

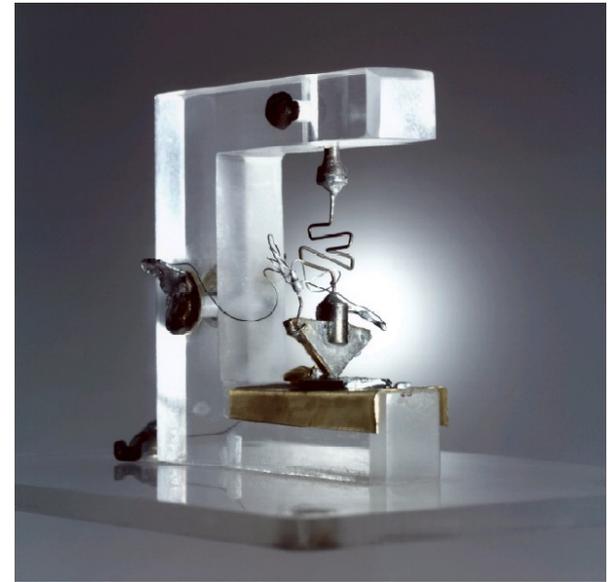
Laboratorio II, modulo 2 2016-2017

Transistor

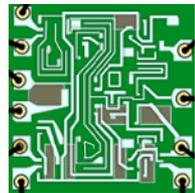
(cfr. <http://studenti.fisica.unifi.it/~carla/appunti/2008-9/cap.4.pdf>
http://ume.gatech.edu/mechatronics_course/Transistor_F04.ppt)

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.

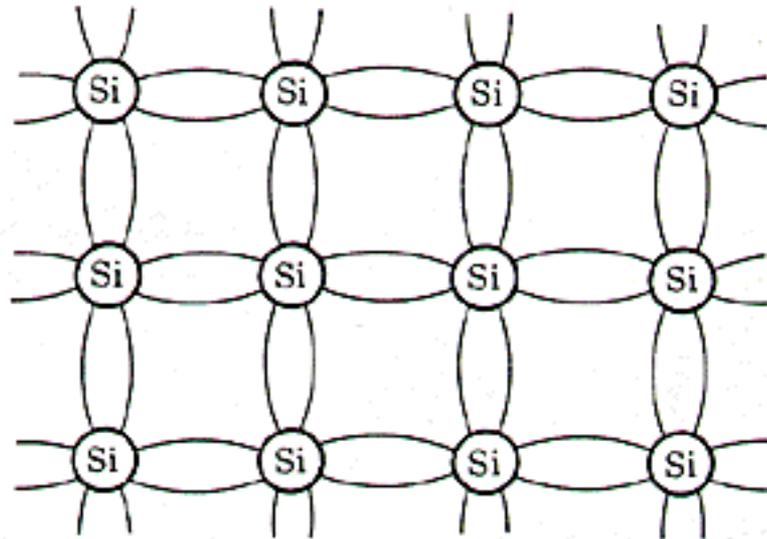


Semiconduttori

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

Semiconduttori: dopaggio

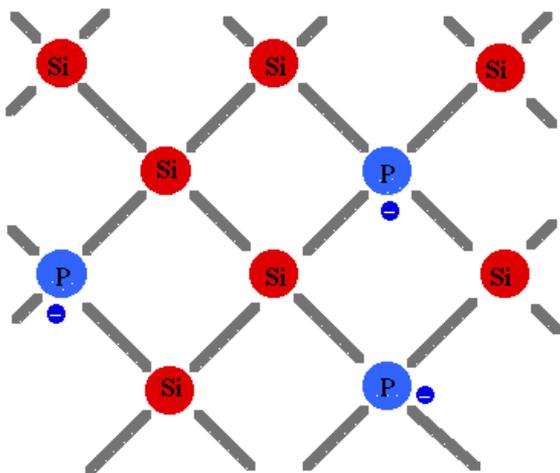
Due tipi di dopaggio

1. *N-type* (negativo)

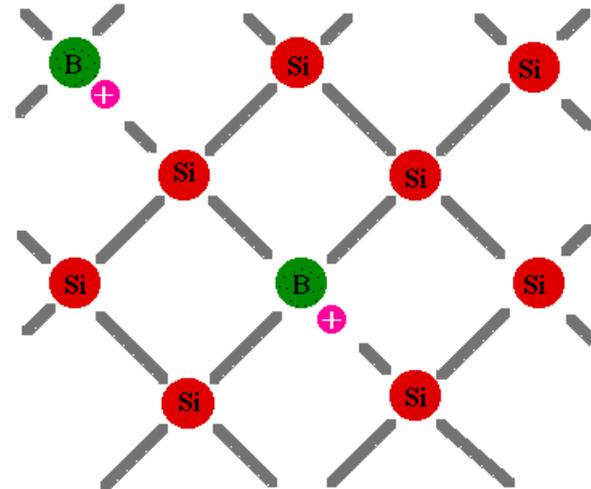
- impurità di **donori** (dal Gruppo V) aggiunte al reticolo cristallino del Si
- portatori di carica dominante: **elettroni negativi**
- elementi del **Gruppo V** come **Fosforo, Arsenico e Antimonio**

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**



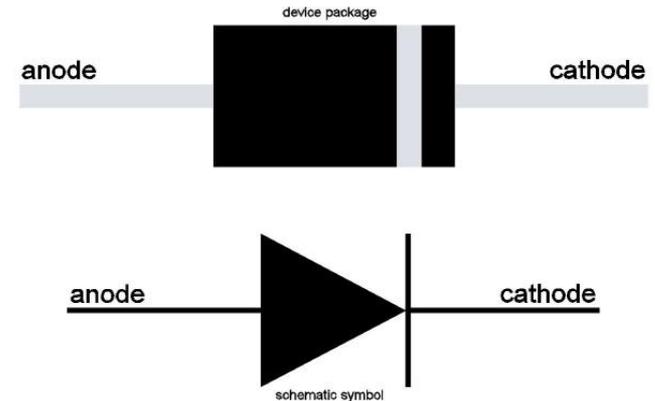
N-type



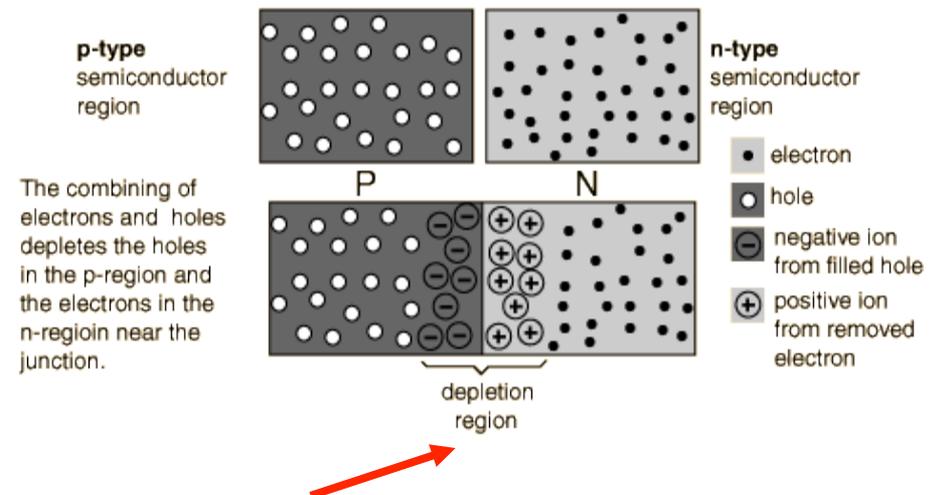
P-type

Costituente base: la giunzione p-n

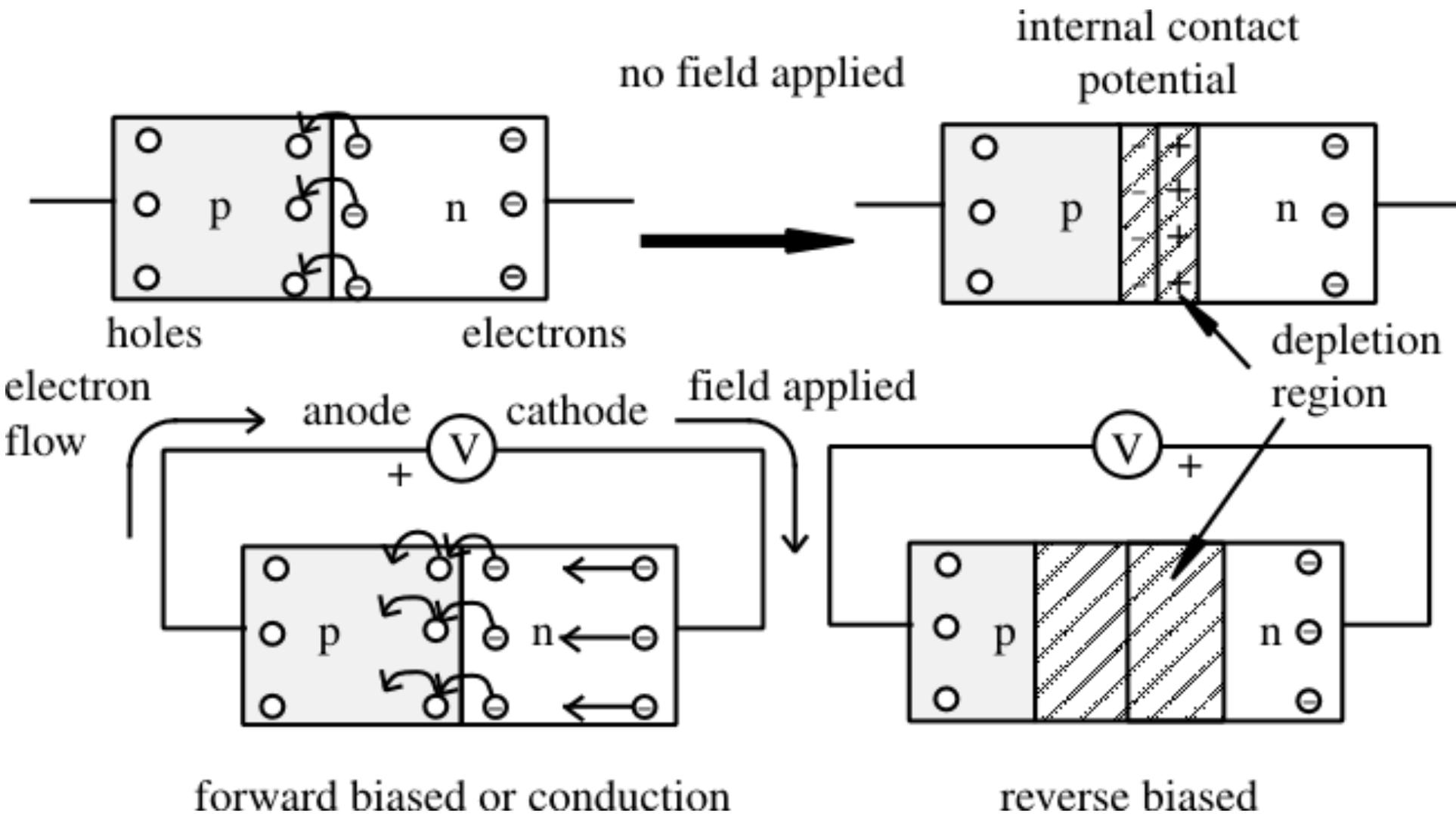
- chiamata anche **diode**
- permette alla corrente, idealmente, di scorrere solamente da p verso N



- 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



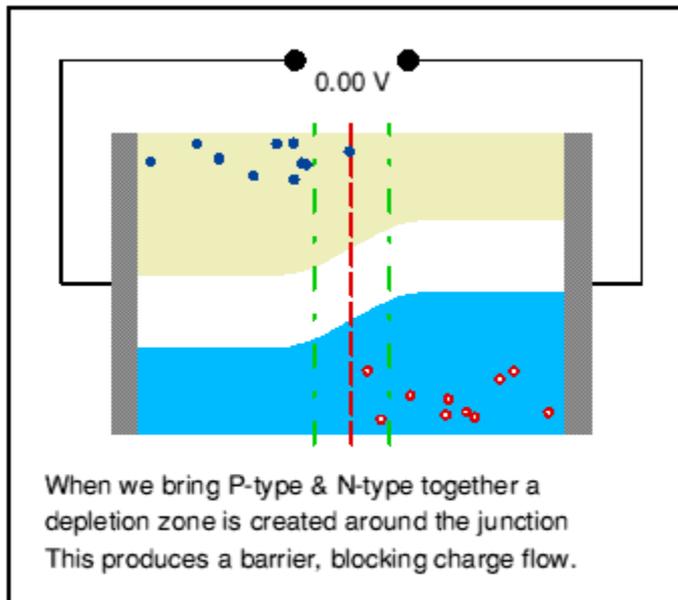
Bias esterno



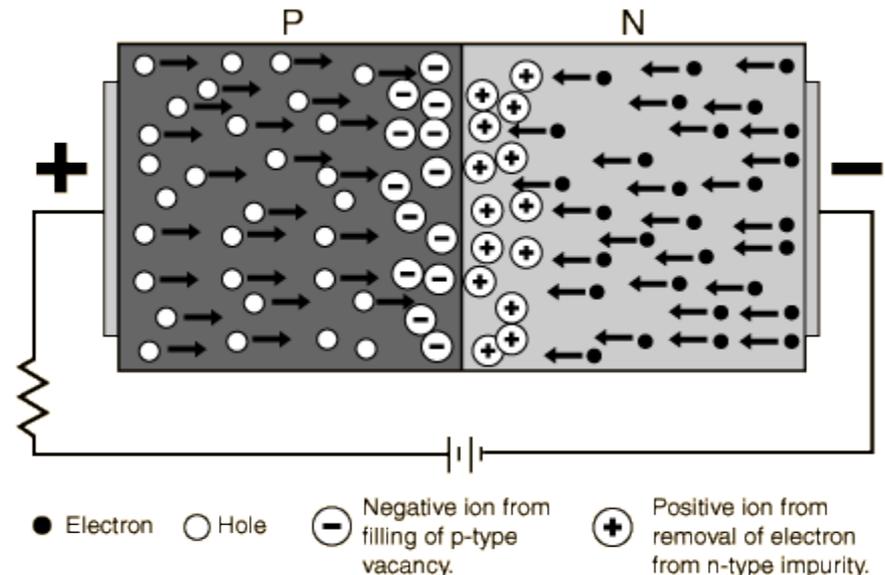
Polarizzazione (bias) diretta

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



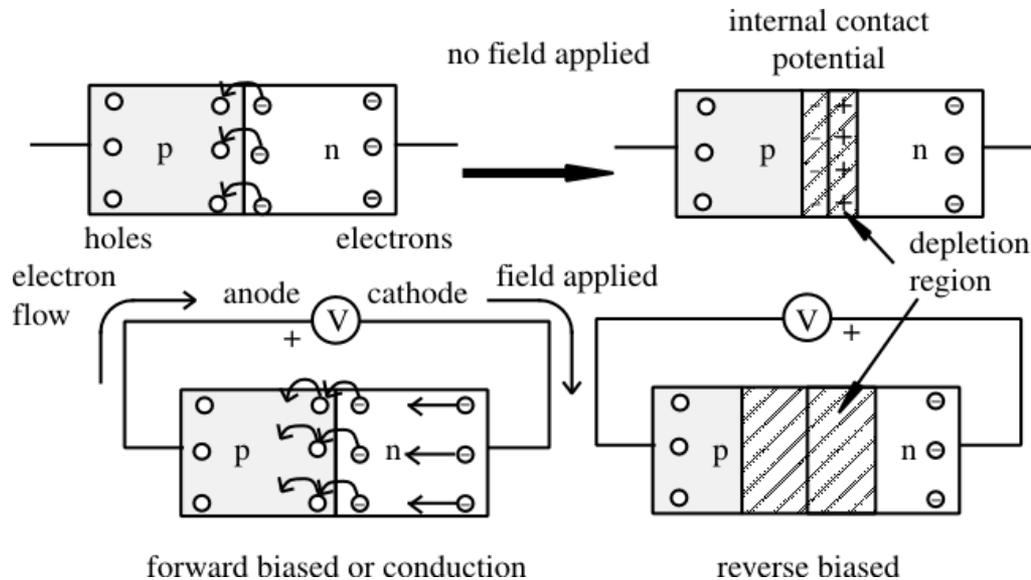
© J. C. G. Lesurf Univ. St. Andrews



Polarizzazione inversa

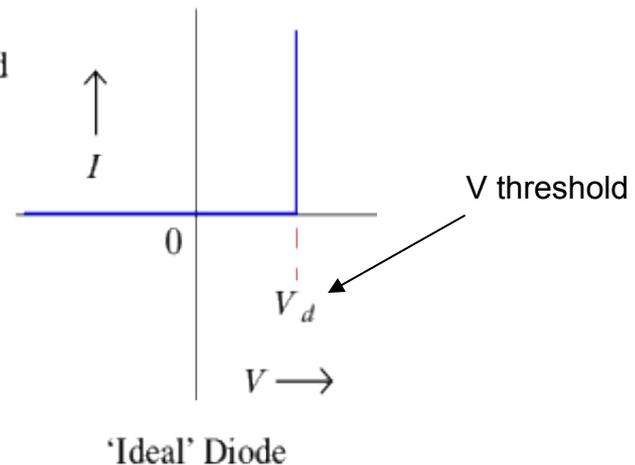
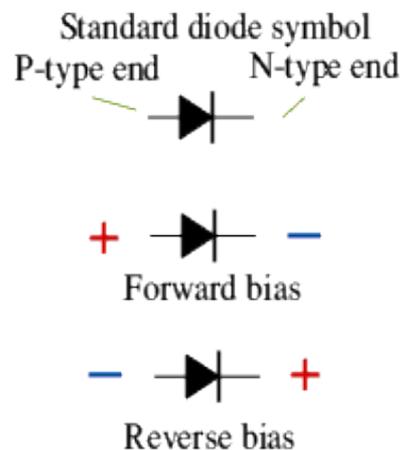
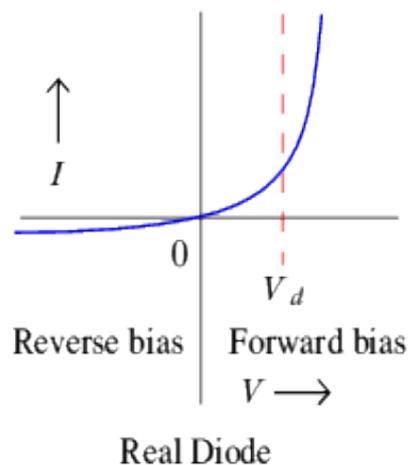
polarizzazione inversa:

- 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")



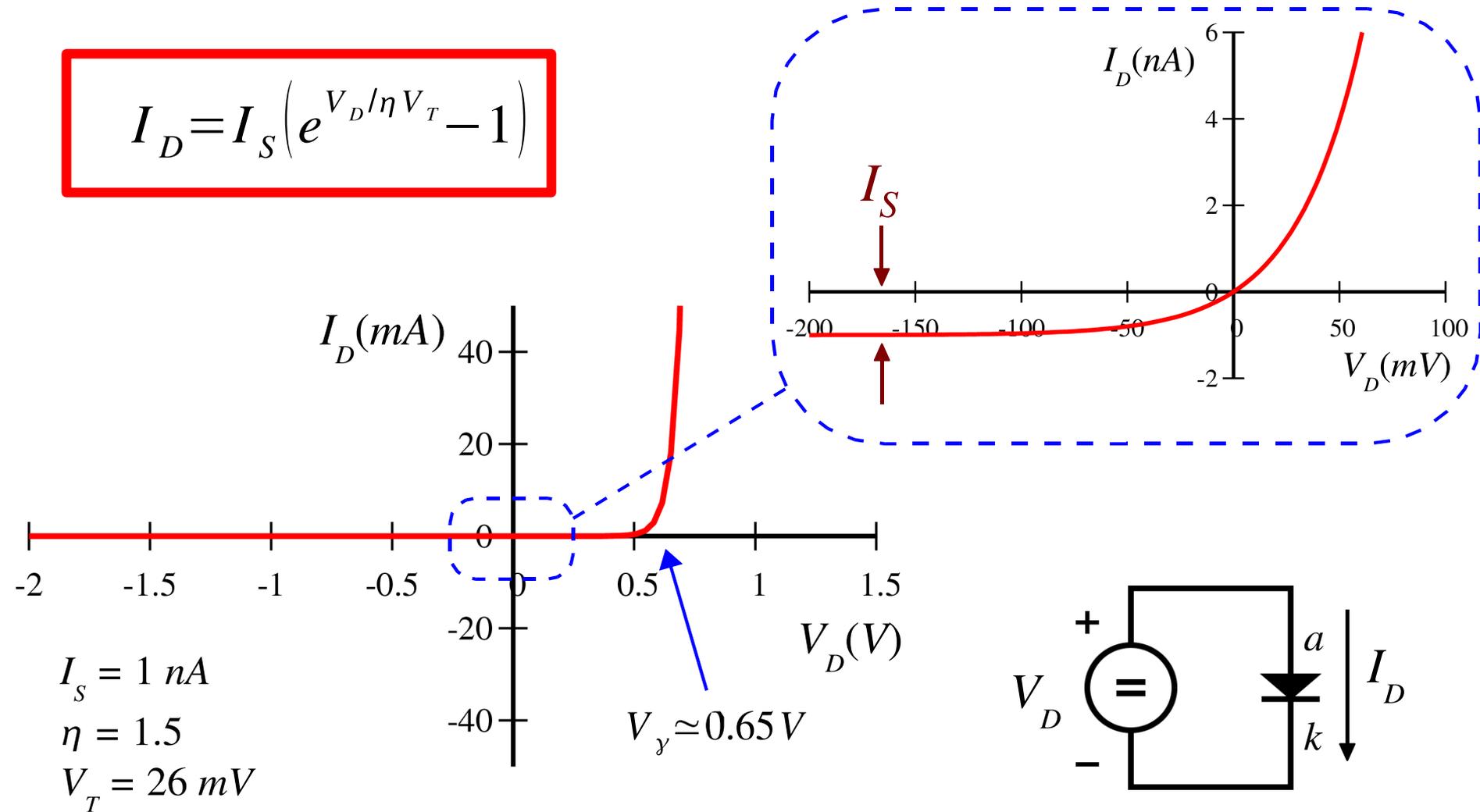
Caratteristica del diodo

- 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 : $I_{\text{flow}} = 10^{-9} \text{ A}$



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

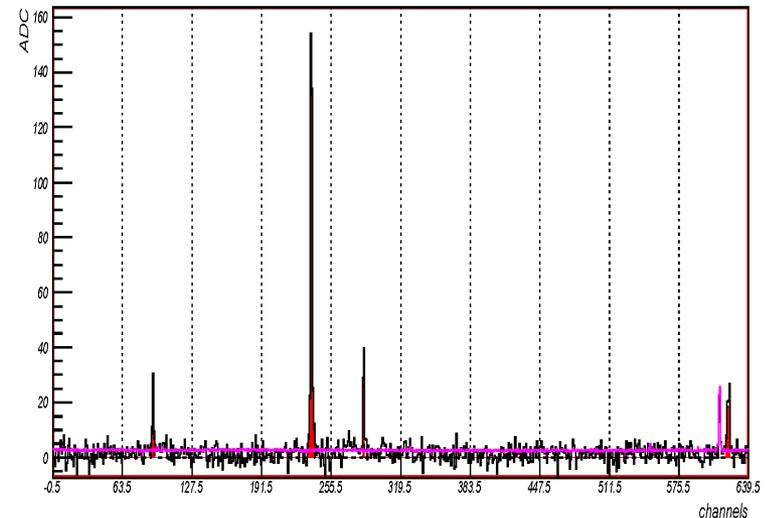
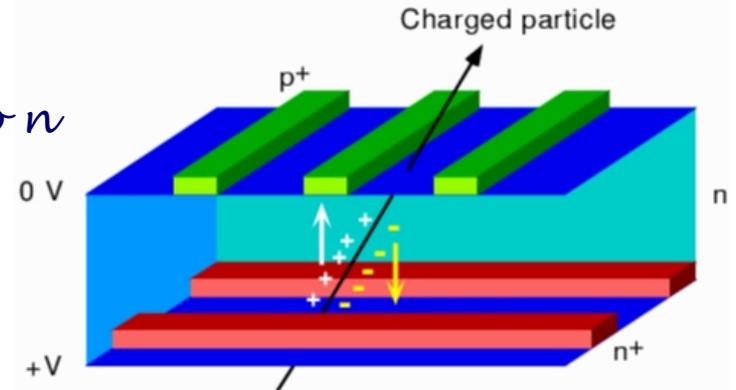
→ Una particella carica attraversa un sottile strato ($300\mu\text{ m}$) di silicio drogato n ed interagendo con il materiale libera 24000 coppie e/h ($\propto Z^2$)

→ 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

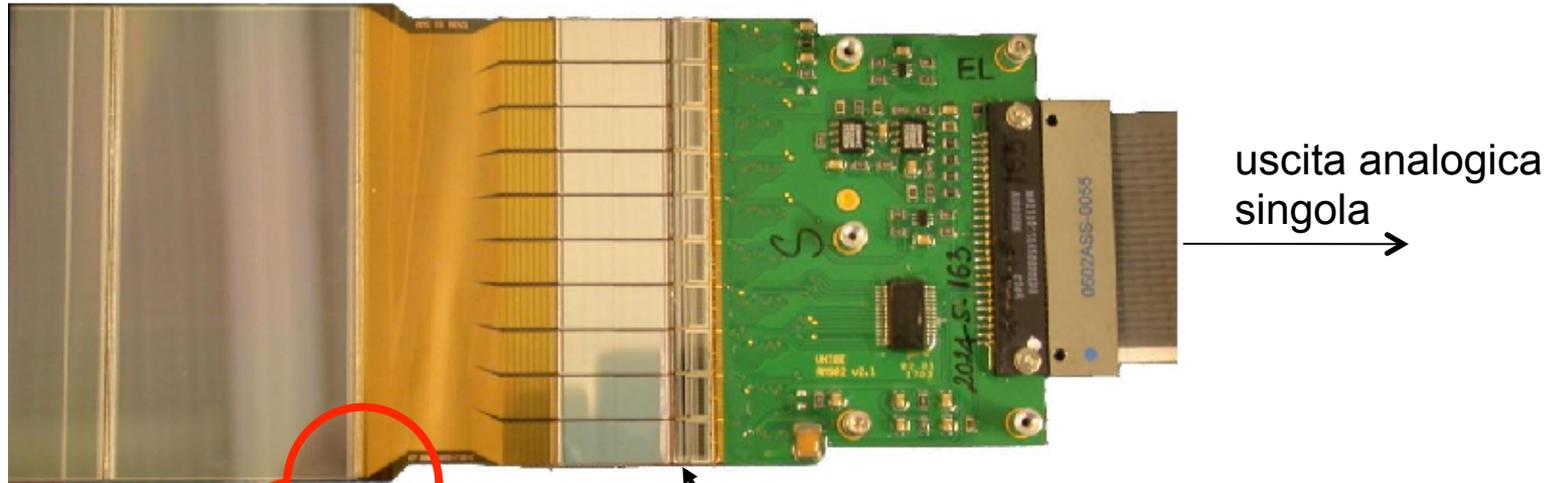
→ Le cariche e/h generate vengono raccolte dalle due parti della giunzione sulle strisce $p+$ e su delle strisce $n+$ dirette in senso ortogonale tramite contatti metallici

→ 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

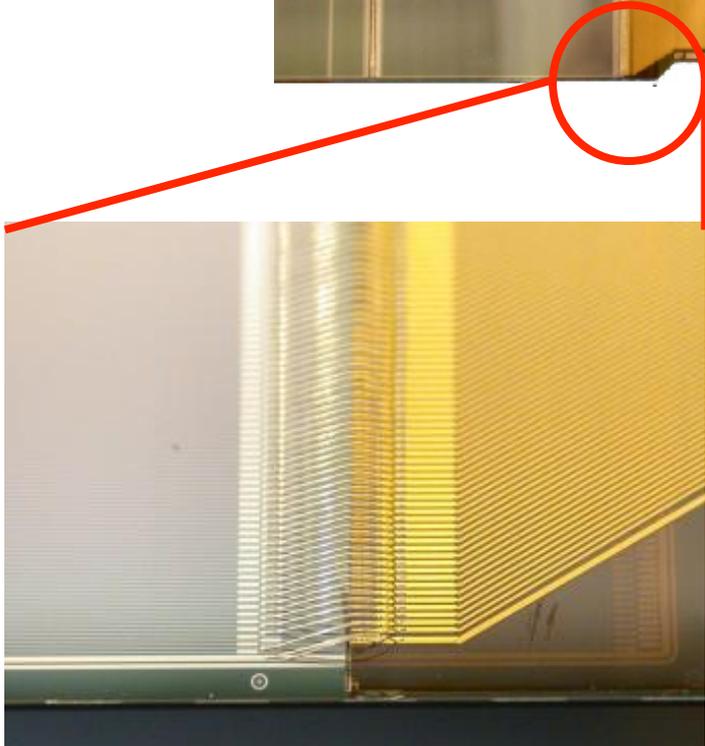


Rivelatore di particelle



uscita analogica
singola →

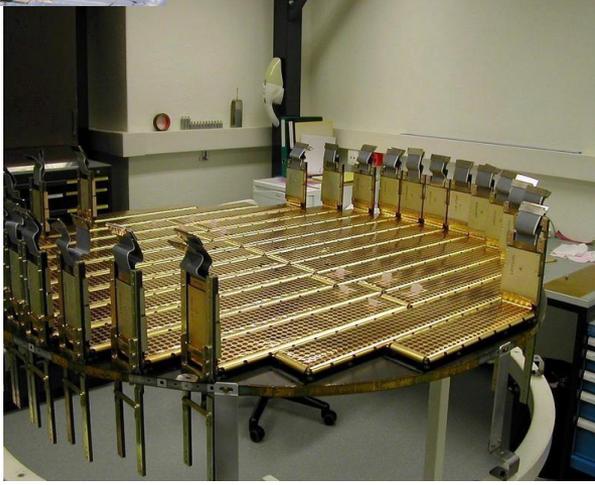
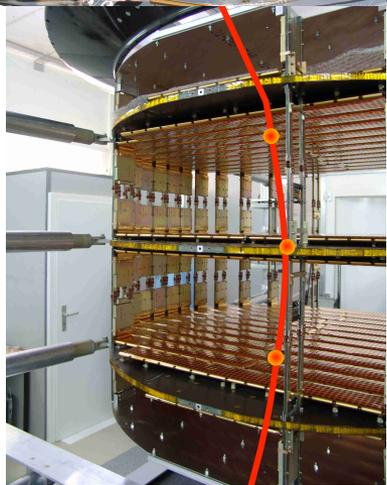
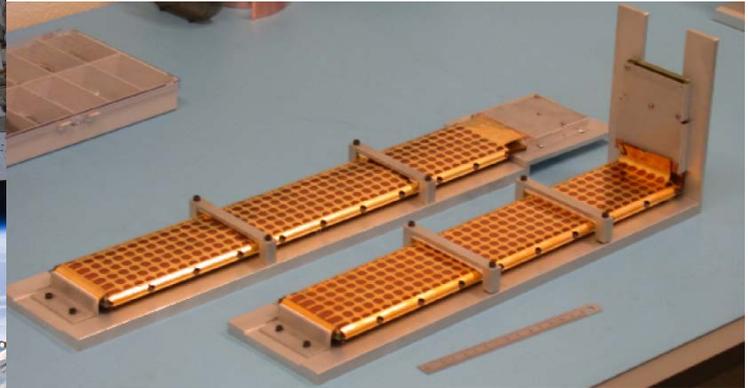
640 channels



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

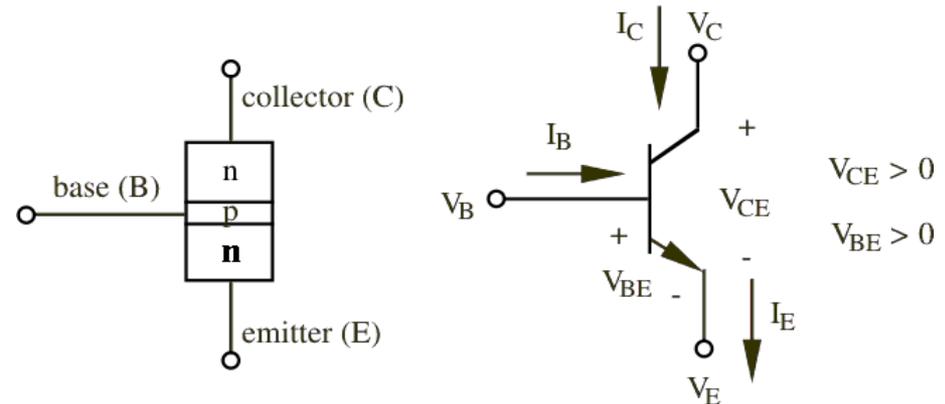
→ ~ 200k canali di lettura

Tracciatore al Si - AMS-02

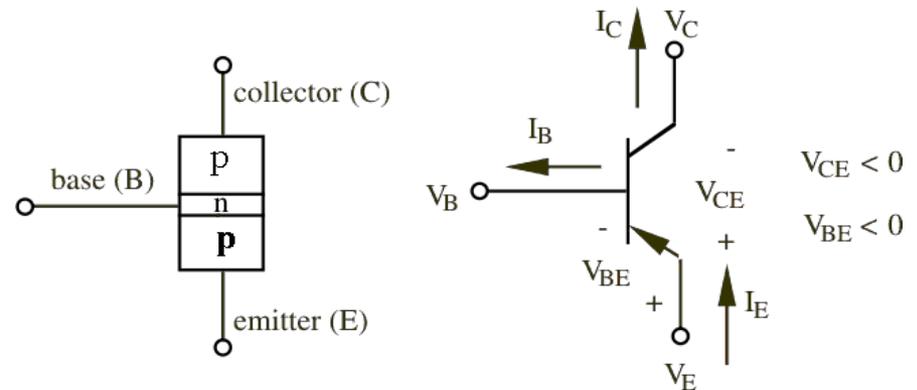


Bipolar Junction Transistor (BJT)

- 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

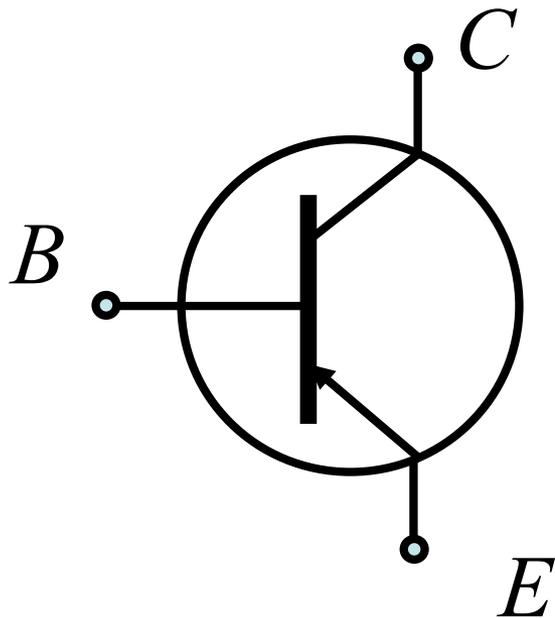


pnp bipolar junction transistor

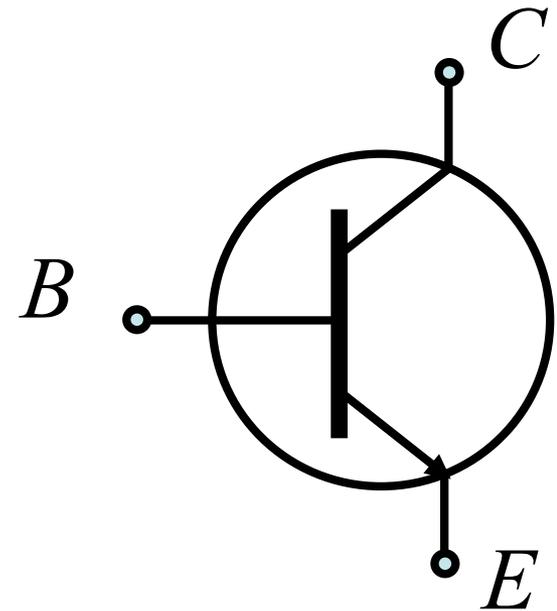
Sviluppato da Shockley (1949)

Bipolar Junction Transistor (BJT)

pnp

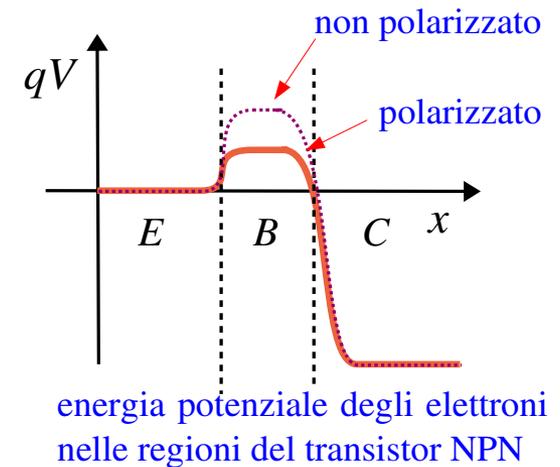
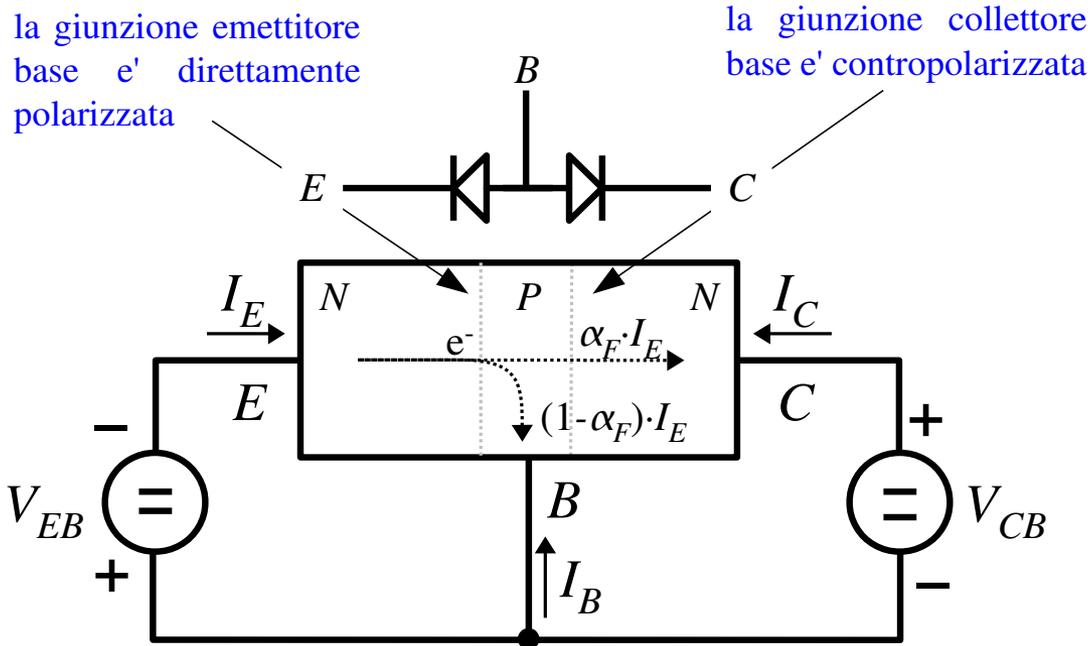


npn



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' β_F volte piu' grande:

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

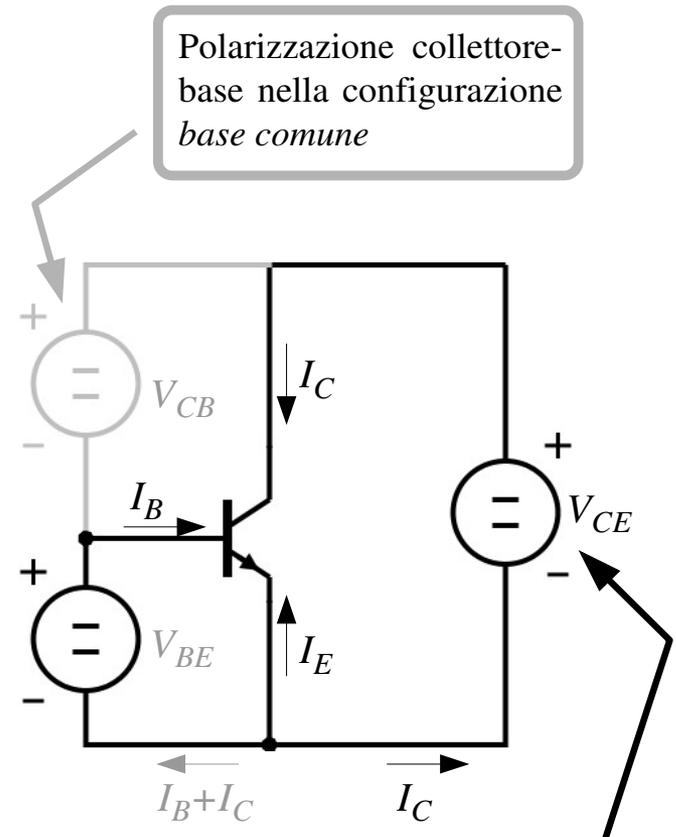
$$I_C = \frac{\alpha_F}{1 - \alpha_F} I_B = \beta_F I_B$$

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

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

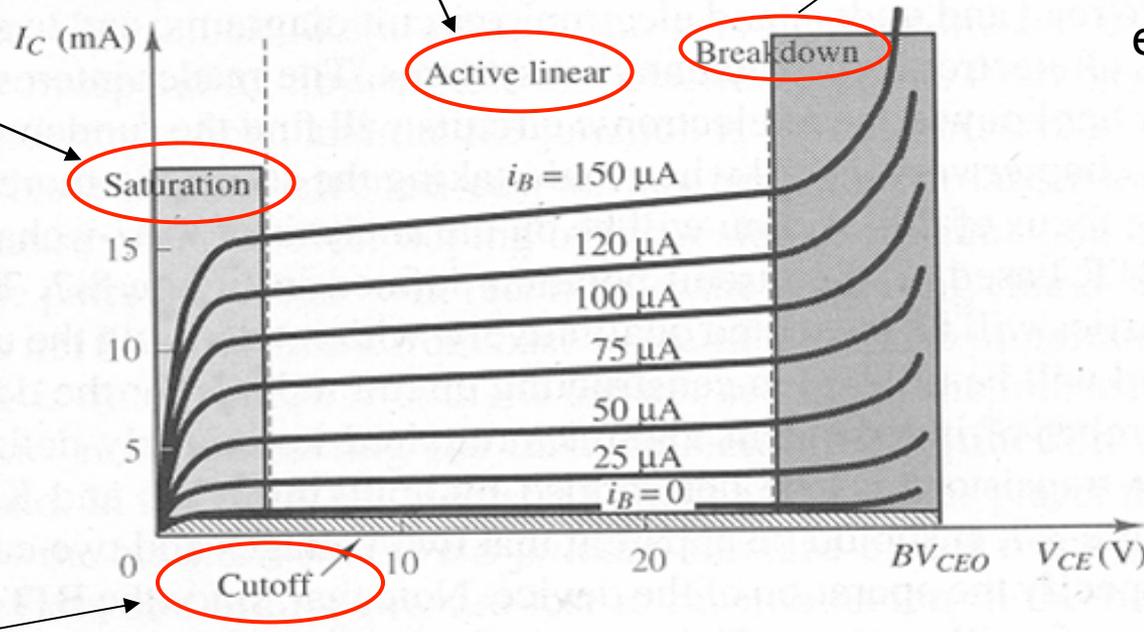
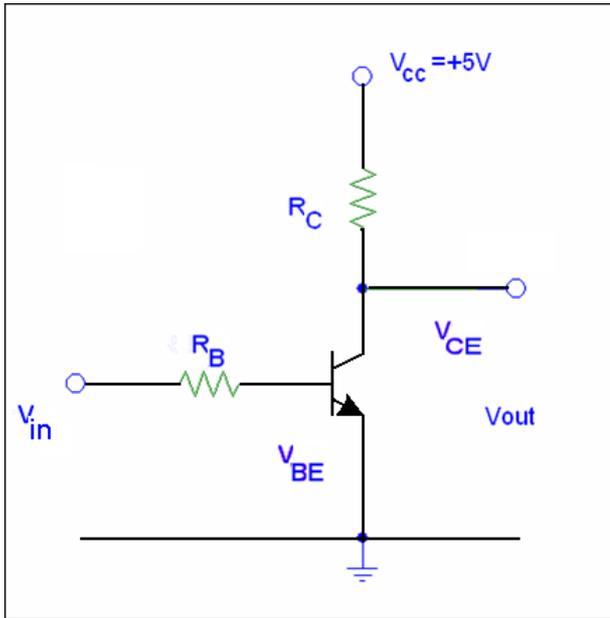


Figure 8.9(b) The collector-emitter output characteristics of a BJT

BJT come interruttore



V_{in} (“bassa”) $< 0.7\text{ V}$

- B-E non polarizzata direttamente

- regione di **cutoff** \rightarrow non fluisce corrente

- $V_{out} = V_{CE} = V_{CC}$

$\rightarrow V_{out} =$ “alta”

V_{in} (“alta”)

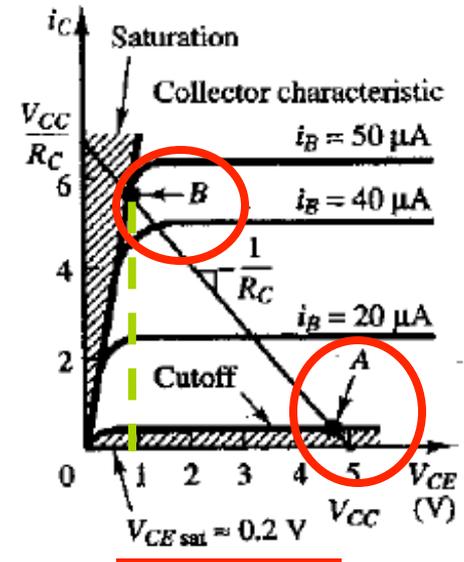
- B-E polarizzata direttamente ($V_{BE} > 0.7\text{V}$)

- I_C massima $\rightarrow V_{CE}$ minima ($\sim 0.2\text{ V}$, BJT in saturazione) \rightarrow regione di **saturazione**

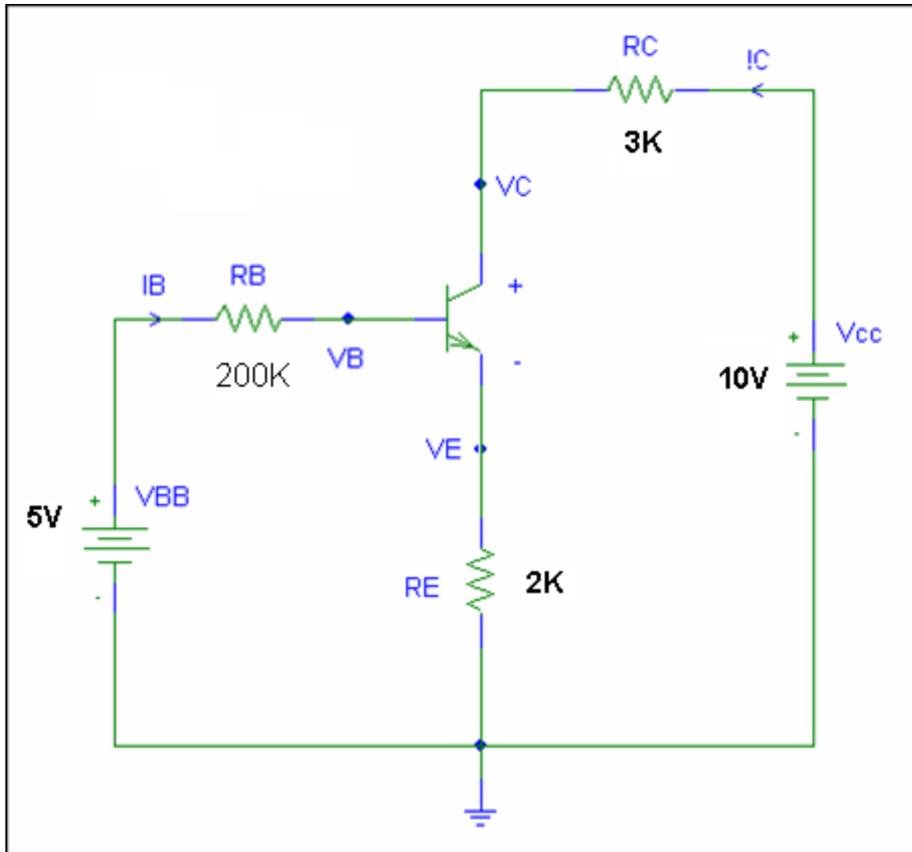
- $V_{out} =$ piccola

- $I_B = (V_{in} - V_B) / R_B$

$\rightarrow V_{out} =$ “bassa”



BJT come amplificatore (zona attiva)

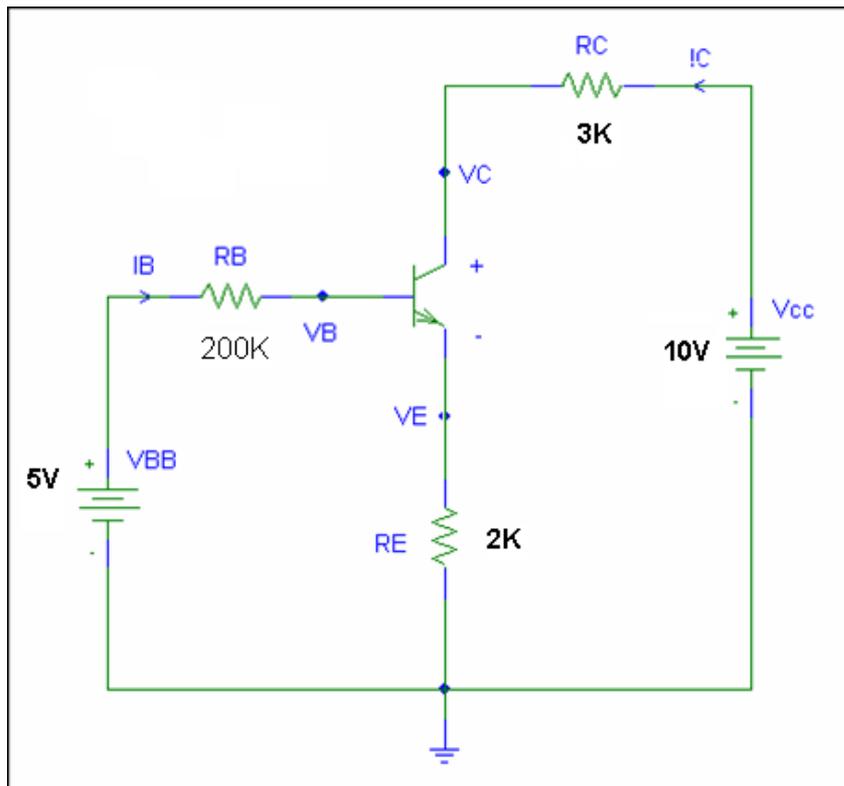


- Emettitore comune
- Regione di linearità
- Guadagno elevato

Esempio:

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

BJT come amplificatore (zona attiva)



$$V_{BE} = 0.7V$$

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

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

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

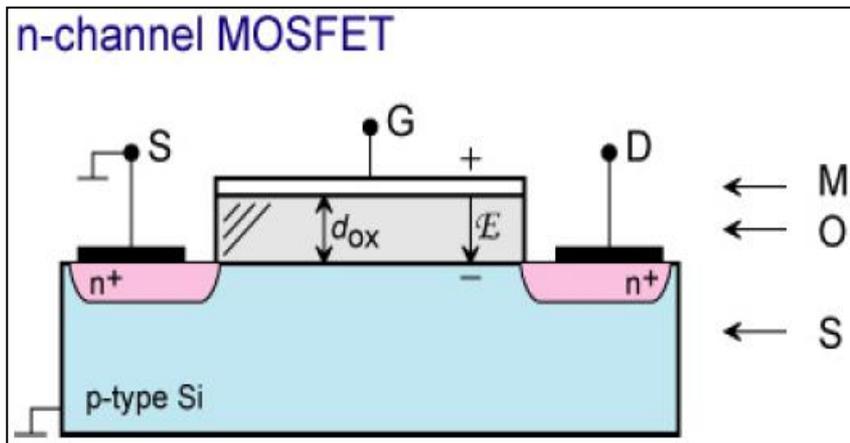
$$\begin{aligned} V_{CB} &= V_{CC} - I_C * R_C - I_E * R_E - V_{BE} = \\ &= 10 - (3)(1.07) - (2)(101 * 0.0107) - 0.7 = \\ &= 3.93V \end{aligned}$$

$V_{CB} > 0$ 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