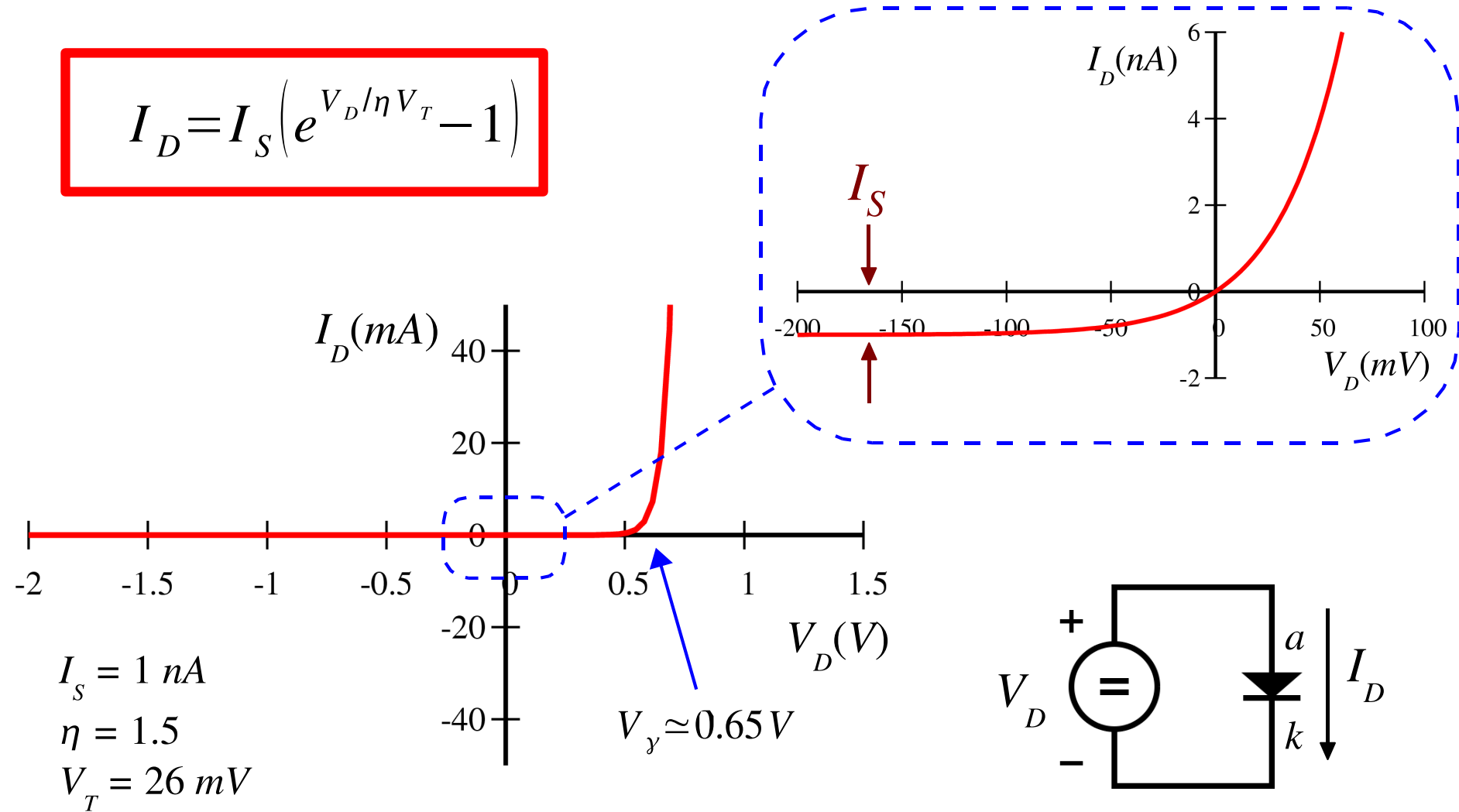
'Ideal' Diode



Real Diode

# 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

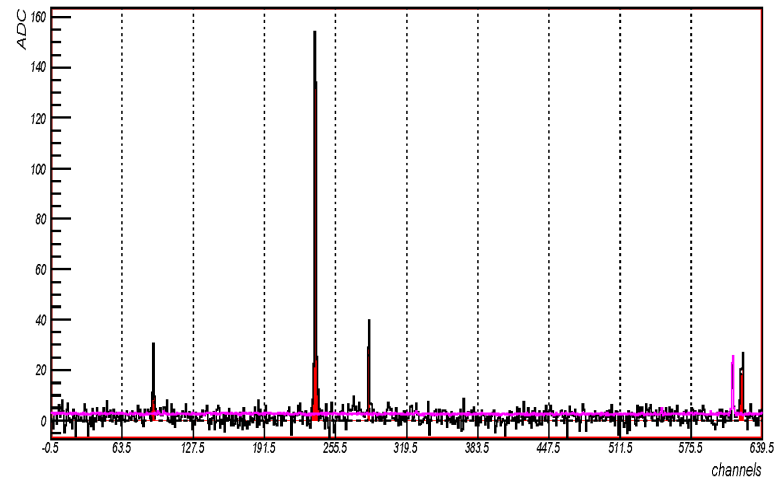
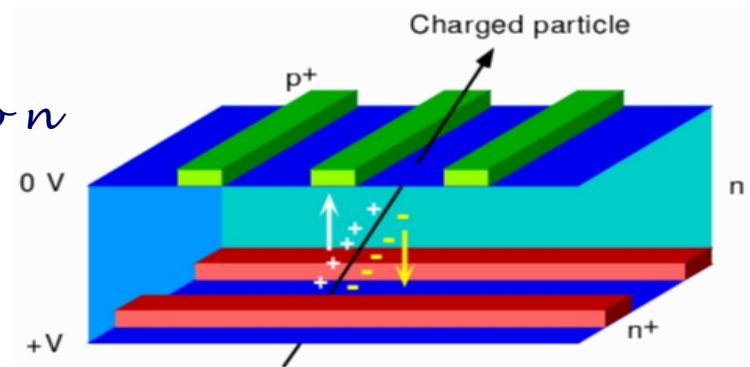
→ Una particella carica attraversa un sottile strato ( $300\mu\text{ m}$ ) di silicio drogato  $n$  ed interagendo con il materiale libera  $24000$  coppie  $e/h$  ( $\propto Z^2$ )

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

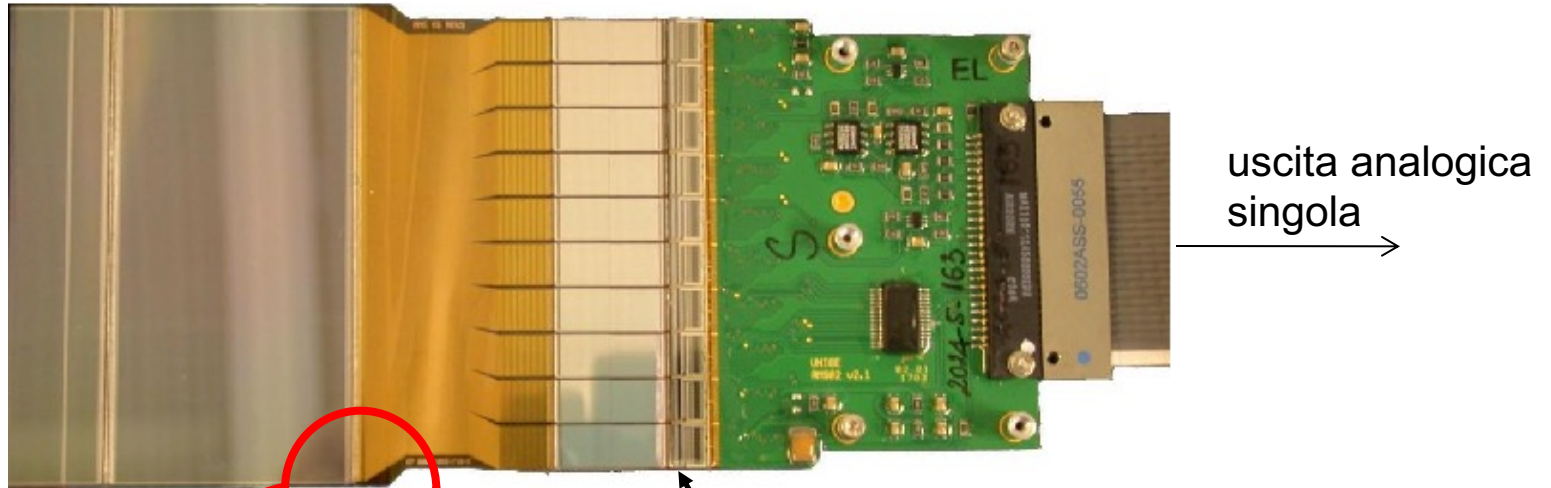
→ Le cariche  $e/h$  generate vengono raccolte dalle due parti della giunzione sulle strisce  $p+$  e su delle strisce  $n+$  dirette in senso ortogonale tramite contatti metallici

→ 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

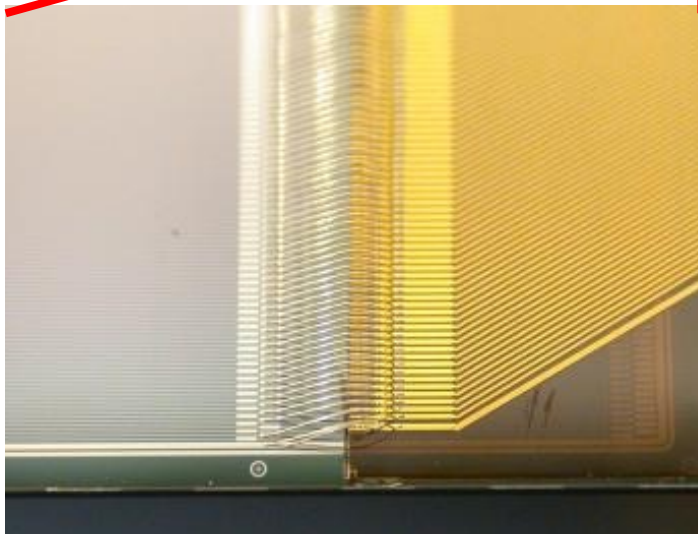


# Rivelatore di particelle



uscita analogica  
singola →

640 channels

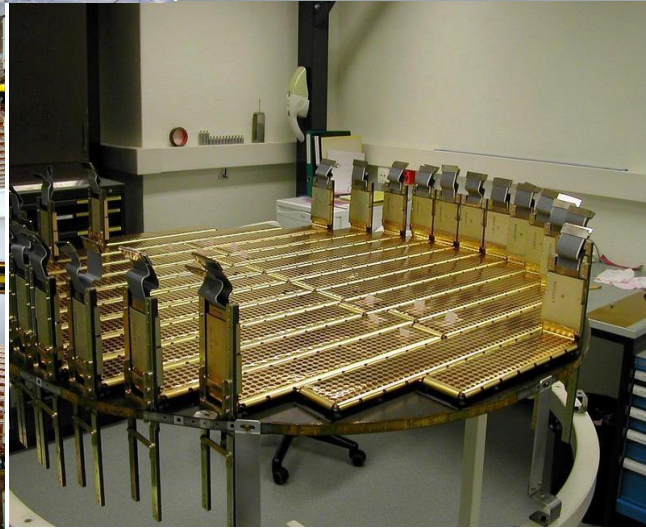
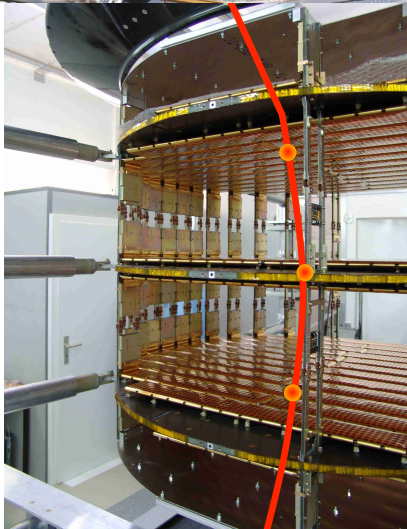
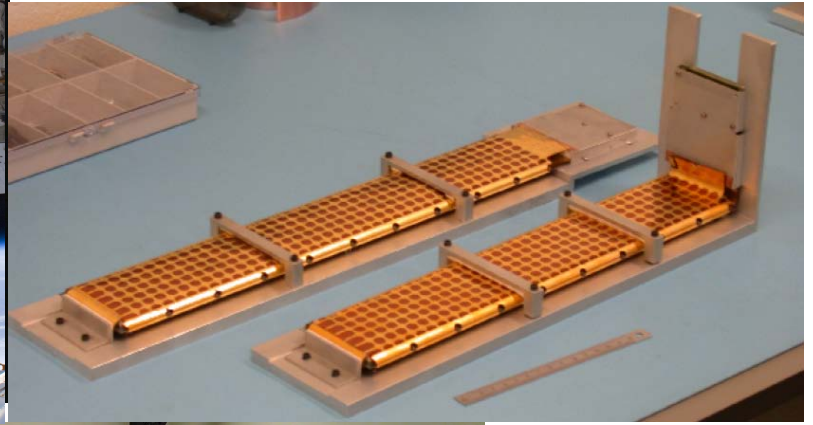


Ad esempio: il tracciatore al silicio del rivelatore AMS-02 ha 192 *rivelatori*, detti *ladder*, ed ognuno a 1024 canali di lettura

→ ~ 200k canali di lettura

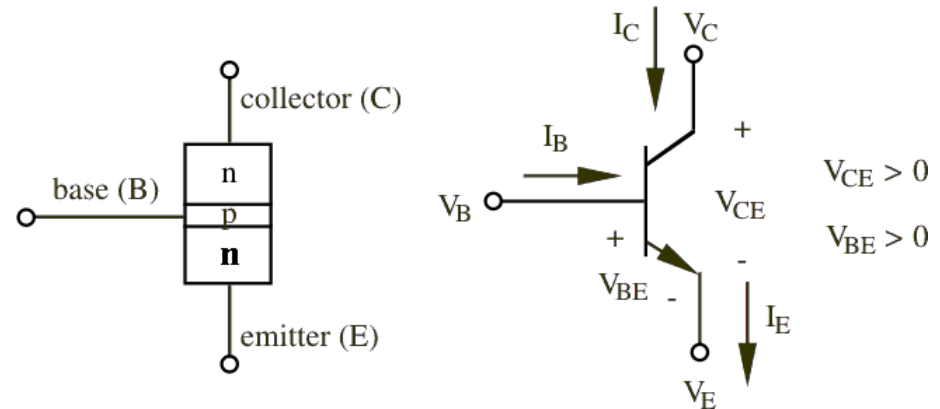


# Tracciatore al Si – AMS-02

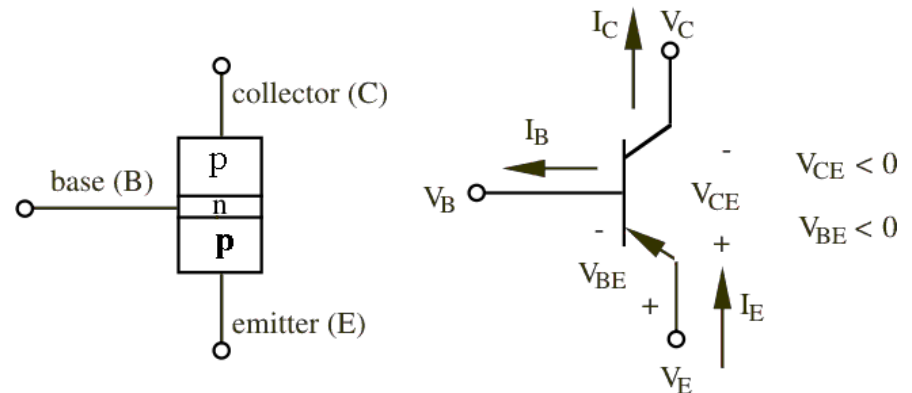


# Bipolar Junction Transistor (BJT)

- 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



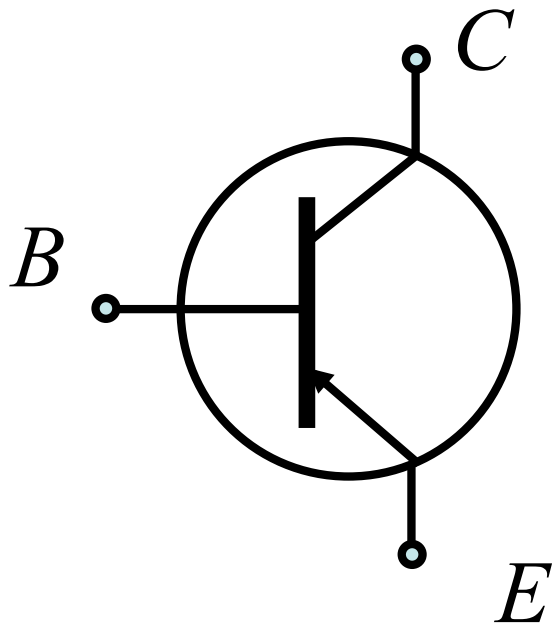
pnp bipolar junction transistor

Sviluppato da Shockley (1949)

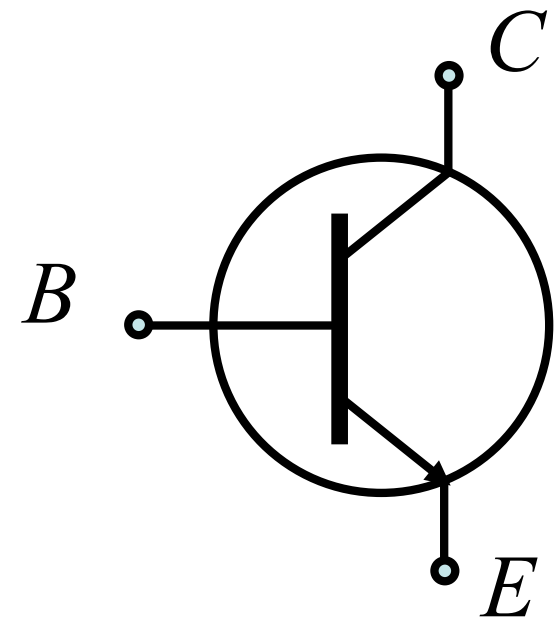


# Bipolar Junction Transistor (BJT)

*pnp*

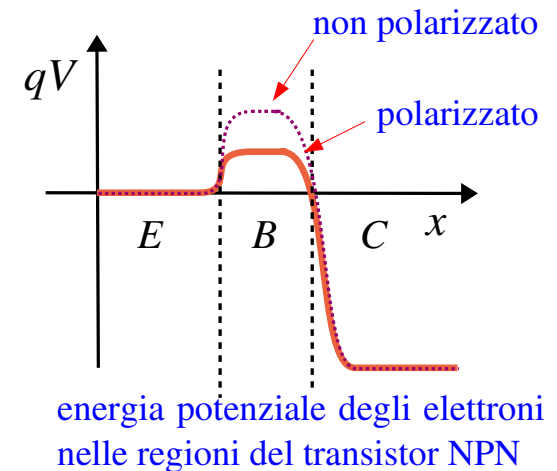
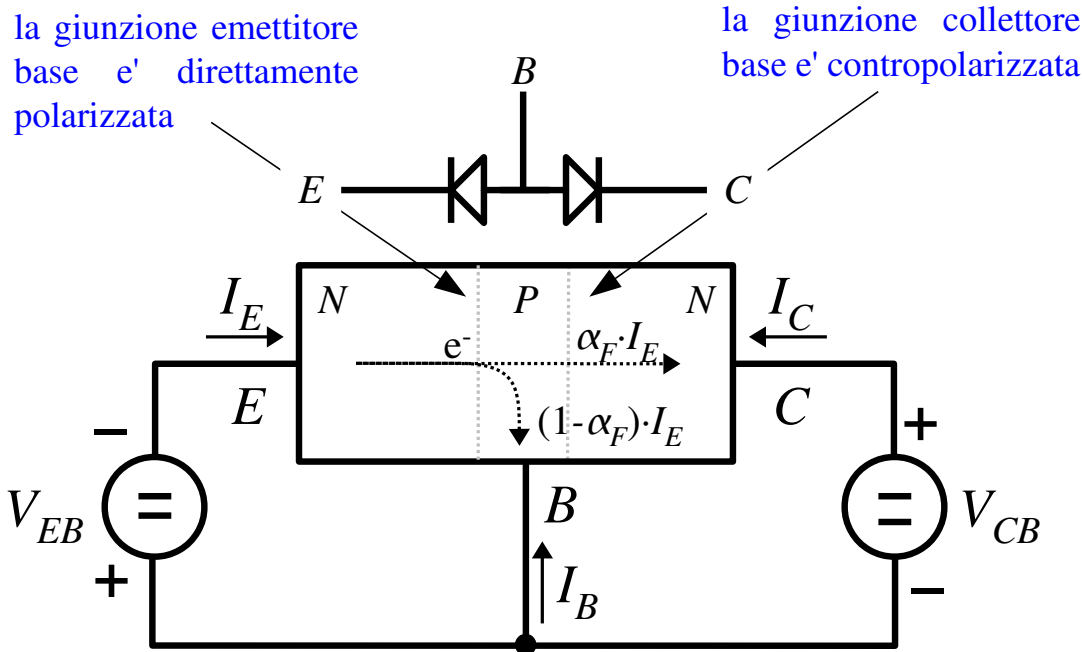


*npn*



# 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 e'  $\beta_F$  volte piu' grande:

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

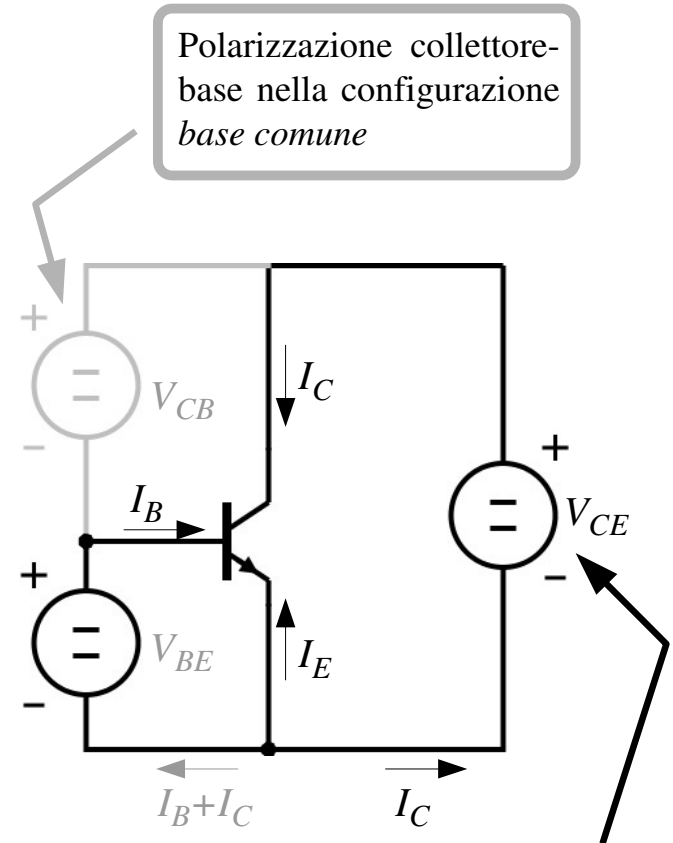
$$I_C = \frac{\alpha_F}{1 - \alpha_F} I_B = \beta_F I_B$$

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)

corrente di collettore proporzionale a quella di base

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

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

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

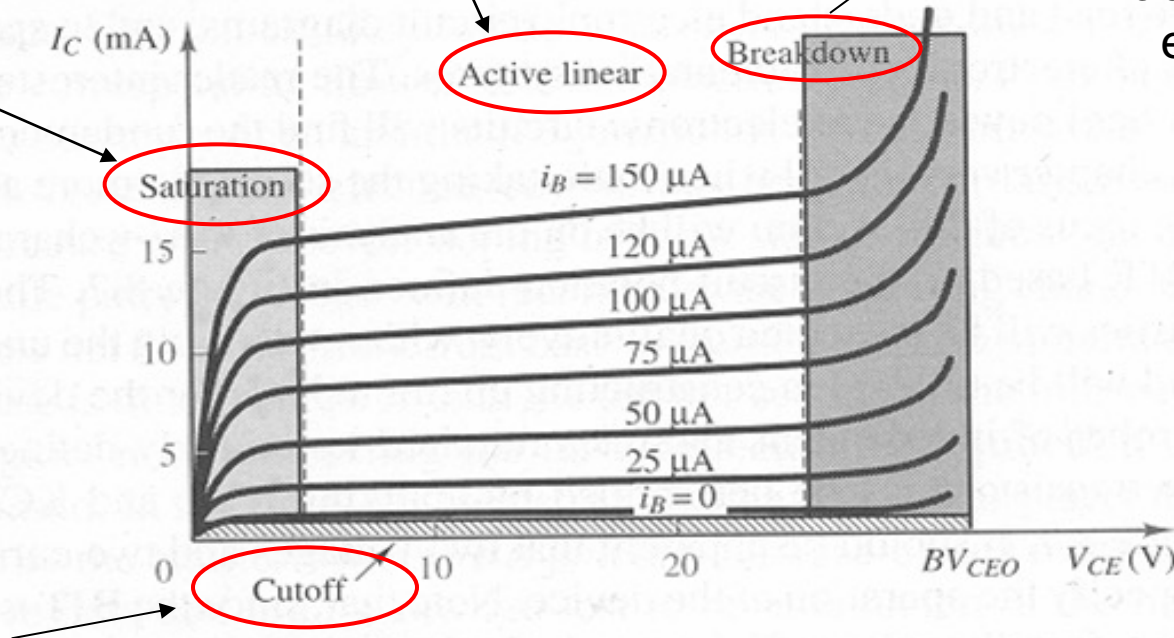
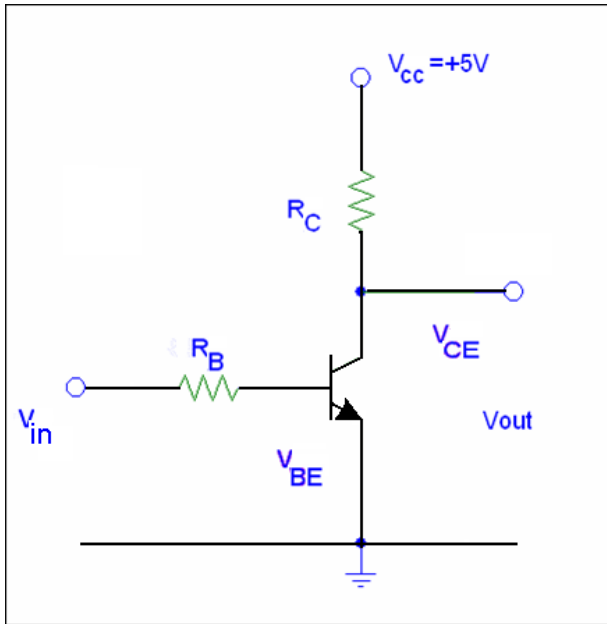


Figure 8.9(b) The collector-emitter output characteristics of a BJT

# BJT come interruttore



$V_{in}$  (“bassa”)  $< 0.7\text{ V}$

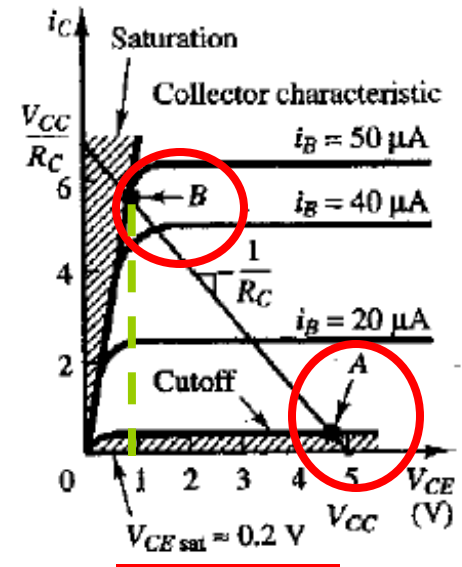
- B-E non polarizzata direttamente
- regione di **cutoff**  $\rightarrow$  non fluisce corrente
- $V_{out} = V_{CE} = V_{CC}$

$\rightarrow V_{out} = \text{“alta”}$

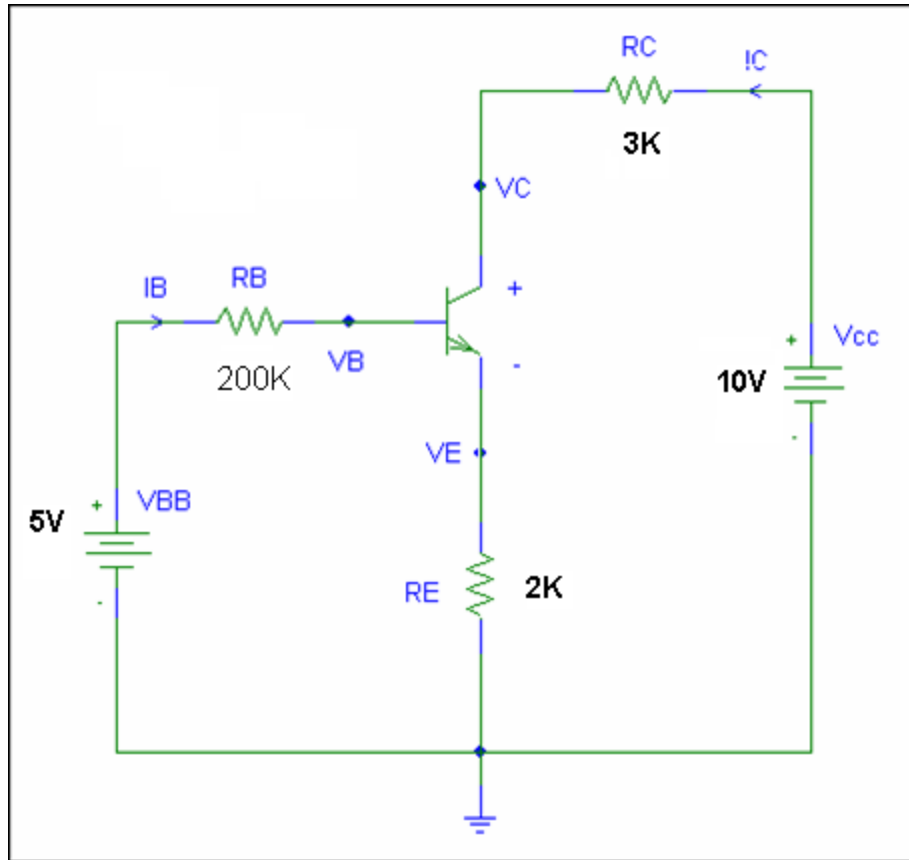
$V_{in}$  (“alta”)

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

$\rightarrow V_{out} = \text{“bassa”}$



# BJT come amplificatore (zona attiva)

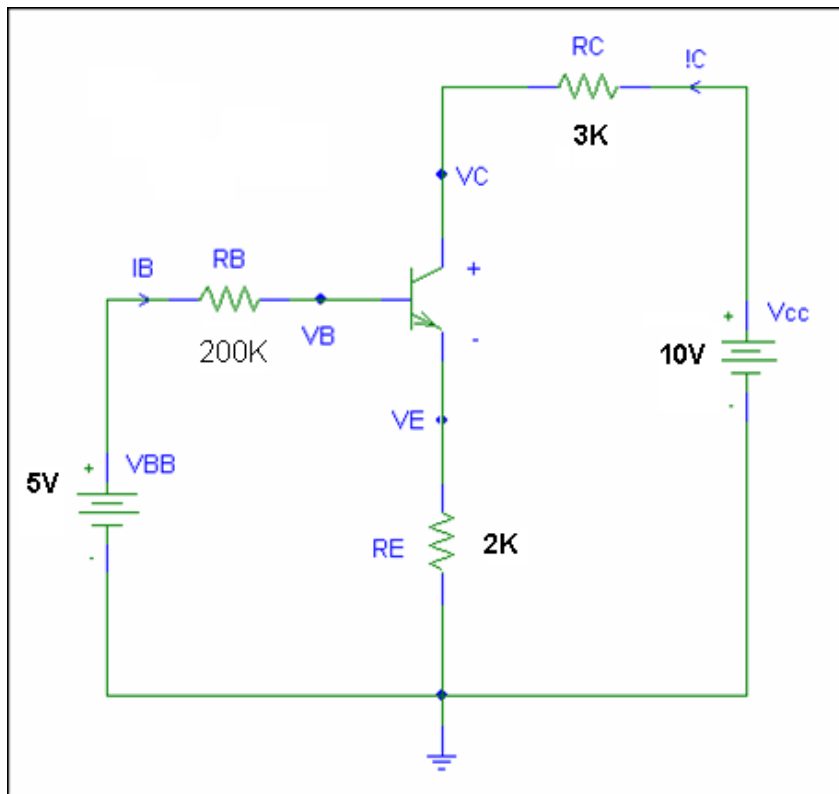


- Emettitore comune
- Regione di linearità
- Guadagno elevato

Esempio:

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

# BJT come amplificatore (zona attiva)



$$V_{BE} = 0.7V$$

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

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

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

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

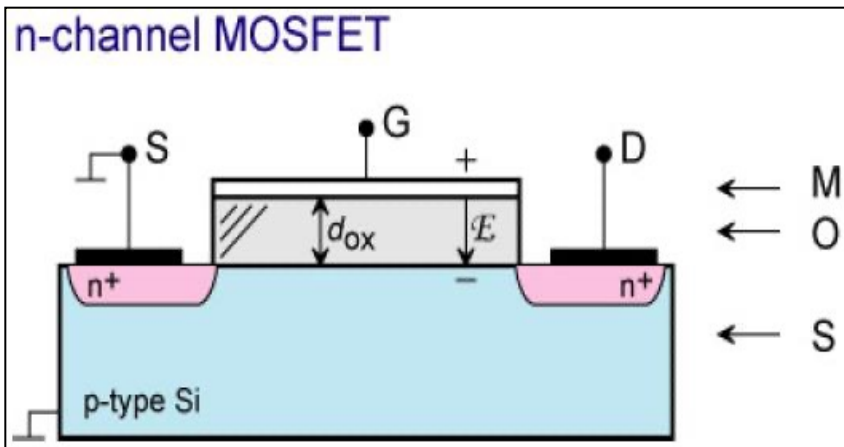
$V_{CB} > 0$  quindi il BJT è nella zona attiva



# 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