

Laboratorio II, modulo 2

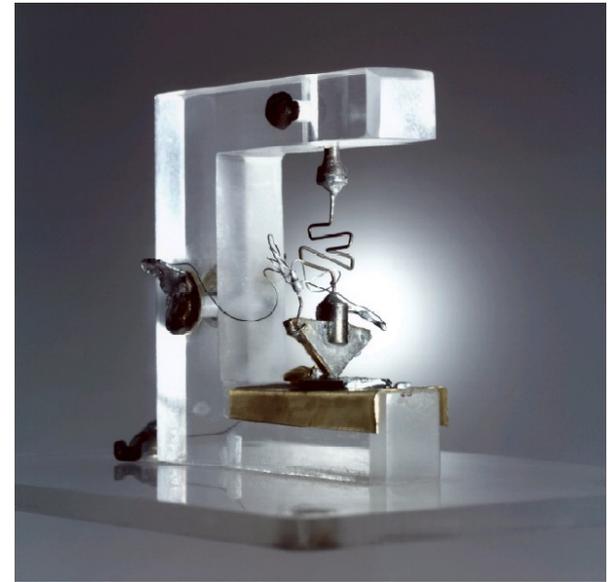
2015-2016

Transistor

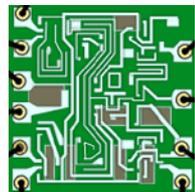
(cfr. <http://studenti.fisica.unifi.it/~carla/appunti/2008-9/cap.4.pdf>
http://ume.gatech.edu/mechatronics_course/Transistor_F04.ppt)

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.

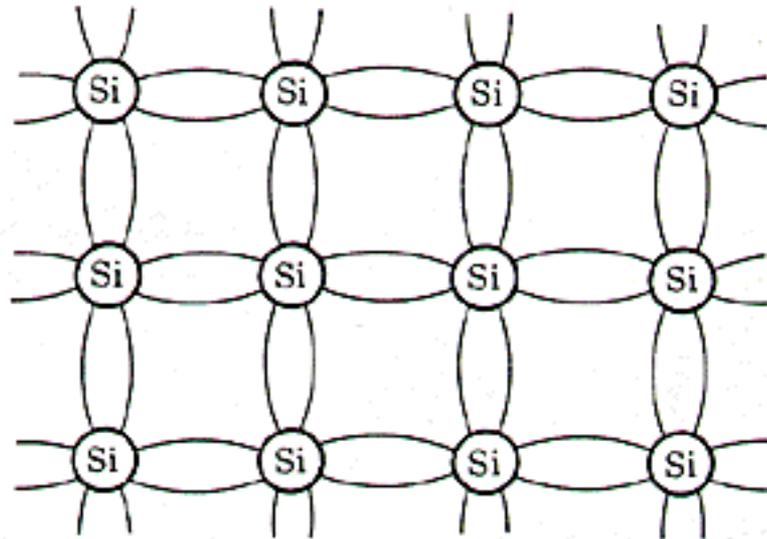


Semiconduttori

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												5 B 10.811	6 C 12.011	7 N 14.007	8 O 15.999	9 F 18.998	10 Ne 20.180												
2 Li 6.941	4 Be 9.012											13 Al 26.982	14 Si 28.086	15 P 30.974	16 S 32.066	17 Cl 35.453	18 Ar 39.948												
3 Na 22.990	12 Mg 24.305											19 K 39.098	20 Ca 40.078	21 Sc 44.956	22 Ti 47.88	23 V 50.942	24 Cr 51.996	25 Mn 54.938	26 Fe 55.845	27 Co 58.933	28 Ni 58.69	29 Cu 63.546	30 Zn 65.39	31 Ga 69.723	32 Ge 72.61	33 As 74.922	34 Se 78.96	35 Br 79.904	36 Kr 83.8
4 K 39.098	38 Sr 87.62	39 Y 88.906	40 Zr 91.224	41 Nb 92.906	42 Mo 95.94	43 Tc 98	44 Ru 101.07	45 Rh 102.906	46 Pd 106.42	47 Ag 107.868	48 Cd 112.411	49 In 114.82	50 Sn 118.71	51 Sb 121.76	52 Te 127.60	53 I 126.905	54 Xe 131.29												
5 Rb 85.468	86 Ba 137.327	87 La 138.906	88 Hf 178.49	89 Ta 180.948	90 W 183.84	91 Re 186.207	92 Os 190.23	93 Ir 192.22	94 Pt 195.08	95 Au 196.967	96 Hg 200.59	97 Tl 204.383	98 Pb 207.2	99 Bi 208.980	100 Po 209	101 At 210	102 Rn 222												
6 Cs 132.905	88 Ra 226.025	89 Ac 227.028	90 Rf 261	91 Db 262	92 Sg 263	93 Bh 262	94 Hs 265	95 Mt 266	96 Uun 269	97 Uuu 272	98 Uub 277																		
7 Fr 223	88 Ra 226.025	89 Ac 227.028	90 Rf 261	91 Db 262	92 Sg 263	93 Bh 262	94 Hs 265	95 Mt 266	96 Uun 269	97 Uuu 272	98 Uub 277																		
Rare earth elements																													
Lanthanides		58 Ce 140.115	59 Pr 140.908	60 Nd 144.24	61 Pm 145	62 Sm 150.36	63 Eu 151.964	64 Gd 157.25	65 Tb 158.925	66 Dy 162.5	67 Ho 164.93	68 Er 167.26	69 Tm 168.934	70 Yb 173.04	71 Lu 174.967														
Actinides		90 Th 232.038	91 Pa 231.036	92 U 238.029	93 Np 237.048	94 Pu 244	95 Am 243	96 Cm 247	97 Bk 247	98 Cf 251	99 Es 252	100 Fm 257	101 Md 258	102 No 259	103 Lr 262														

Semiconduttori: dopaggio

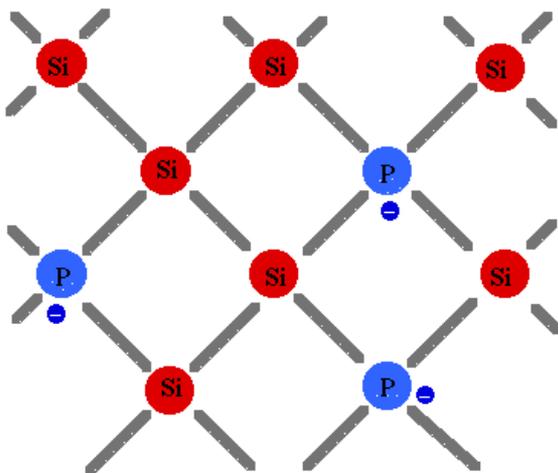
Due tipi di dopaggio

1. *N-type* (negativo)

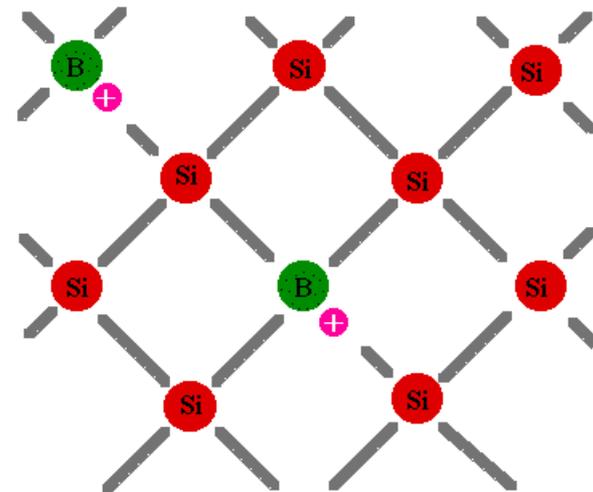
- impurità di **donori** (dal Gruppo V) aggiunte al reticolo cristallino del Si
- portatori di carica dominante: **elettroni negativi**
- elementi del **Gruppo V** come **Fosforo, Arsenico e Antimonio**

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**



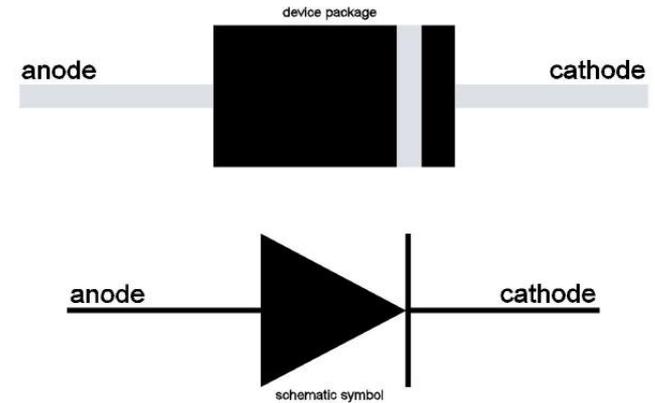
N-type



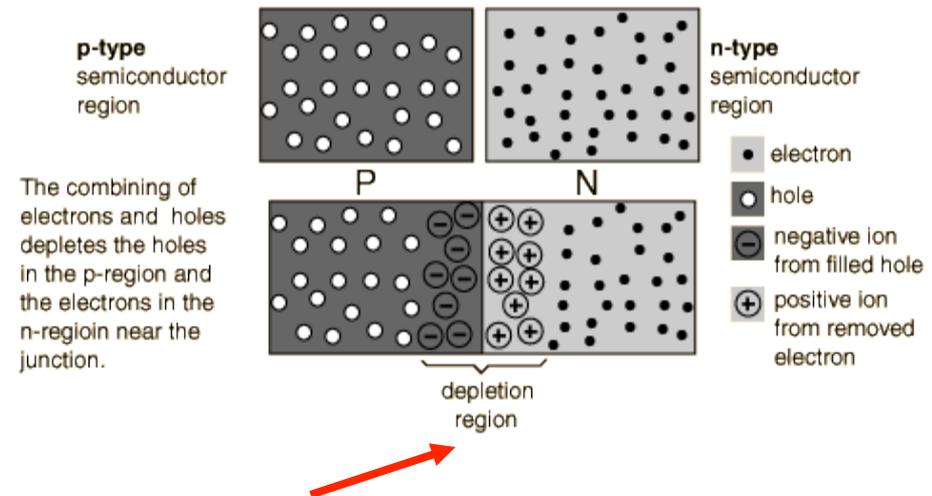
P-type

Costituente base: la giunzione p-n

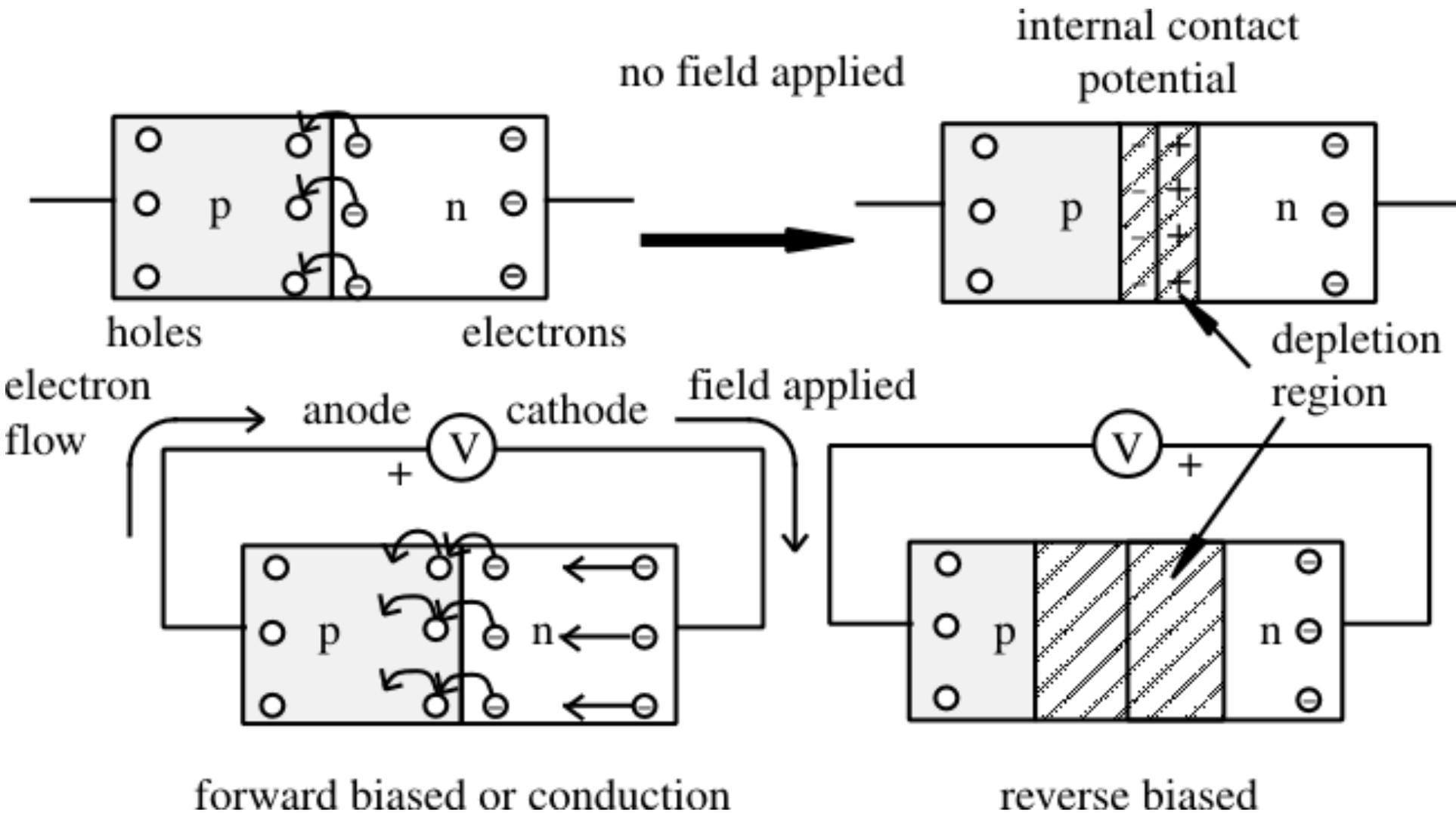
- chiamata anche **diode**
- permette alla corrente, idealmente, di scorrere solamente da p verso N



- 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



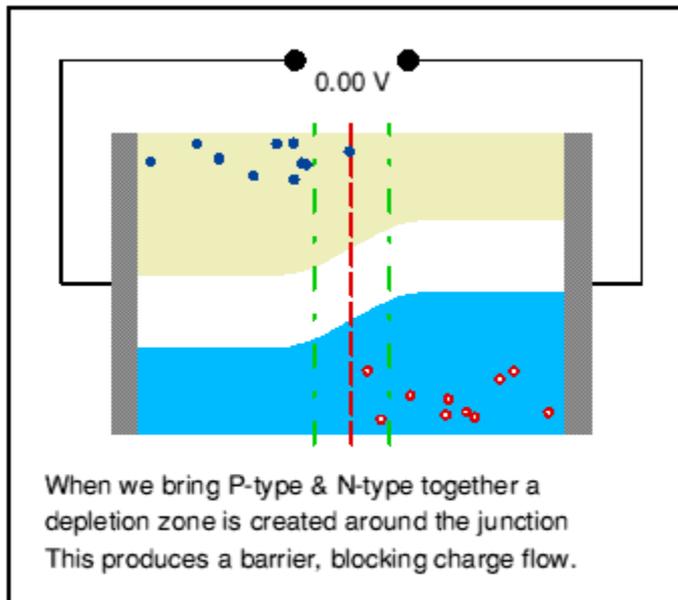
Bias esterno



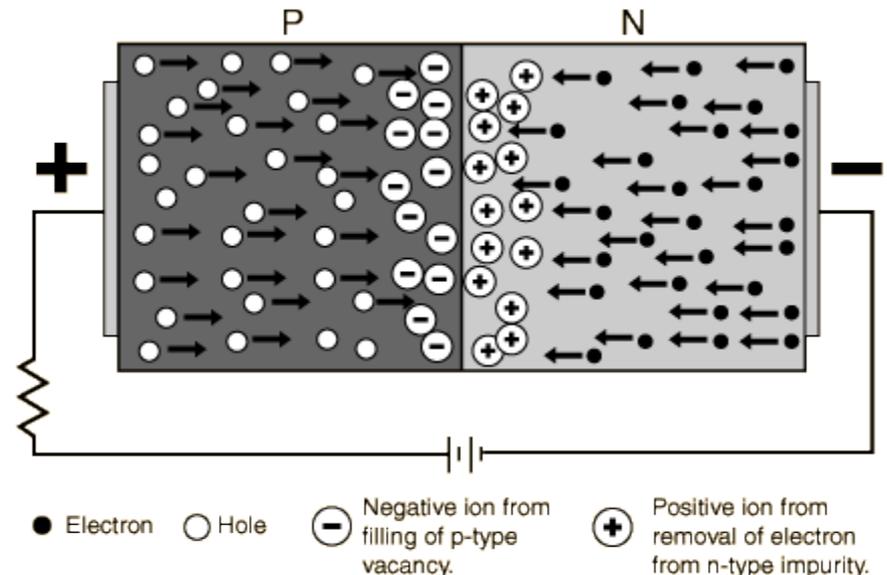
Polarizzazione (bias) diretta

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



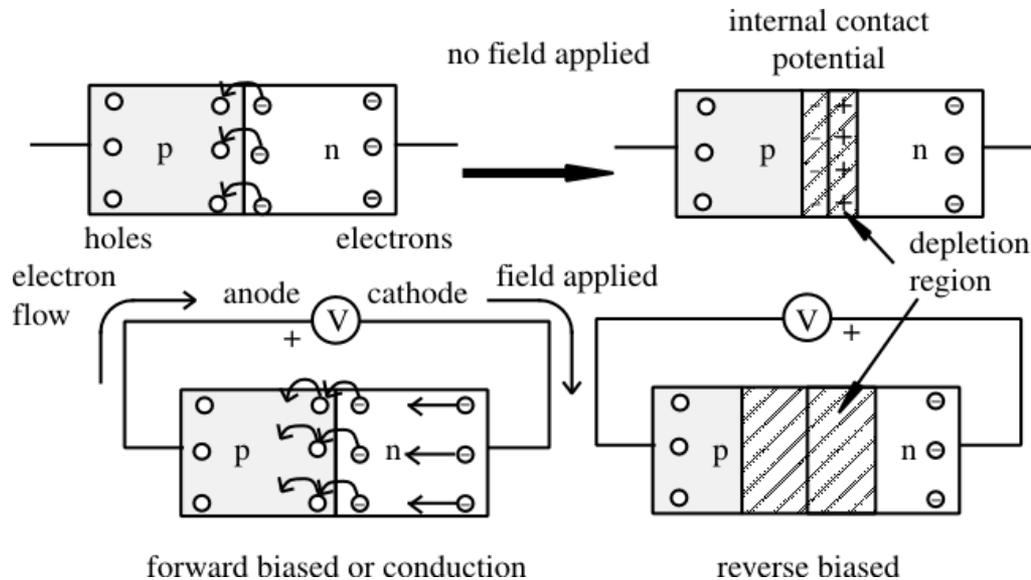
© J. C. G. Lesurf Univ. St. Andrews



Polarizzazione inversa

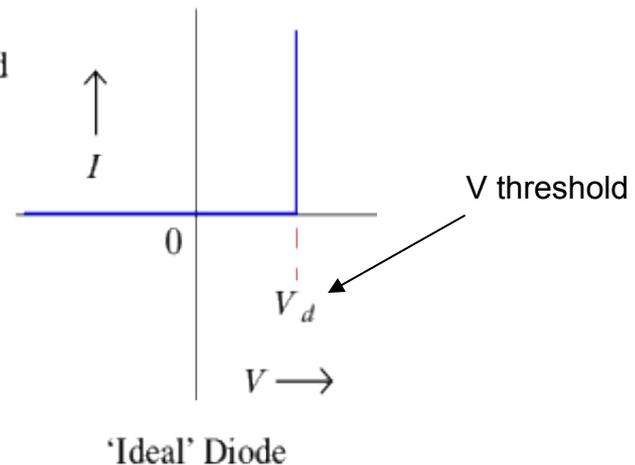
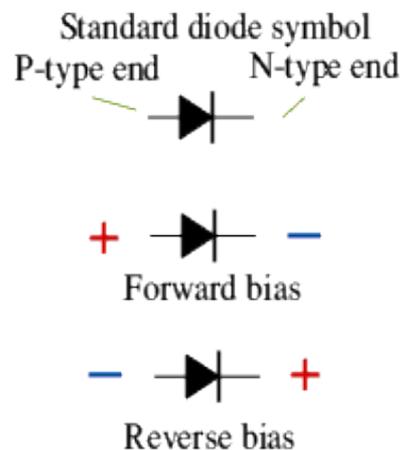
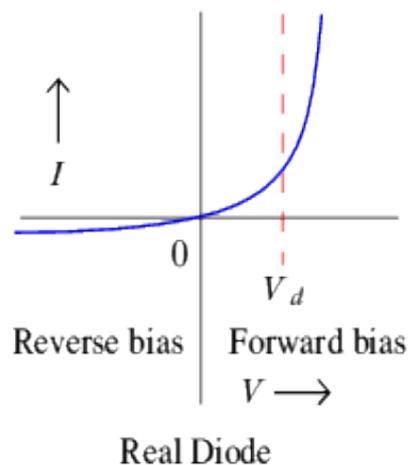
polarizzazione inversa:

- 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 : $I_{\text{flow}} = 10^{-6} \text{ A}$



Il diodo come rivelatore di particelle

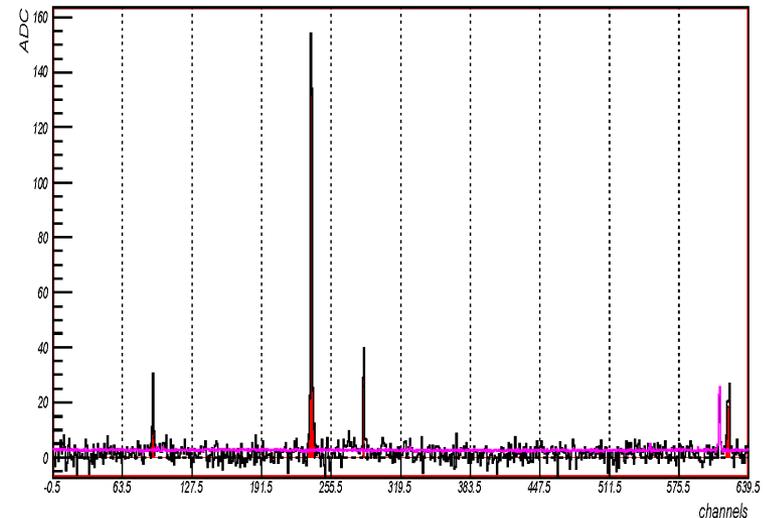
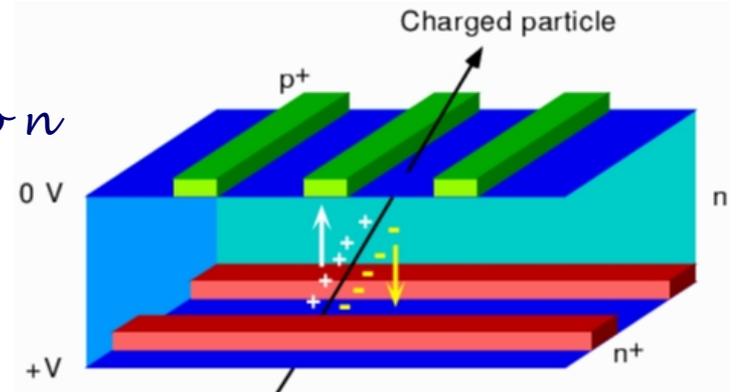
→ Una particella carica attraversa un sottile strato ($300\mu\text{ m}$) di silicio drogato n ed interagendo con il materiale libera 24000 coppie e/h ($\propto Z^2$)

→ 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

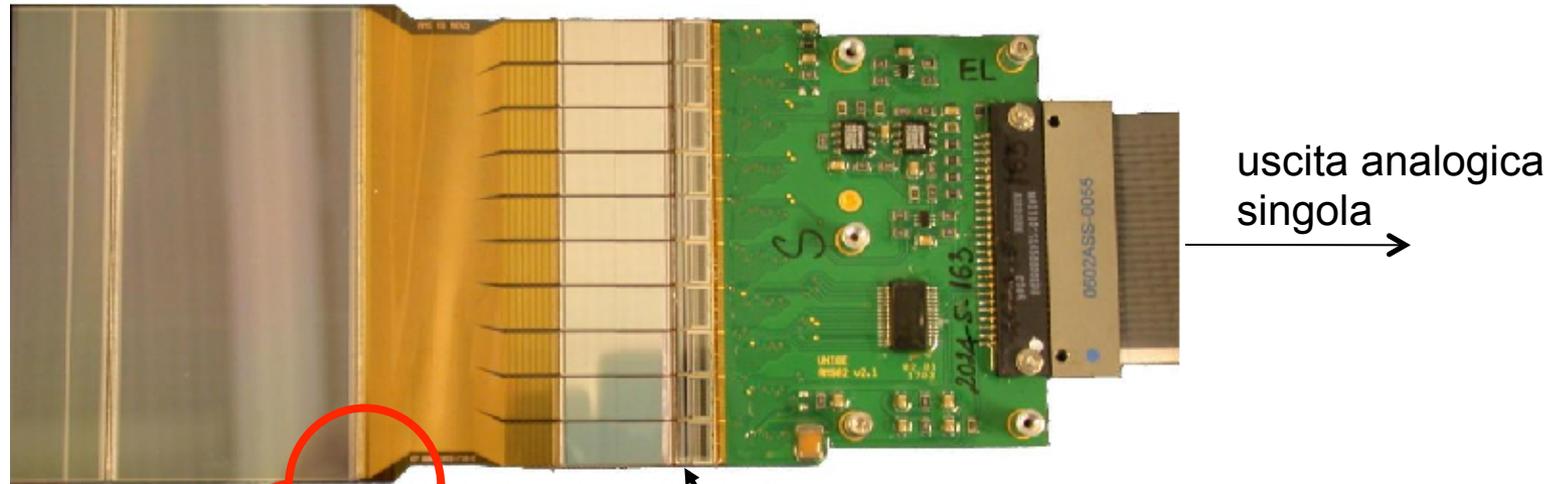
→ Le cariche e/h generate vengono raccolte dalle due parti della giunzione sulle strisce $p+$ e su delle strisce $n+$ dirette in senso ortogonale tramite contatti metallici

→ 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

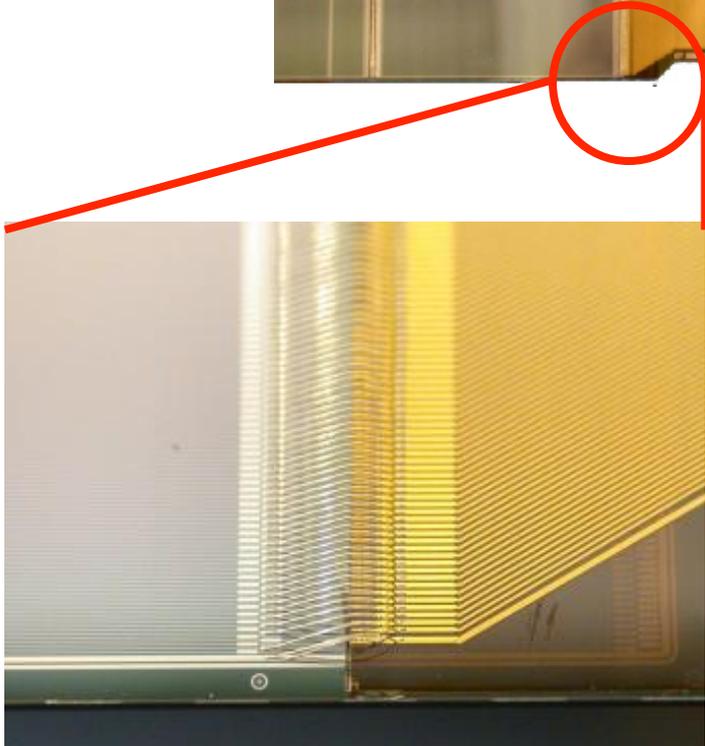


Rivelatore di particelle



uscita analogica
singola →

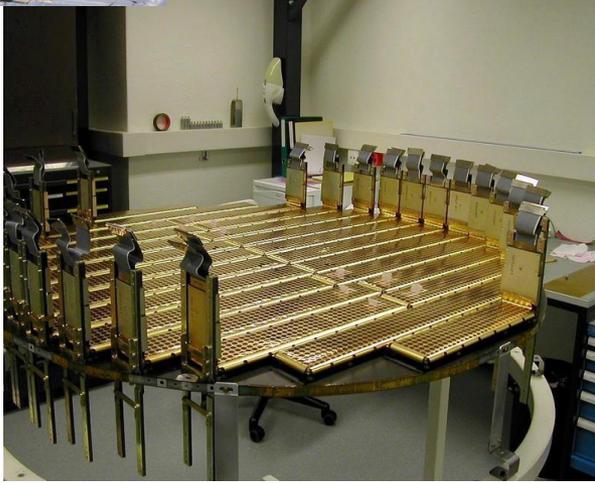
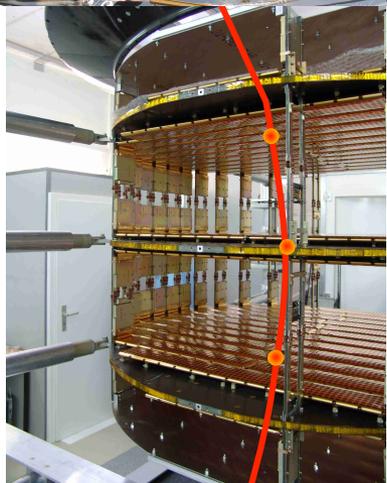
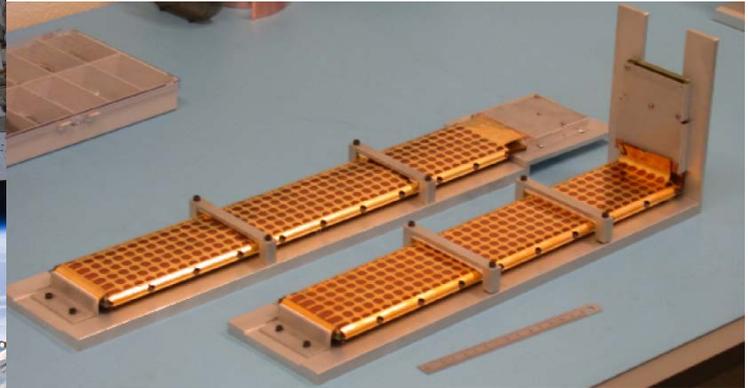
640 channels



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

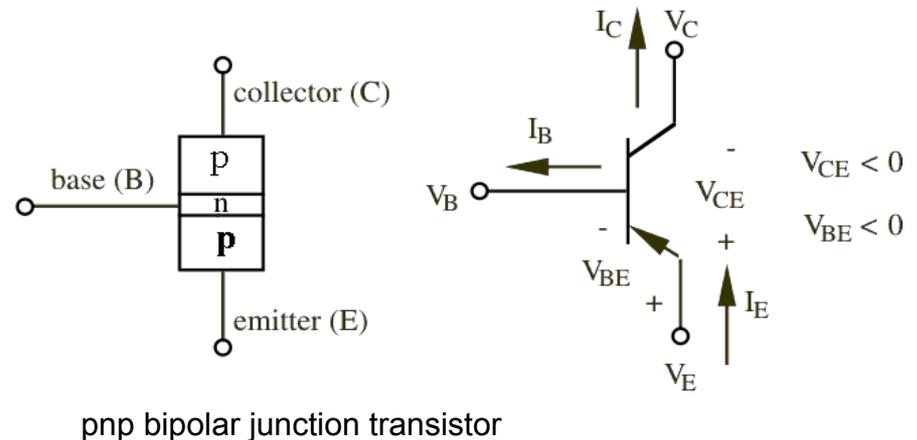
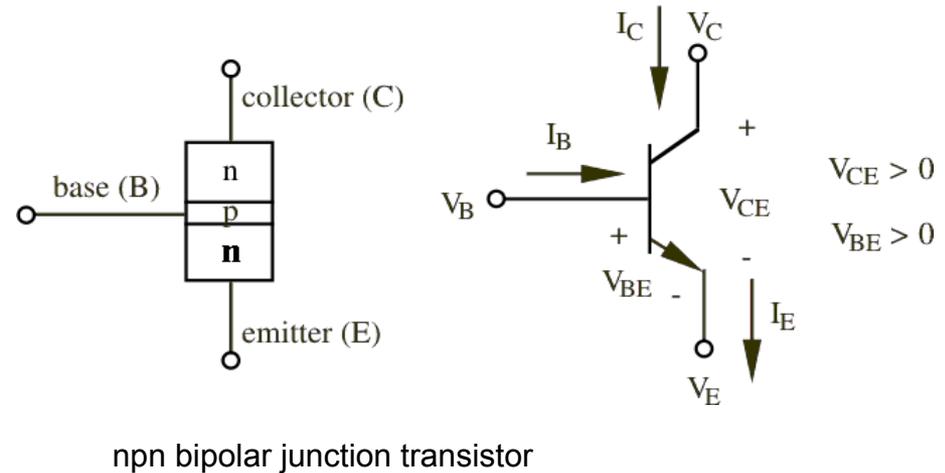
→ ~ 200k canali di lettura

Tracciatore al Si - AMS-02



Bipolar Junction Transistor (BJT)

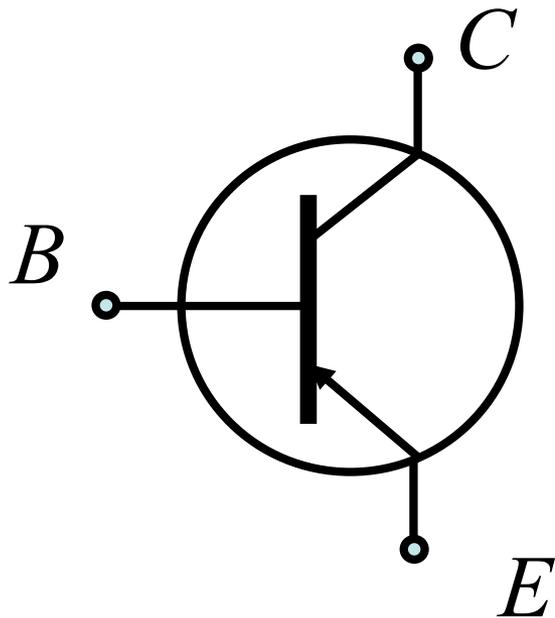
- 3 zone adiacenti di Si dopato (ognuna connessa ad un filo):
 - Base (sottile, poco dopata).
 - Collettore
 - Emettitore
- 2 tipi di BJT:
 - npn
 - pnp
- più comune: npn



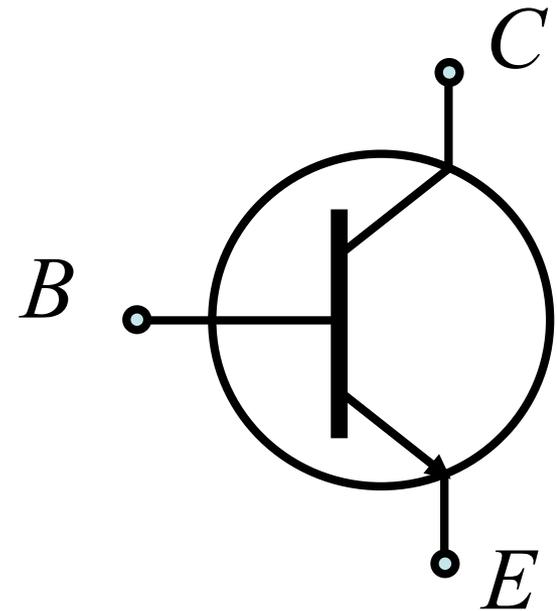
Sviluppato da
Shockley (1949)

Bipolar Junction Transistor (BJT)

pnp

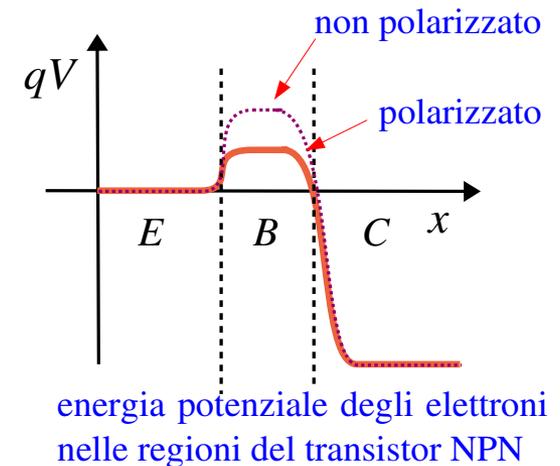
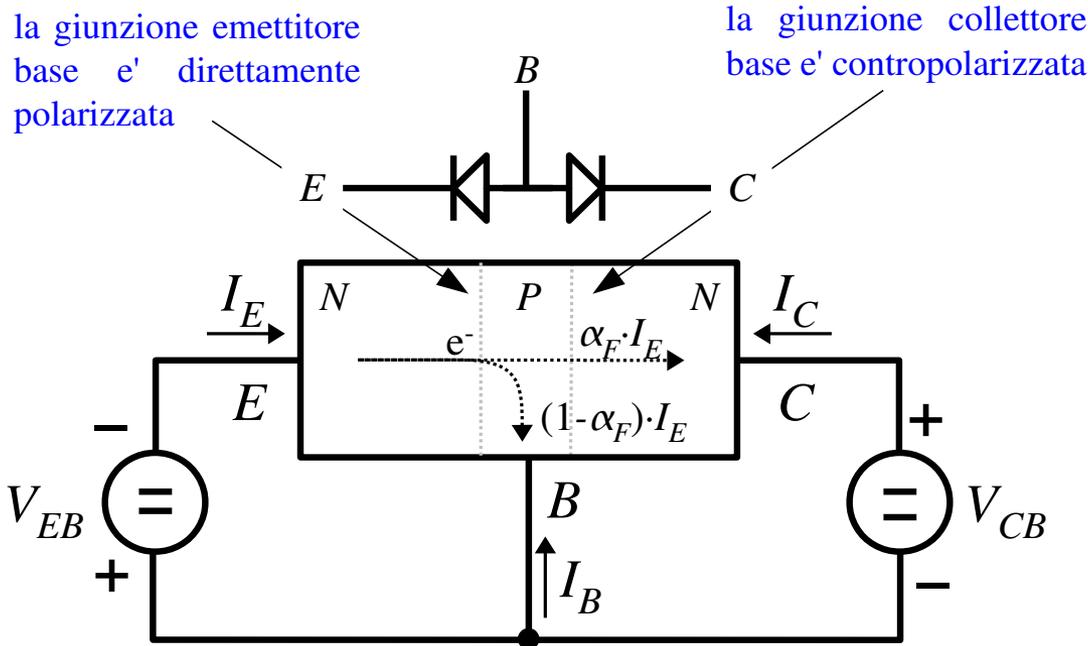


npn



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.
 - la corrente di base, I_B (piccola), controlla quella di collettore, I_C (più grande)



Caratteristica del BJT

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:

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

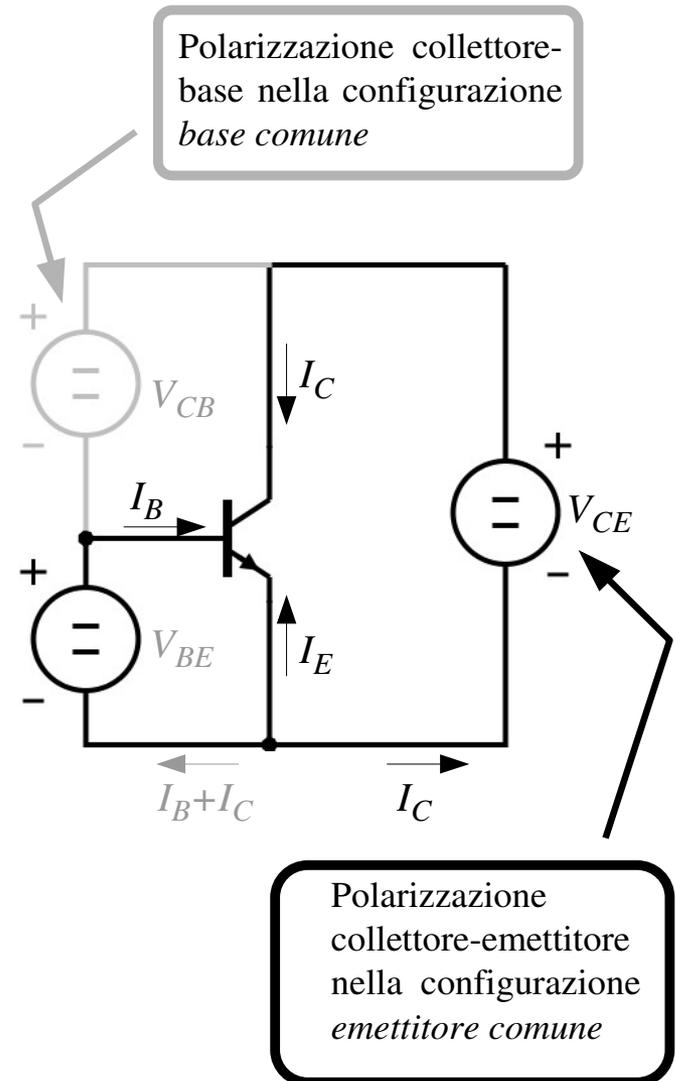
$$I_C = \frac{\alpha_F}{1 - \alpha_F} I_B = \beta_F I_B$$

coefficienti di amplificazione di corrente:

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

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

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



circuito con npn a Emettitore Comune

- E è a ground
- B-E inizia a condurre quando $V_{BE}=0.6V$, I_C fluisce e è $I_C=\beta*I_B$.
- Aumentando I_B , V_{BE} lentamente aumenta verso $0.7V$ ma I_C cresce esponenzialmente (fino alla saturazione, $V_{CE} \rightarrow 0$, in cui si perde la linearità fra I_C e I_B)

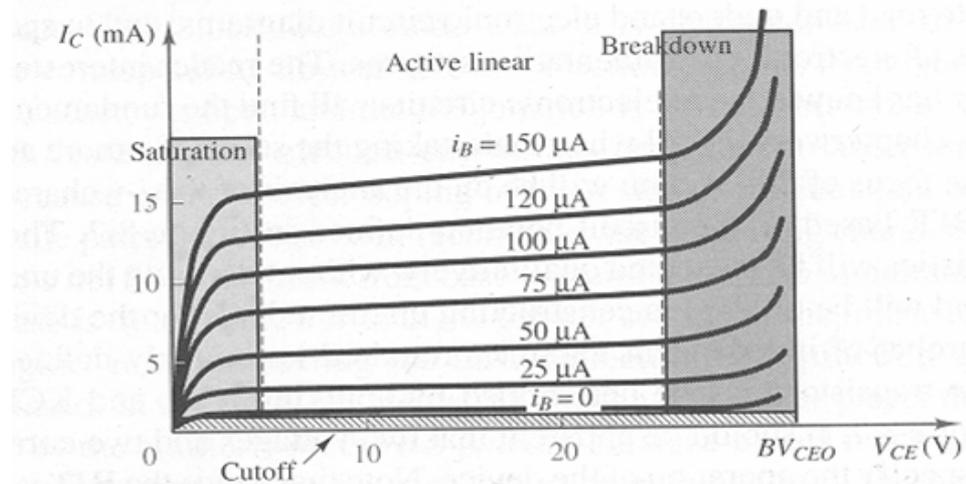
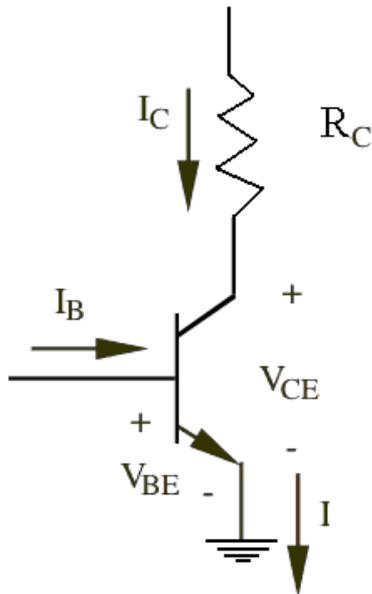


Figure 8.9(b) The collector-emitter output characteristics of a BJT

Caratteristica con Emittitore Comune

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

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

corrente di collettore proporzionale a quella di base

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

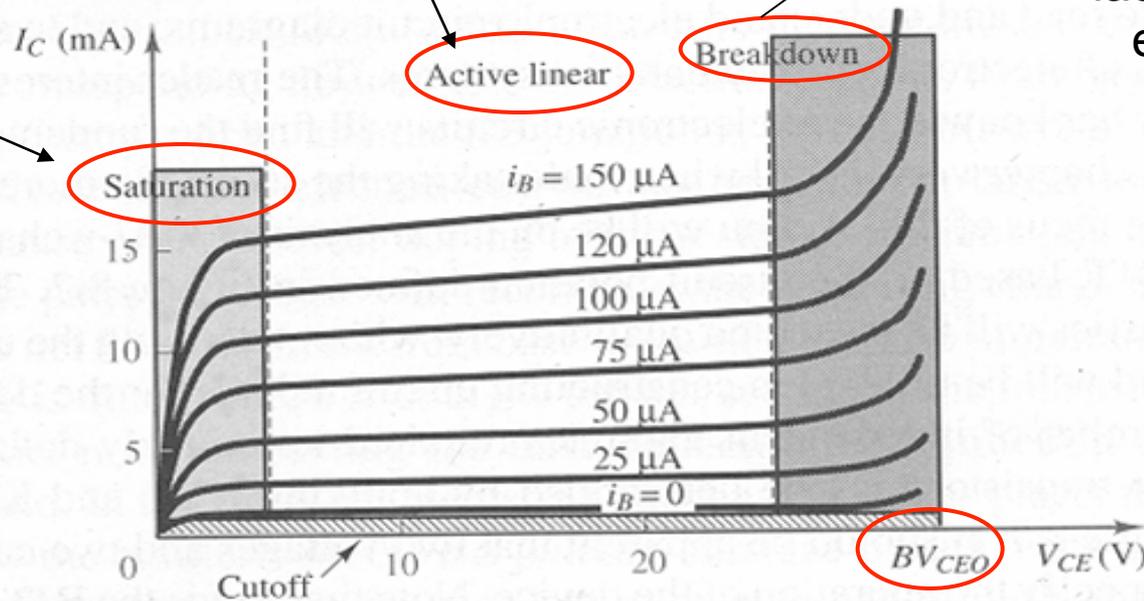
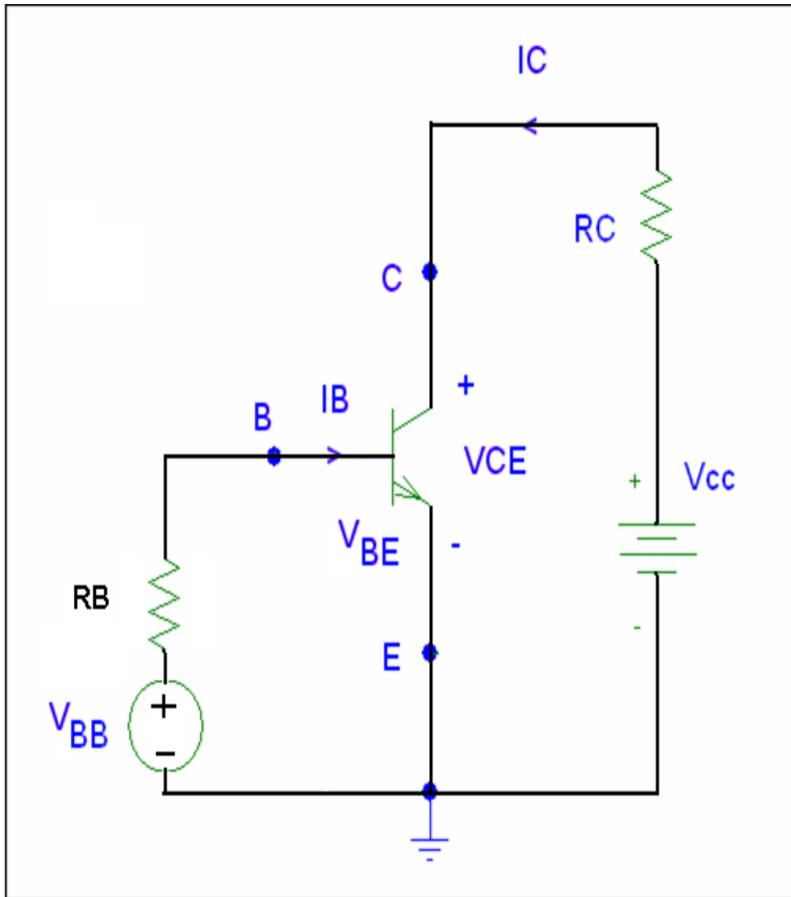


Figure 8.9(b) The collector-emitter output characteristics of a BJT

Punto di lavoro del BJT



- Ogni I_B ha una curva I-V corrispondente.
- Selezionando I_B e V_{CE} , possiamo trovare il punto di lavoro, o Q-point.
- Applicando la legge di Kirchoff attorno a B-E sul circuito al collettore abbiamo:

$$I_B = (V_{BB} - V_{BE}) / R_B$$
$$V_{CE} = V_{CC} - I_C * R_C$$

$$I_C = \frac{V_{CC}}{R_C} - \frac{V_{CE}}{R_C}$$

Punto di lavoro del BJT

$$I_C = \frac{V_{CC}}{R_C} - \frac{V_{CE}}{R_C}$$

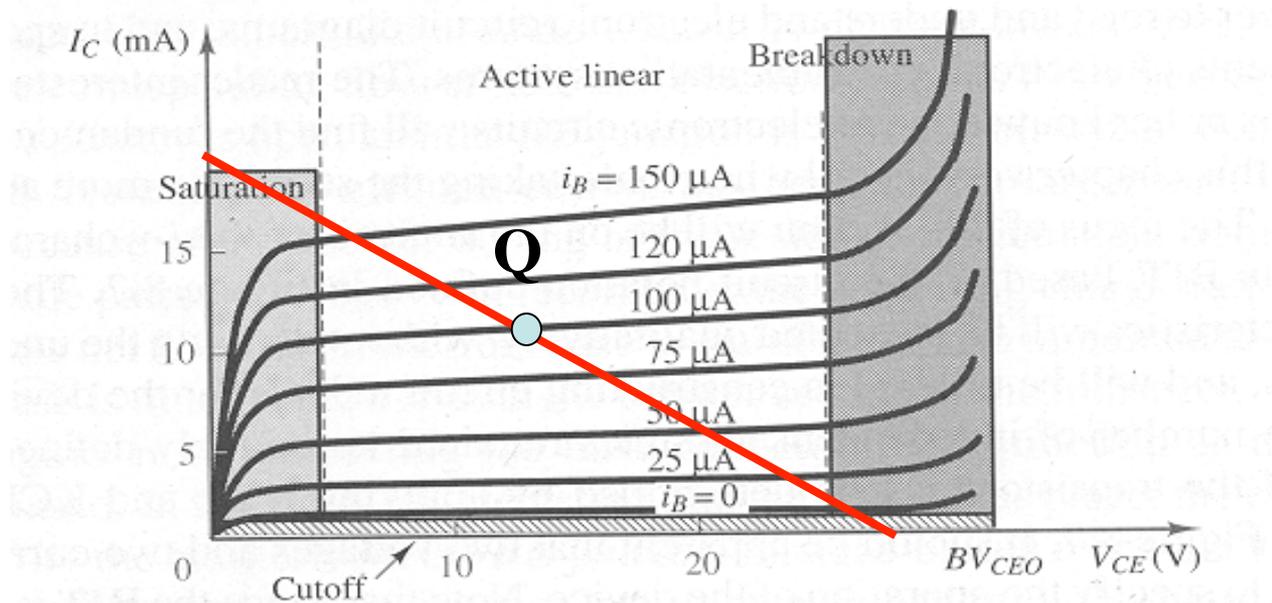
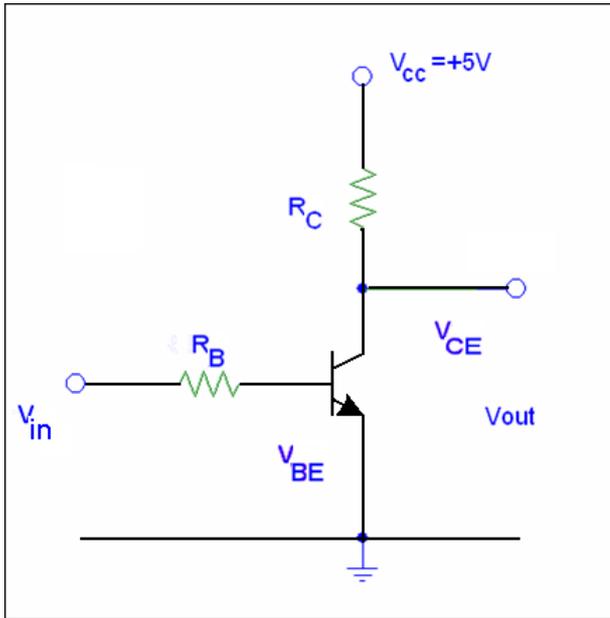


Figure 8.9(b) The collector-emitter output characteristics of a BJT

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 ($V_{BE} = 0.7\text{V}$)

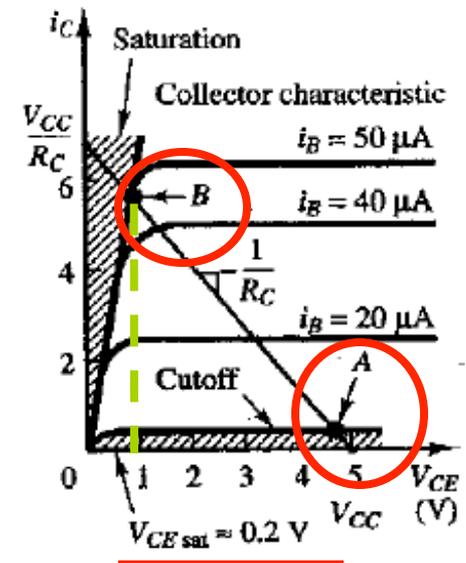
- Regione di saturazione

- V_{CE} piccola ($\sim 0.2\text{ V}$, BJT in saturazione)

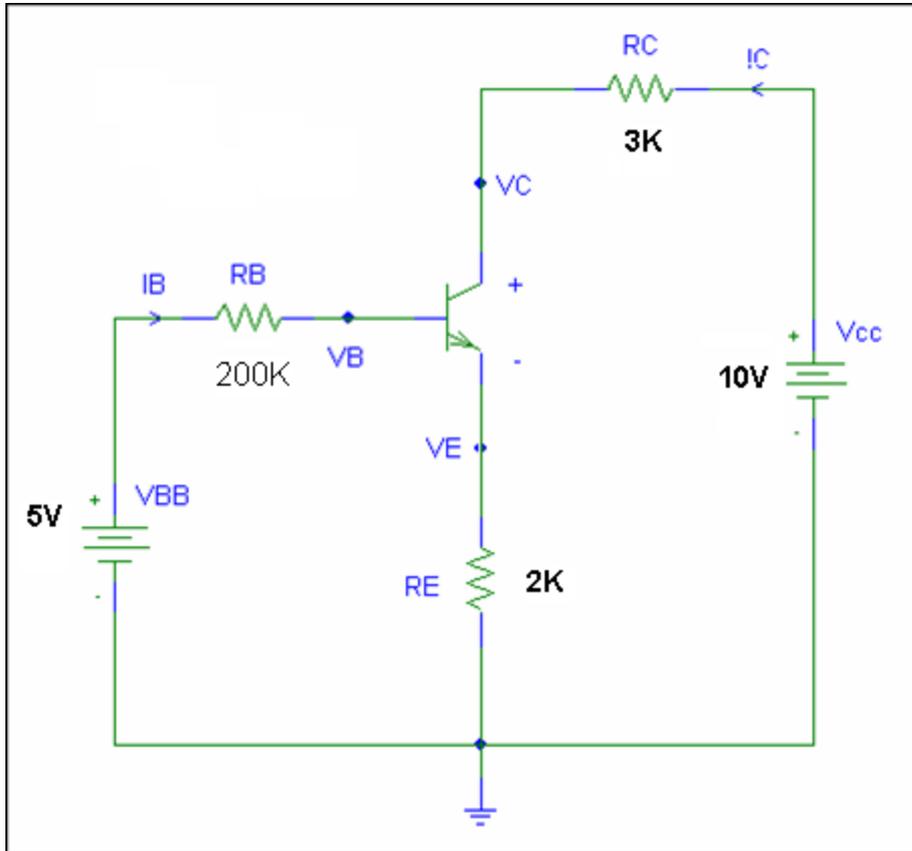
- V_{out} = piccola

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

V_{out} = “bassa”



BJT come amplificatore

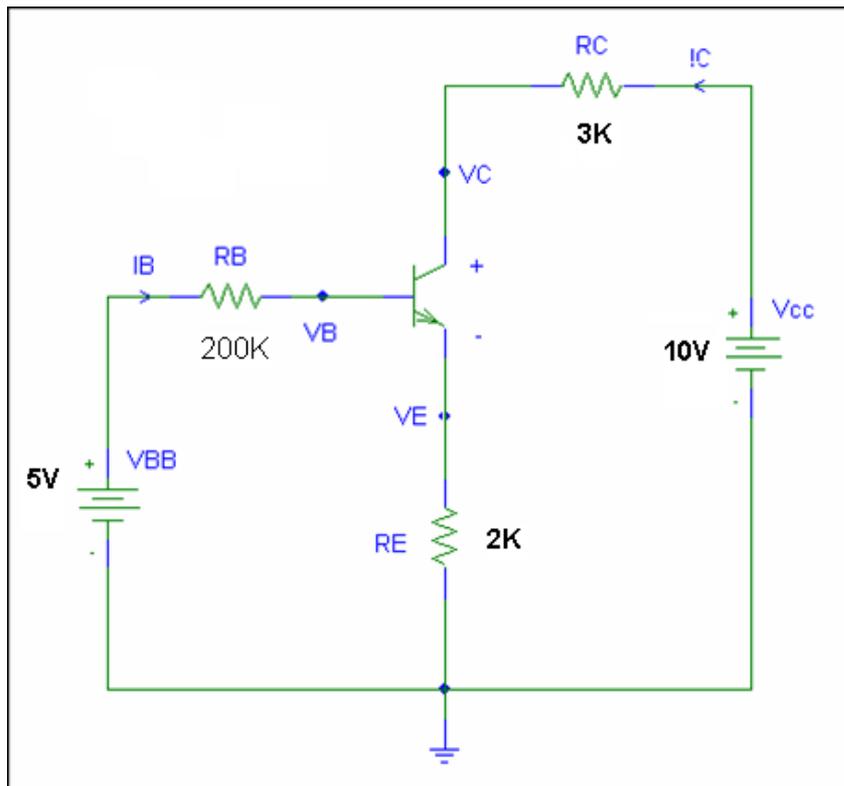


- Emittitore comune
- Regione di linearità
- Guadagno elevato

Esempio:

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

BJT come amplificatore



$$V_{BE} = 0.7V$$

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

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

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

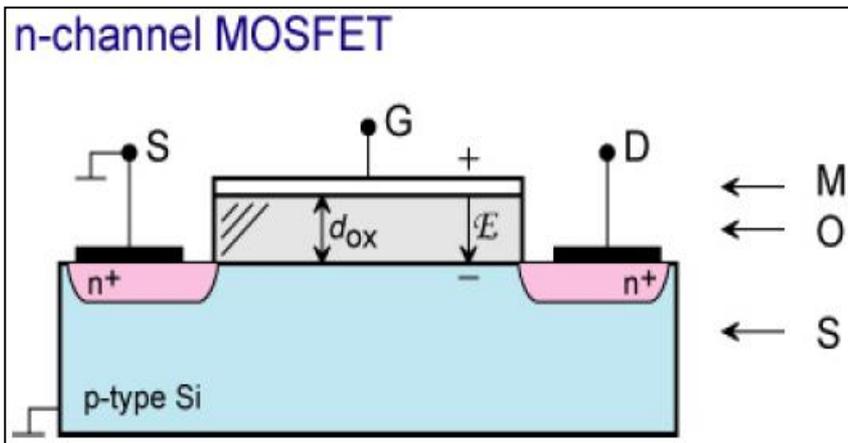
$$\begin{aligned} V_{CB} &= V_{CC} - I_C * R_C - I_E * R_E - V_{BE} = \\ &= 10 - (3)(1.07) - (2)(101 * 0.0107) - 0.7 = \\ &= 3.93V \end{aligned}$$

$V_{CB} > 0$ 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