

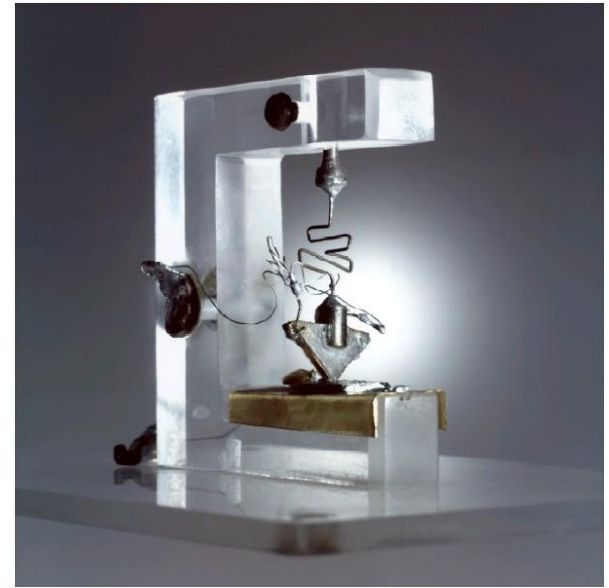
Laboratorio di Elettronica e Tecniche di Acquisizione Dati 2025-2026

Transistor

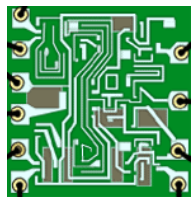
(cfr. [https://inst.eecs.berkeley.edu/~ee105/fa15/lectures/Lecture06-pn%20Junction%20\(with%20appendix\).pdf](https://inst.eecs.berkeley.edu/~ee105/fa15/lectures/Lecture06-pn%20Junction%20(with%20appendix).pdf)
<http://studenti.fisica.unifi.it/~carla/appunti/2008-9/cap.4.pdf>
http://ume.gatech.edu/mechatronics_course/Transistor_F04.ppt)

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?

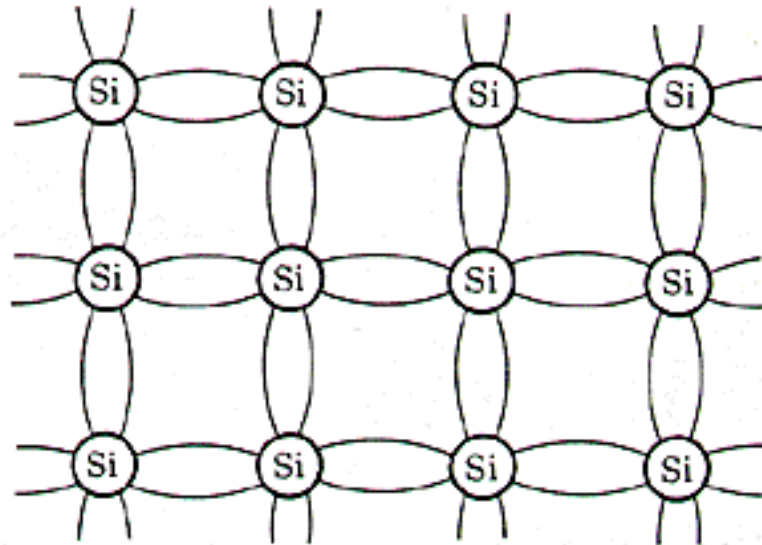
- Il transistor è un dispositivo a semiconduttore a 3 terminali
- E' possibile, con un transistor, controllare la corrente elettrica o il voltaggio fra due terminali applicando una corrente elettrica o un voltaggio al terzo. E' un componente "attivo".
- Con il transistor possiamo fare dispositivi amplificanti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

Representative (main group) elements																		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						
		Transition metals																																			
3	Na 22.990	12	Mg 24.305																	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	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	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	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	81	Tl 204.383	82	Pb 207.2	83	Bi 208.980	84	Po 209	85	At 210	86	Rn 222		
6	Cs 132.905	56	Ba 137.327	57	La 138.906	72	Hf 178.49	73	Ta 180.948	74	W 183.84	75	Re 186.207	76	Os 190.23	77	Ir 192.22	78	Pt 195.08	79	Au 196.967	80	Hg 200.59	113		114		115		116		118					
7	Fr 223	88	Ra 226.025	89	Ac 227.028	104	Rf 261	105	Db 262	106	Sg 263	107	Bh 262	108	Hs 265	109	Mt 266	110	Uun 269	111	Uuu 272	112	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

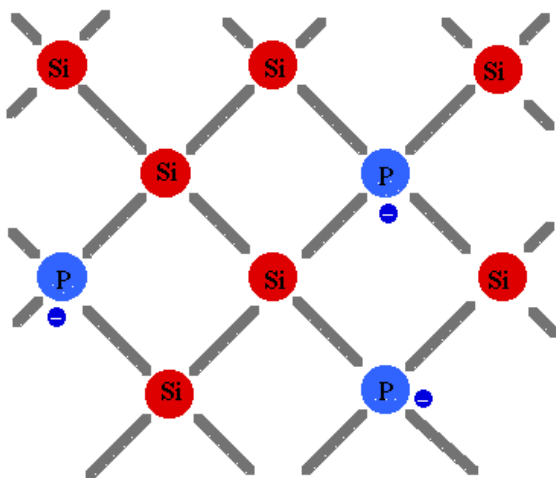
Due tipi di dopaggio

1. *N-type* (negativo)

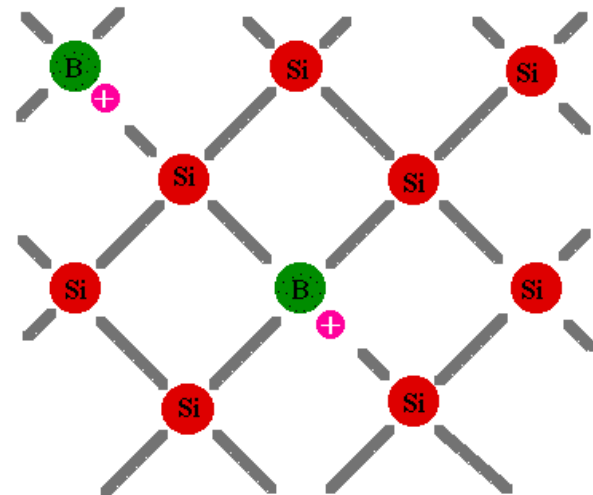
- impurità di **donori** (dal Gruppo V) aggiunte al reticolo cristallino del Si
- portatori di carica dominante: **elettroni negativi**
- elementi del **Gruppo V** come **Fosforo, Arsenico e Antimonio**

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**



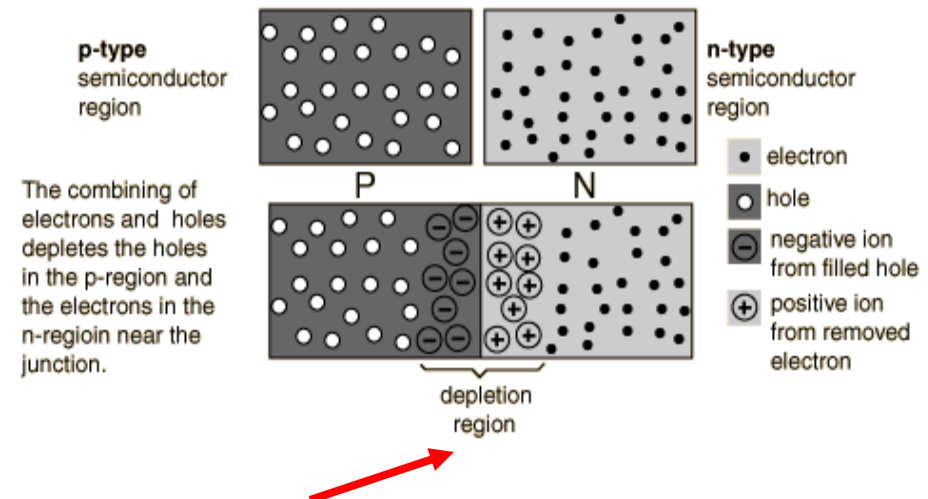
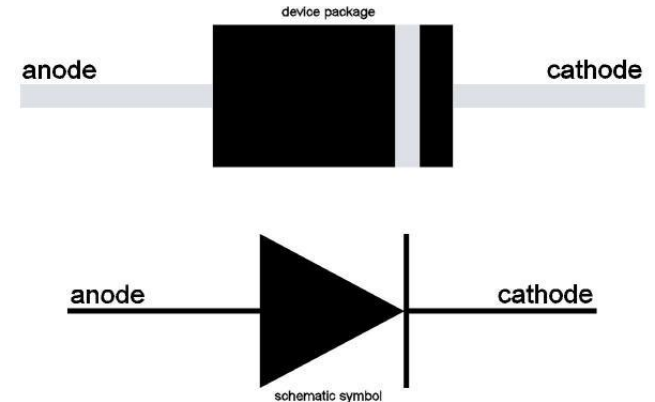
N-type



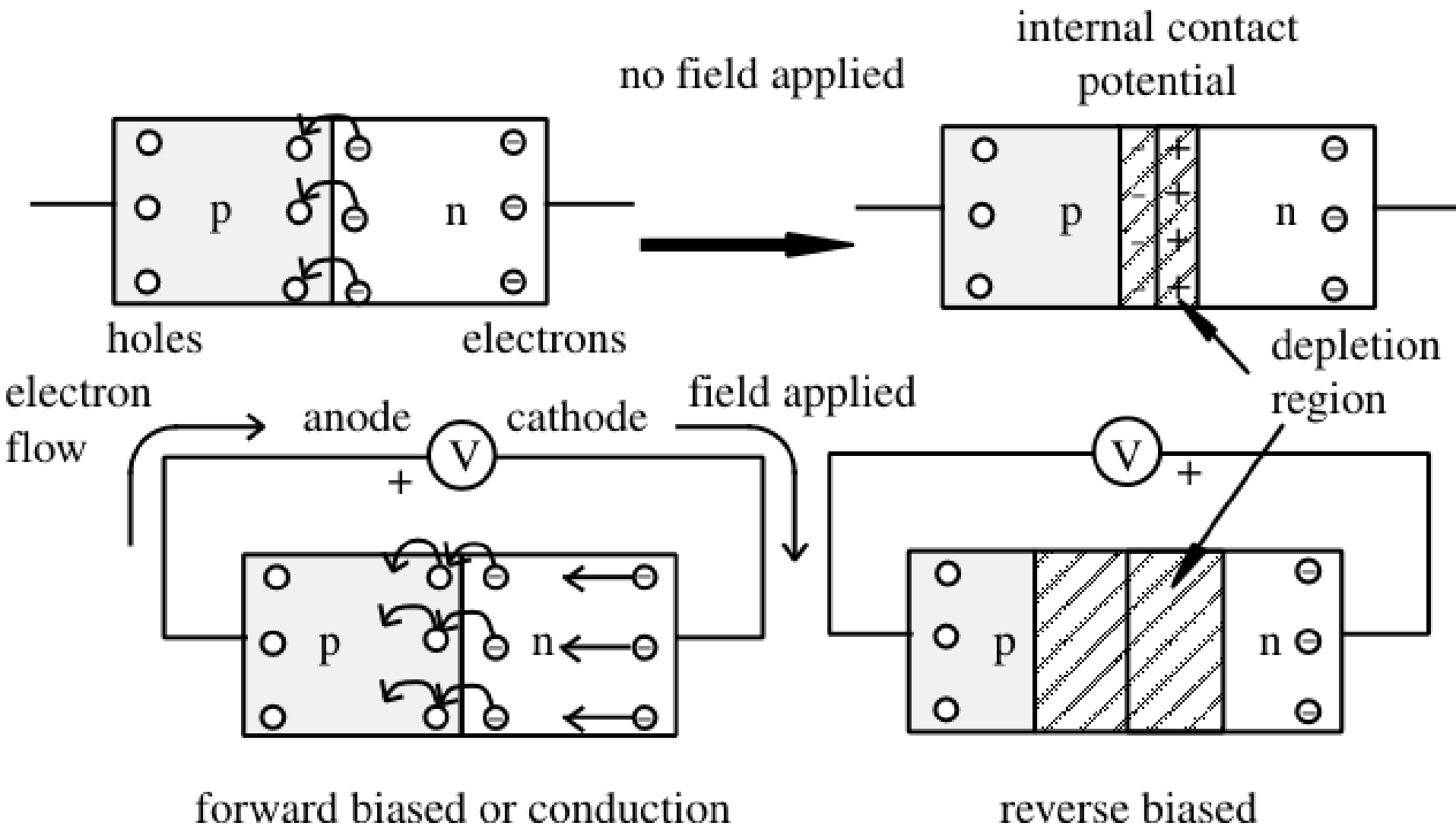
P-type

Costituente base: la giunzione p-n

- chiamata anche **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



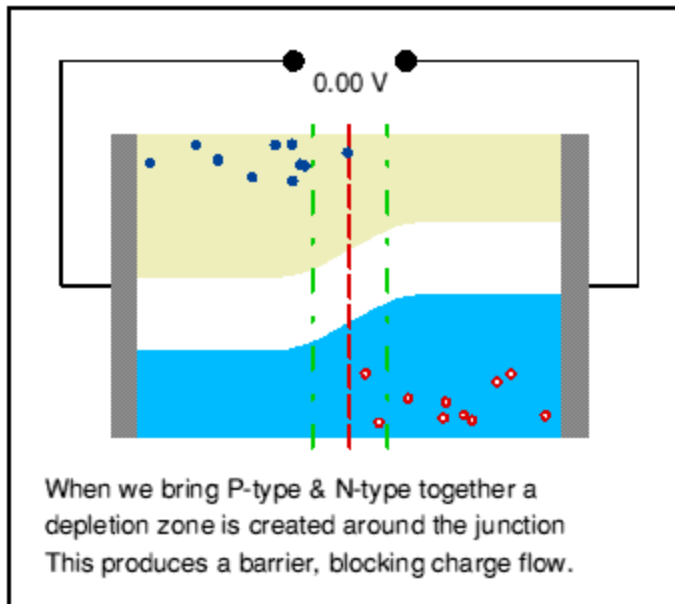
Bias esterno



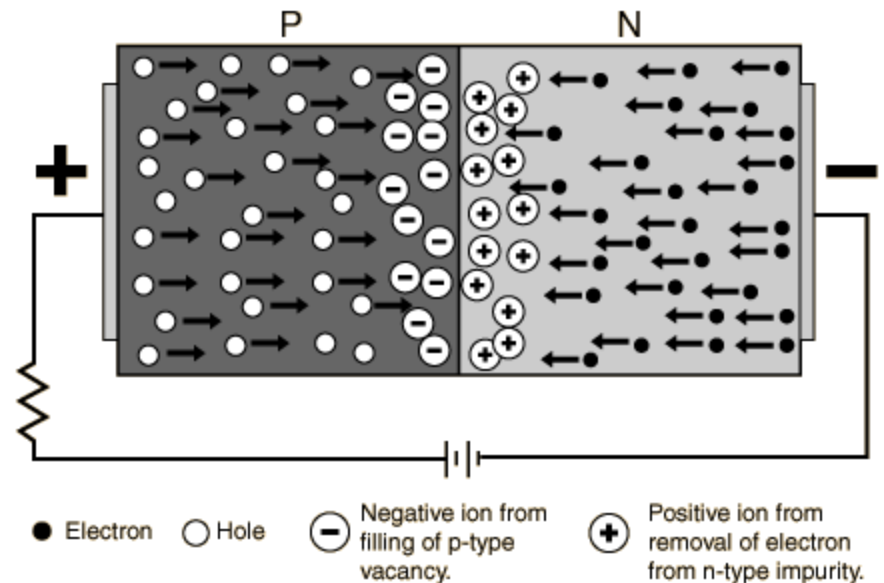
Polarizzazione (bias) diretta

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



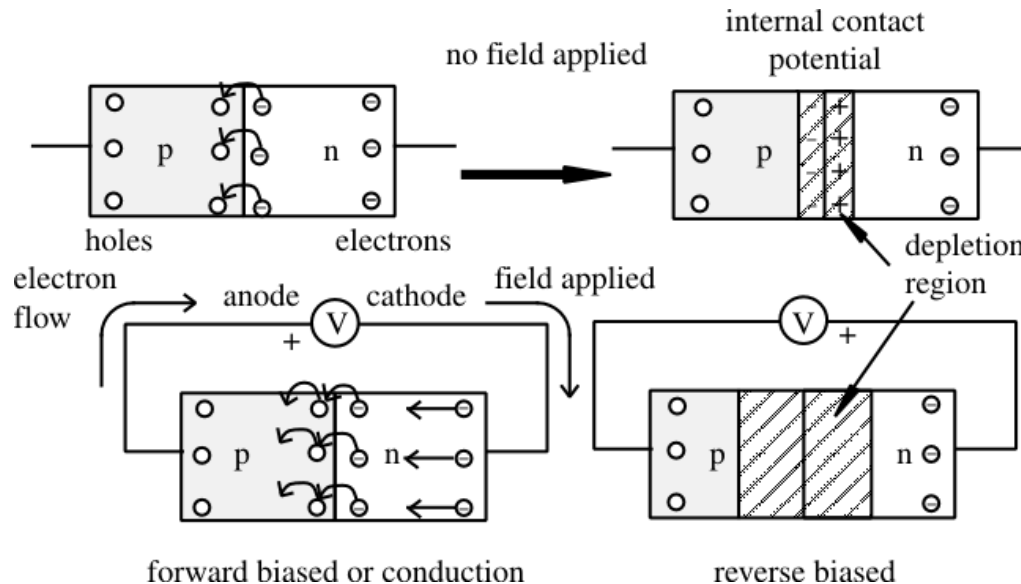
© J. C. G. Lesurf Univ. St. Andrews



Polarizzazione inversa

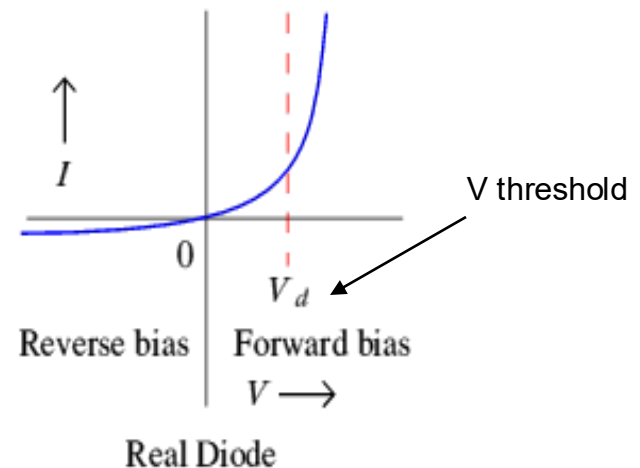
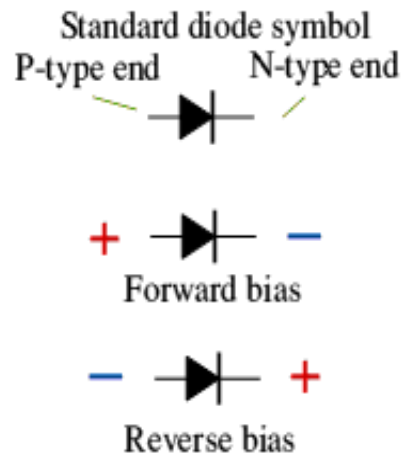
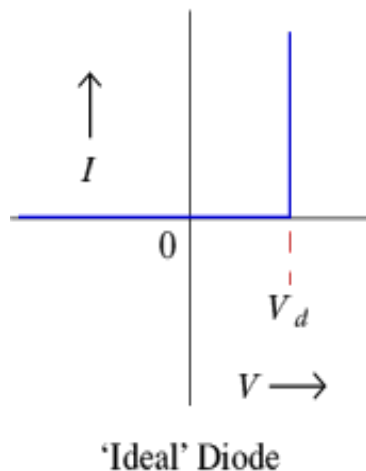
polarizzazione inversa:

- 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

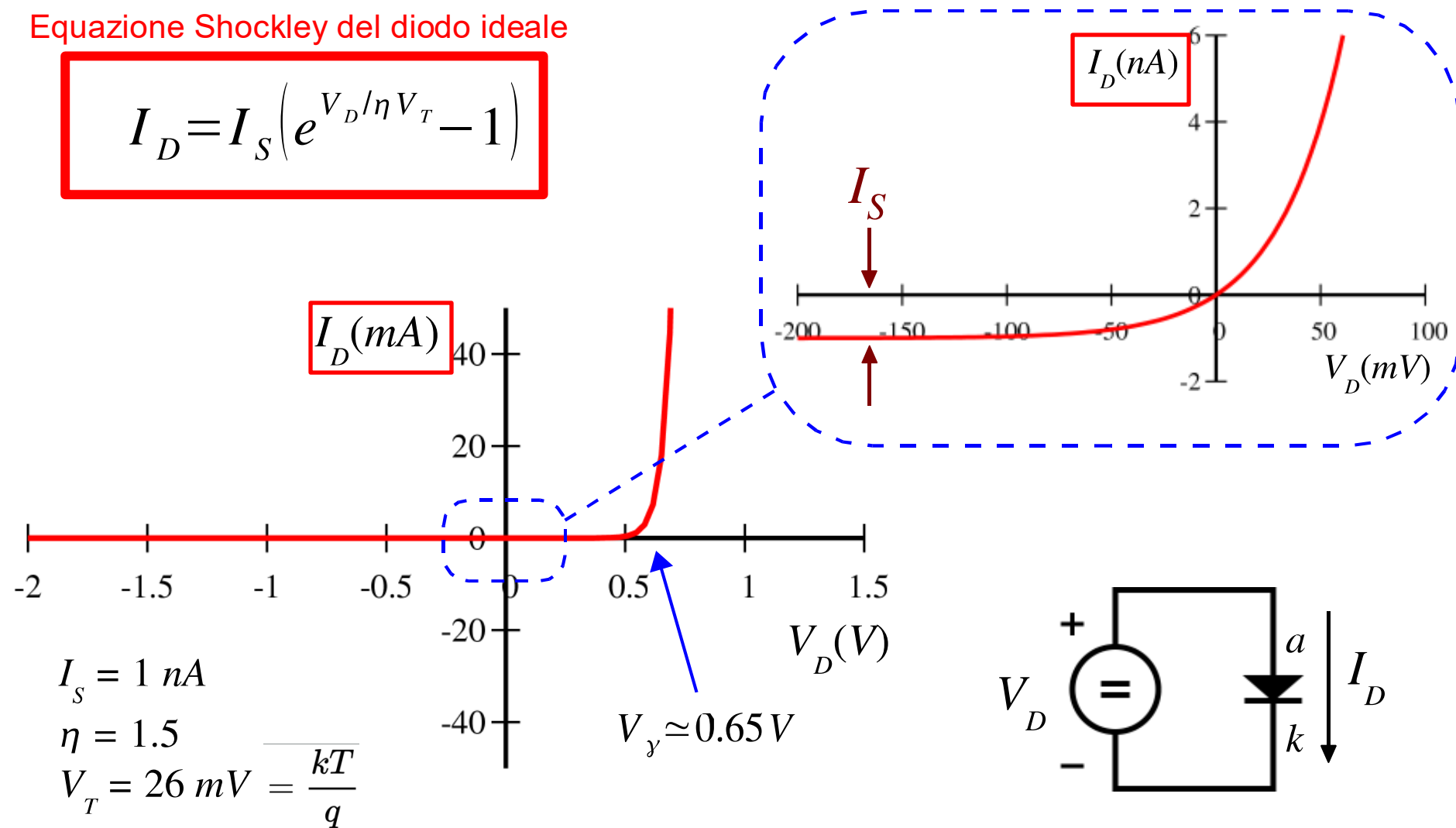
- Polarizzazione diretta: la corrente passa
 - sono necessari $\sim 0.7V$ (nel Si) per iniziare la conduzione (“vincendo” il potenziale di contatto, V_d)
- Polarizzazione inversa: il diodo blocca la corrente
 - ideale: corrente = 0
 - reale : $I_{flow} = 10^{-9} A$



Caratteristica del diodo

Equazione Shockley del diodo ideale

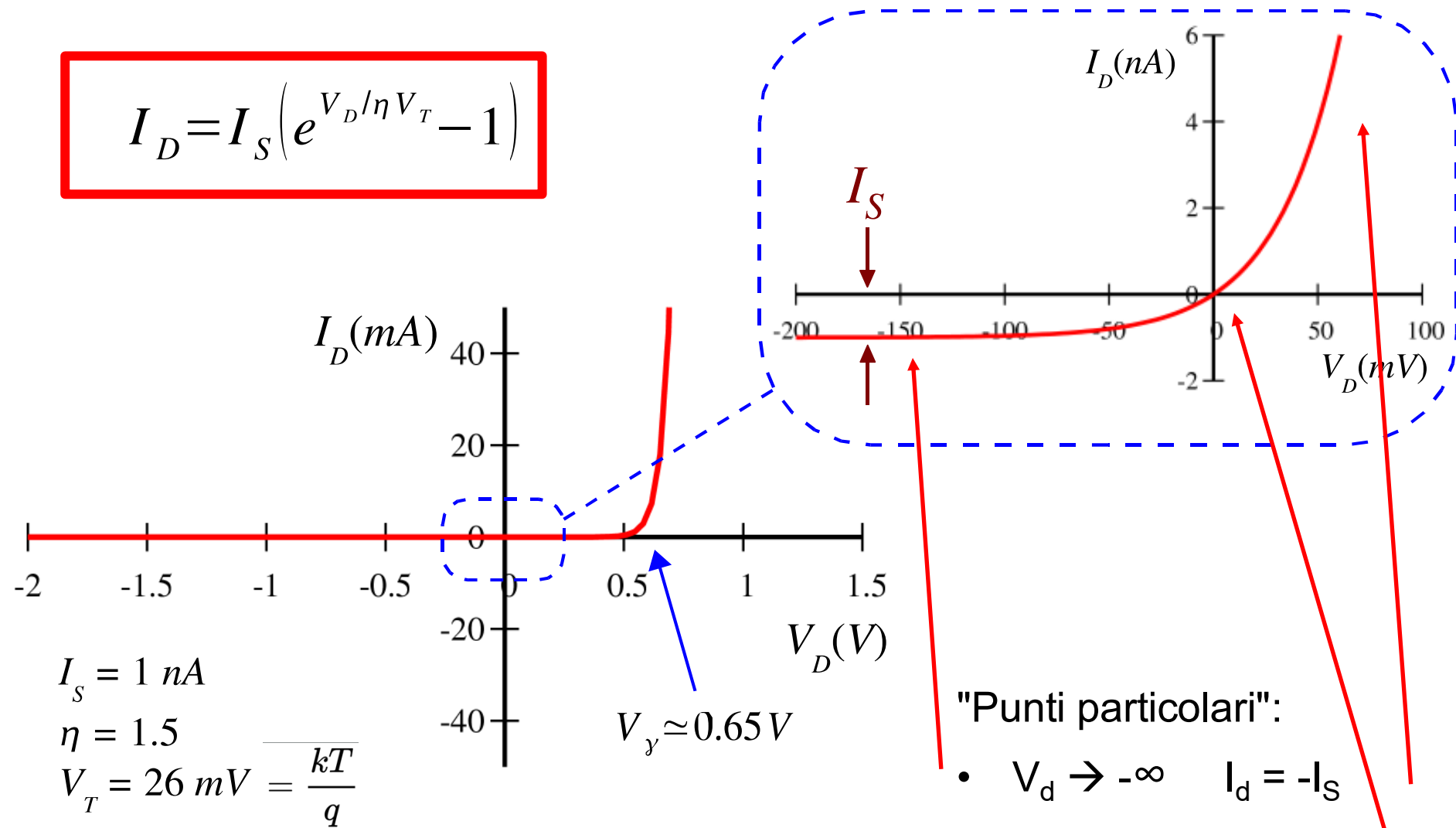
$$I_D = I_S \left(e^{V_D / \eta V_T} - 1 \right)$$



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

Caratteristica del diodo

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



$$I_S = 1 \text{ nA}$$

$$\eta = 1.5$$

$$V_T = 26 \text{ mV} = \frac{kT}{q}$$

"Punti particolari":

- $V_D \rightarrow -\infty$ $I_D = -I_S$
- $V_D \rightarrow \infty$ $I_D \rightarrow \infty$
- $V_D = 0$ $I_D = 0$

Caratteristica del diodo

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

$$V_Y = V_0 = V_T \ln \left(\frac{N_A N_D}{n_i^2} \right)$$

soglia di conduzione
in diretta

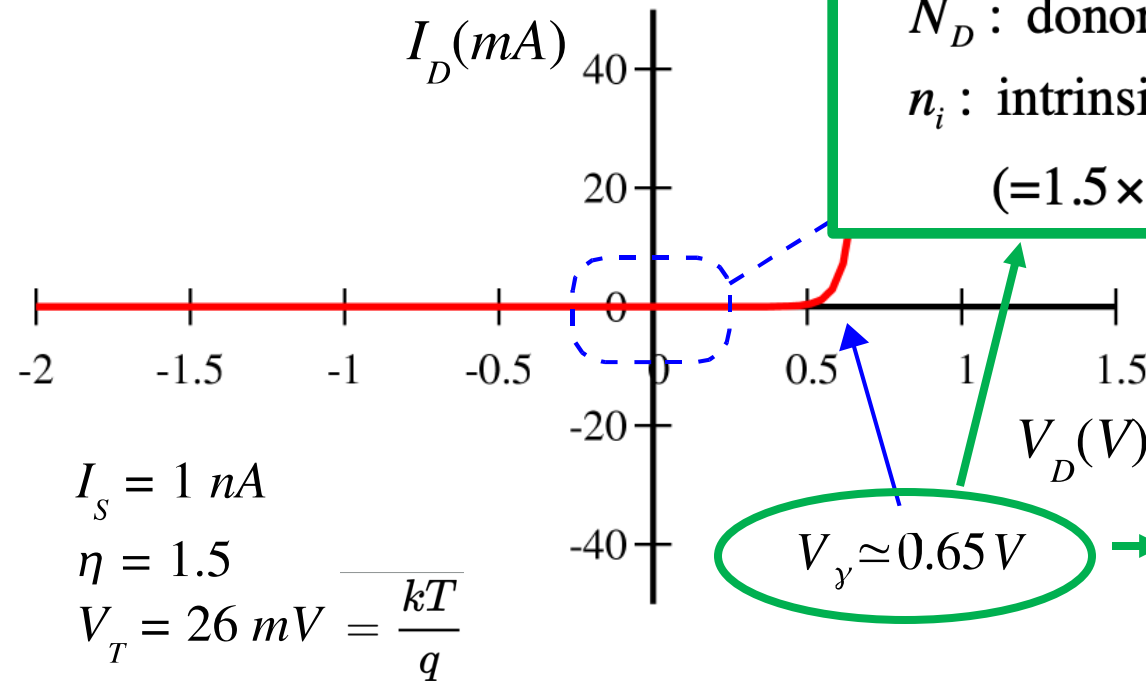
V_T : thermal voltage (= 26 mV at room temp)

N_A : acceptor concentration on p-side

N_D : donor concentration on n-side

n_i : intrinsic carrier concentration

($= 1.5 \times 10^{10} \text{ cm}^{-3}$ at room temp)



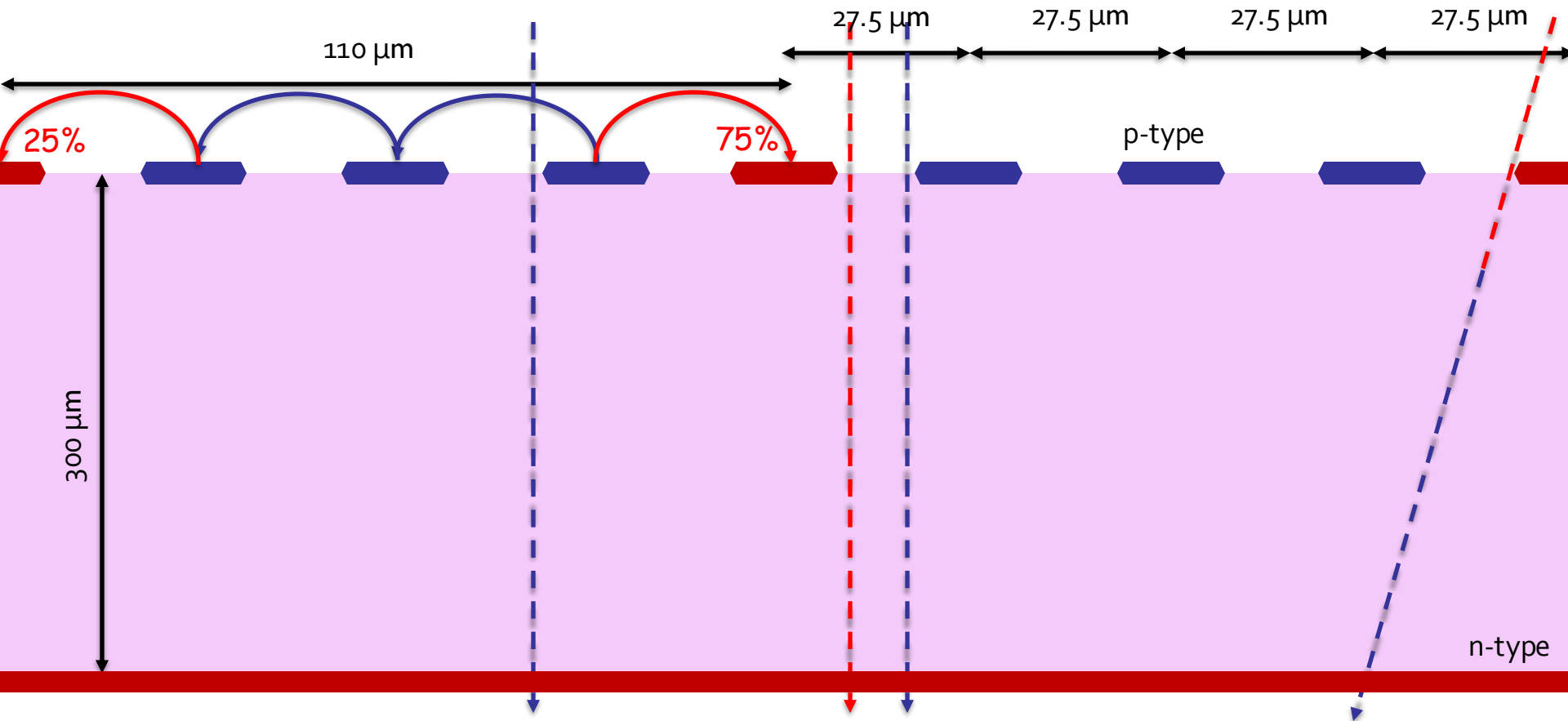
$$V_Y \simeq 0.65 \text{ V}$$

Example: A pn junction with
n-doping of 10^{17} cm^{-3} and
p-doping of 10^{18} cm^{-3}

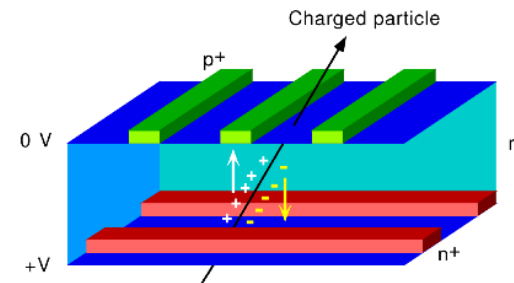
$$V_0 = V_T \ln \left(\frac{N_A N_D}{n_i^2} \right) = 0.88 \text{ V}$$

I_S è la **corrente di saturazione inversa** che,
regime di contropolarizzazione (bastano poche centinaia di mV)

Il diodo come rivelatore di particelle

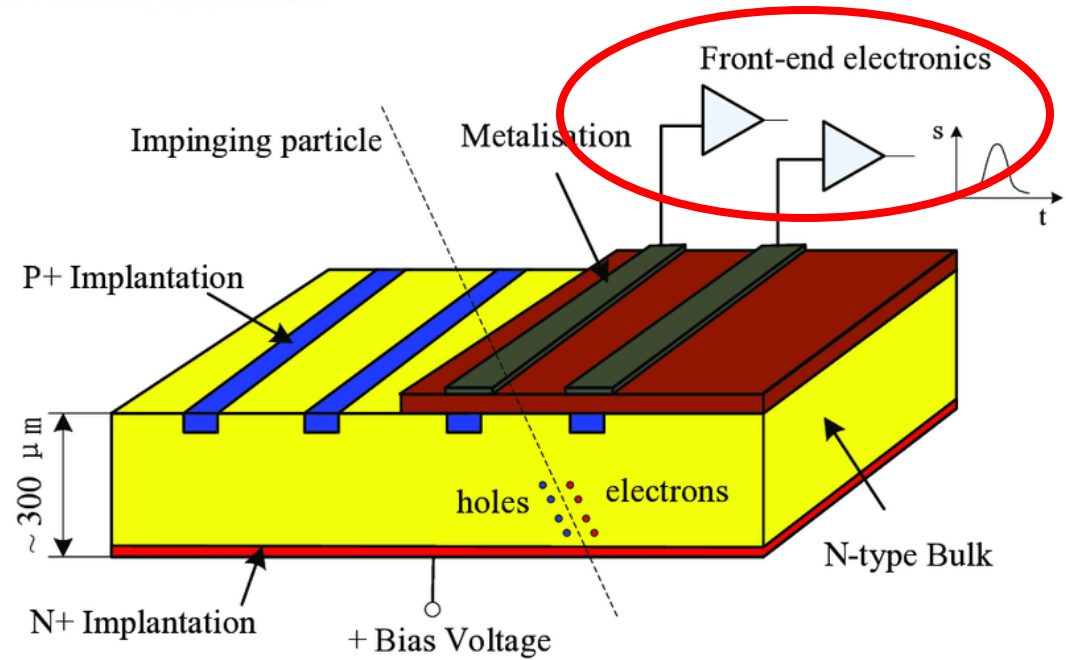
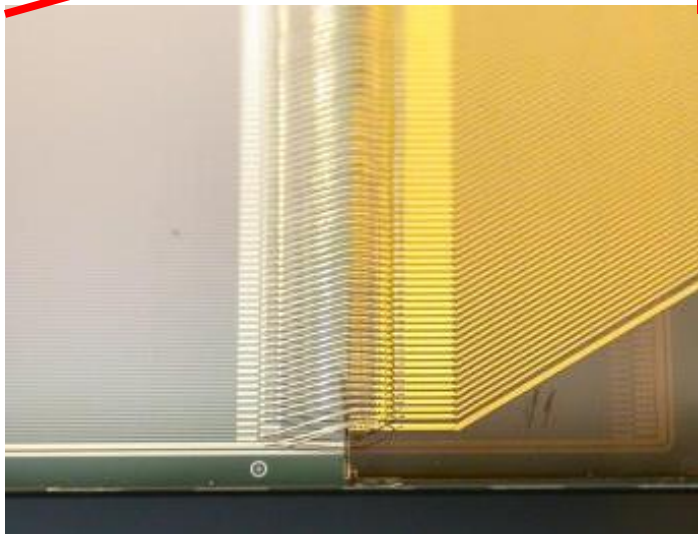


- "substrato" (300 μm, ad esempio) tutto completamente svuotato ($V_d \sim 100$ V)
- se passa una particella carica ionizza il materiale, oppure un fotone "promuove" un elettrone in conduzione per effetto fotoelettrico
- i portatori liberi migrano verso le "strip" sotto l'effetto del campo elettrico
- è possibile realizzare strutture 2D (misura di X e Y)
- è possibile non leggere tutte le strip ma avere comunque risoluzioni spaziali di ~ 10 μm grazie al "travaso di carica" (accoppiamento capacitivo fra le strip)

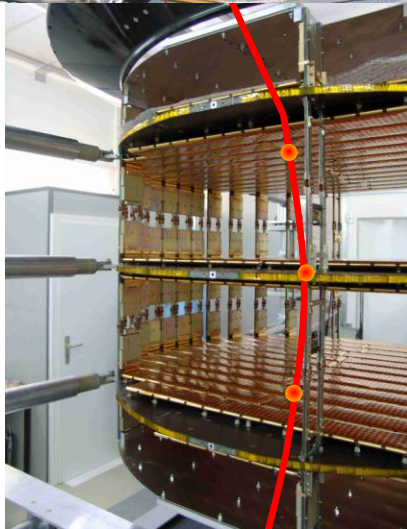
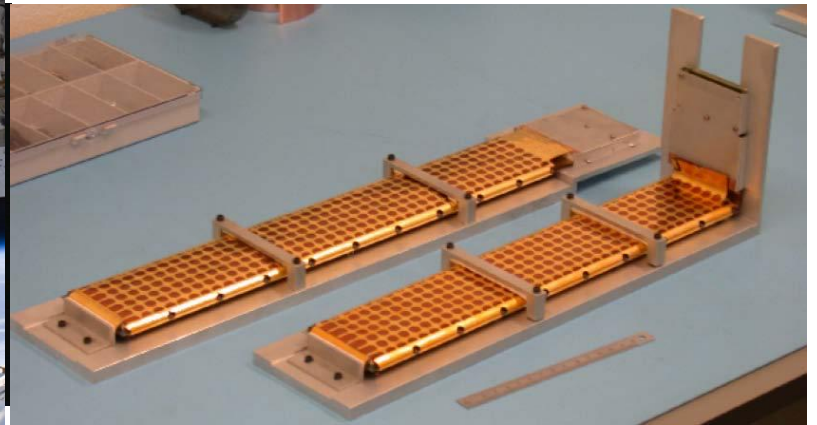


Rivelatore di particelle

Rivelatore microstrip
al silicio di AMS-02

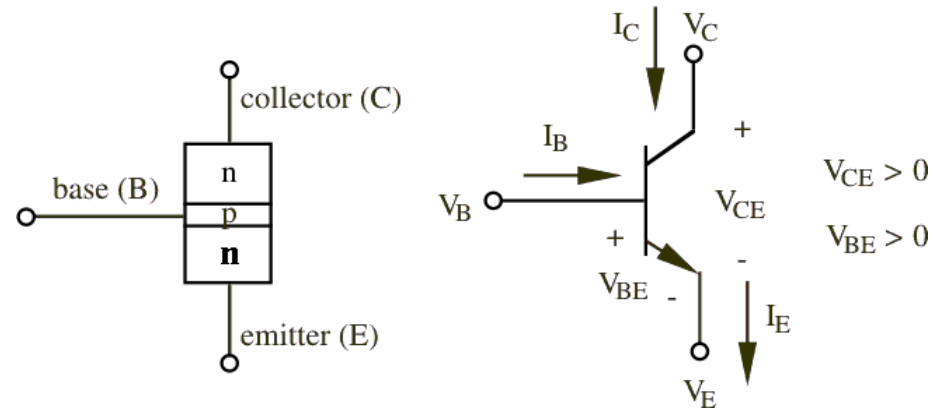


Tracciatore al Si – AMS-02

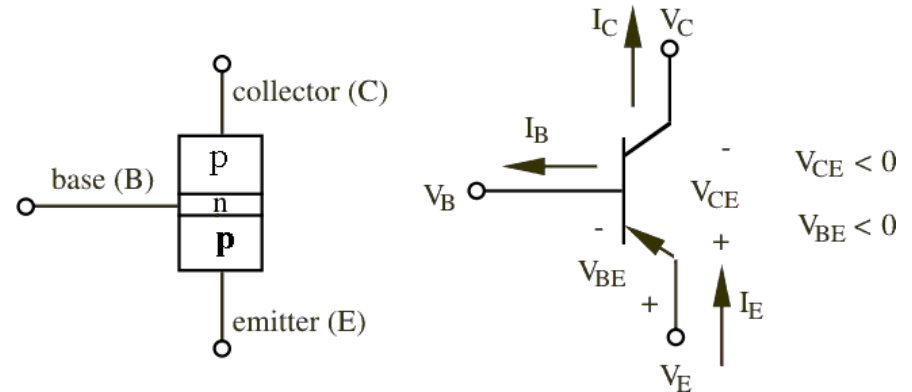


Bipolar Junction Transistor (BJT)

- 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

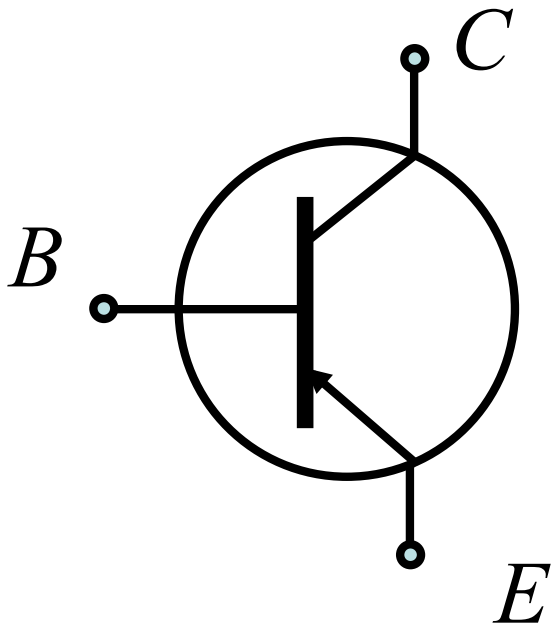


pnp bipolar junction transistor

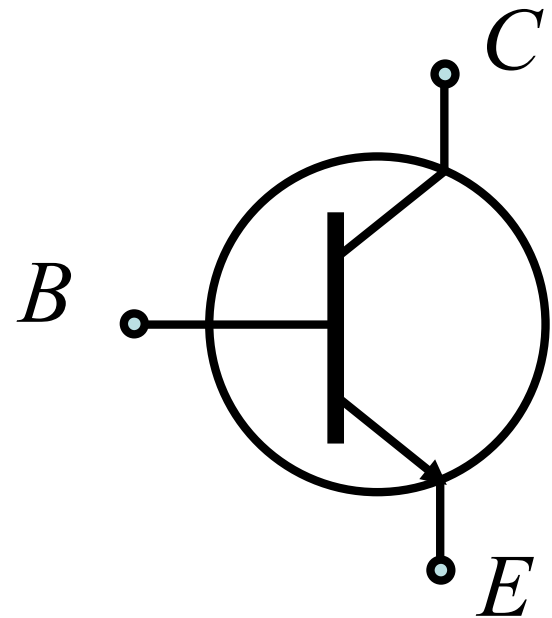
Sviluppato da
Shockley (1949)

Bipolar Junction Transistor (BJT)

pnp

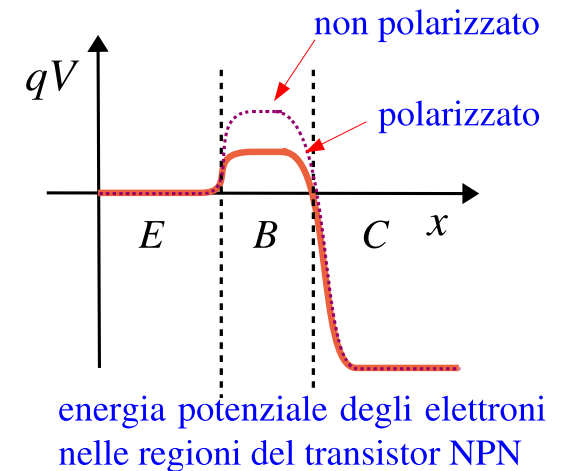
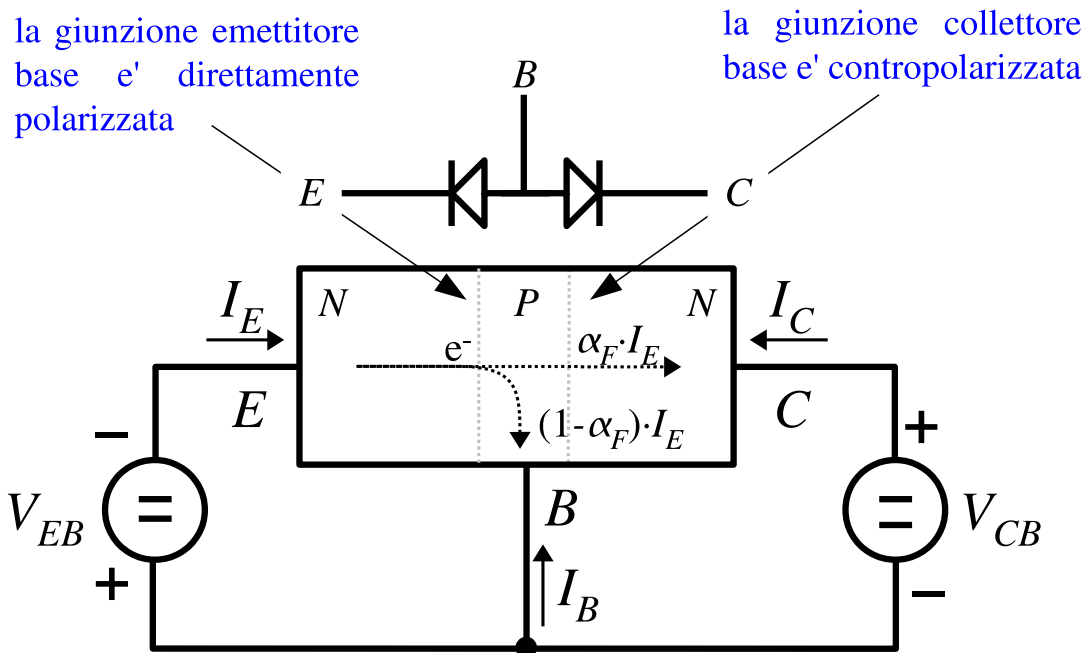


npn



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 è β_F volte più grande:

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

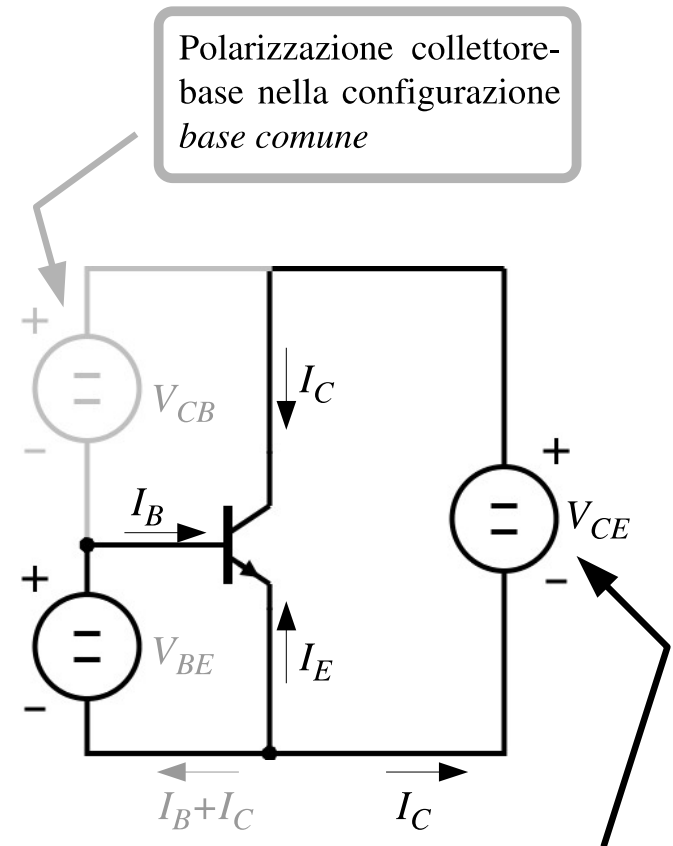
$$I_C = \frac{\alpha_F}{1 - \alpha_F} I_B = \beta_F I_B$$

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)

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

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

corrente di collettore proporzionale a quella di base

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

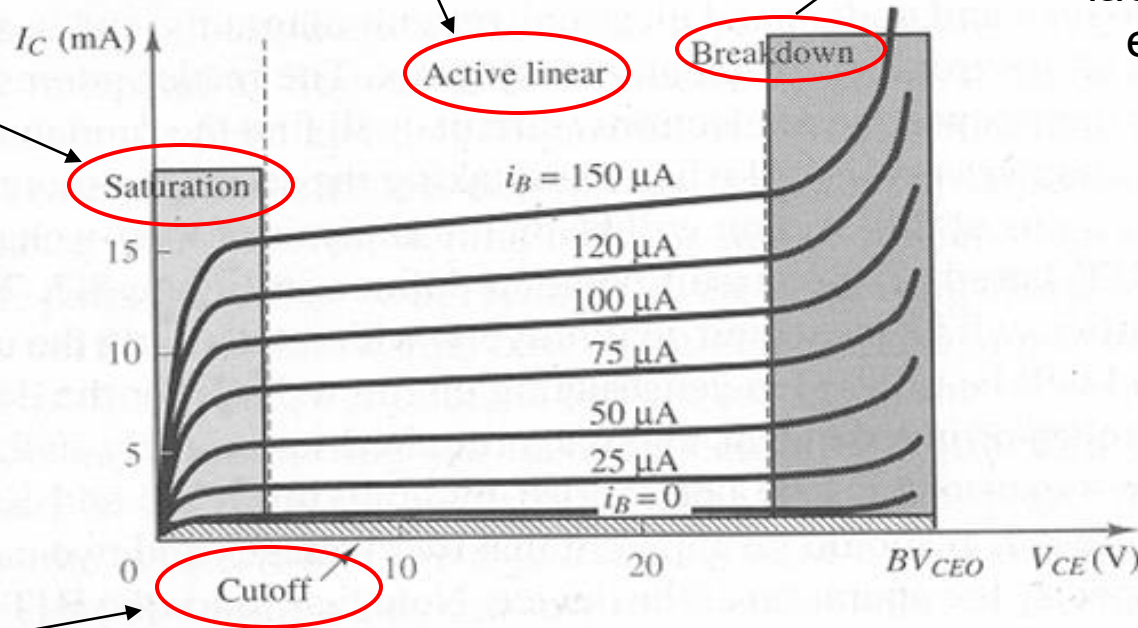
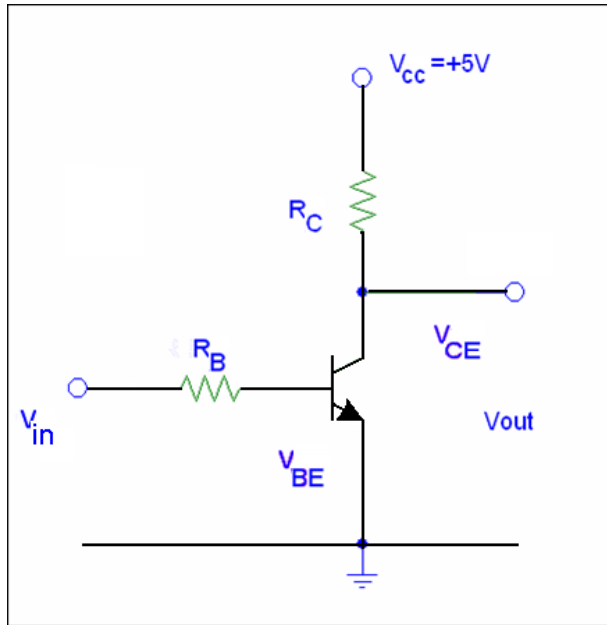


Figure 8.9(b) The collector-emitter output characteristics of a BJT

BJT come interruttore



V_{in} (“bassa”) $< 0.7\text{ V}$

- B-E non polarizzata direttamente
- regione di **cutoff** → non fluisce corrente

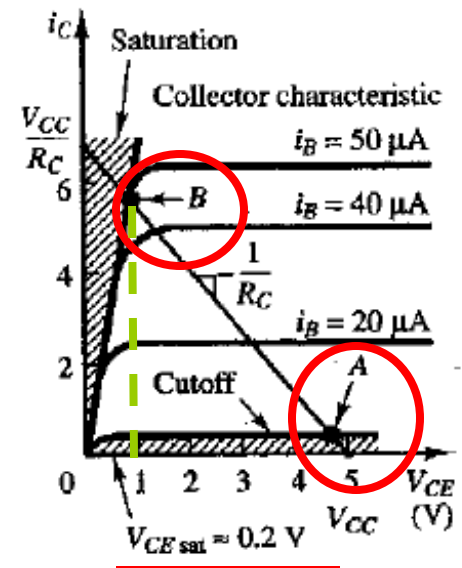
- $V_{out} = V_{CE} = V_{cc}$

→ V_{out} = “alta”

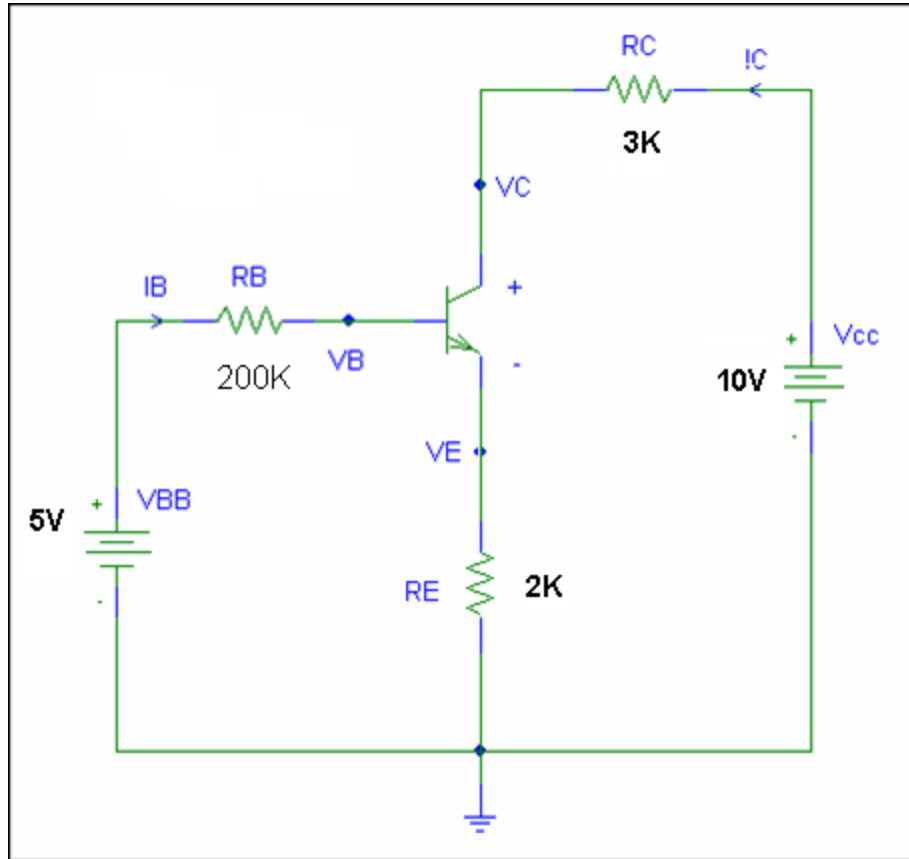
V_{in} (“alta”)

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

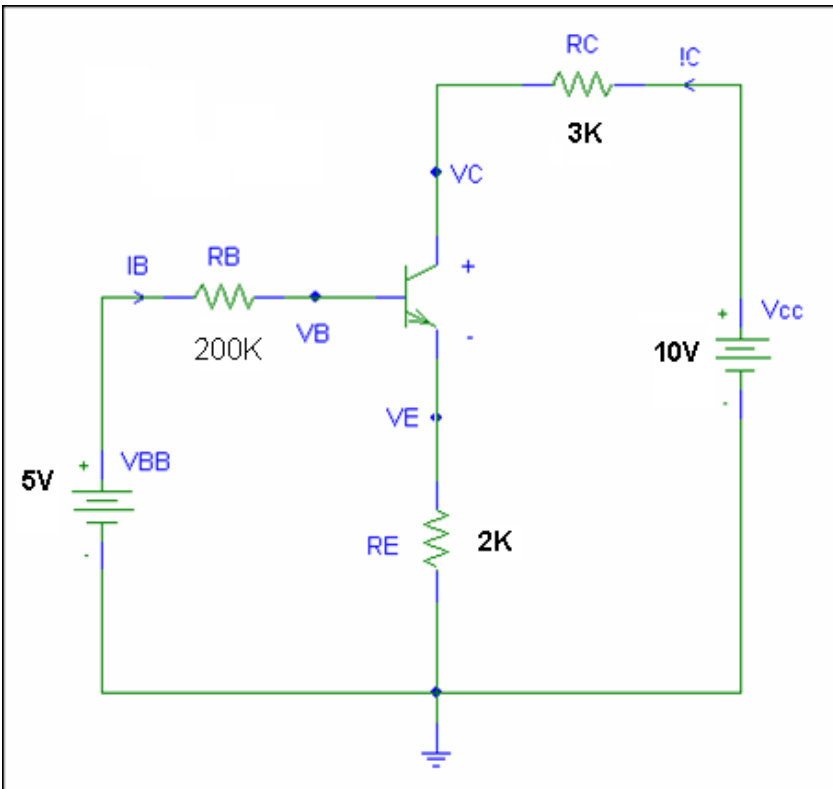


- Emettitore comune
- Regione di linearità
- Guadagno elevato

Esempio:

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

BJT come amplificatore (zona attiva)



$$V_{BE} = 0.7V$$

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

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

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

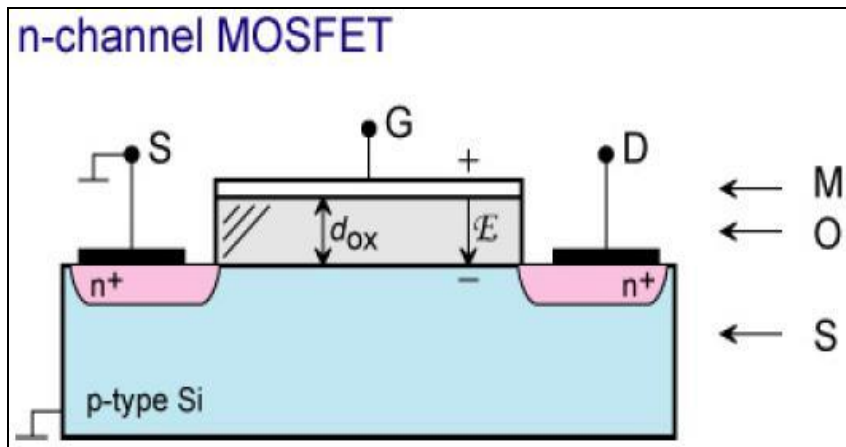
$$\begin{aligned} V_{CB} &= V_{CC} - I_C * R_C - I_E * R_E - V_{BE} = \\ &= 10 - (3)(1.07) - (2)(101 * 0.0107) - 0.7 = \\ &= 3.93V \end{aligned}$$

$V_{CB} > 0$ 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