

Laboratorio II, modulo 2

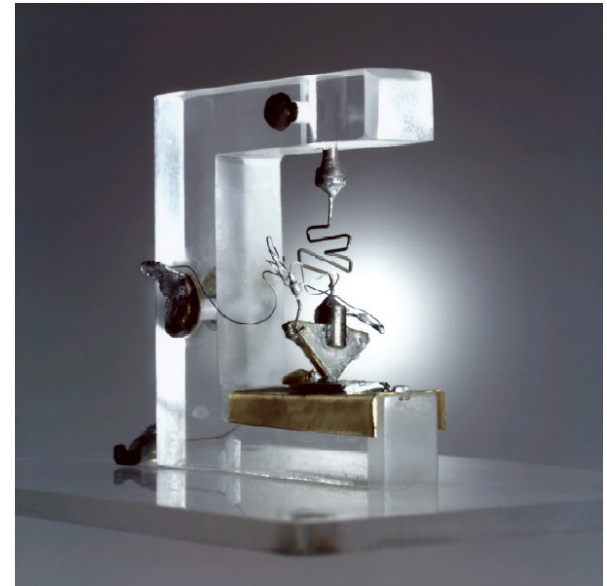
2016-2017

Transistor

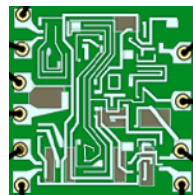
(cfr. <http://studenti.fisica.unifi.it/~carla/appunti/2008-9/cap.4.pdf>
http://ume.gatech.edu/mechatronics_course/Transistor_F04.ppt)

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.

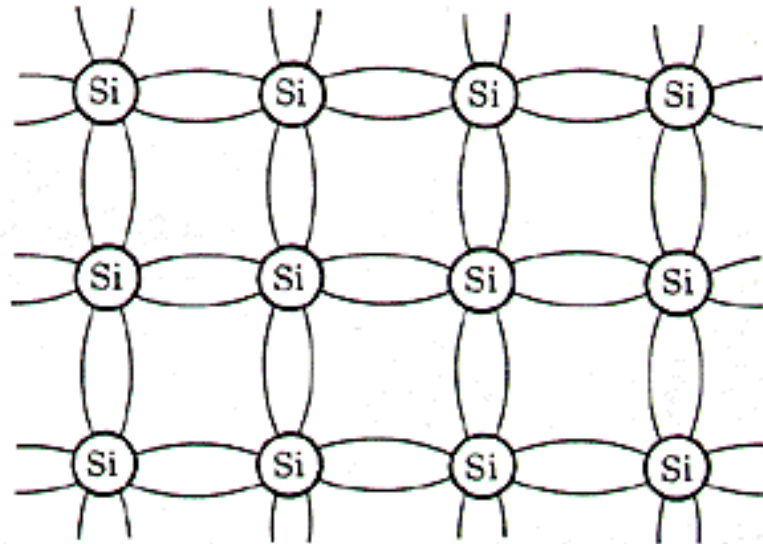


Semiconduttori

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	2											13	14	15	16	17	18
1	2											5	6	7	8	9	10
1	2											B	C	N	O	F	Ne
3	4											10.811	12.011	14.007	15.999	18.998	20.180
3	4											13	14	15	16	17	18
3	4											Al	Si	P	S	Cl	Ar
11	12											26.982	28.086	30.974	32.066	35.453	39.948
11	12											31	32	33	34	35	36
4	5	IIIB	IVB	VB	VIB	VIIIB	VIII B			IIB	31	32	33	34	35	36	
4	5	III B	IV B	V B	VI B	VII B	VIII B			I B	Ga	Ge	As	Se	Br	Kr	
19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	31	32	33	34	35	36
4	5	Sc	Ti	V	Cr	Mn	Fe	Co	Ni	Cu	Zn	31	32	33	34	35	36
39.098	40.078	44.956	47.88	50.942	51.996	54.938	55.845	58.933	58.69	63.546	65.39	69.723	72.61	74.922	78.96	79.904	83.8
37	38	39	40	41	42	43	44	45	46	47	48	49	50	51	52	53	54
5	6	Y	Zr	Nb	Mo	Tc	Ru	Rh	Pd	Ag	Cd	49	50	51	52	53	54
85.468	87.62	88.906	91.224	92.906	95.94	98	101.07	102.906	106.42	107.868	112.411	114.82	118.71	121.76	127.60	126.905	131.29
55	56	57	72	73	74	75	76	77	78	79	80	81	82	83	84	85	86
6	7	La	Hf	Ta	W	Re	Os	Ir	Pt	Au	Hg	81	82	83	84	85	86
132.905	137.327	138.906	178.49	180.948	183.84	186.207	190.23	192.22	195.08	196.967	200.59	204.383	207.2	208.980	209	210	211
87	88	89	104	105	106	107	108	109	110	111	112		114		116		118
7	8	Ac	Rf	Db	Sg	Bh	Hs	Mt	Uun	Uuu	Uub						
223	226.025	227.028	261	262	263	262	265	266	269	272	277						

Rare earth elements													
Lanthanides													
58	59	60	61	62	63	64	65	66	67	68	69	70	71
Ce	Pr	Nd	Pm	Sm	Eu	Gd	Tb	Dy	Ho	Er	Tm	Yb	Lu
140.115	140.908	144.24	145	150.36	151.964	157.25	158.925	162.5	164.93	167.26	168.934	173.04	174.967
Actinides													
90	91	92	93	94	95	96	97	98	99	100	101	102	103
Th	Pa	U	Np	Pu	Am	Cm	Bk	Cf	Es	Fm	Md	No	Lr
232.038	231.036	238.029	237.048	244	243	247	247	251	252	257	258	259	262

Semiconduttori: dopaggio

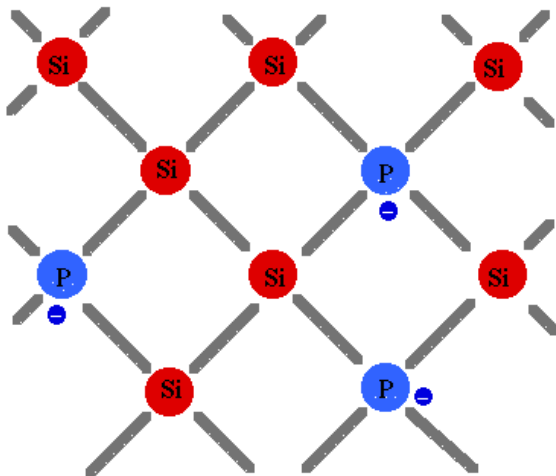
Due tipi di dopaggio

1. *N-type* (negativo)

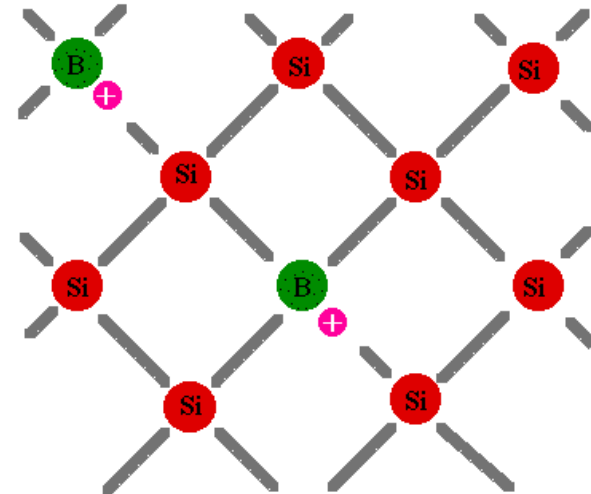
- impurità di **donori** (dal Gruppo V) aggiunte al reticolo cristallino del Si
- portatori di carica dominante: **elettroni negativi**
- elementi del **Gruppo V** come **Fosforo, Arsenico e Antimonio**

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**



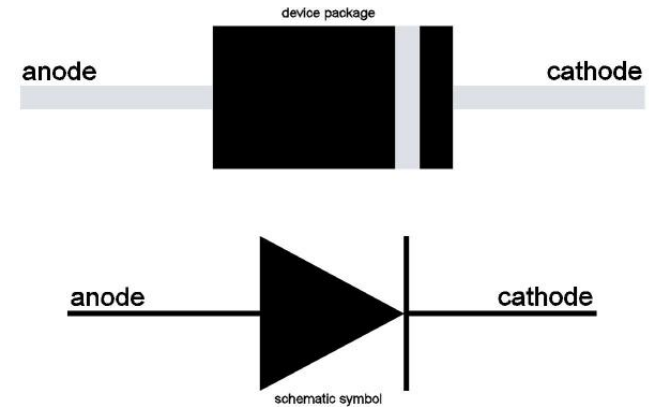
N-type



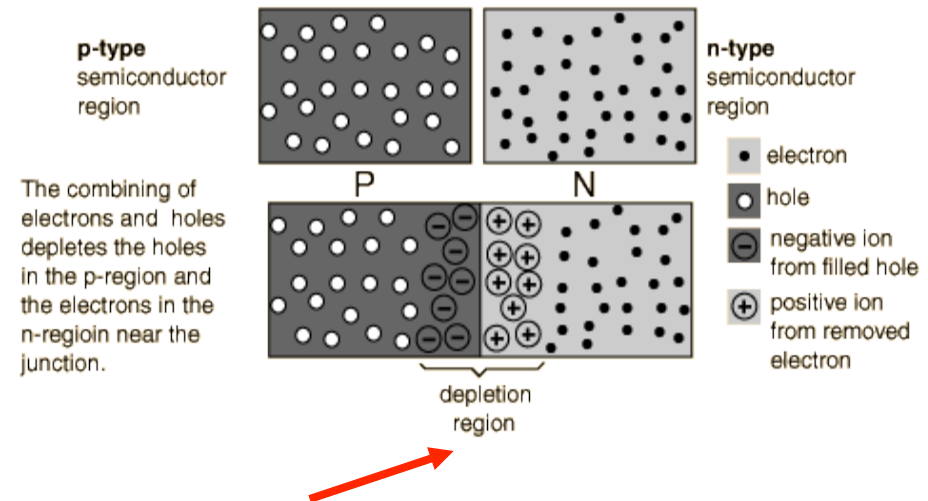
P-type

Costituente base: la giunzione p-n

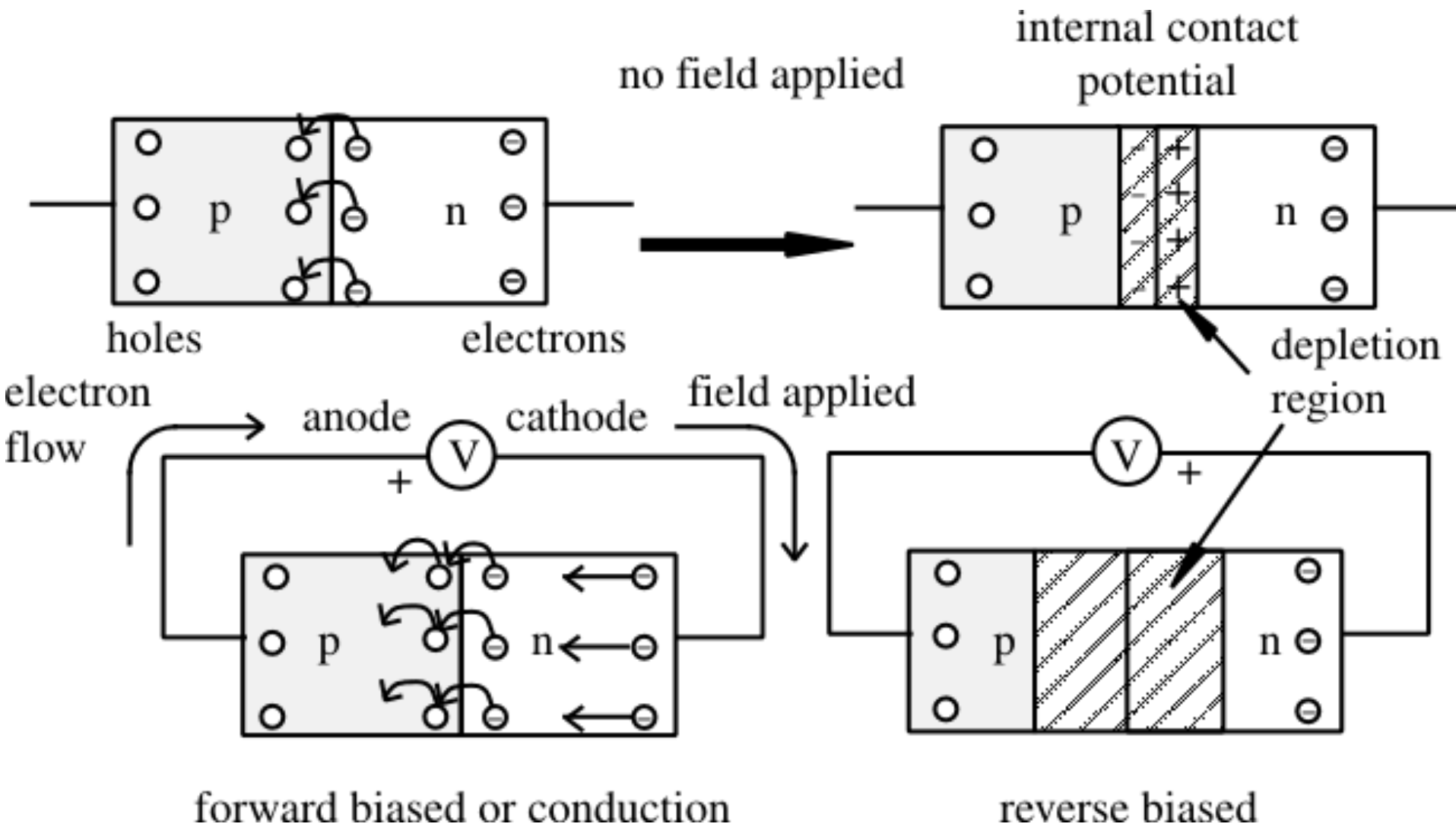
- chiamata anche **diode**
- permette alla corrente, idealmente, di scorrere solamente da p verso N



- 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



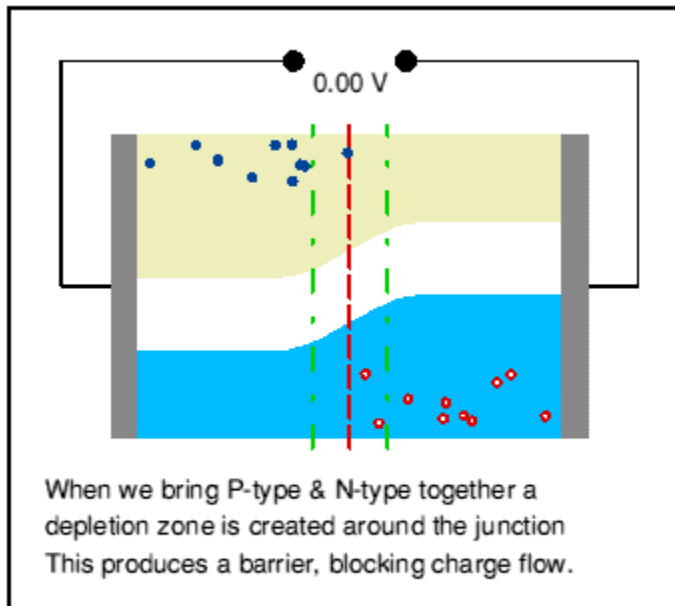
Bias esterno



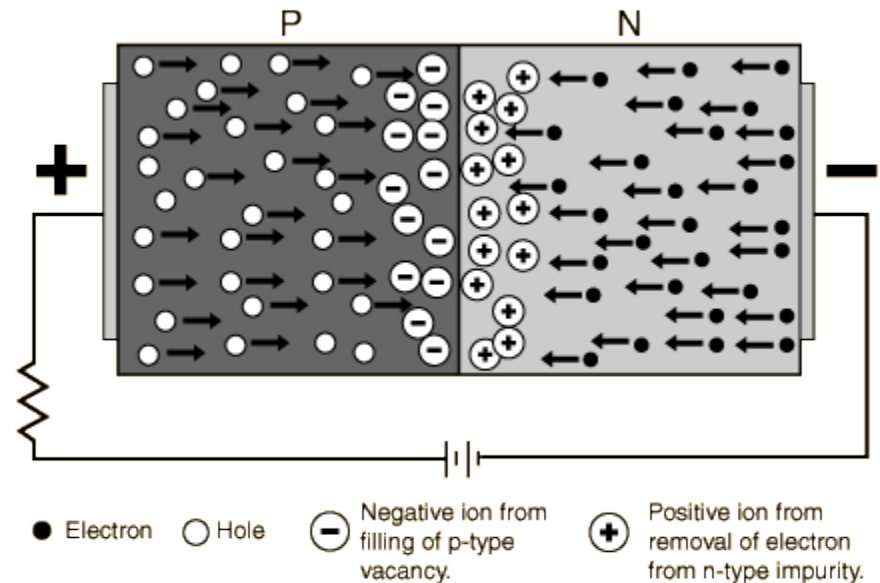
Polarizzazione (bias) diretta

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



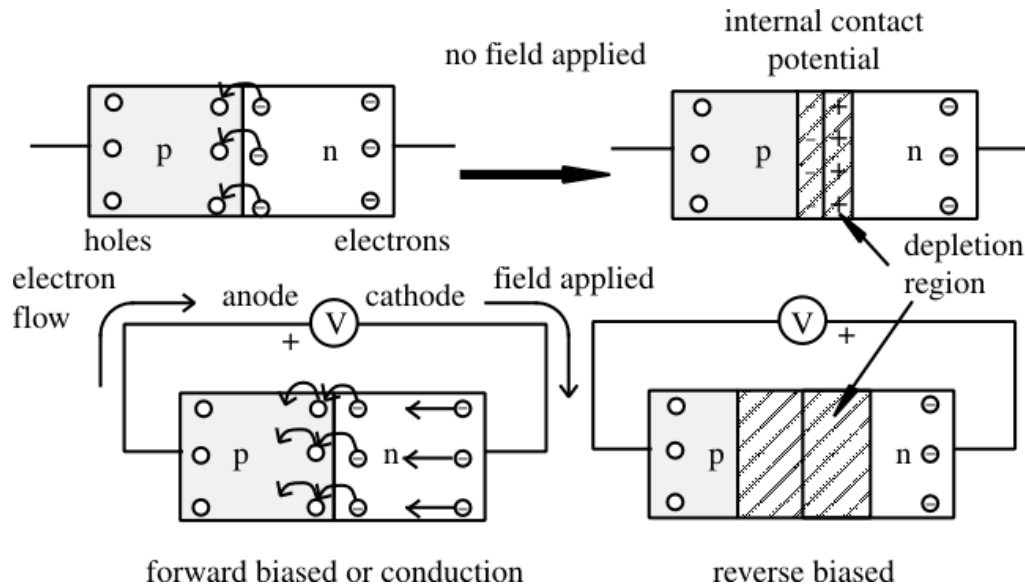
© J. C. G. Lesurf Univ. St. Andrews



Polarizzazione inversa

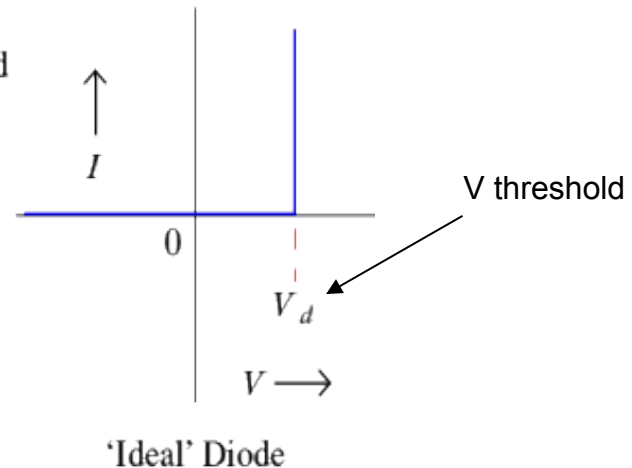
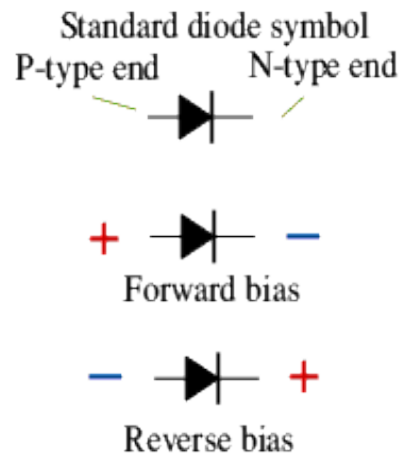
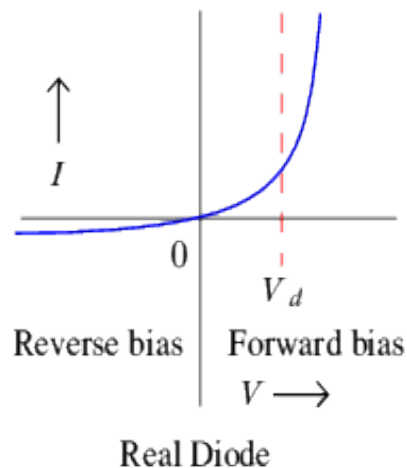
polarizzazione inversa:

- 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")



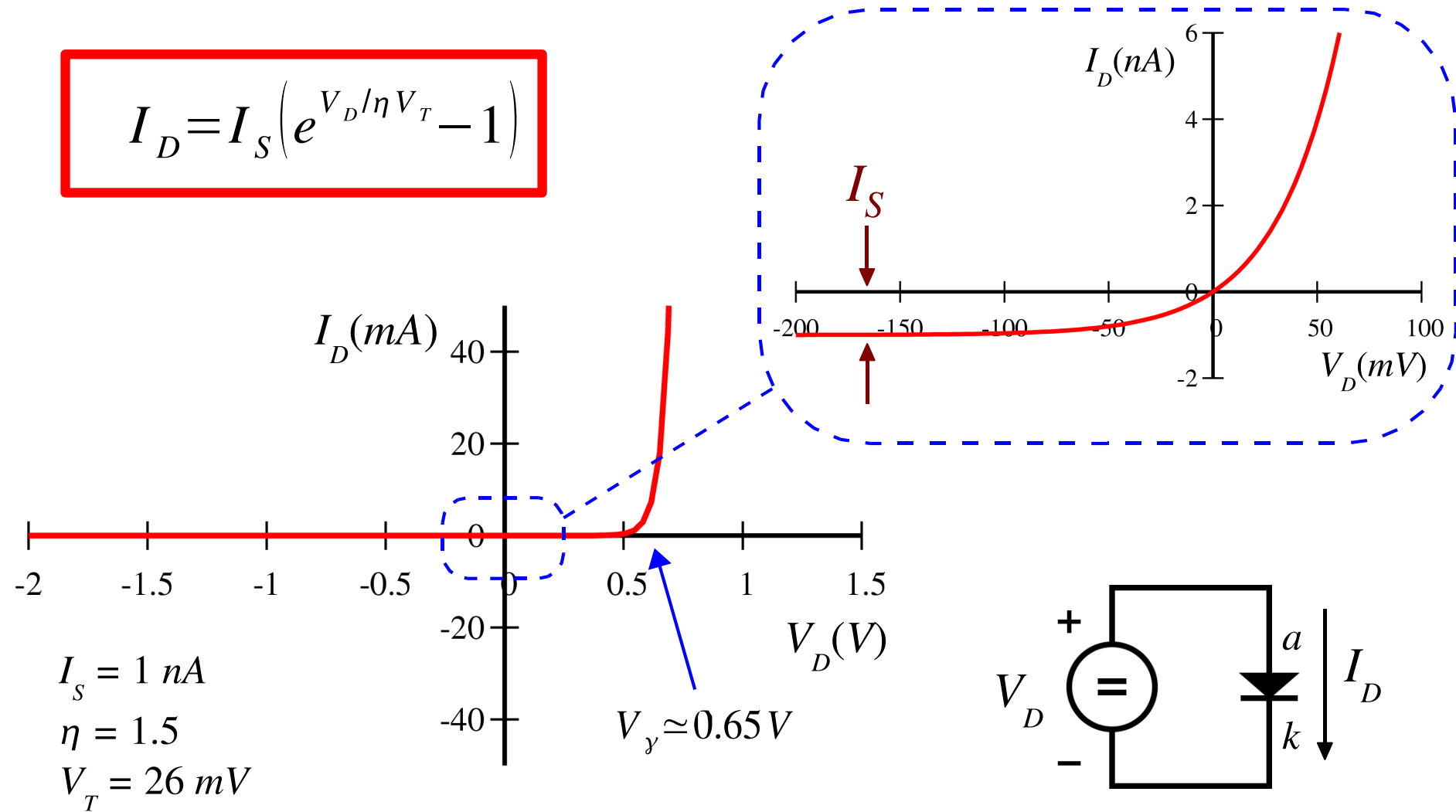
Caratteristica del diodo

- 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

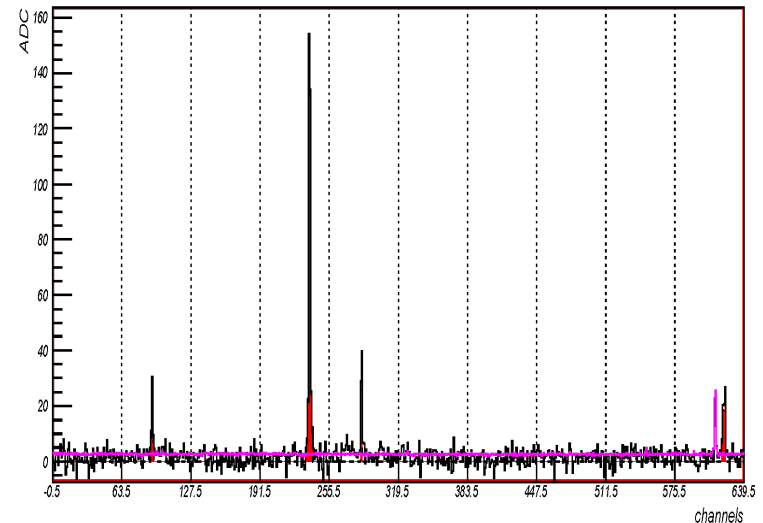
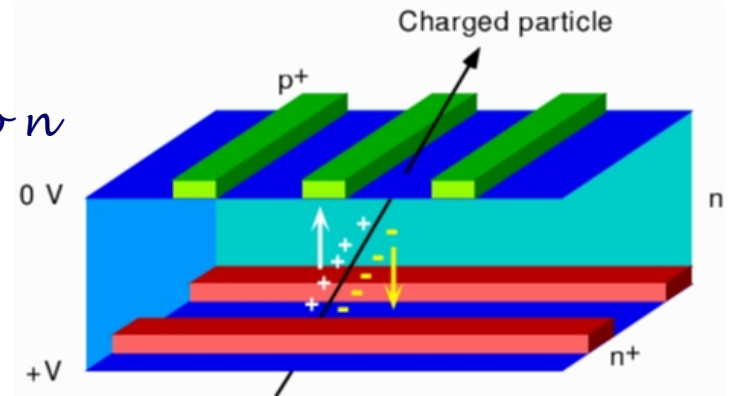
→ Una particella carica attraversa un sottile strato ($300\mu\text{ m}$) di silicio drogato n ed interagendo con il materiale libera 24000 coppie e/h ($\propto Z^2$)

→ 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

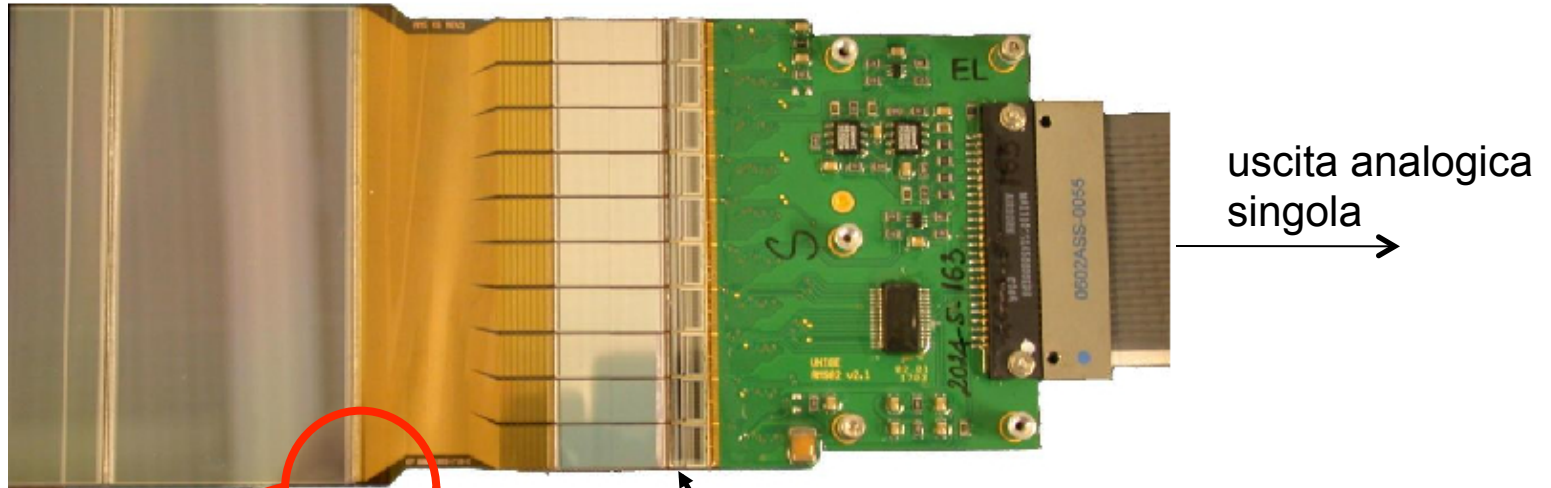
→ Le cariche e/h generate vengono raccolte dalle due parti della giunzione sulle strisce p^+ e su delle strisce n^+ dirette in senso ortogonale tramite contatti metallici

→ 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

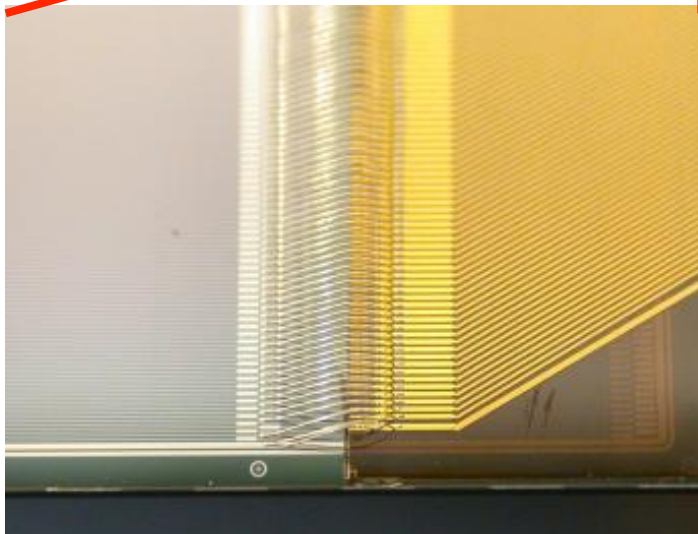


Rivelatore di particelle



uscita analogica
singola →

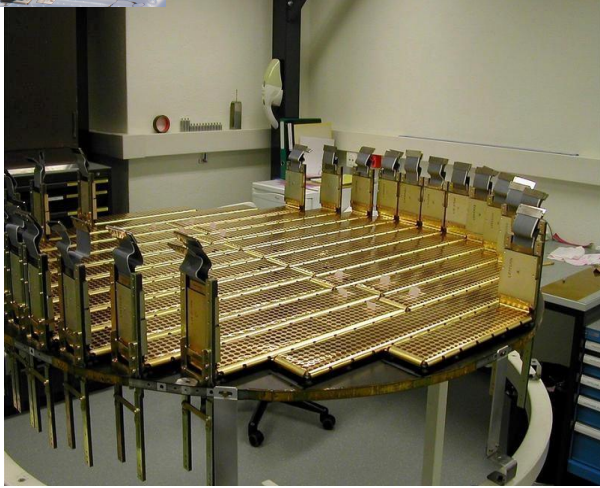
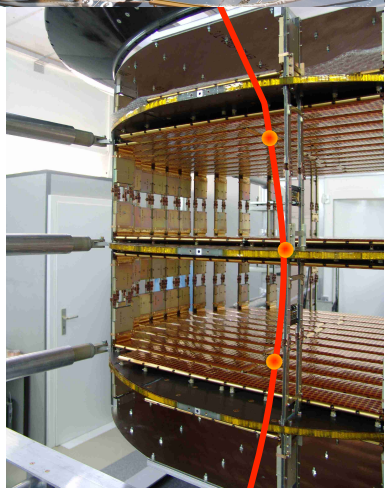
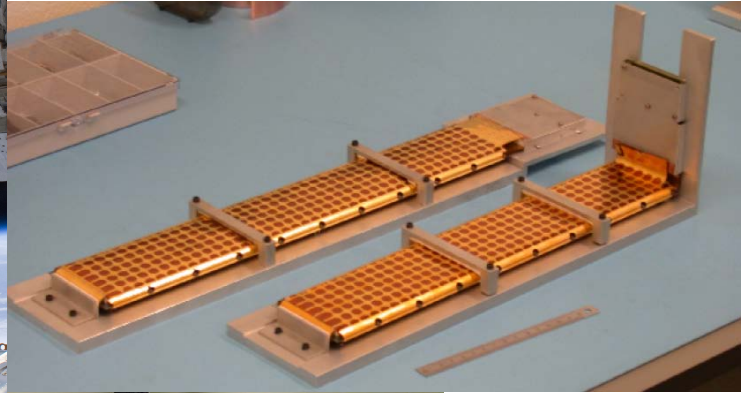
640 channels



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

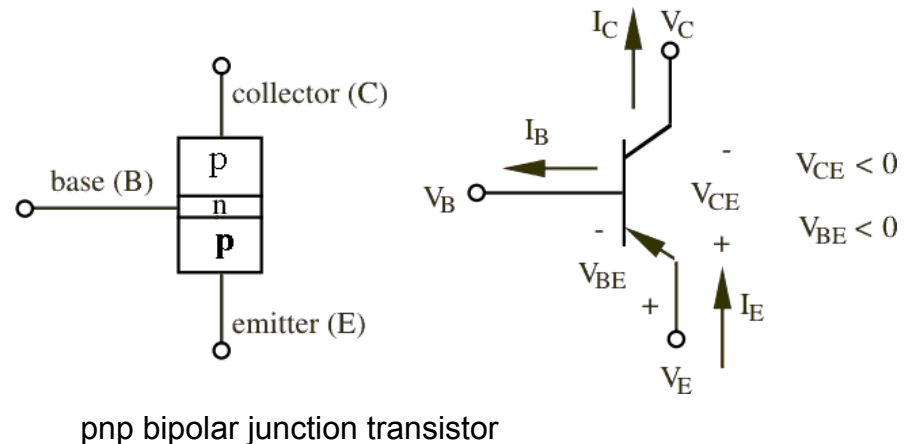
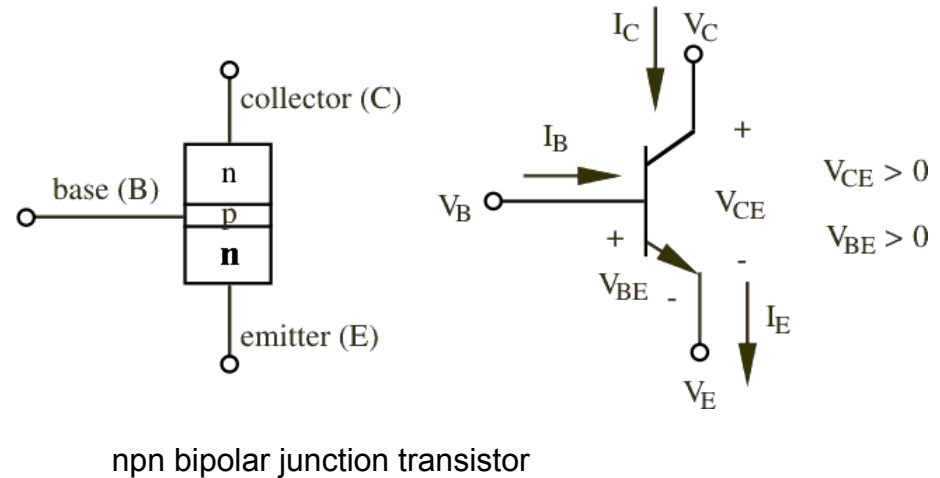
→ ~ 200k canali di lettura

Tracciatore al Si - AMS-02



Bipolar Junction Transistor (BJT)

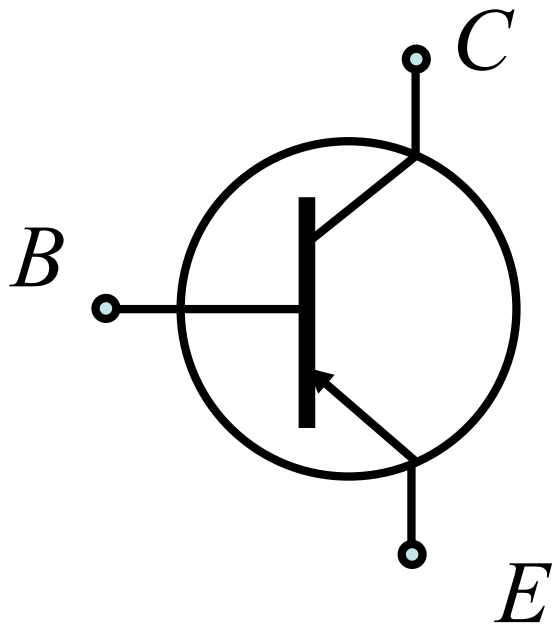
- 3 zone adiacenti di Si dopato (ognuna connessa ad un filo):
 - Base (sottile, poco dopata).
 - Collettore
 - Emettitore
- 2 tipi di BJT:
 - npn
 - pnp
- più comune: npn



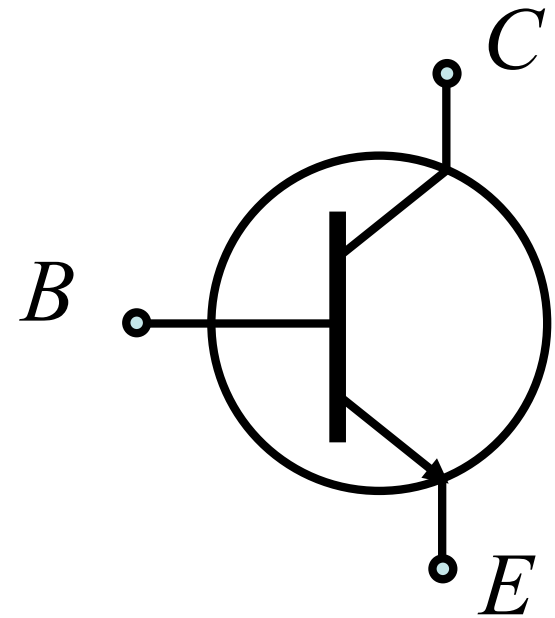
Sviluppato da
Shockley (1949)

Bipolar Junction Transistor (BJT)

pnp

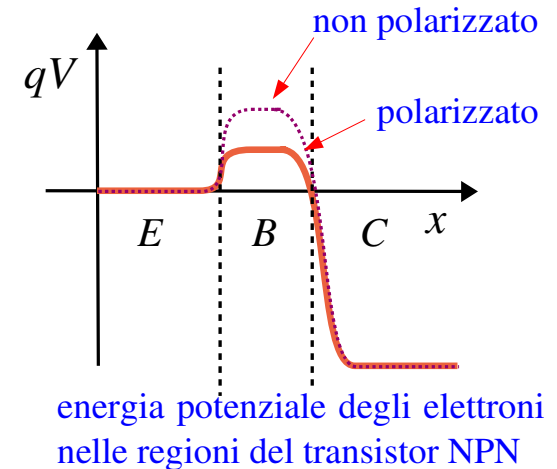
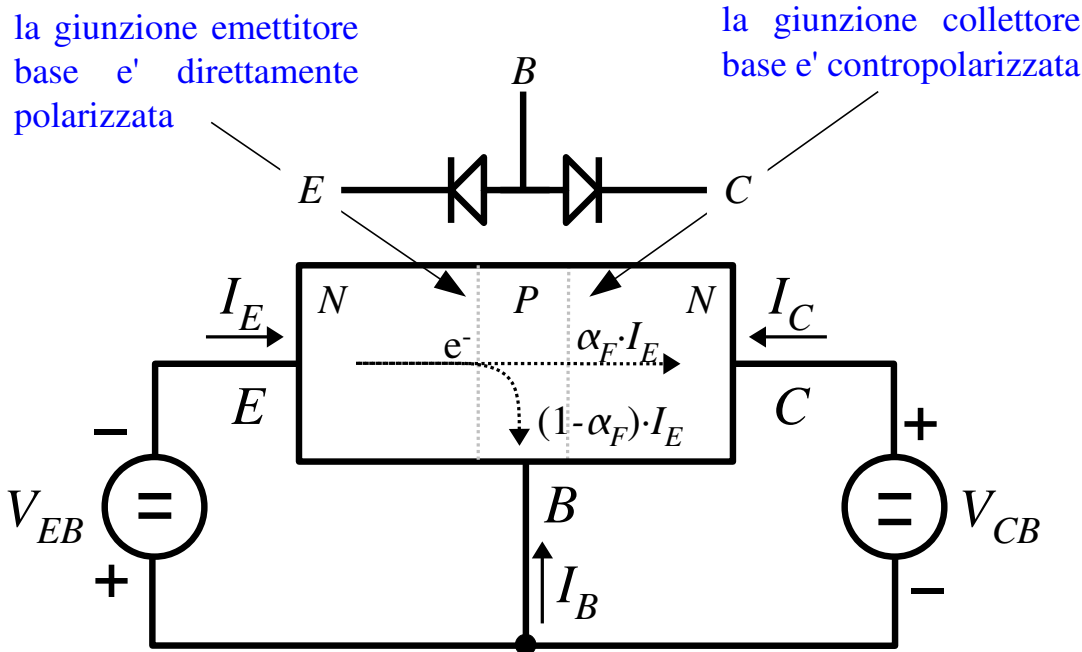


npn



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:

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

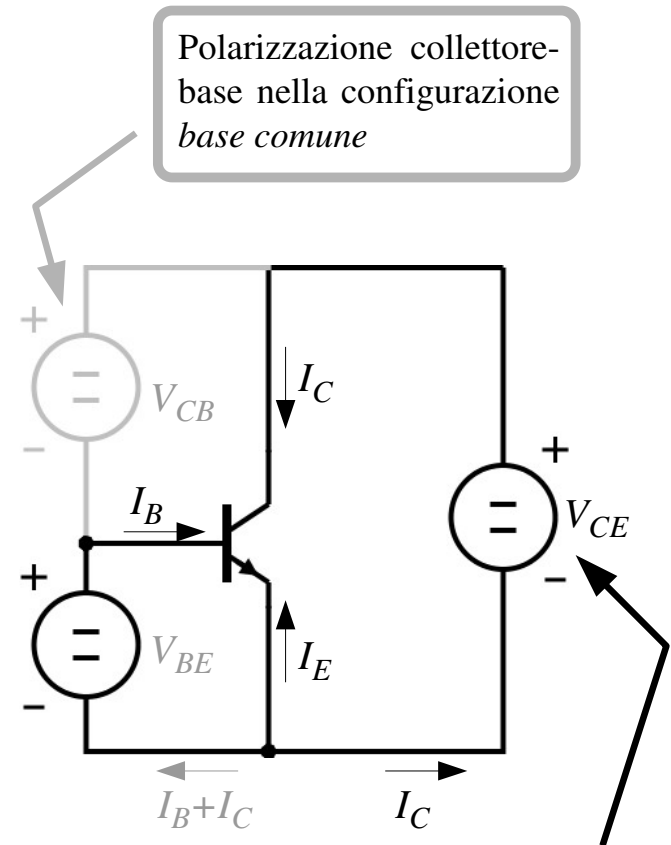
$$I_C = \frac{\alpha_F}{1 - \alpha_F} I_B = \beta_F I_B$$

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

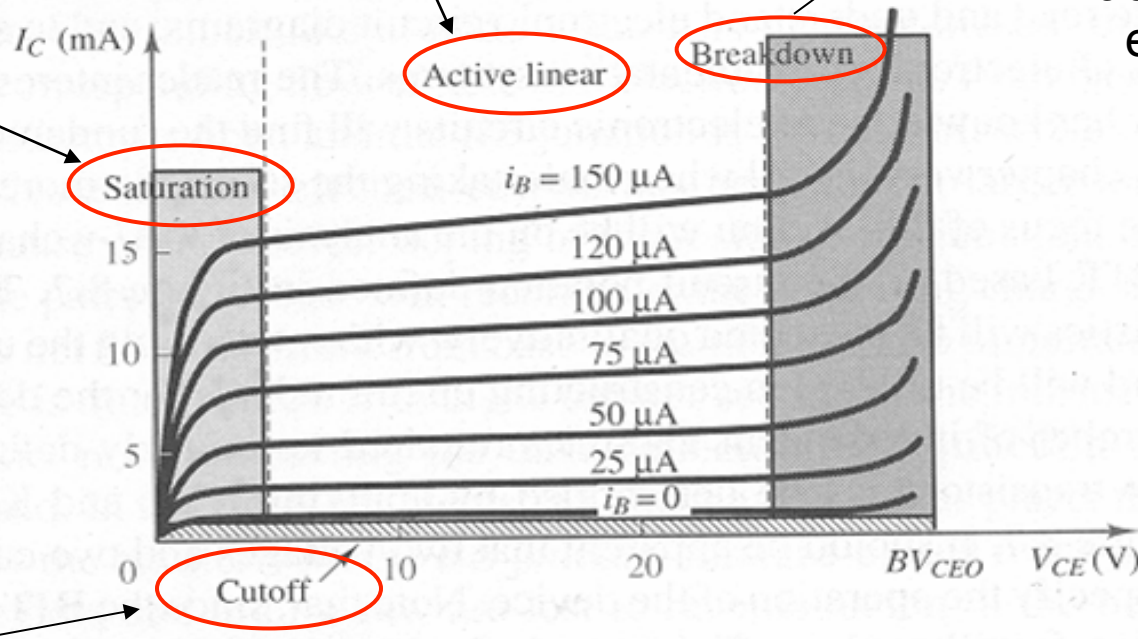
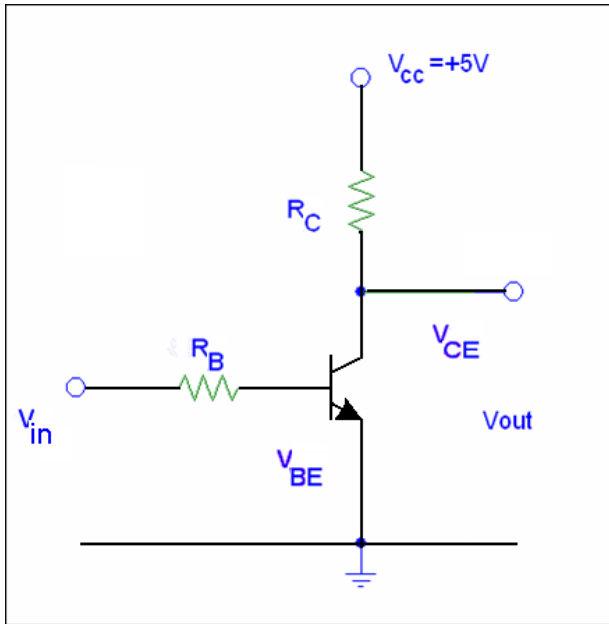


Figure 8.9(b) The collector-emitter output characteristics of a BJT

BJT come interruttore



V_{in} (“bassa”) < 0.7 V

- B-E non polarizzata direttamente

- regione di **cutoff** → non fluisce corrente

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

→ V_{out} = “alta”

V_{in} (“alta”)

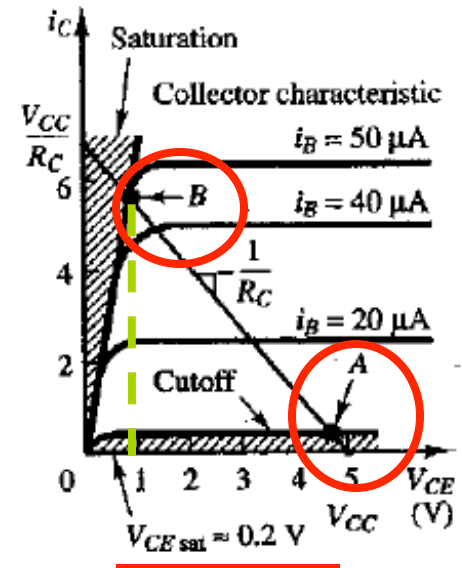
- B-E polarizzata direttamente ($V_{BE} > 0.7V$)

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

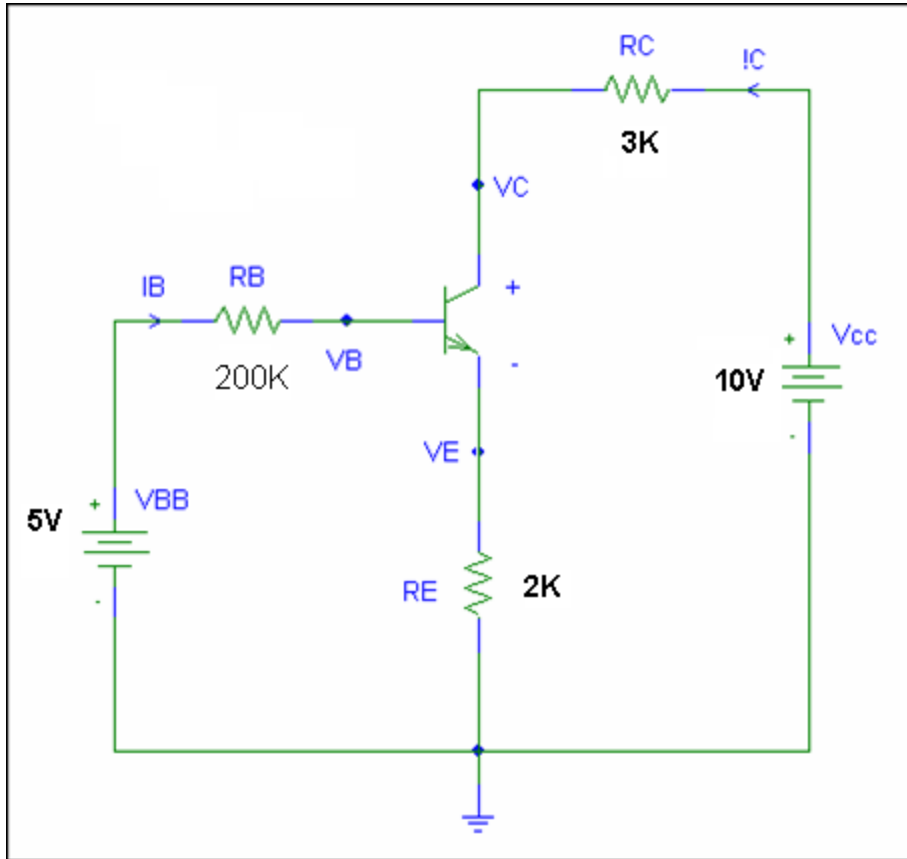
- V_{out} = piccola

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

→ V_{out} = “bassa”



BJT come amplificatore (zona attiva)

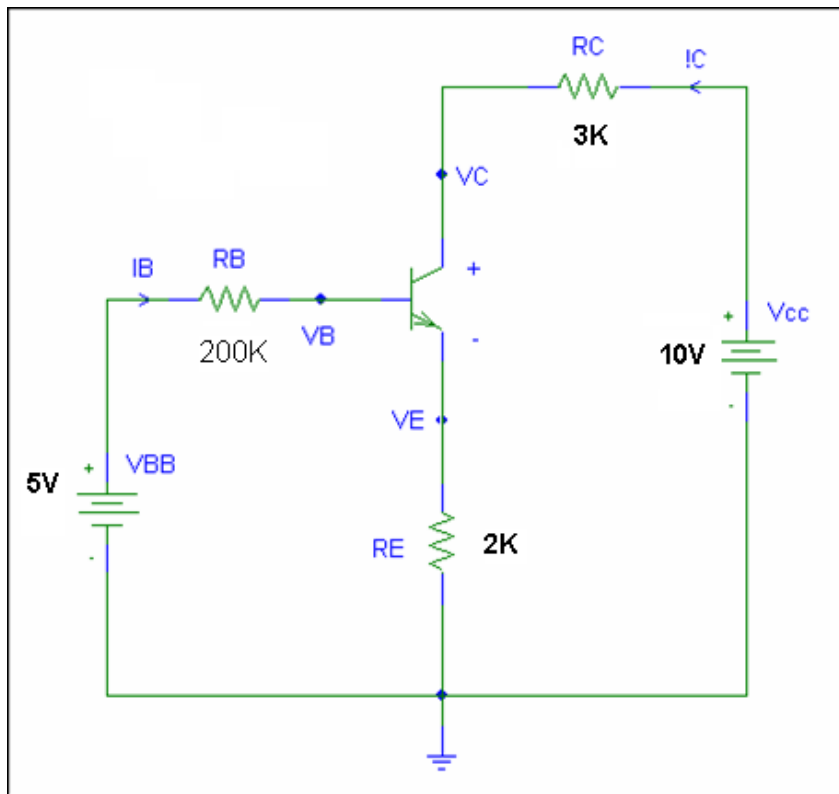


- Emittitore comune
- Regione di linearità
- Guadagno elevato

Esempio:

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

BJT come amplificatore (zona attiva)



$$V_{BE} = 0.7V$$

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

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

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

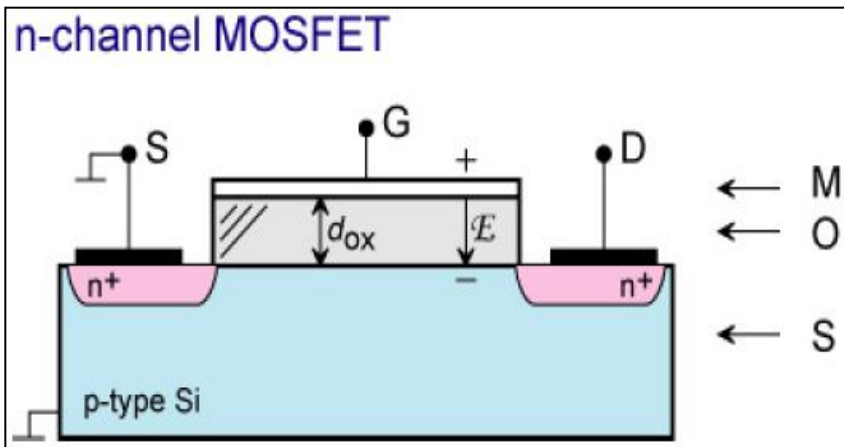
$$\begin{aligned} V_{CB} &= V_{CC} - I_C * R_C - I_E * R_E - V_{BE} = \\ &= 10 - (3)(1.07) - (2)(101 * 0.0107) - 0.7 = \\ &= 3.93V \end{aligned}$$

$V_{CB} > 0$ 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