

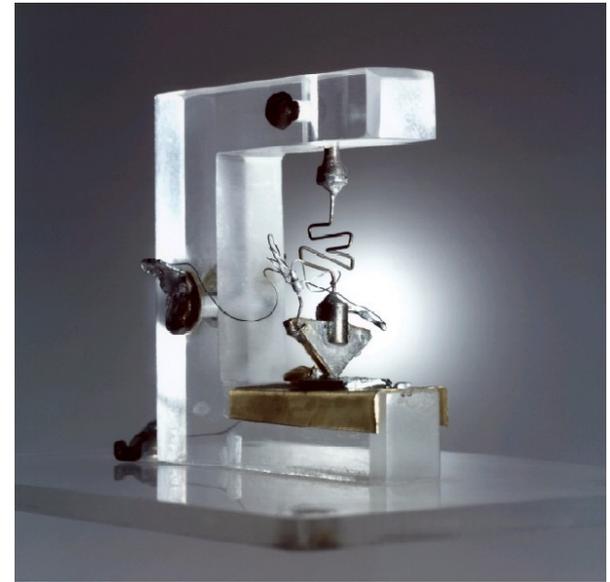
# Laboratorio di Elettronica e Tecniche di Acquisizione Dati 2023-2024

## Transistor

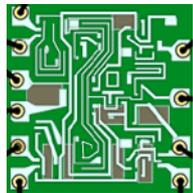
(cfr. [https://inst.eecs.berkeley.edu/~ee105/fa15/lectures/Lecture06-pn%20Junction%20\(with%20appendix\).pdf](https://inst.eecs.berkeley.edu/~ee105/fa15/lectures/Lecture06-pn%20Junction%20(with%20appendix).pdf)  
<http://studenti.fisica.unifi.it/~carla/appunti/2008-9/cap.4.pdf>  
[http://ume.gatech.edu/mechatronics\\_course/Transistor\\_F04.ppt](http://ume.gatech.edu/mechatronics_course/Transistor_F04.ppt))

# Storia del Transistor

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

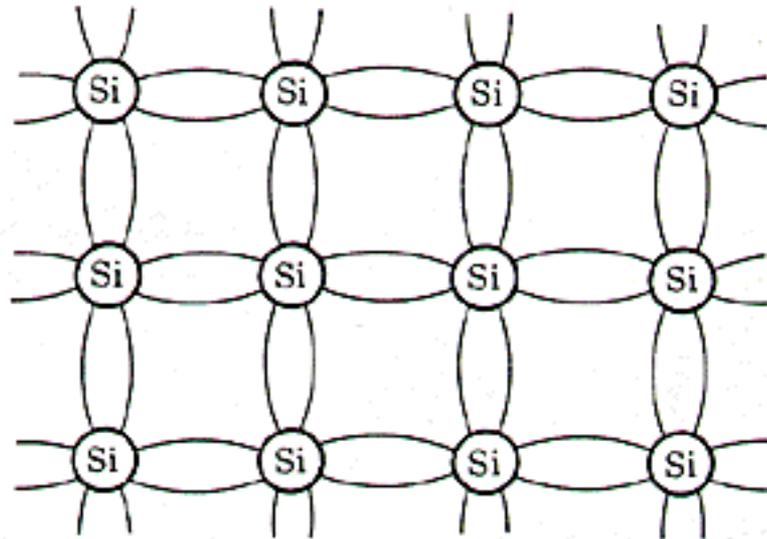


# Semiconduttori

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

**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			IB	IIB	Ga	Ge	As	Se	Br	Kr				
4	5	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	31	32	33	34	35	36		
4	5	K	Ca	Sc	Ti	V	Cr	Mn	Fe	Co	Ni	Cu	Zn	31	32	33	34	35	36		
4	5	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		
5	6	37	38	39	40	41	42	43	44	45	46	47	48	49	50	51	52	53	54		
5	6	Rb	Sr	Y	Zr	Nb	Mo	Tc	Ru	Rh	Pd	Ag	Cd	In	Sn	Sb	Te	I	Xe		
5	6	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		
6	7	55	56	57	72	73	74	75	76	77	78	79	80	81	82	83	84	85	86		
6	7	Cs	Ba	La	Hf	Ta	W	Re	Os	Ir	Pt	Au	Hg	Tl	Pb	Bi	Po	At	Rn		
6	7	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	222		
7	8	87	88	89	104	105	106	107	108	109	110	111	112		114		116		118		
7	8	Fr	Ra	Ac	Rf	Db	Sg	Bh	Hs	Mt	Uun	Uuu	Uub								
7	8	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

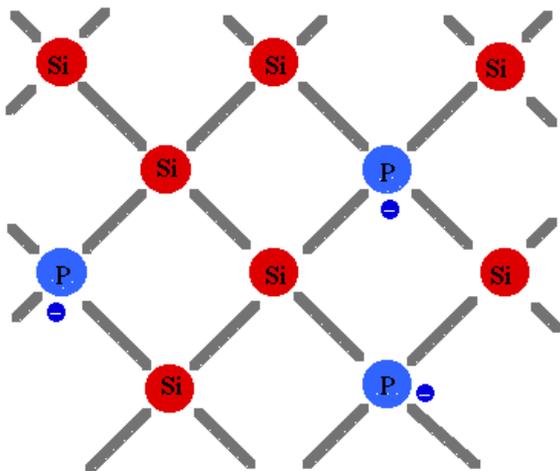
Due tipi di dopaggio

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

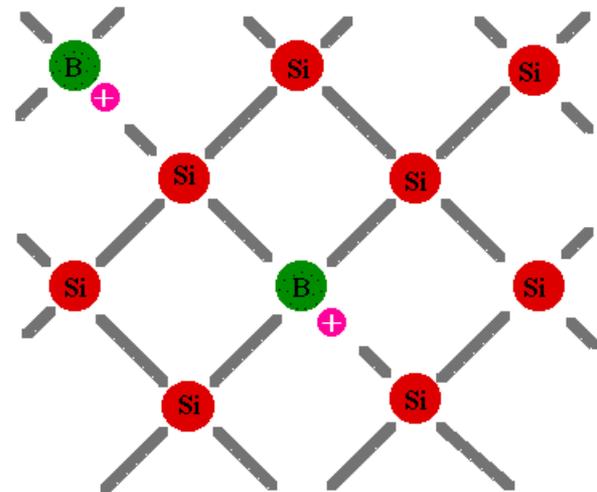
- impurità di **donori** (dal Gruppo V) aggiunte al reticolo cristallino del Si
- portatori di carica dominante: **elettroni negativi**
- elementi del **Gruppo V** come **Fosforo, Arsenico e Antimonio**

## 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**



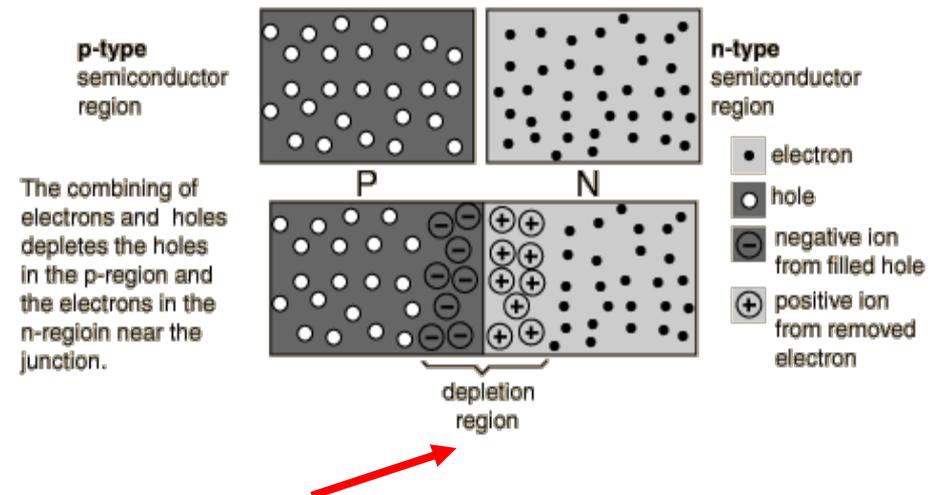
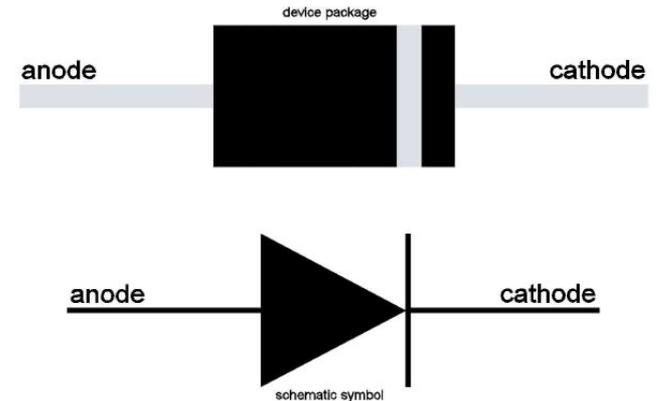
*N-type*



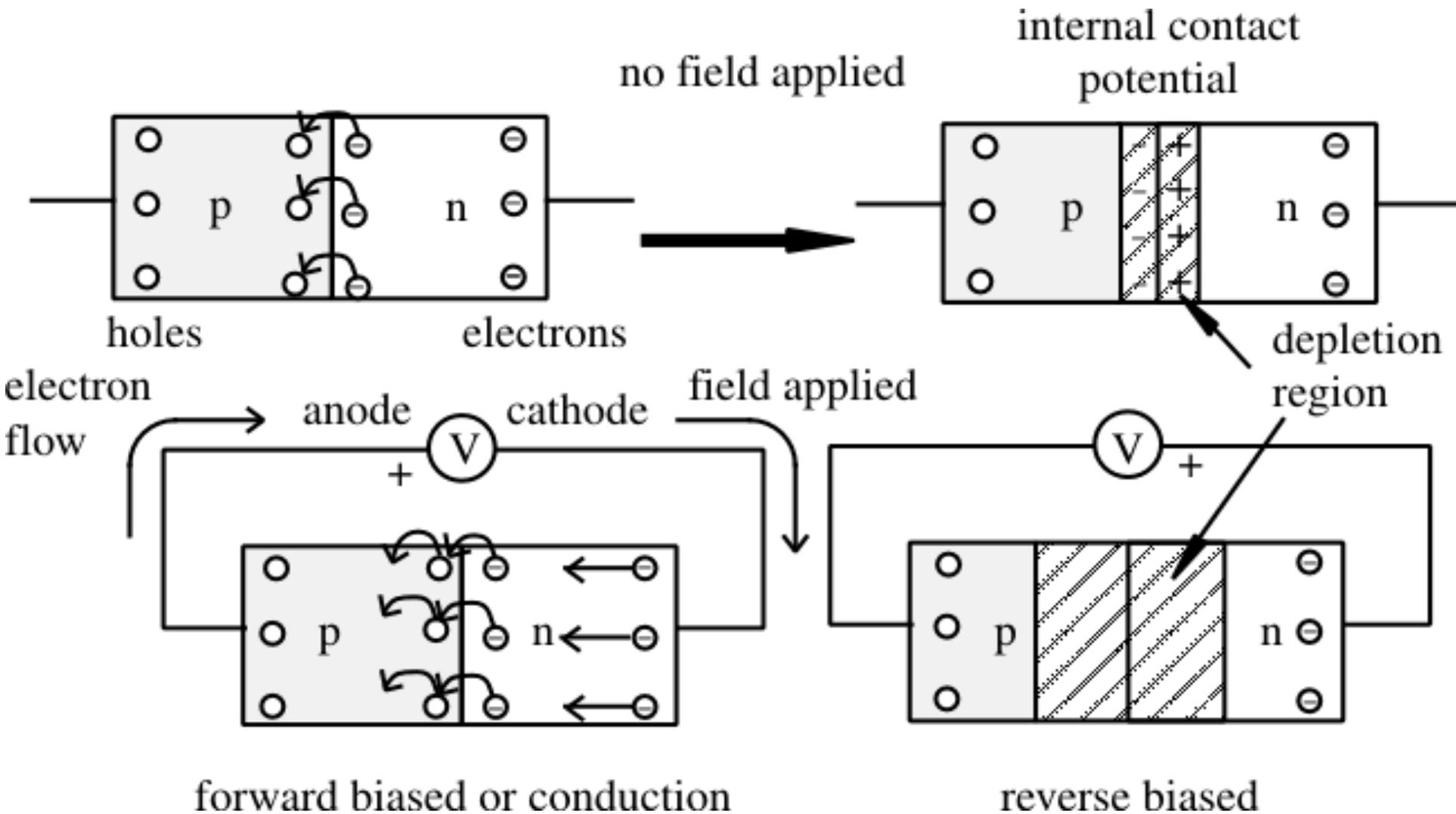
*P-type*

# Costituente base: la giunzione p-n

- chiamata anche **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

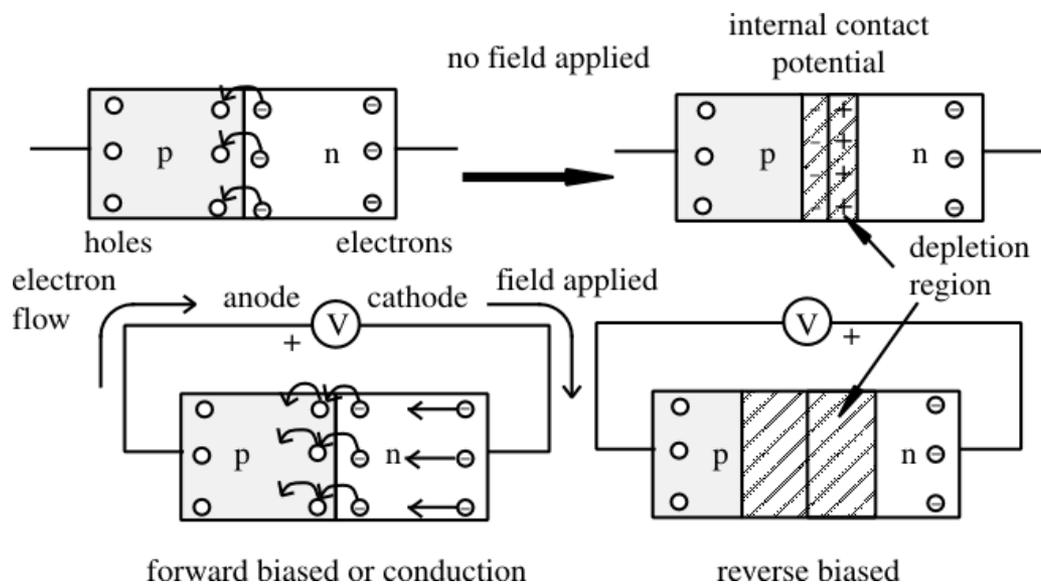




# Polarizzazione inversa

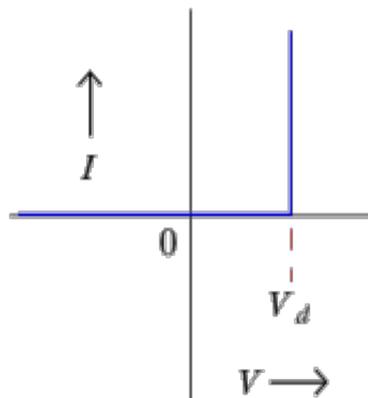
polarizzazione inversa:

- 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")

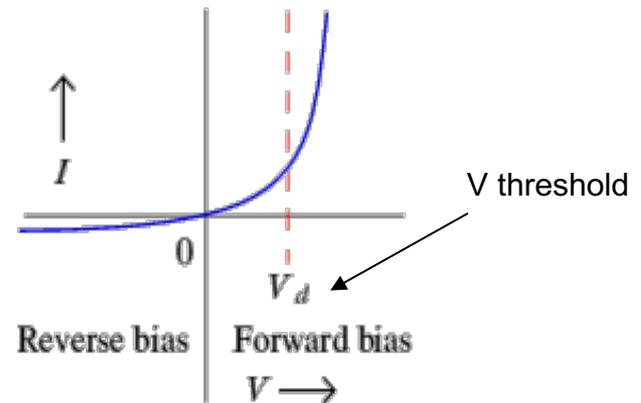
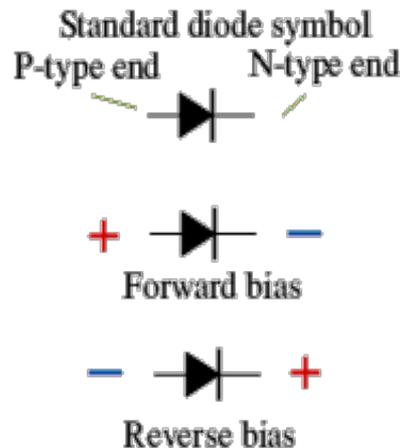


# Caratteristica del diodo

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



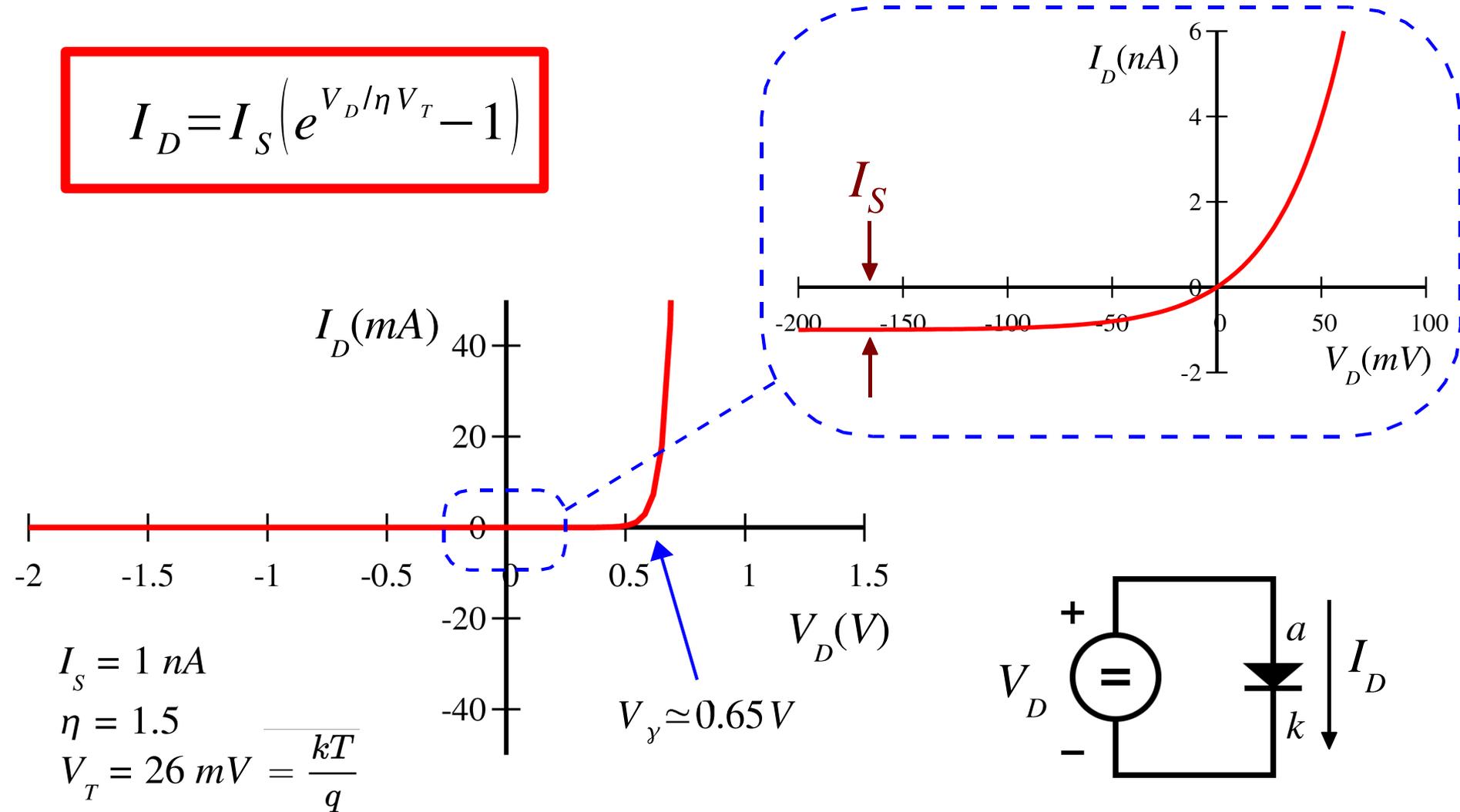
'Ideal' Diode



Real Diode

# 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)

# Caratteristica del diodo

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

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

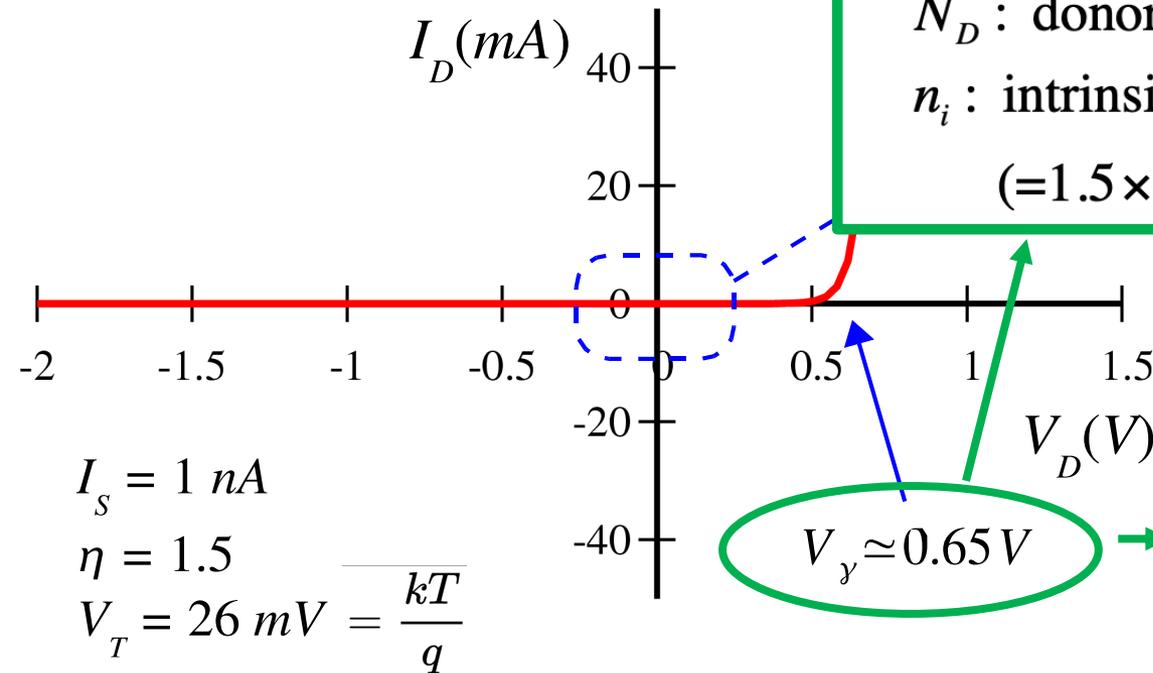
$V_T$  : thermal voltage (= 26 mV at room temp)

$N_A$  : 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)

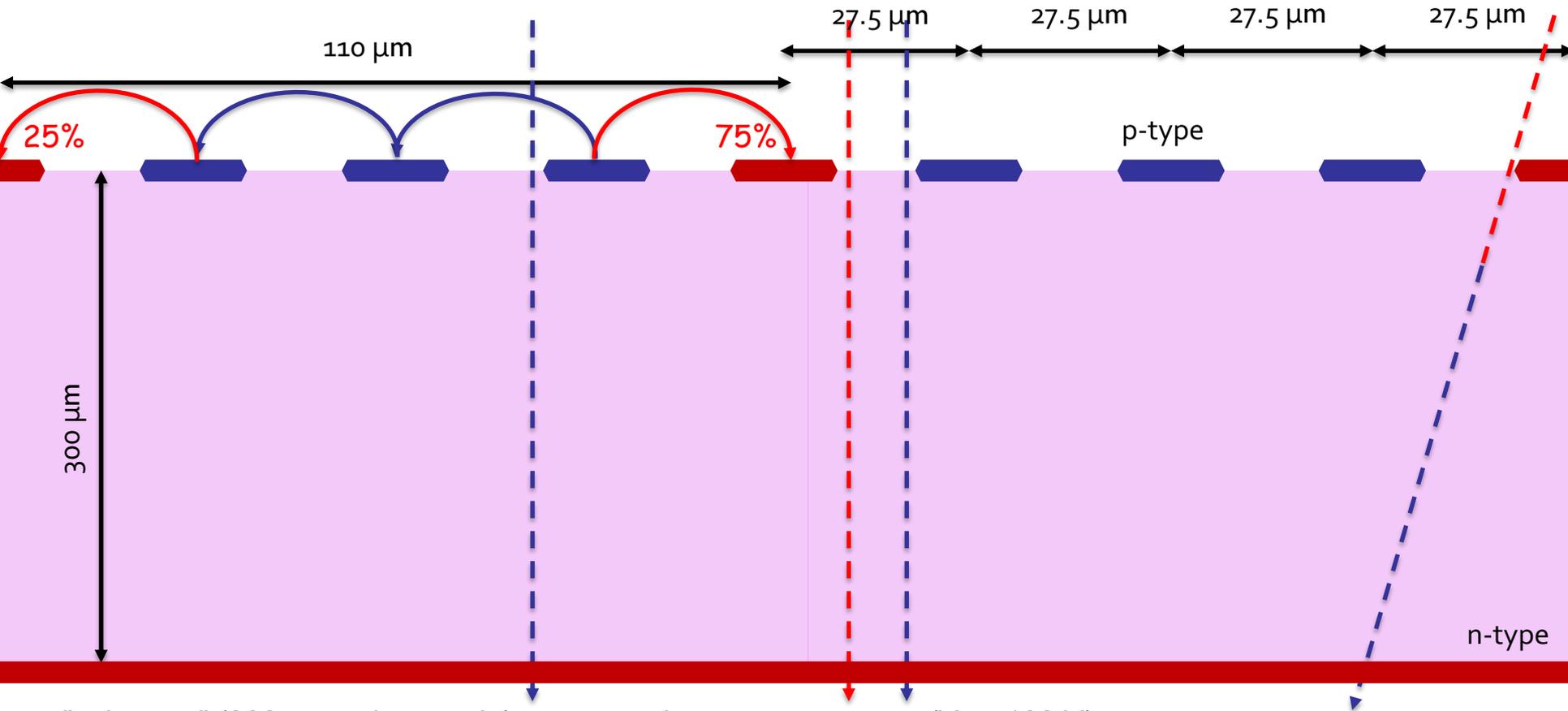


$I_S$  è la **corrente di saturazione inversa** che, in regime di contropolarizzazione (bastano poche centinaia di mV)

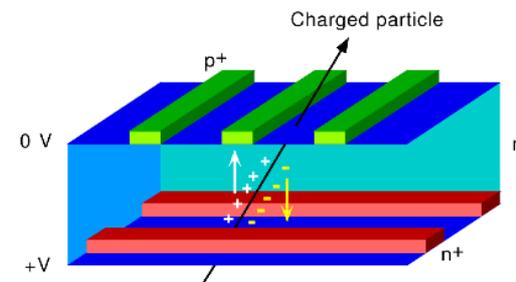
**Example:** A pn junction with n-doping of  $10^{17} \text{ cm}^{-3}$  and p-doping of  $10^{18} \text{ cm}^{-3}$

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

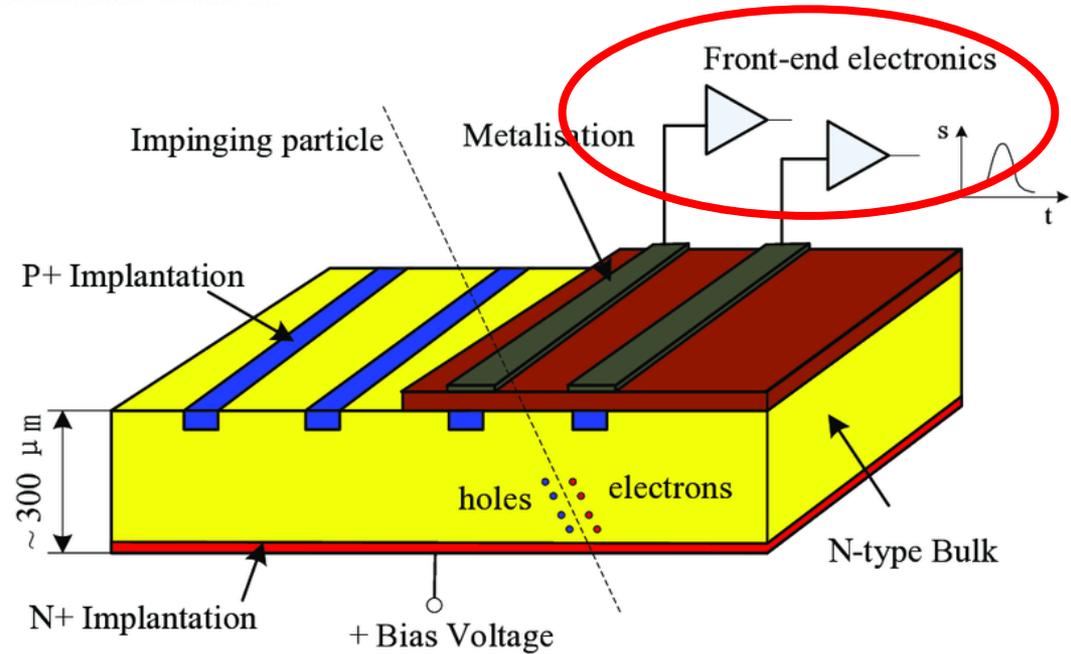
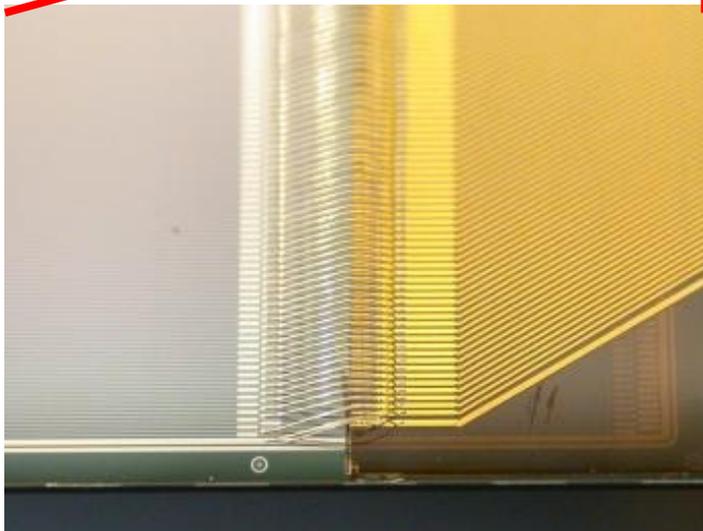
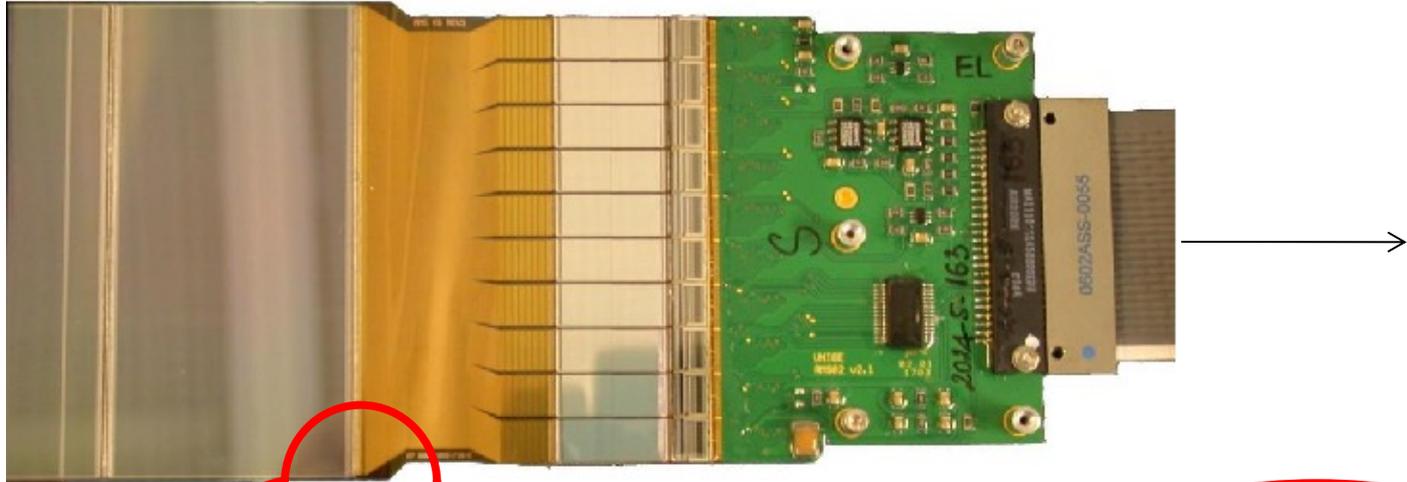
# Il diodo come rivelatore di particelle



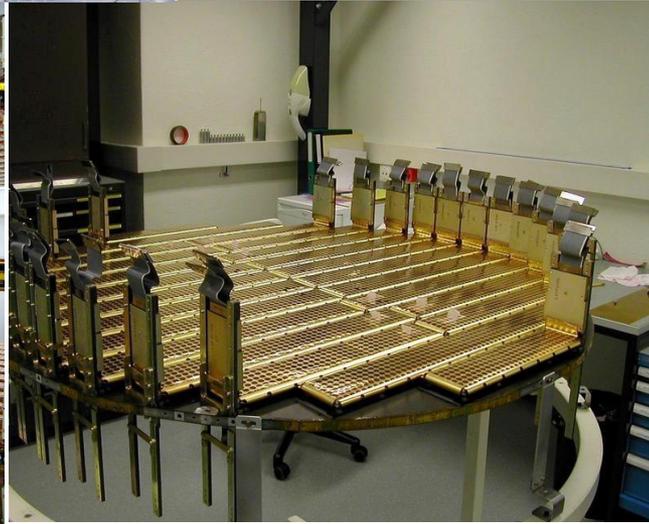
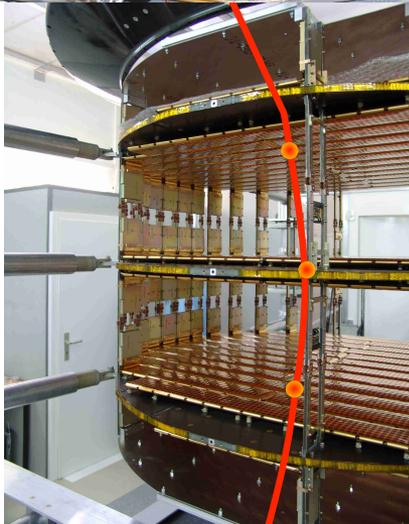
- "substrato" (300 μm, ad esempio) tutto completamente svuotato ( $V_d \sim 100$  V)
- se passa una particella carica ionizza il materiale, oppure un fotone "promuove" un elettrone in conduzione per effetto fotoelettrico
- i portatori liberi migrano verso le "strip" sotto l'effetto del campo elettrico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



# Rivelatore di particelle

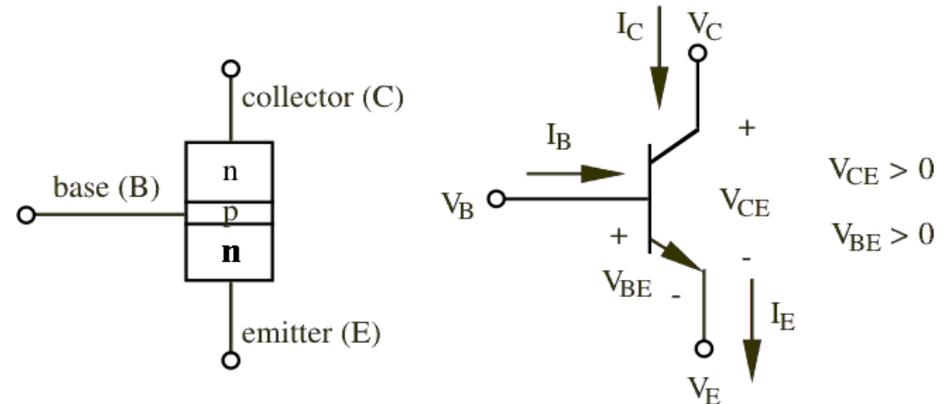


# Tracciatore al Si – AMS-02

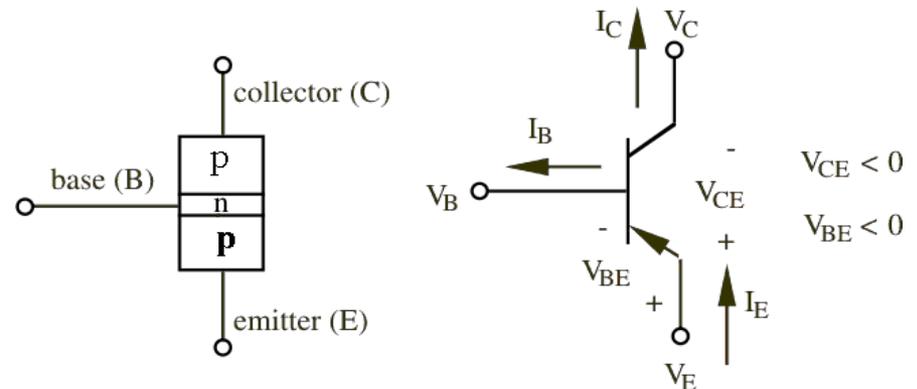


# Bipolar Junction Transistor (BJT)

- 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

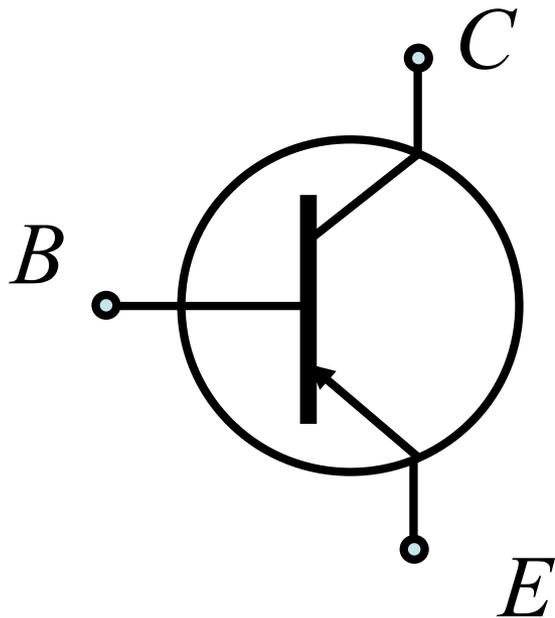


pnp bipolar junction transistor

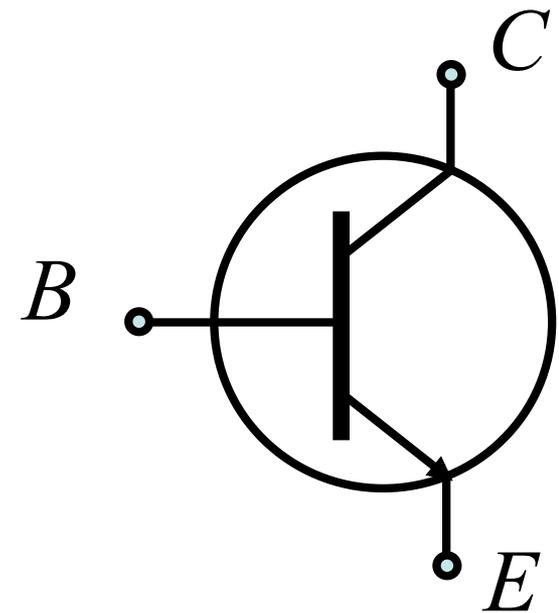
Sviluppato da Shockley (1949)

# Bipolar Junction Transistor (BJT)

*pnp*



*npn*





# 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'  $\beta_F$  volte piu' grande:

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

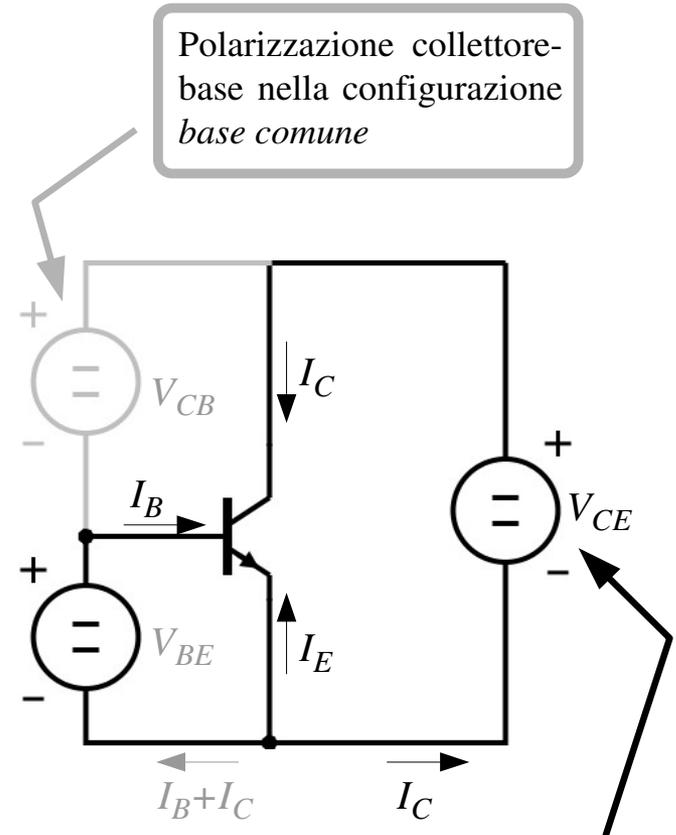
$$I_C = \frac{\alpha_F}{1 - \alpha_F} I_B = \beta_F I_B$$

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

Materiale aggiuntivo non discusso  
a lezione

# 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

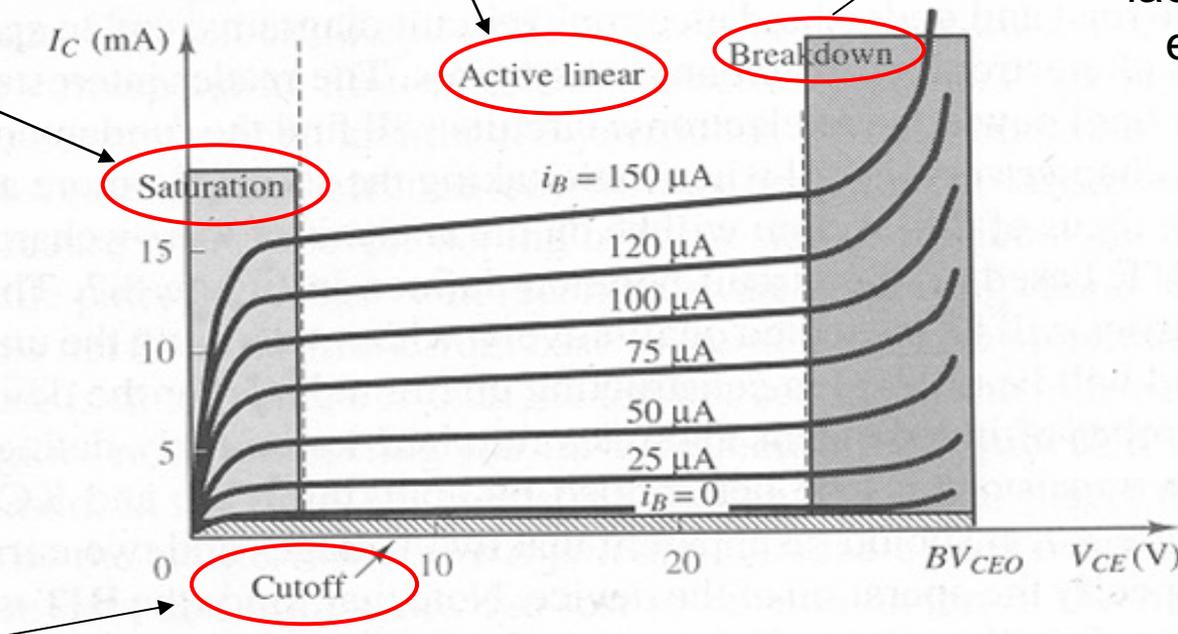
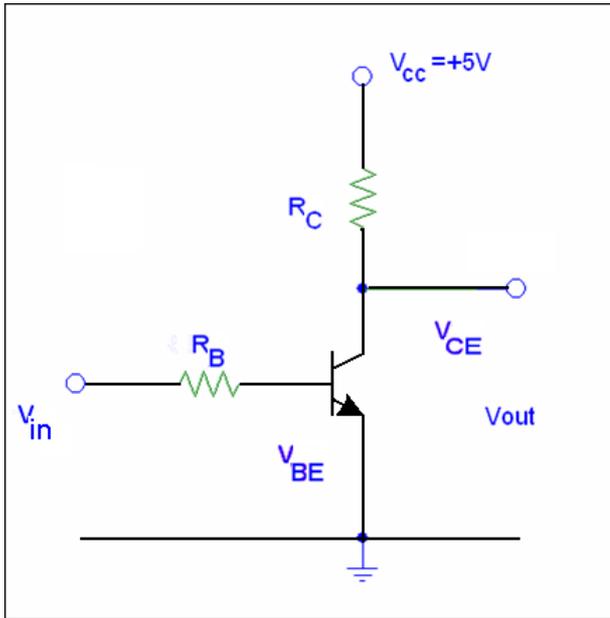


Figure 8.9(b) The collector-emitter output characteristics of a BJT

# BJT come interruttore



$V_{in}$  (“bassa”)  $< 0.7\text{ V}$

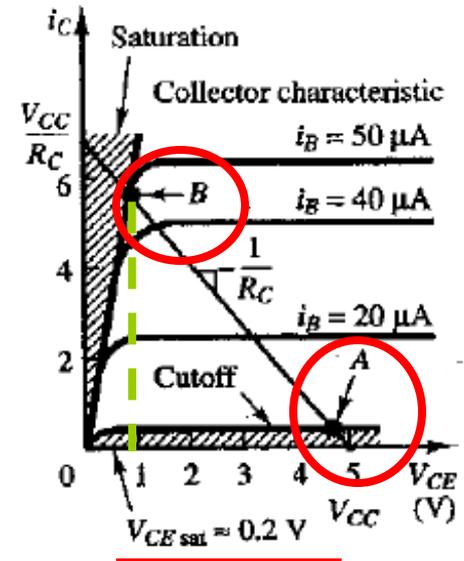
- B-E non polarizzata direttamente
- regione di **cutoff**  $\rightarrow$  non fluisce corrente
- $V_{out} = V_{CE} = V_{CC}$

$\rightarrow V_{out} = \text{“alta”}$

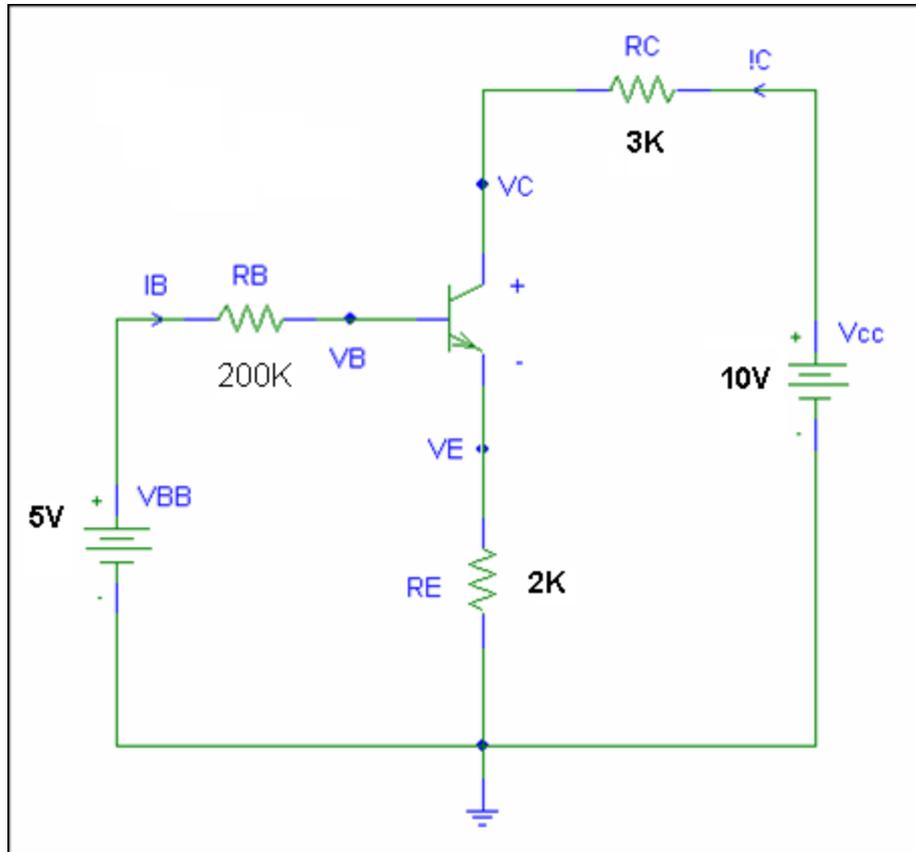
$V_{in}$  (“alta”)

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

$\rightarrow V_{out} = \text{“bassa”}$



# BJT come amplificatore (zona attiva)

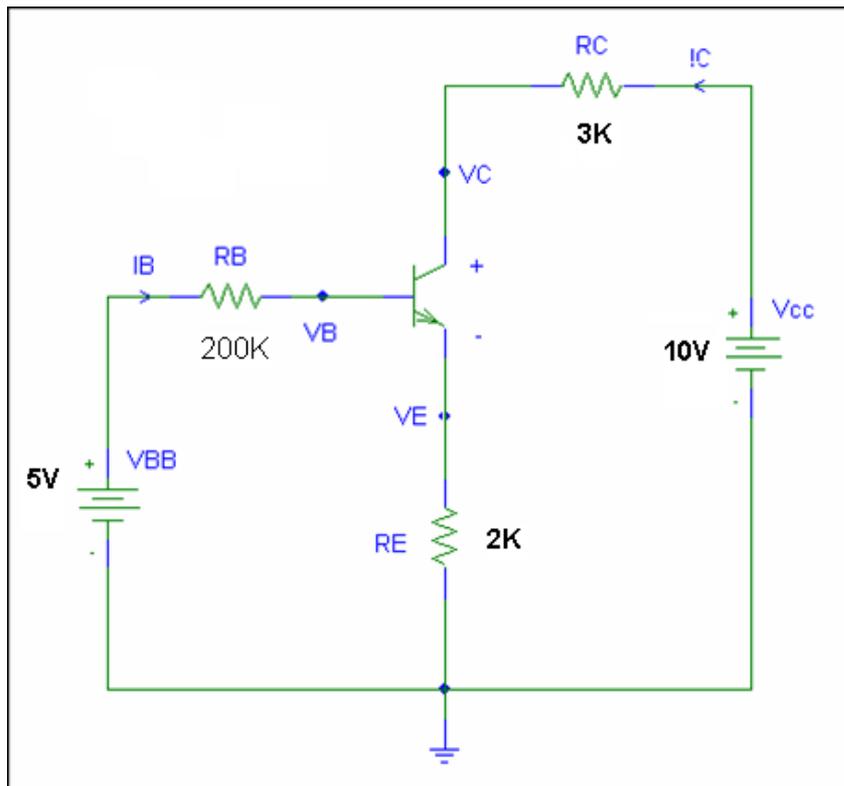


- Emettitore comune
- Regione di linearità
- Guadagno elevato

Esempio:

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

# BJT come amplificatore (zona attiva)



$$V_{BE} = 0.7V$$

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

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

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

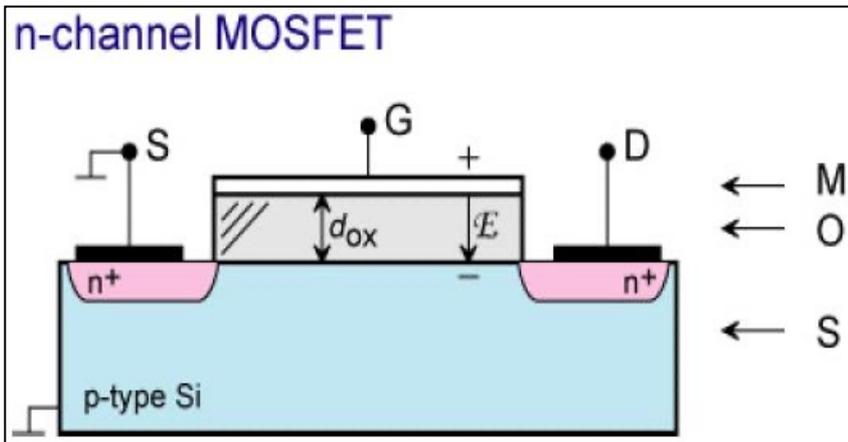
$$\begin{aligned} V_{CB} &= V_{CC} - I_C * R_C - I_E * R_E - V_{BE} = \\ &= 10 - (3)(1.07) - (2)(101 * 0.0107) - 0.7 = \\ &= 3.93V \end{aligned}$$

$V_{CB} > 0$  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