

# **Laboratorio di Elettronica e Tecniche di Acquisizione Dati 2024-2025**

## **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>**

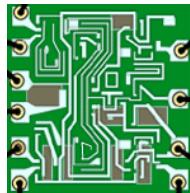
**[http://ume.gatech.edu/mechatronics\\_course/Transistor\\_F04.ppt](http://ume.gatech.edu/mechatronics_course/Transistor_F04.ppt)**

# Storia del Transistor

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

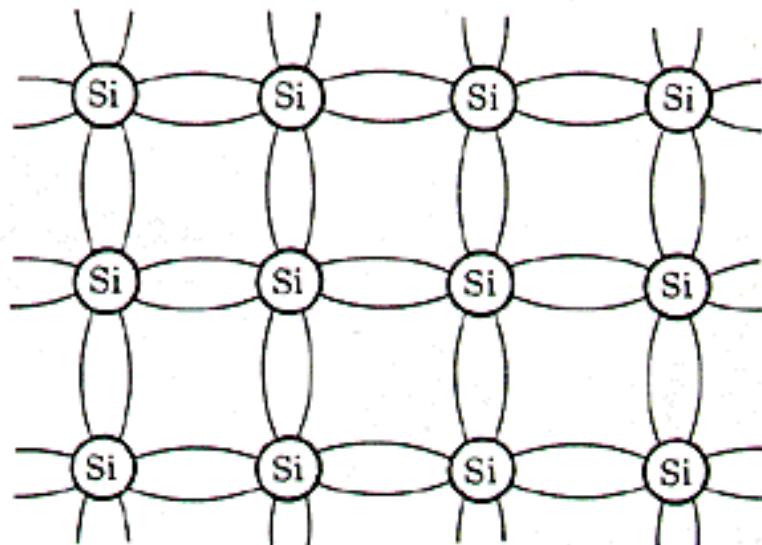
- Il transistor è un dispositivo a semiconduttore a 3 terminali
- E' possibile, con un transistor, controllare la corrente elettrica o il voltaggio fra due terminali applicando una corrente elettrica o un voltaggio al terzo. E' un componente "attivo".
- Con il transistor possiamo fare dispositivi amplificanti 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,  $n_i = 10^{10} /cm^3$ )



# 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		Periodic Table of the Elements																		Representative (main group) elements																							
		IA		Transition metals																																							
1		1	H	IIA		VIIIB										IB		IIB		2	He	4.003																					
2		3	Li	4	Be	6.941	9.012	Transition metals										5	6	7	8	9	10																				
3		11	Na	12	Mg	22.990	24.305	IIIIB										B	C	N	O	F	Ne																				
4		19	K	20	Ca	39.098	40.078	21	Sc	22	Ti	23	V	24	Cr	25	Mn	26	Fe	27	Co	28	Ni	29	Cu	30	Zn	10.811	12.011	14.007	15.999	18.998	20.180										
5		37	Rb	38	Sr	85.468	87.62	39	Y	40	Zr	41	Nb	42	Mo	43	Tc	44	Ru	45	Rh	46	Pd	47	Ag	48	Cd	49	Ga	50	Ge	51	As	52	Se	53	Br	54	Kr	83.8			
6		55	Cs	56	Ba	132.905	137.327	57	La	72	Hf	73	Ta	74	W	75	Re	76	Os	77	Ir	78	Pt	79	Au	80	Hg	81	Tl	82	Pb	83	Bi	84	Po	85	At	86	Rn	222			
7		87	Fr	88	Ra	223	226.025	89	Ac	104	Rf	105	Db	106	Sg	107	Bh	108	Hs	109	Mt	110	Uun	111	Uuu	112	Uub	114		116			118										
Lanthanides		Rare earth elements																		Actinides																							
		58	Ce	59	Pr	60	Nd	61	Pm	62	Sm	63	Eu	64	Gd	65	Tb	66	Dy	67	Ho	68	Er	69	Tm	70	Yb	71	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
		90	Th	91	Pa	92	U	93	Np	94	Pu	95	Am	96	Cm	97	Bk	98	Cf	99	Es	100	Fm	101	Md	102	No	103	232.036	231.036	238.029	237.048	244	243	247	247	251	252	257	258	259	260	262

# Semiconduttori: dopaggio

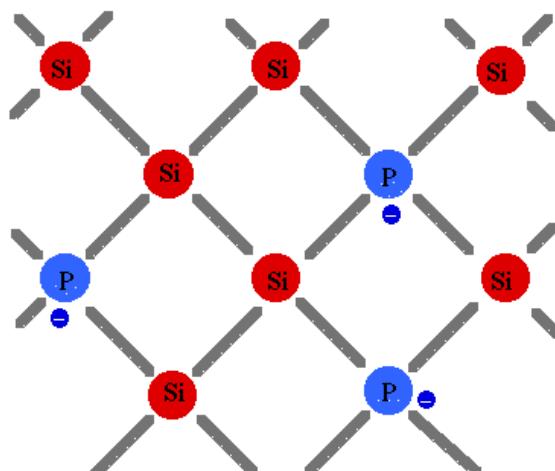
Due tipi di dopaggio

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

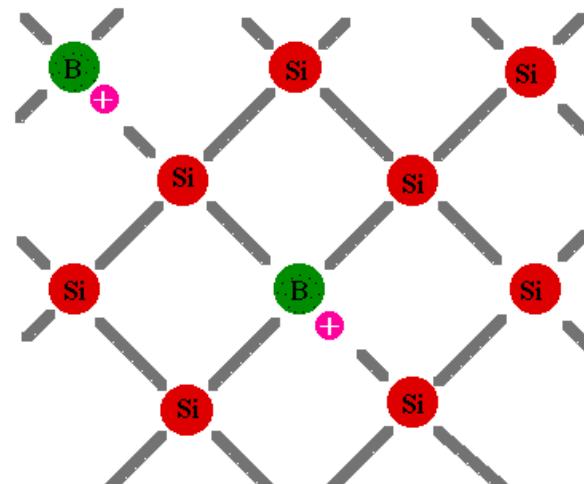
- impurità di **donori** (dal Gruppo V) aggiunte al reticolo cristallino del Si
- portatori di carica dominante: **elettroni negativi**
- elementi del **Gruppo V** come **Fosforo, Arsenico e Antimonio**

## 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**



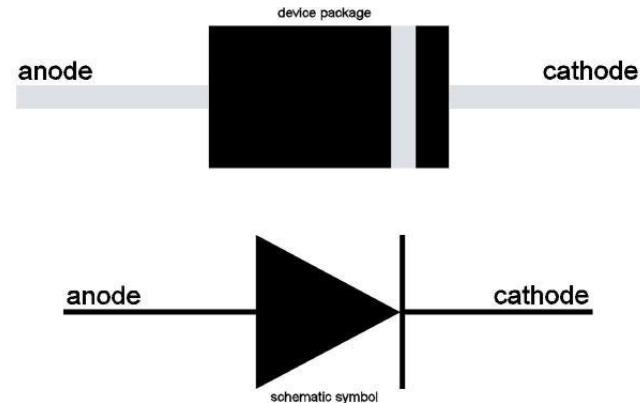
*N-type*



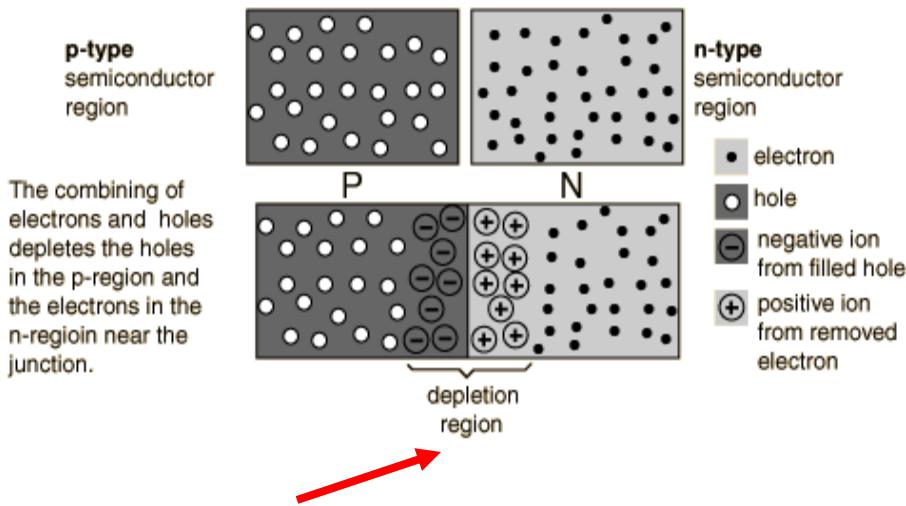
*P-type*

# Costituente base: la giunzione p-n

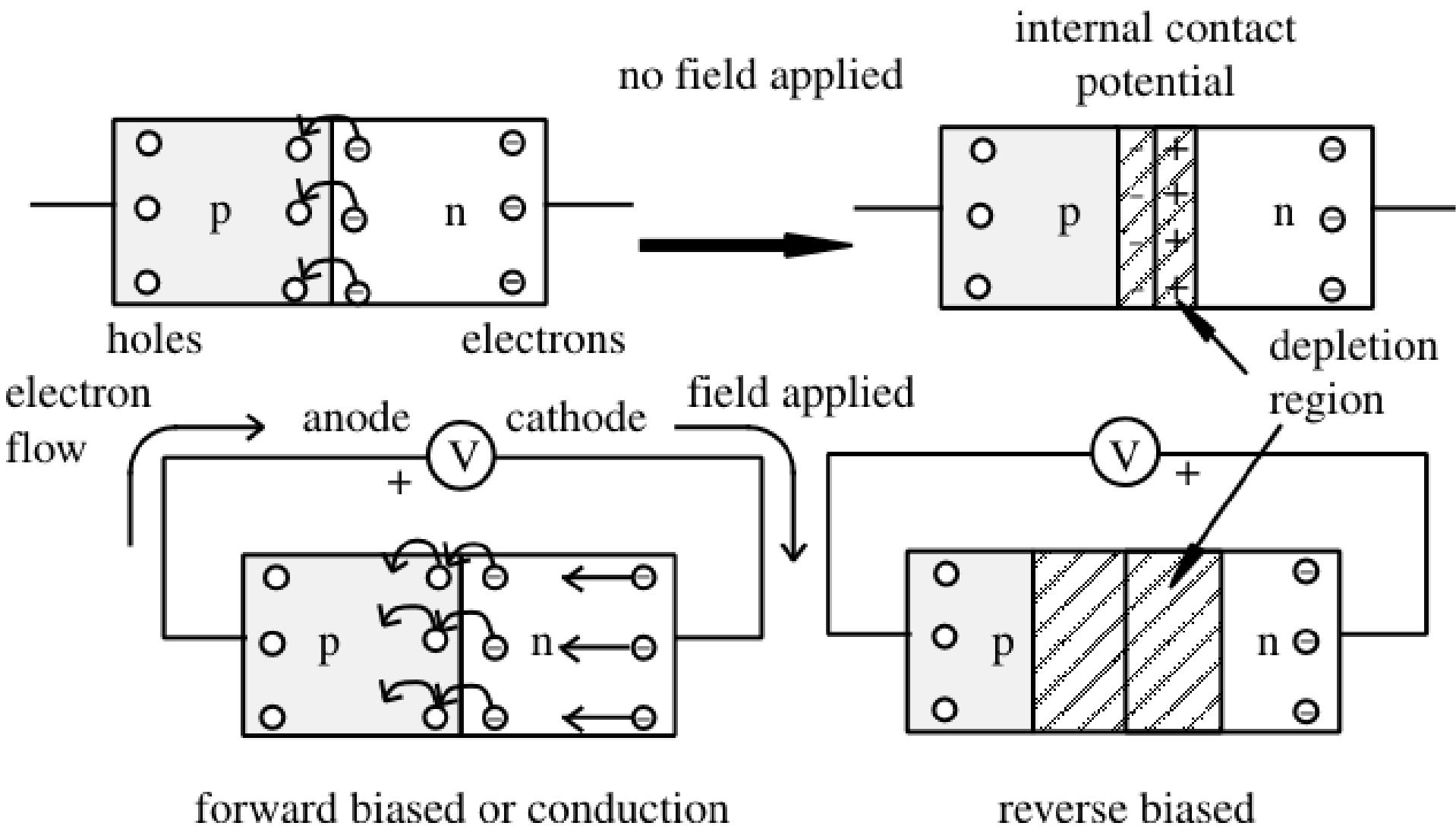
- chiamata anche **diodo**
- permette alla corrente, idealmente, di scorrere solamente da *p* verso *n*



- 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



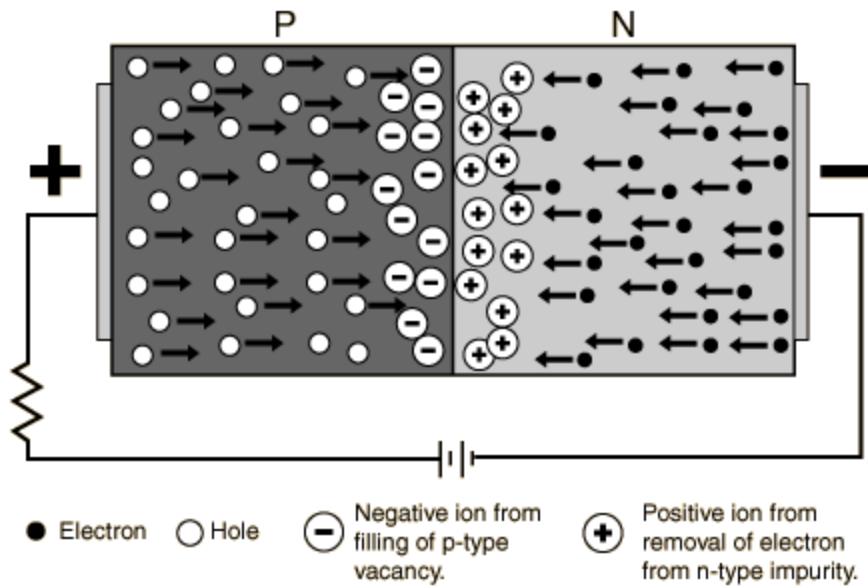
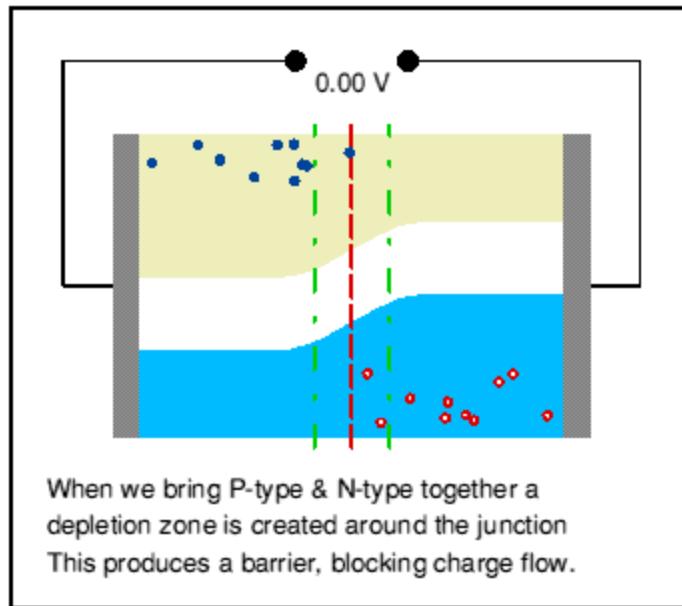
# Bias esterno



# Polarizzazione (bias) diretta

polarizzazione diretta:

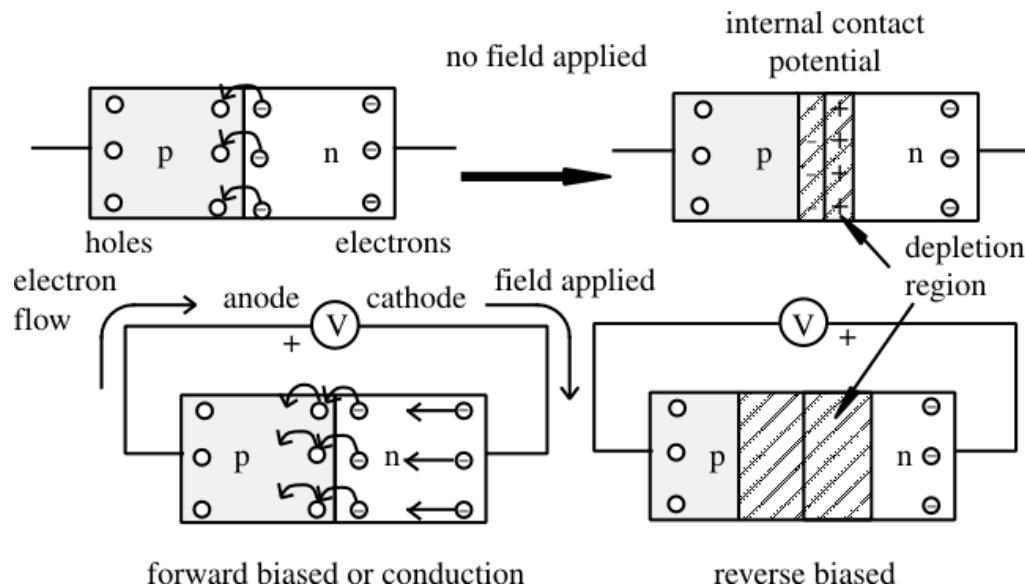
- il potenziale esterno abbassa la barriera di potenziale alla giunzione
- le lacune (dal materiale *p*-type) e gli elettroni (dal materiale *n*-type) sono spinte verso la giunzione
- Una corrente di *elettroni* fluisce verso *p* (sinistra nel disegno) e una di *lacune* verso *n* (destra). La corrente totale è la somma delle due correnti



# Polarizzazione inversa

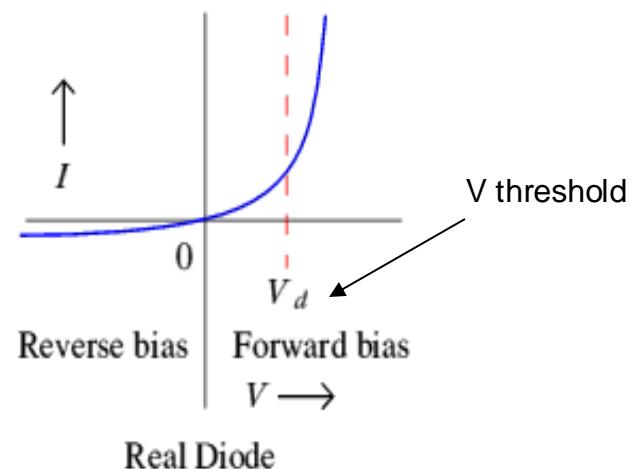
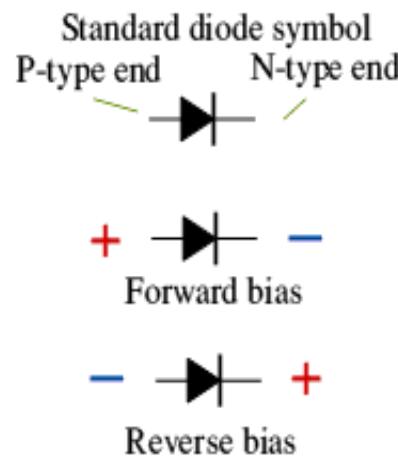
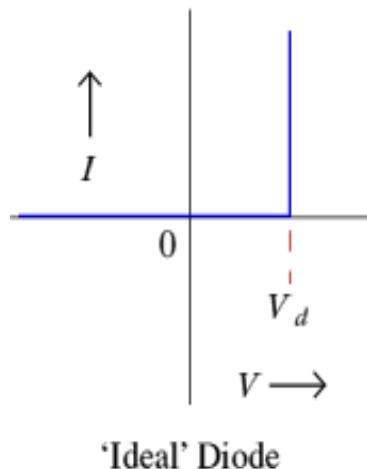
polarizzazione inversa:

- 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 egualia il voltaggio esterno applicato la corrente transiente si ferma (ad eccezione di una piccola corrente "termica")



# Caratteristica del diodo

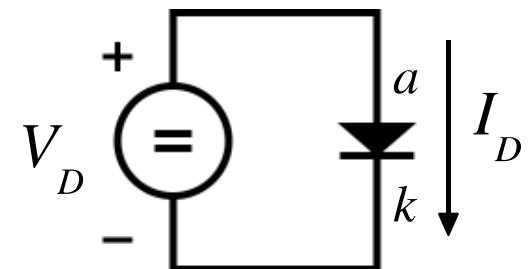
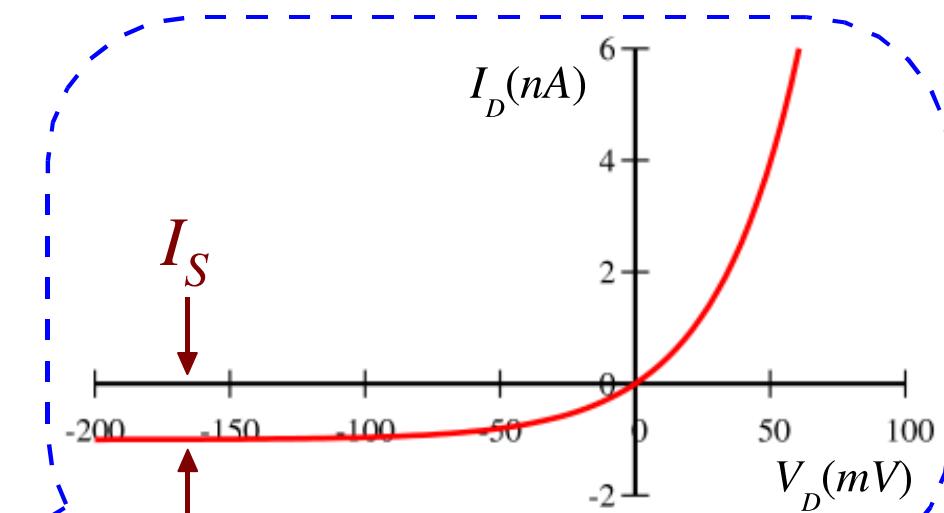
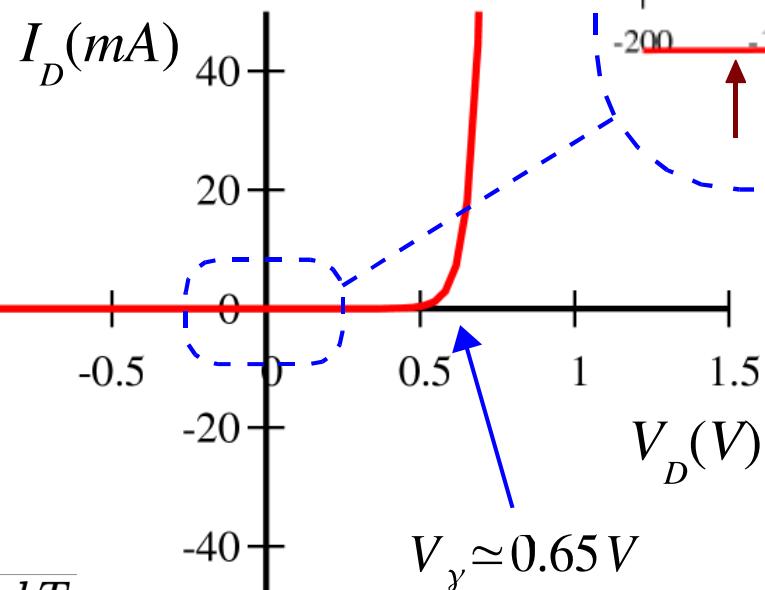
- Polarizzazione diretta: la corrente passa
  - sono necessari  $\sim 0.7V$  (nel Si) per iniziare la conduzione (“vincendo” il potenziale di contatto,  $V_d$ )
- Polarizzazione inversa: il diodo blocca la corrente
  - ideale: corrente = 0
  - reale :  $I_{flow} = 10^{-9} A$



# Caratteristica del diodo

Equazione Shockley del diodo ideale

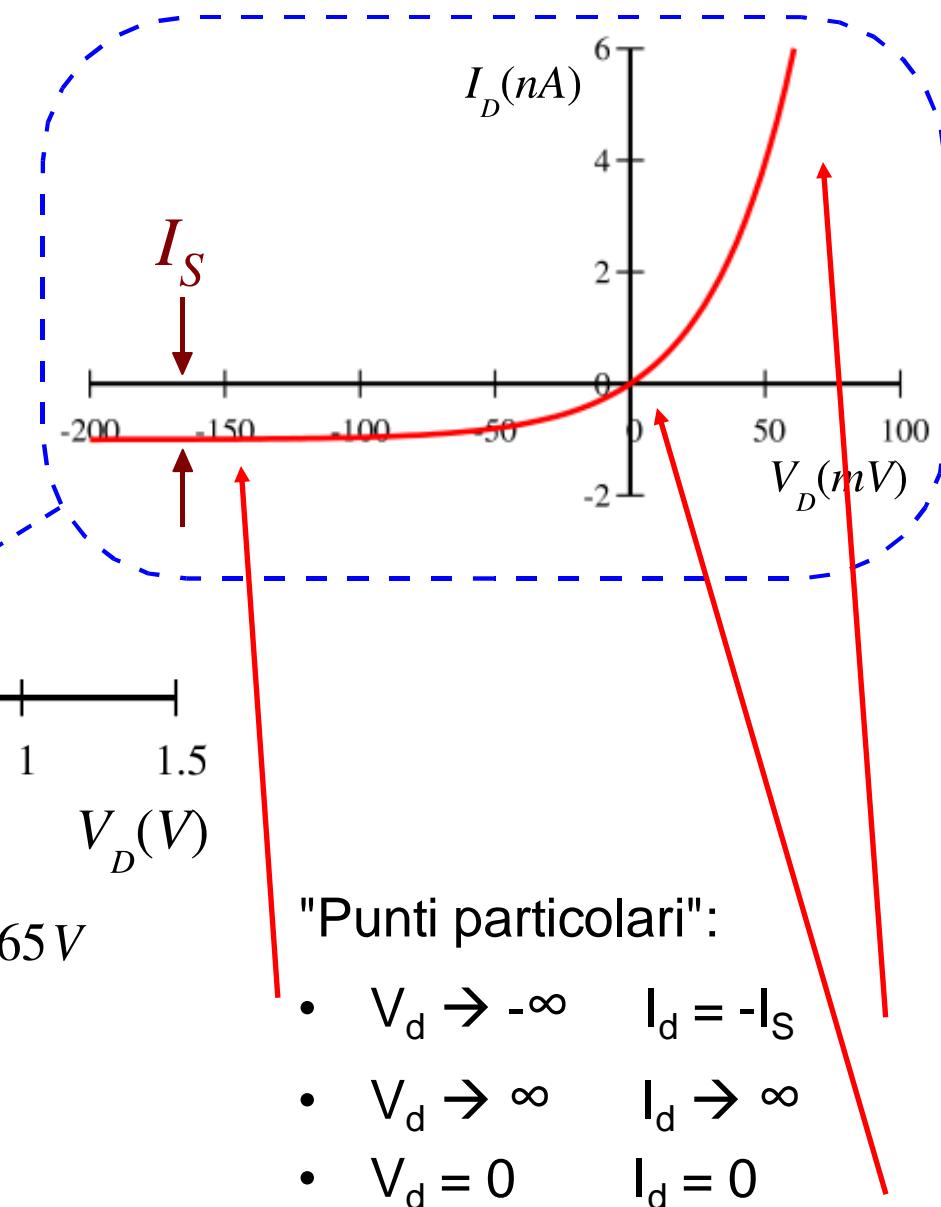
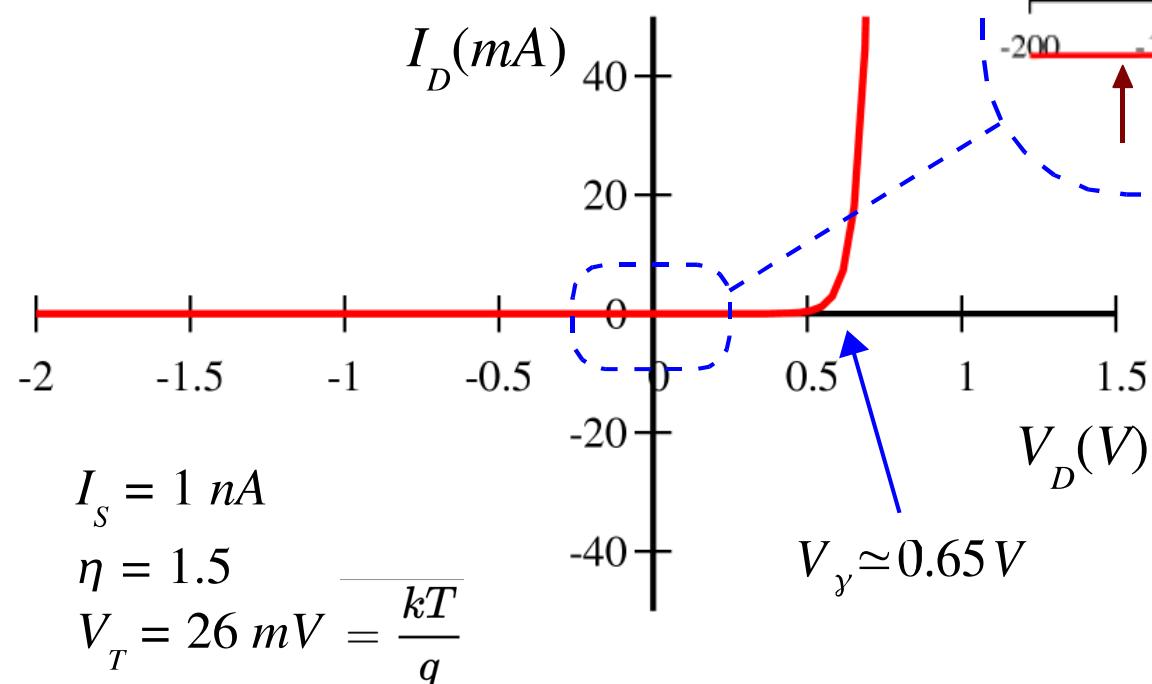
$$I_D = I_S \left( e^{V_D / \eta V_T} - 1 \right)$$



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

# Caratteristica del diodo

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



# Caratteristica del diodo

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

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

soglia di conduzione  
in diretta

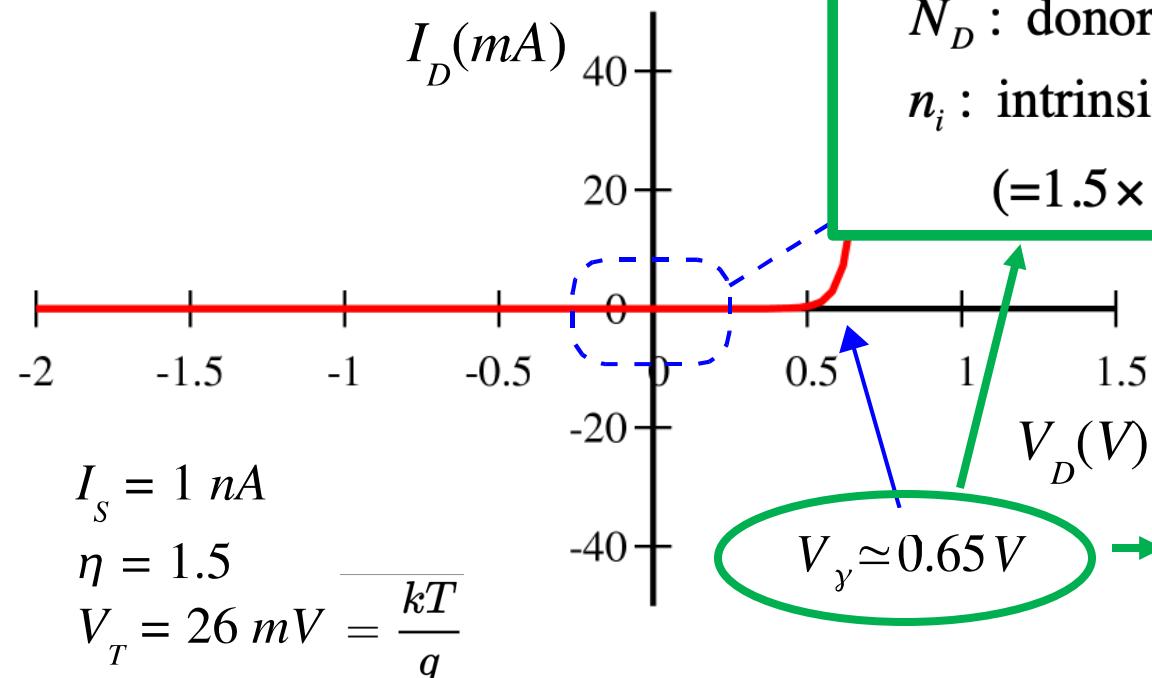
$V_T$  : thermal voltage (= 26 mV at room temp)

$N_A$  : 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)



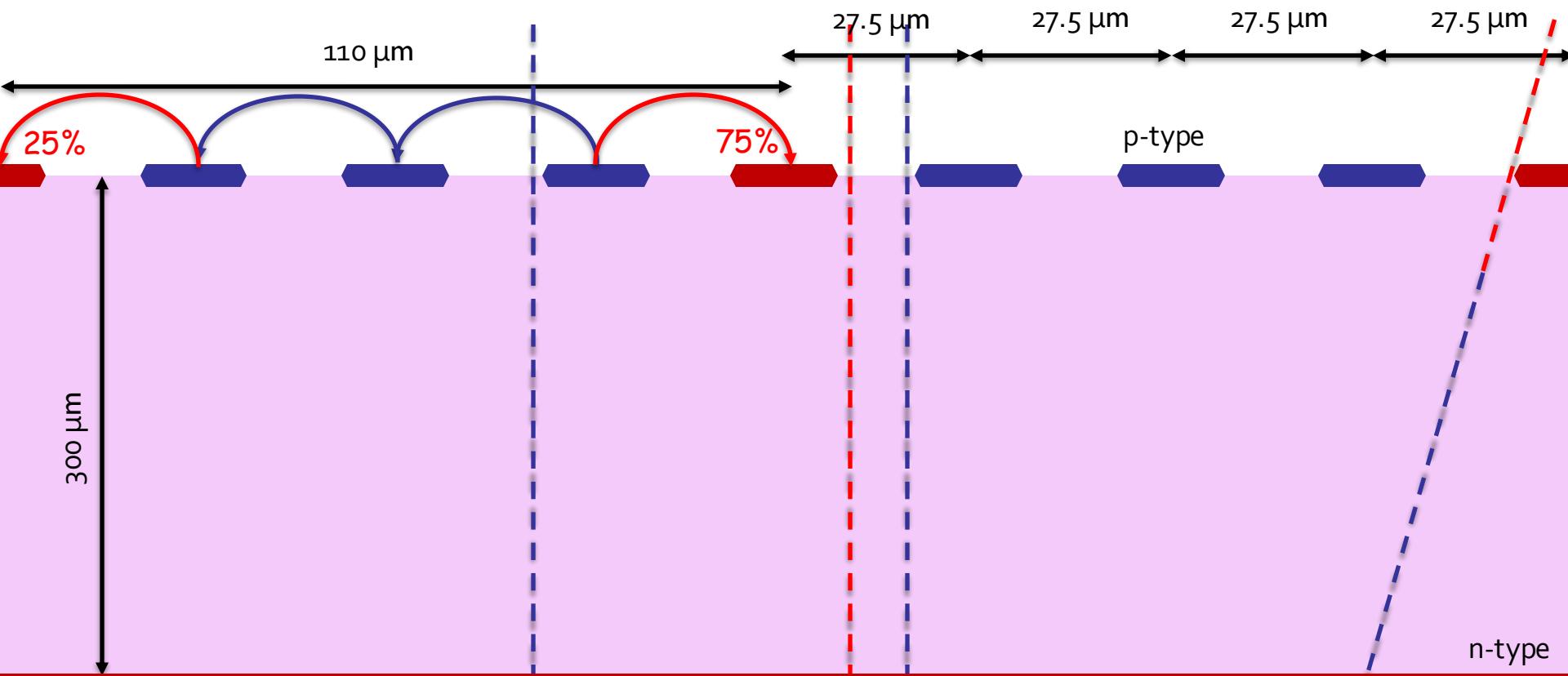
$$V_\gamma \approx 0.65 \text{ V}$$

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

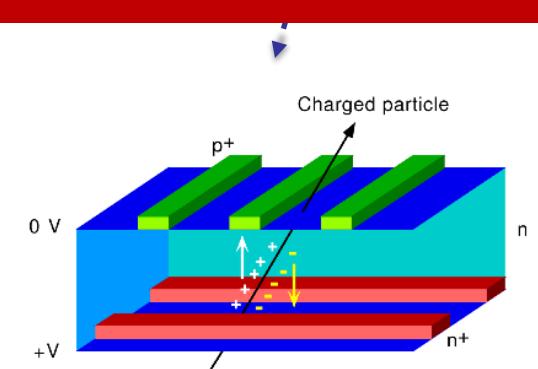
$$V_0 = V_T \ln \left( \frac{N_A N_D}{n_i^2} \right) = 0.88 \text{ V}$$

$I_s$  è la corrente di saturazione inversa che,  
regime di contropolarizzazione (bastano poche centinaia di mv)

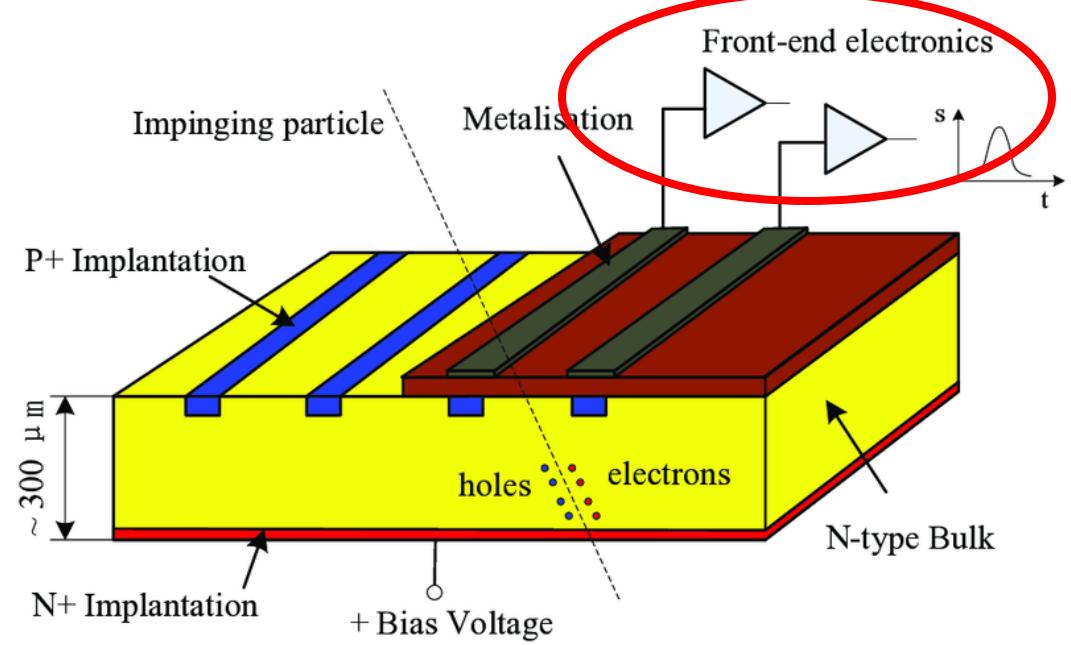
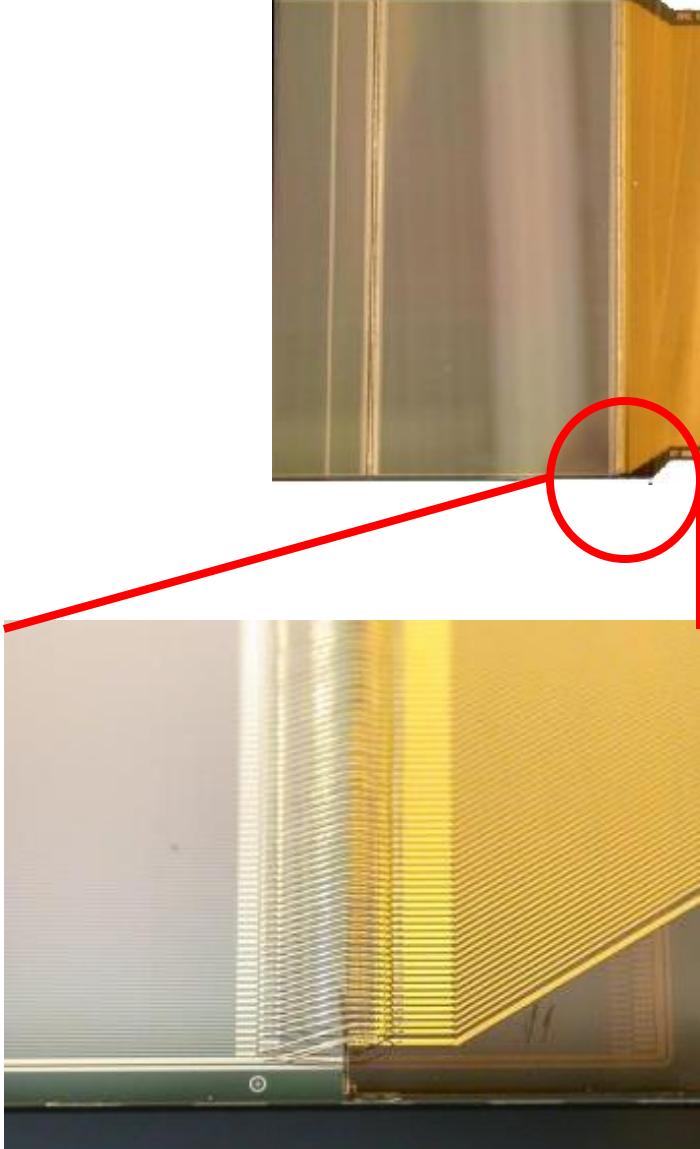
# Il diodo come rivelatore di particelle



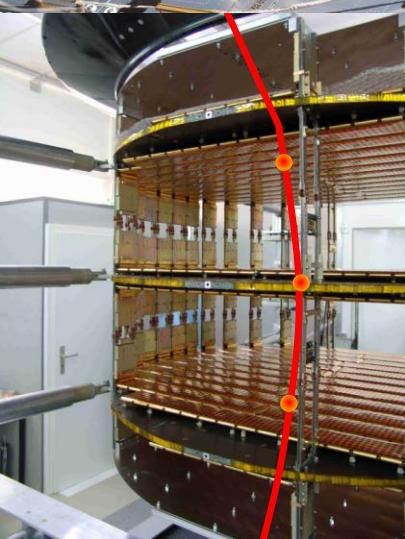
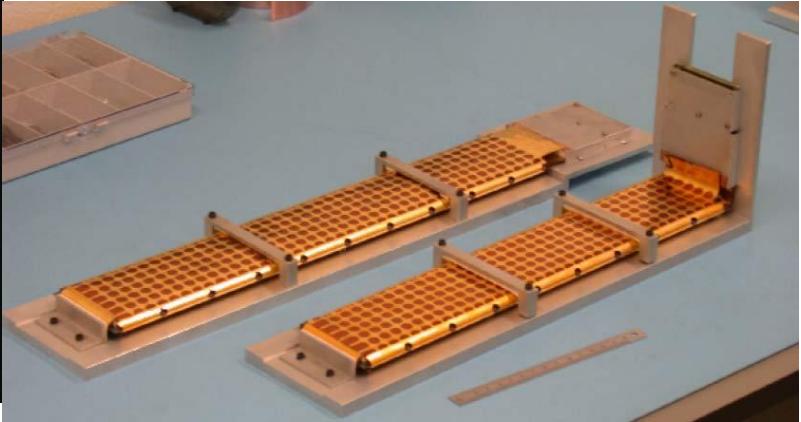
- "substrato" (300 um, ad esempio) tutto completamente svuotato ( $V_d \sim 100$  V)
- se passa una particella carica ionizza il materiale, oppure un fotone "promuove" un elettrone in conduzione per effetto fotoelettrico
- i portatori liberi migrano verso le "strip" sotto l'effetto del campo elettrico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



# Rivelatore di particelle

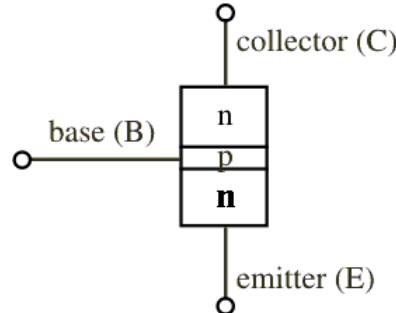


# Tracciatore al Si – AMS-02

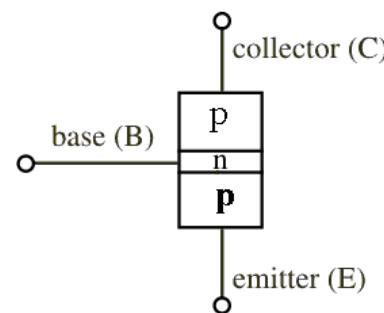
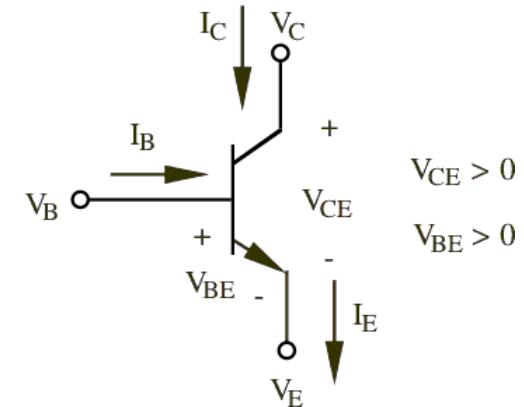


# Bipolar Junction Transistor (BJT)

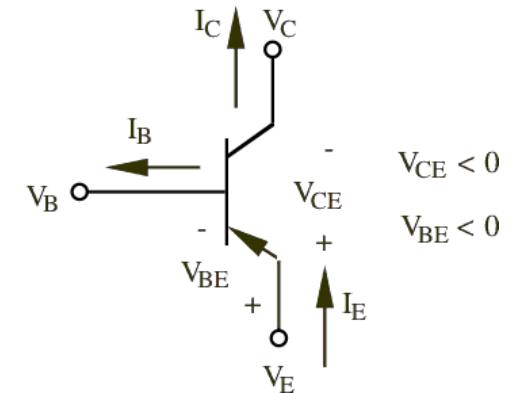
- 3 zone adiacenti di Si dopato (ognuna connessa ad un filo):
  - Base (sottile, poco dopata).
  - Collettore
  - Emettitore
- 2 tipi di BJT:
  - npn
  - pnp
- più comune: npn



npn bipolar junction transistor



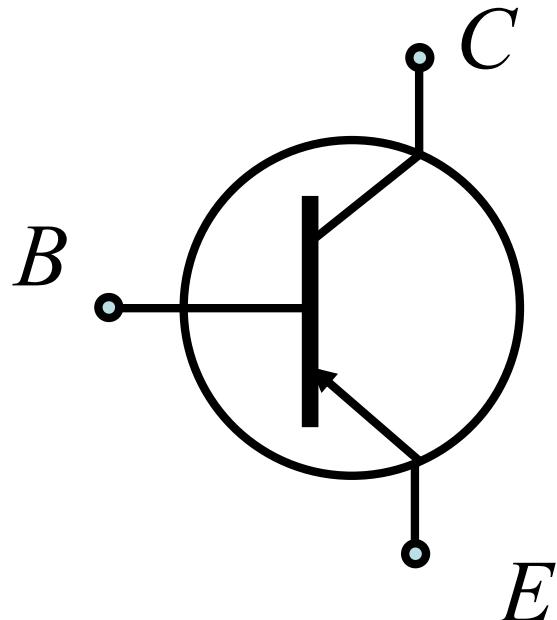
pnp bipolar junction transistor



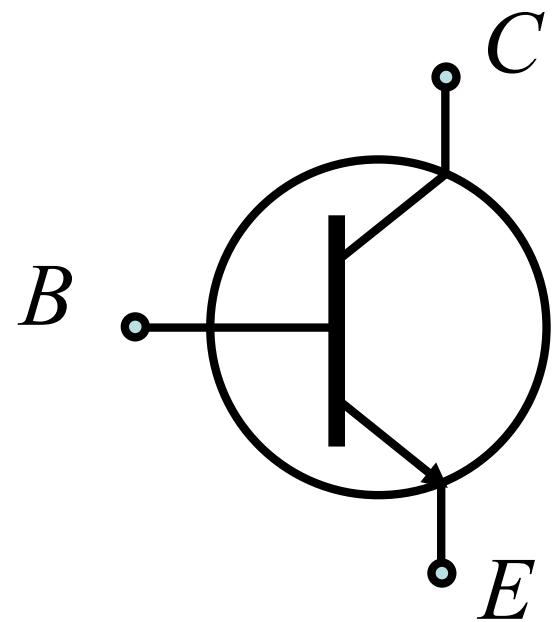
Sviluppato da  
Shockley (1949)

# Bipolar Junction Transistor (BJT)

*pnp*

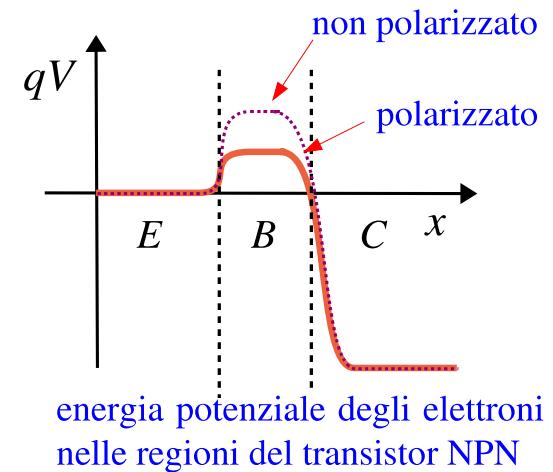
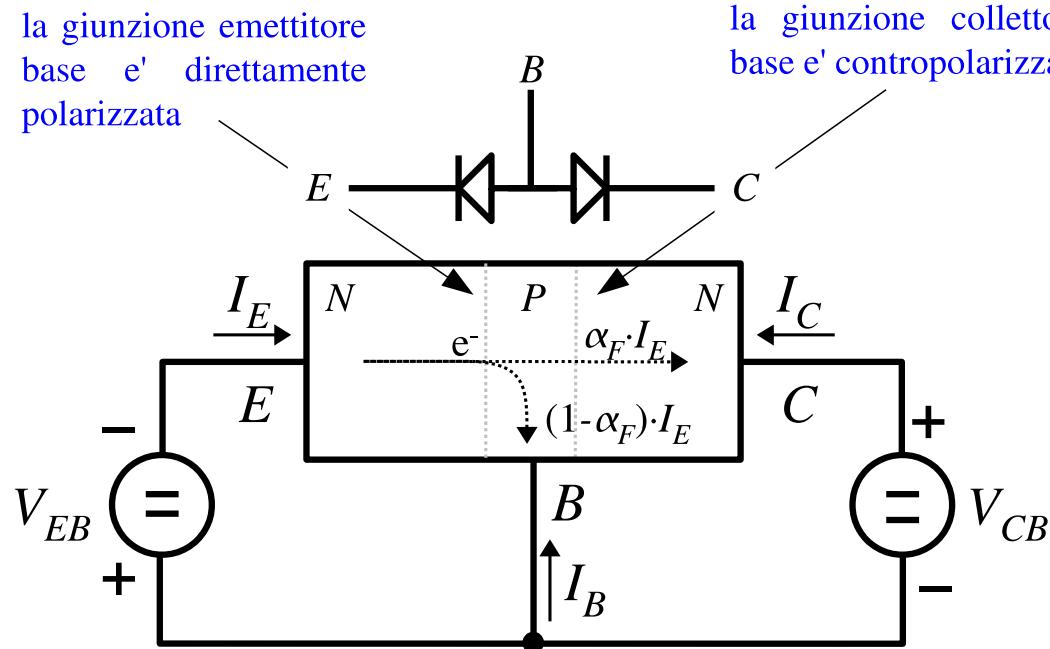


*npn*



# 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:

$$I_E = -I_{ES} \cdot (e^{V_{BE}/\eta V_r} - 1)$$

$$I_C = \alpha_F I_{ES} \cdot (e^{V_{BE}/\eta V_r} - 1) = -\alpha_F I_E$$

La corrente di base  $I_B$  controlla una corrente di collettore  $I_C$  che è  $\beta_F$  volte più grande:

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

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

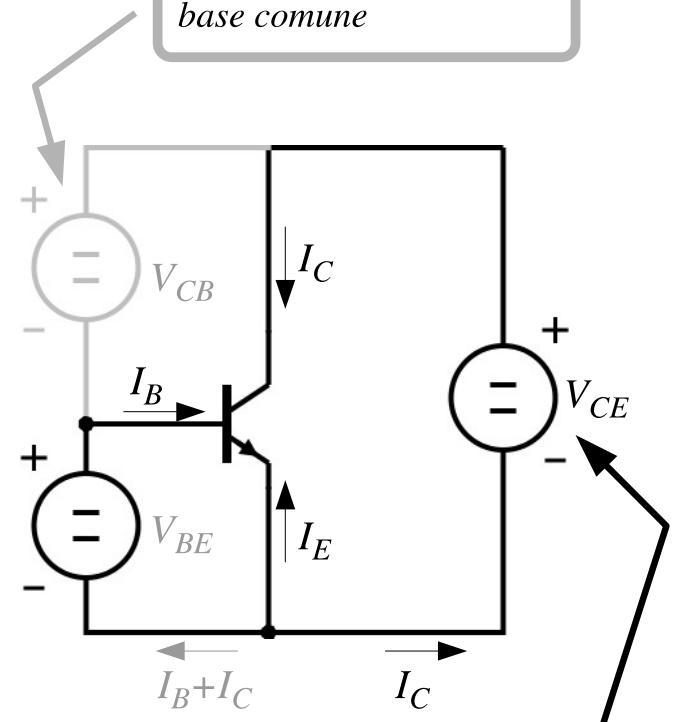
coeffienti di amplificazione di corrente:

$\alpha_F = 0.95 \dots 0.999$  a base comune

$\beta_F = 20 \dots 1000$  a emettitore comune

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

Polarizzazione collettore-base nella configurazione *base comune*



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 elettron-iacuna: da evitare

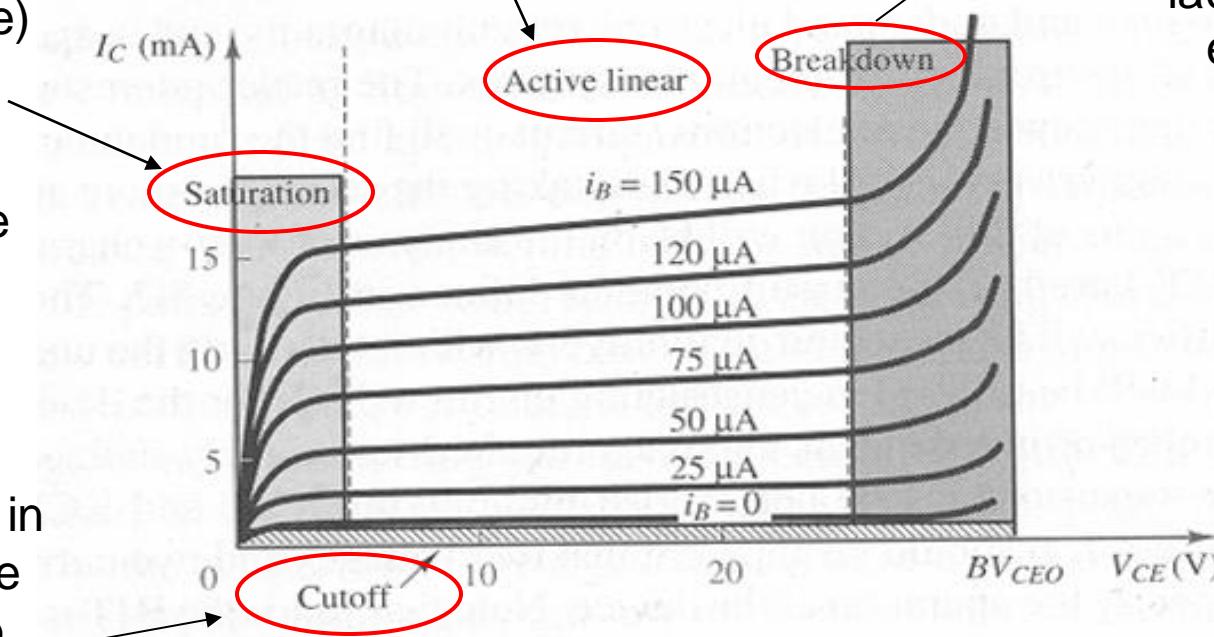
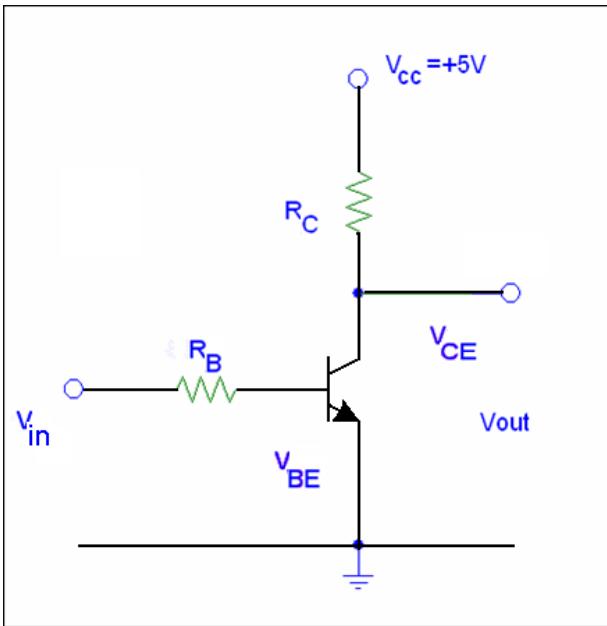


Figure 8.9(b) The collector-emitter output characteristics of a BJT

# BJT come interruttore

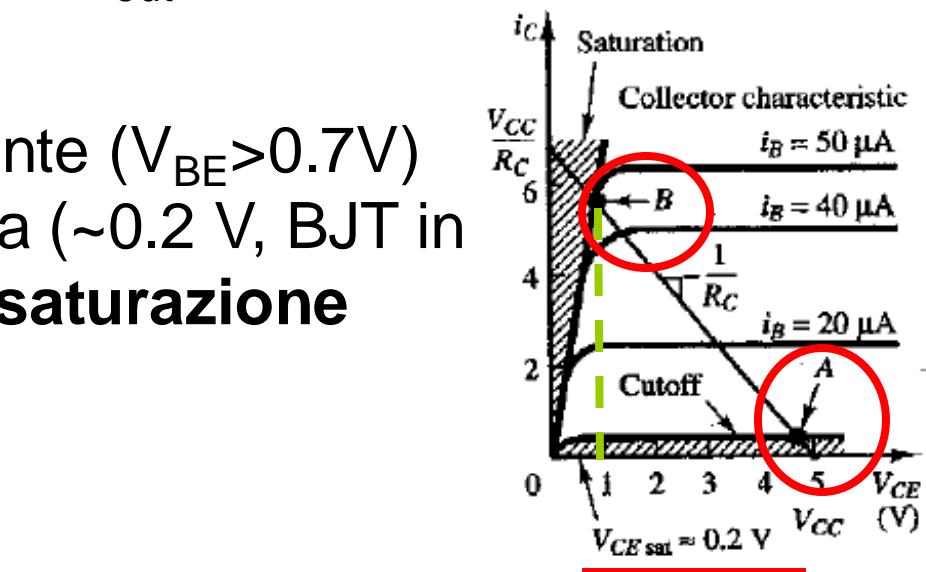


$V_{in}$  ("bassa") < 0.7 V

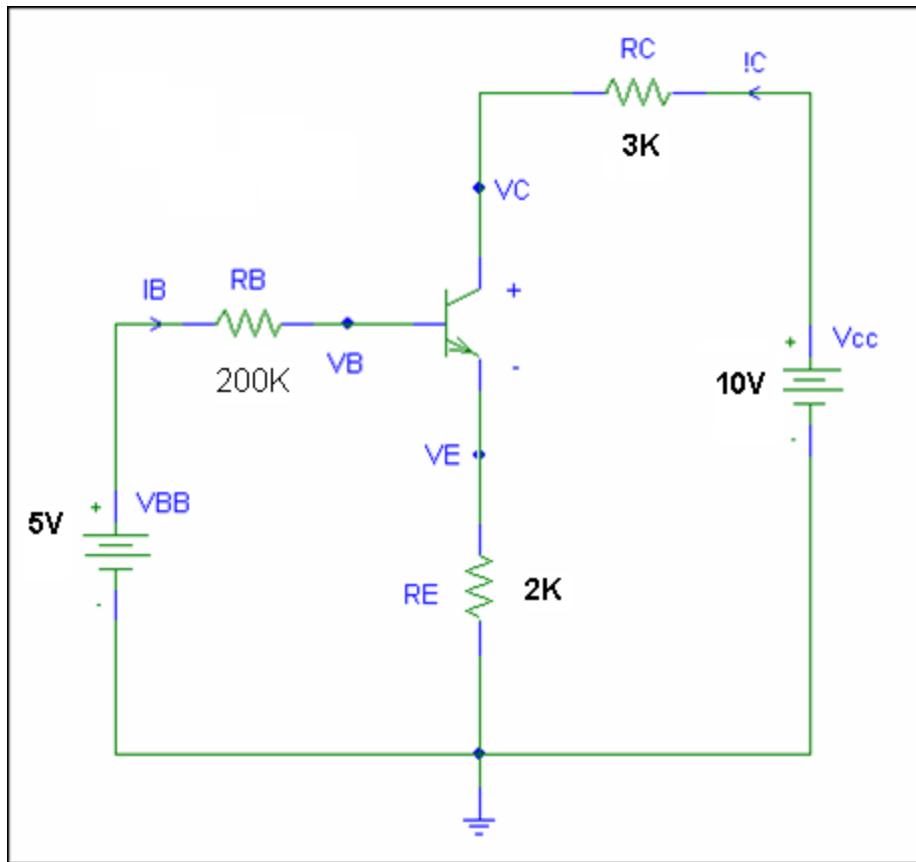
- B-E non polarizzata direttamente
  - regione di **cutoff** → non fluisce corrente
  - $V_{out} = V_{CE} = V_{cc}$
- $V_{out}$  = "alta"

$V_{in}$  ("alta")

- B-E polarizzata direttamente ( $V_{BE} > 0.7V$ )
  - $I_c$  massima →  $V_{CE}$  minima (~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)

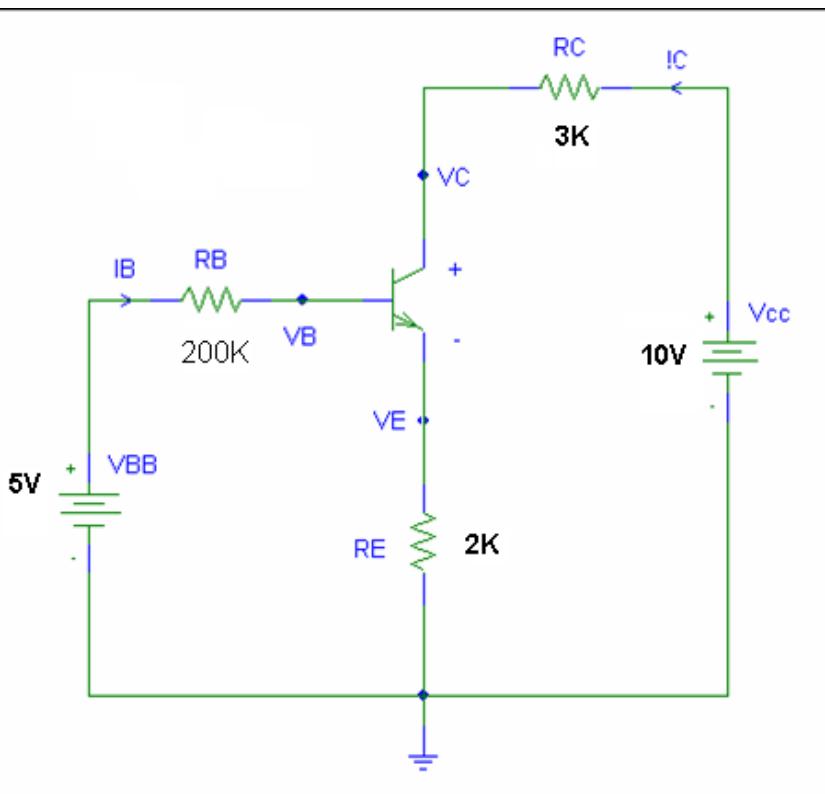


- Emettitore comune
- Regione di linearità
- Guadagno elevato

Esempio:

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

# BJT come amplificatore (zona attiva)



$$V_{BE} = 0.7V$$

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

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

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

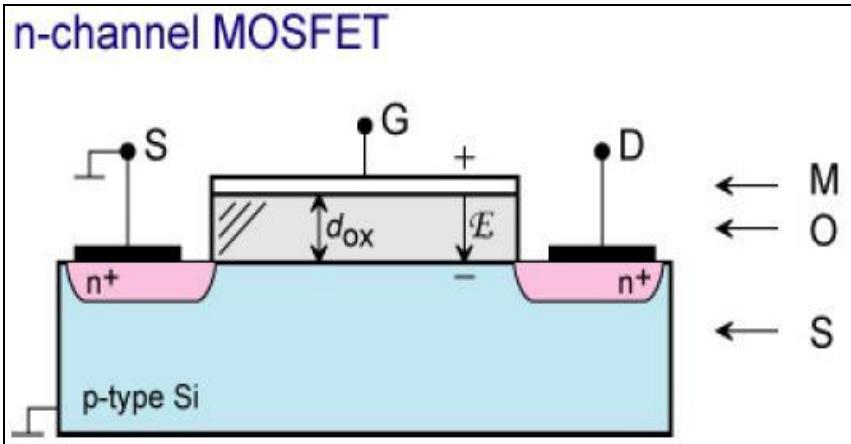
$$\begin{aligned} V_{CB} &= V_{CC} - I_C * R_C - I_E * R_E - V_{BE} = \\ &= 10 - (3)(1.07) - (2)(101 * 0.0107) - 0.7 = \\ &= 3.93V \end{aligned}$$

$V_{CB} > 0$  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