

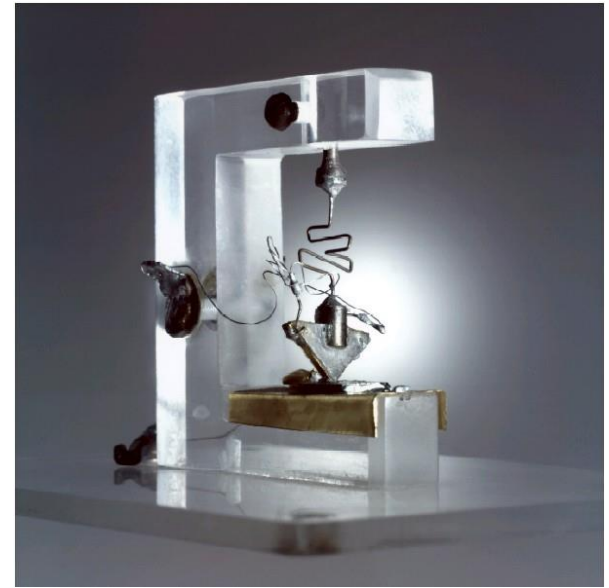
Laboratorio di Elettronica e Tecniche di Acquisizione Dati 2024-2025

Transistor

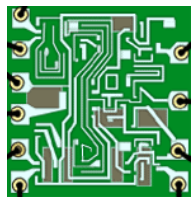
(cfr. [https://inst.eecs.berkeley.edu/~ee105/fa15/lectures/Lecture06-pn%20Junction%20\(with%20appendix\).pdf](https://inst.eecs.berkeley.edu/~ee105/fa15/lectures/Lecture06-pn%20Junction%20(with%20appendix).pdf)
<http://studenti.fisica.unifi.it/~carla/appunti/2008-9/cap.4.pdf>
http://ume.gatech.edu/mechatronics_course/Transistor_F04.ppt)

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?

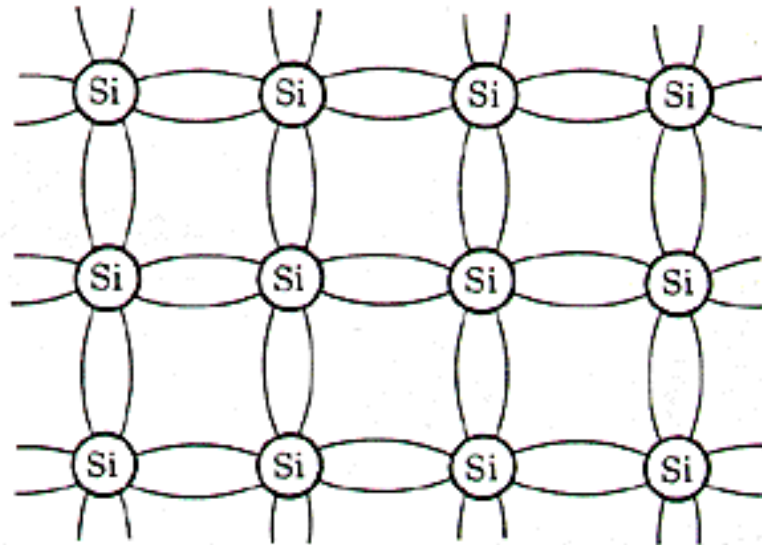
- Il transistor è un dispositivo a semiconduttore a 3 terminali
- E' possibile, con un transistor, controllare la corrente elettrica o il voltaggio fra due terminali applicando una corrente elettrica o un voltaggio al terzo. E' un componente "attivo".
- Con il transistor possiamo fare dispositivi amplificanti 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	1 H 1.0079															5	5 B 10.811	6	6 C 12.011	7	7 N 14.007	8	8 O 15.999	9	9 F 18.998	10	10 Ne 20.180																																																												
2	3 Li 6.941	4	4 Be 9.012	Periodic Table of the Elements														13	13 Al 26.982	14	14 Si 28.086	15	15 P 30.974	16	16 S 32.066	17	17 Cl 35.453	18	18 Ar 39.948																																																										
		Transition metals																																																																																					
3	11 Na 22.990	12	12 Mg 24.305	IIIB	IVB	VB	VIB	VIIA	VIIB		VIII		IB	IIA	31	31 Ga 69.723	32	32 Ge 72.61	33	33 As 74.922	34	34 Se 78.96	35	35 Br 79.904	36	36 Kr 83.8																																																													
4	19 K 39.098	20	20 Ca 40.078	21	21 Sc 44.956	22	22 Ti 47.88	23	23 V 50.942	24	24 Cr 51.996	25	25 Mn 54.938	26	26 Fe 55.845	27	27 Co 58.933	28	28 Ni 58.69	29	29 Cu 63.546	30	30 Zn 65.39	49	49 In 114.82	50	50 Sn 118.71	51	51 Sb 121.76	52	52 Te 127.60	53	53 I 126.905	54	54 Xe 131.29																																																				
5	37 Rb 85.468	38	38 Sr 87.62	39	39 Y 88.906	40	40 Zr 91.224	41	41 Nb 92.906	42	42 Mo 95.94	43	43 Tc 98	44	44 Ru 101.07	45	45 Rh 102.906	46	46 Pd 106.42	47	47 Ag 107.868	48	48 Cd 112.411	81	81 Tl 204.383	82	82 Pb 207.2	83	83 Bi 208.980	84	84 Po 209	85	85 At 210	86	86 Rn 222																																																				
6	55 Cs 132.905	56	56 Ba 137.327	57	57 La 138.906	72	72 Hf 178.49	73	73 Ta 180.948	74	74 W 183.84	75	75 Re 186.207	76	76 Os 190.23	77	77 Ir 192.22	78	78 Pt 195.08	79	79 Au 196.967	80	80 Hg 200.59	114	114 Fl 289	115	115 Mc 288	116	116 Lv 293	117	117 Ts 294	118	118 Og 294																																																						
7	87 Fr 223	88	88 Ra 226.025	89	89 Ac 227.028	104	104 Rf 261	105	105 Db 262	106	106 Sg 263	107	107 Bh 262	108	108 Hs 265	109	109 Mt 266	110	110 Uun 269	111	111 Uuu 272	112	112 Uub 277																																																																
Rare earth elements																																																																																							
Lanthanides																																																																																							
Actinides																																																																																							
<table><tr><td>58</td><td>58 Ce 140.115</td><td>59</td><td>59 Pr 140.908</td><td>60</td><td>60 Nd 144.24</td><td>61</td><td>61 Pm 145</td><td>62</td><td>62 Sm 150.36</td><td>63</td><td>63 Eu 151.964</td><td>64</td><td>64 Gd 157.25</td><td>65</td><td>65 Tb 158.925</td><td>66</td><td>66 Dy 162.5</td><td>67</td><td>67 Ho 164.93</td><td>68</td><td>68 Er 167.26</td><td>69</td><td>69 Tm 168.934</td><td>70</td><td>70 Yb 173.04</td><td>71</td><td>71 Lu 174.967</td></tr><tr><td>90</td><td>90 Th 232.038</td><td>91</td><td>91 Pa 231.036</td><td>92</td><td>92 U 238.029</td><td>93</td><td>93 Np 237.048</td><td>94</td><td>94 Pu 244</td><td>95</td><td>95 Am 243</td><td>96</td><td>96 Cm 247</td><td>97</td><td>97 Bk 247</td><td>98</td><td>98 Cf 251</td><td>99</td><td>99 Es 252</td><td>100</td><td>100 Fm 257</td><td>101</td><td>101 Md 258</td><td>102</td><td>102 No 259</td><td>103</td><td>103 Lr 262</td></tr></table>																																58	58 Ce 140.115	59	59 Pr 140.908	60	60 Nd 144.24	61	61 Pm 145	62	62 Sm 150.36	63	63 Eu 151.964	64	64 Gd 157.25	65	65 Tb 158.925	66	66 Dy 162.5	67	67 Ho 164.93	68	68 Er 167.26	69	69 Tm 168.934	70	70 Yb 173.04	71	71 Lu 174.967	90	90 Th 232.038	91	91 Pa 231.036	92	92 U 238.029	93	93 Np 237.048	94	94 Pu 244	95	95 Am 243	96	96 Cm 247	97	97 Bk 247	98	98 Cf 251	99	99 Es 252	100	100 Fm 257	101	101 Md 258	102	102 No 259	103	103 Lr 262
58	58 Ce 140.115	59	59 Pr 140.908	60	60 Nd 144.24	61	61 Pm 145	62	62 Sm 150.36	63	63 Eu 151.964	64	64 Gd 157.25	65	65 Tb 158.925	66	66 Dy 162.5	67	67 Ho 164.93	68	68 Er 167.26	69	69 Tm 168.934	70	70 Yb 173.04	71	71 Lu 174.967																																																												
90	90 Th 232.038	91	91 Pa 231.036	92	92 U 238.029	93	93 Np 237.048	94	94 Pu 244	95	95 Am 243	96	96 Cm 247	97	97 Bk 247	98	98 Cf 251	99	99 Es 252	100	100 Fm 257	101	101 Md 258	102	102 No 259	103	103 Lr 262																																																												

Semiconduttori: dopaggio

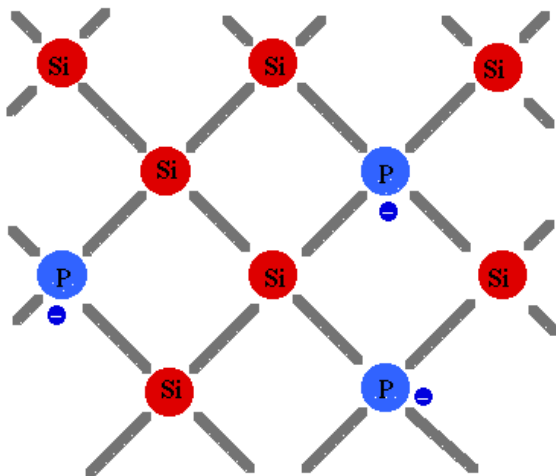
Due tipi di dopaggio

1. *N-type* (negativo)

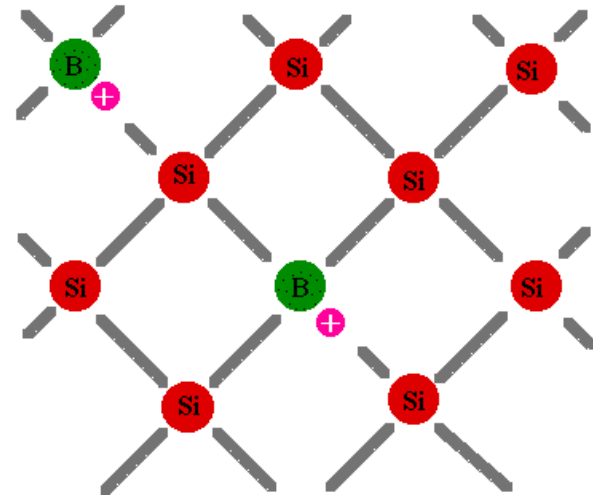
- impurità di **donori** (dal Gruppo V) aggiunte al reticolo cristallino del Si
- portatori di carica dominante: **elettroni negativi**
- elementi del **Gruppo V** come **Fosforo, Arsenico e Antimonio**

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**



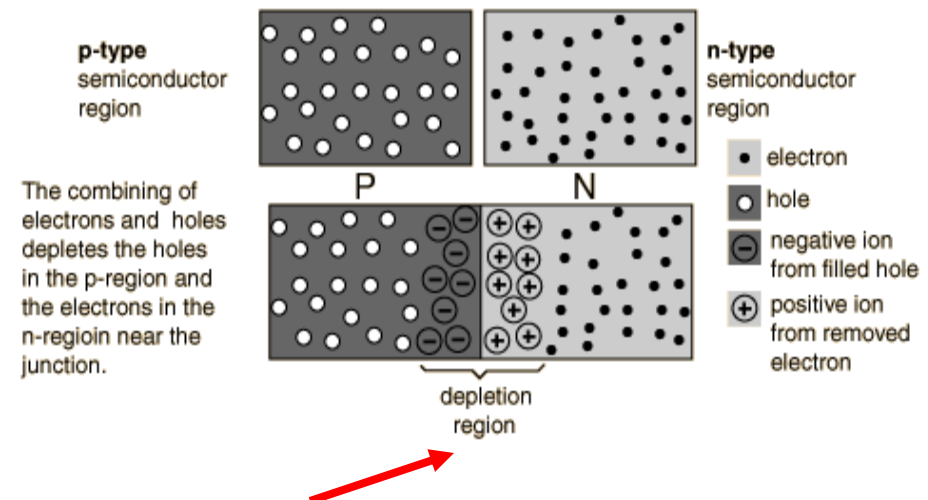
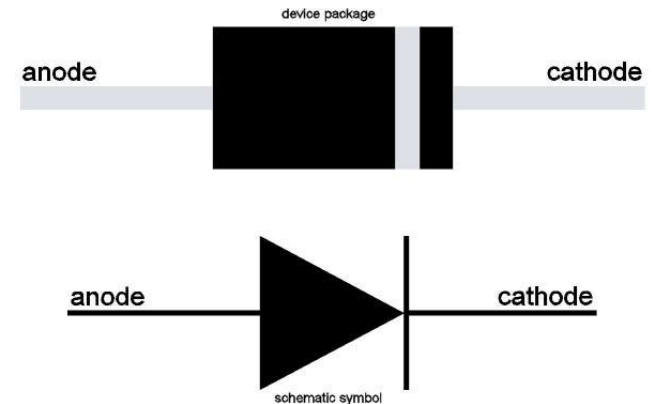
N-type



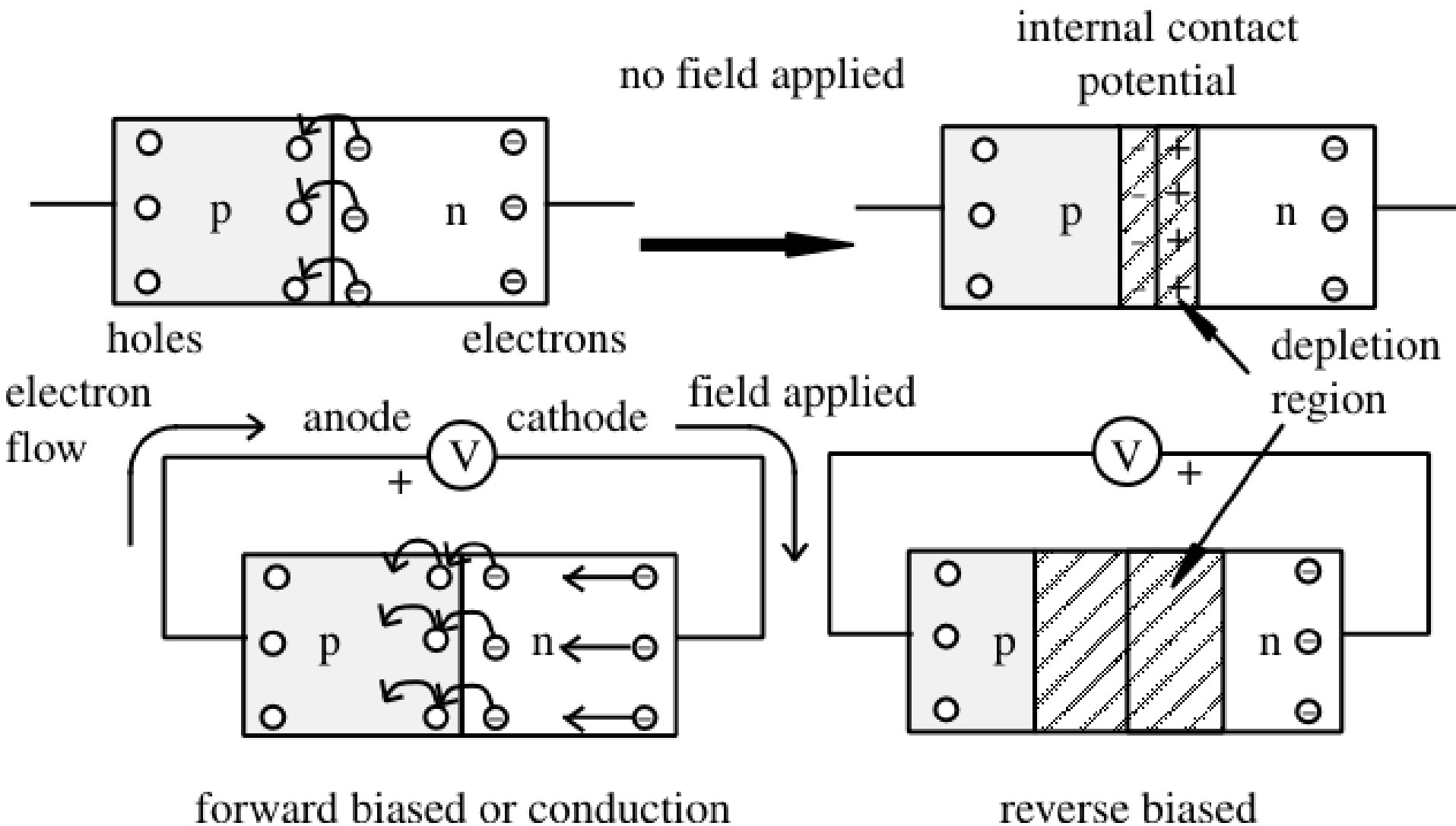
P-type

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



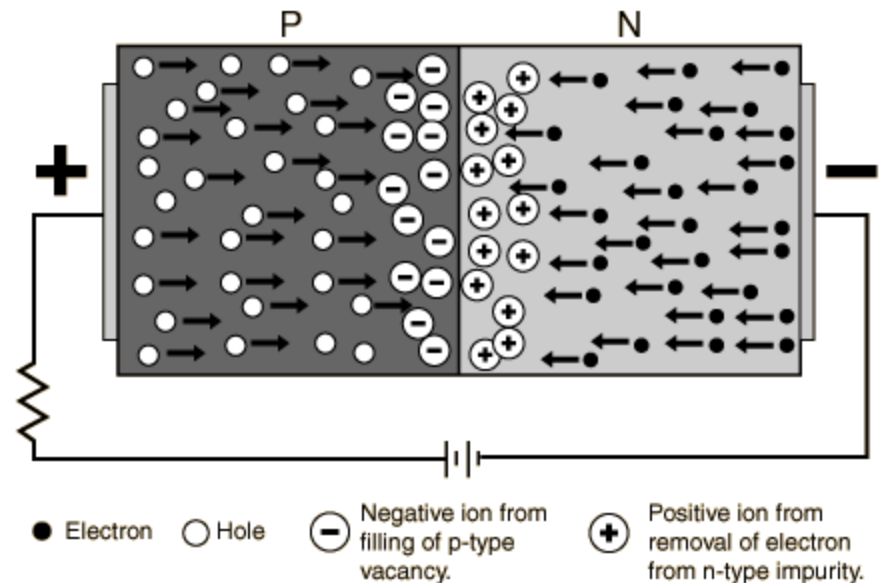
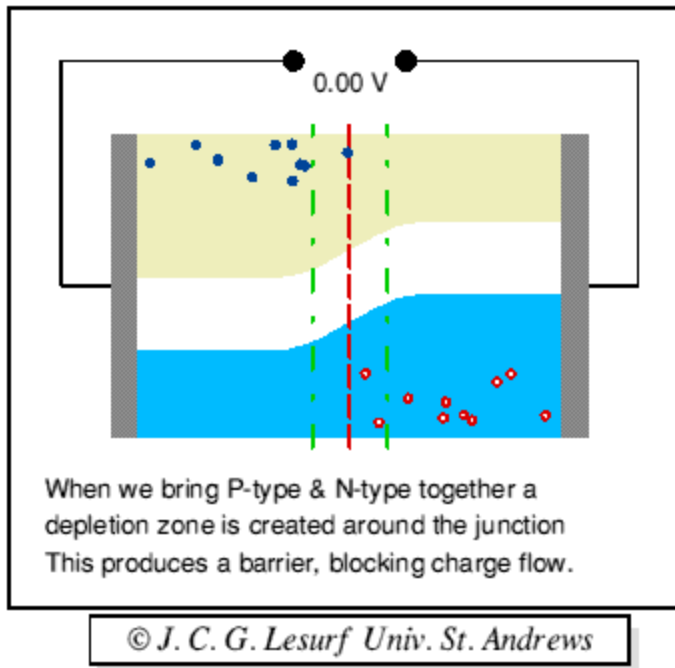
Bias esterno



Polarizzazione (bias) diretta

polarizzazione diretta:

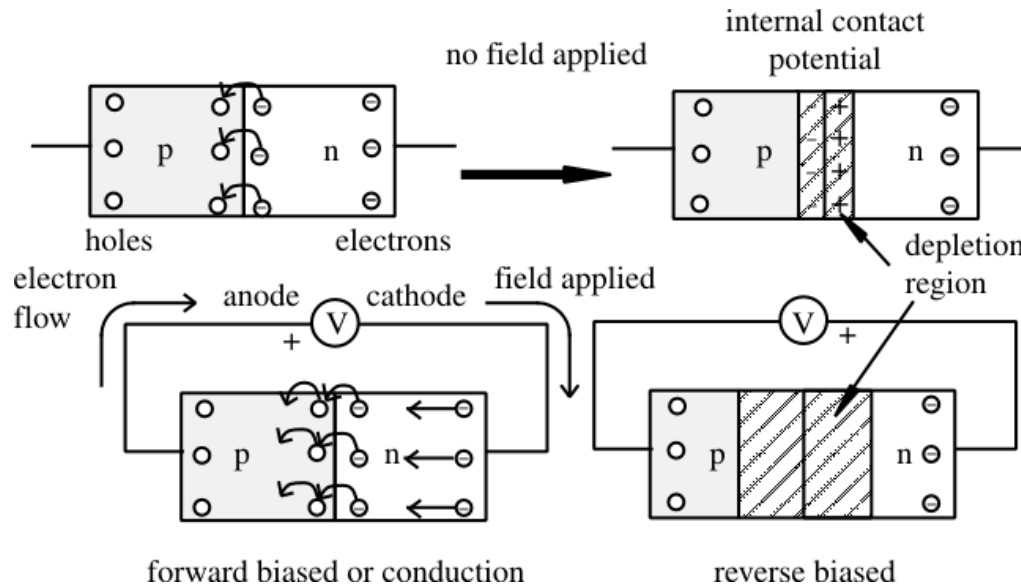
- il potenziale esterno abbassa la barriera di potenziale alla giunzione
- le lacune (dal materiale *p*-type) e gli elettroni (dal materiale *n*-type) sono spinte verso la giunzione
- Una corrente di *elettroni* fluisce verso *p* (sinistra nel disegno) e una di *lacune* verso *n* (destra). La corrente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



Polarizzazione inversa

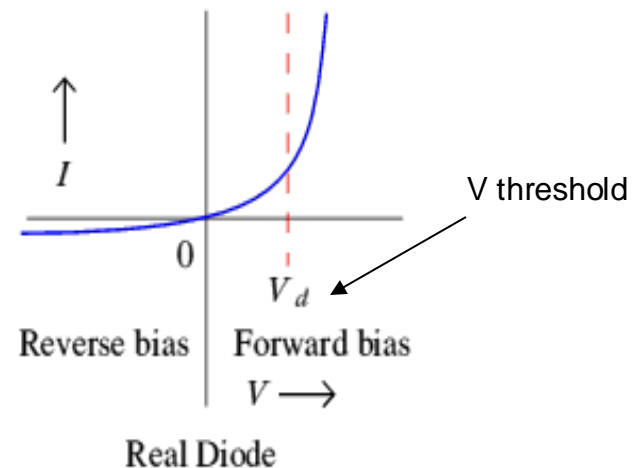
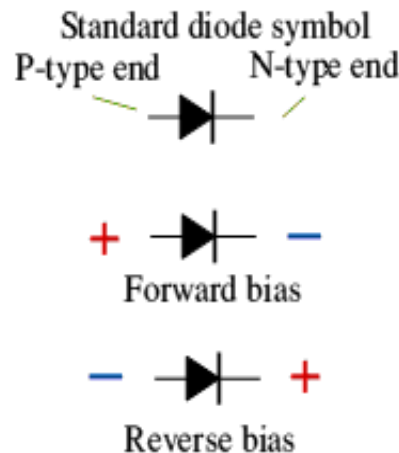
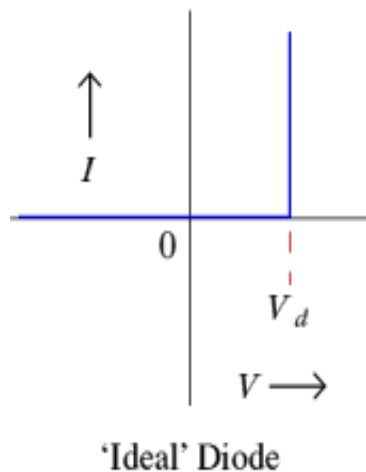
polarizzazione inversa:

- 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

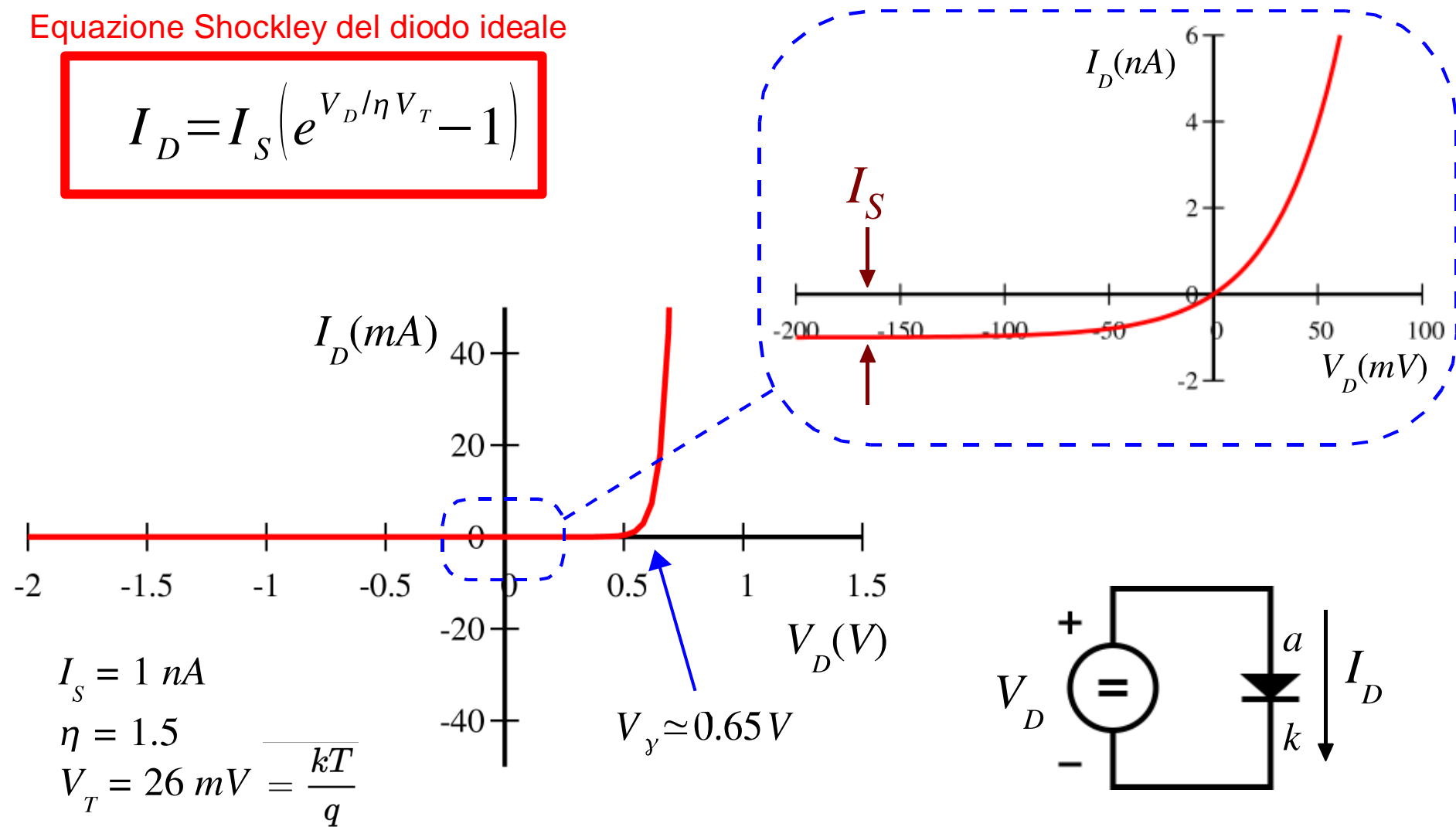
- Polarizzazione diretta: la corrente passa
 - sono necessari $\sim 0.7V$ (nel Si) per iniziare la conduzione (“vincendo” il potenziale di contatto, V_d)
- Polarizzazione inversa: il diodo blocca la corrente
 - ideale: corrente = 0
 - reale : $I_{flow} = 10^{-9} A$



Caratteristica del diodo

Equazione Shockley del diodo ideale

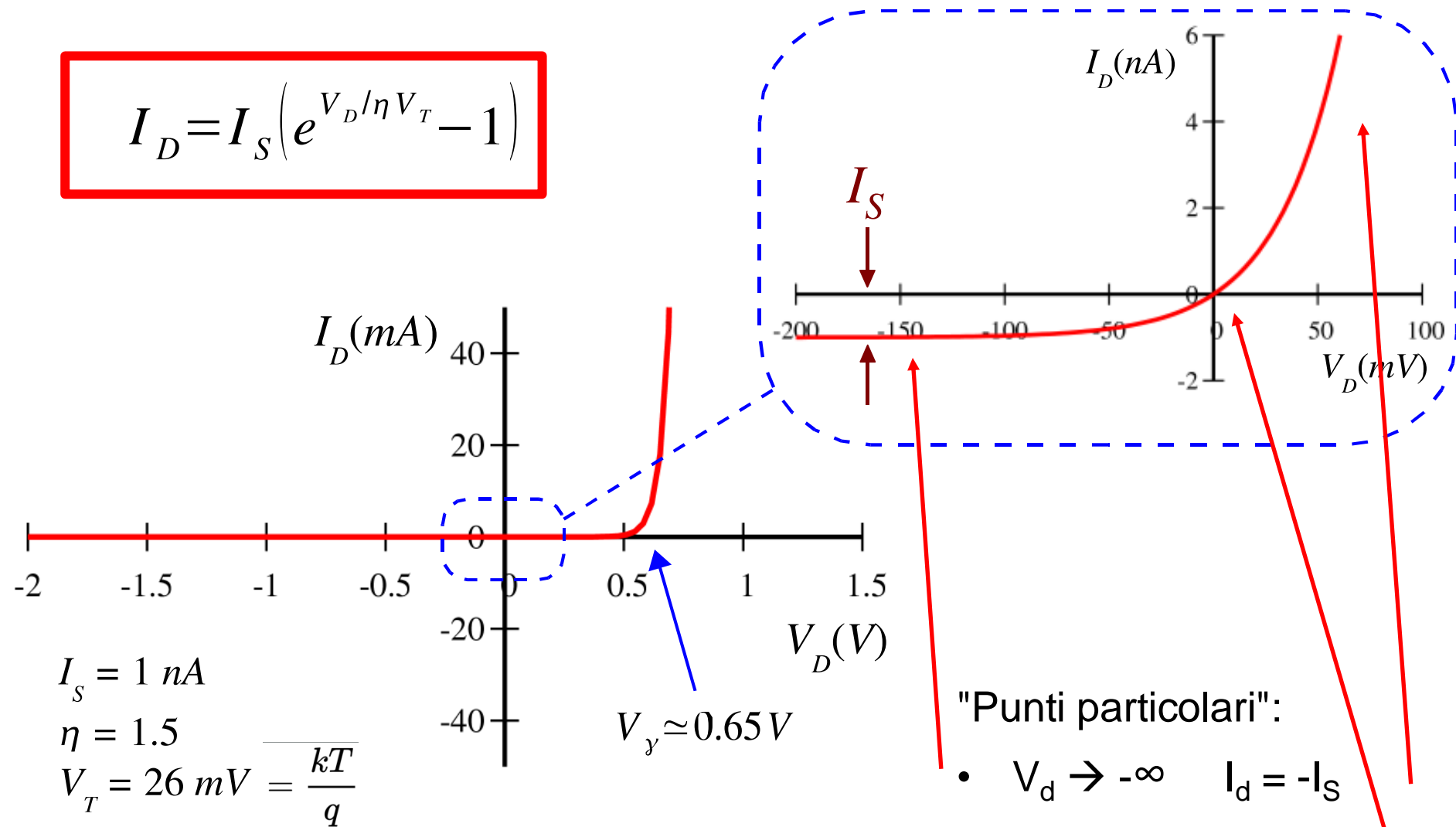
$$I_D = I_S \left(e^{V_D / \eta V_T} - 1 \right)$$



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

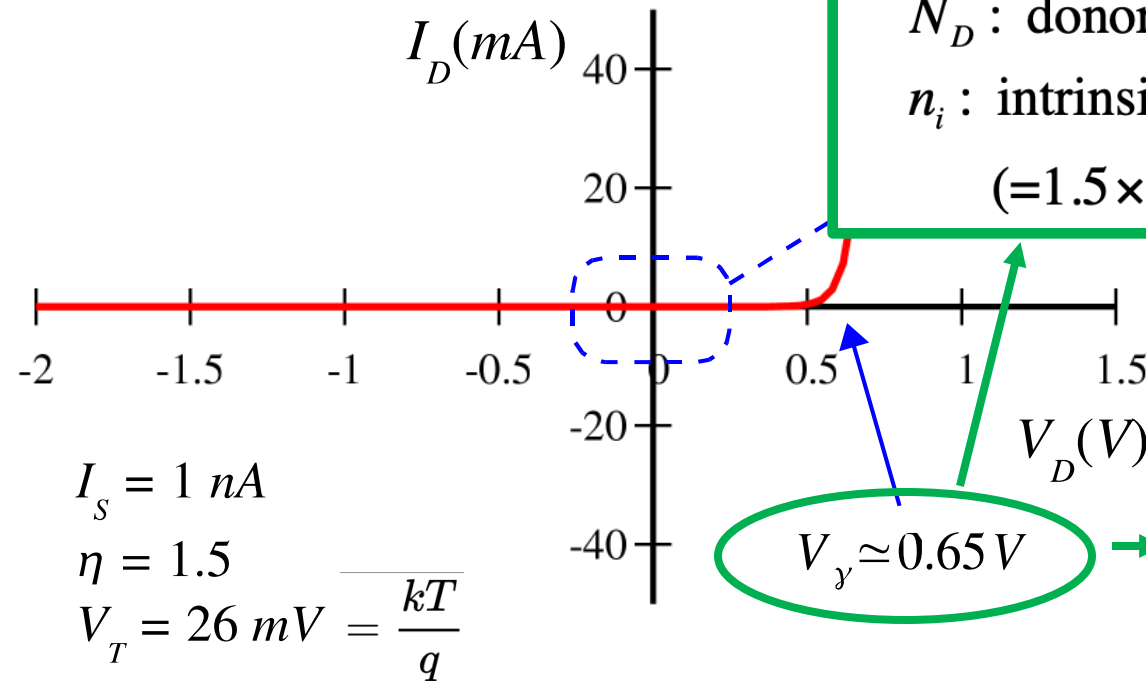
V_T : thermal voltage (= 26 mV at room temp)

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)



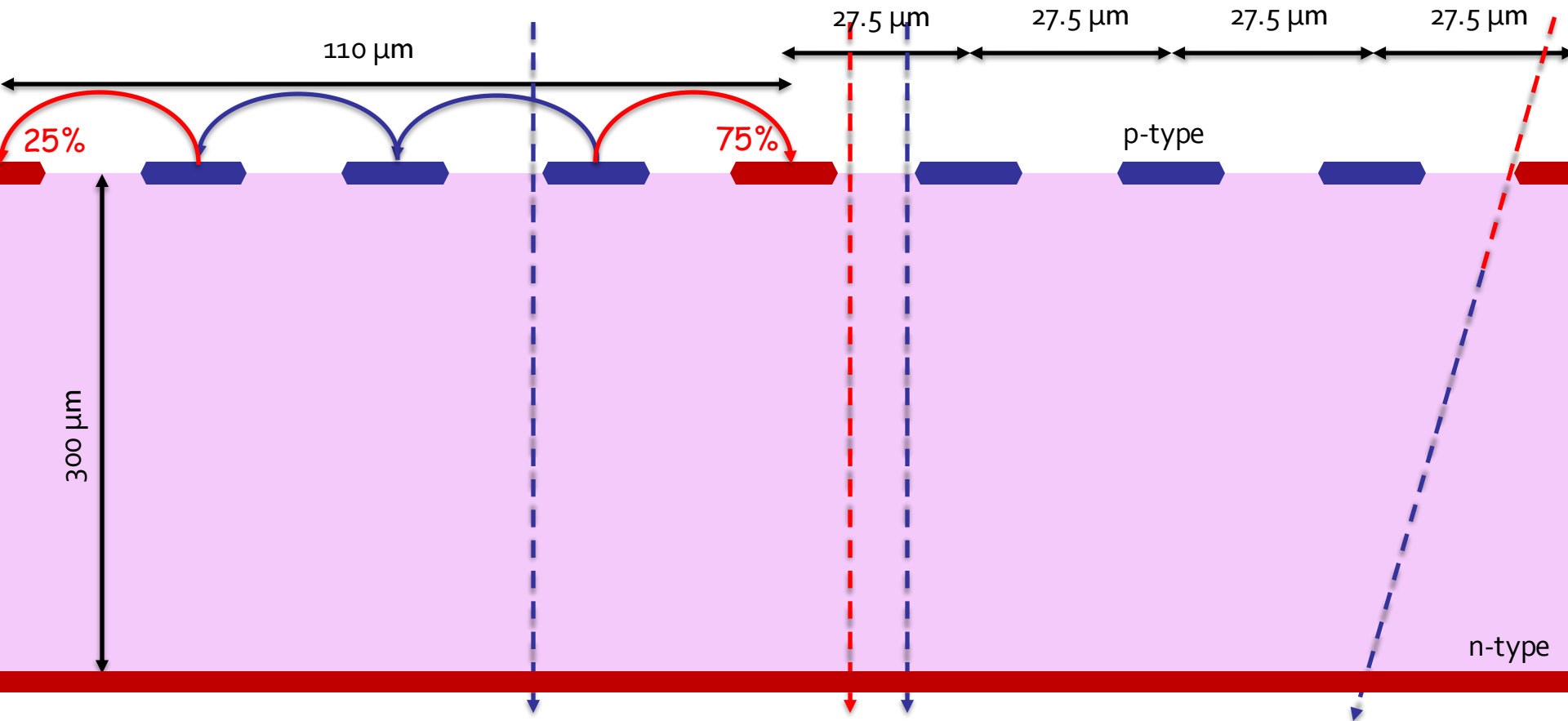
$$V_Y \simeq 0.65 \text{ V}$$

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

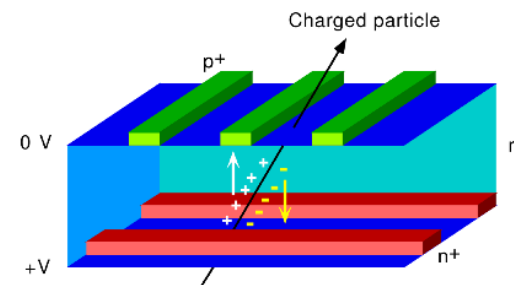
$$V_0 = V_T \ln \left(\frac{N_A N_D}{n_i^2} \right) = 0.88 \text{ V}$$

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

Il diodo come rivelatore di particelle

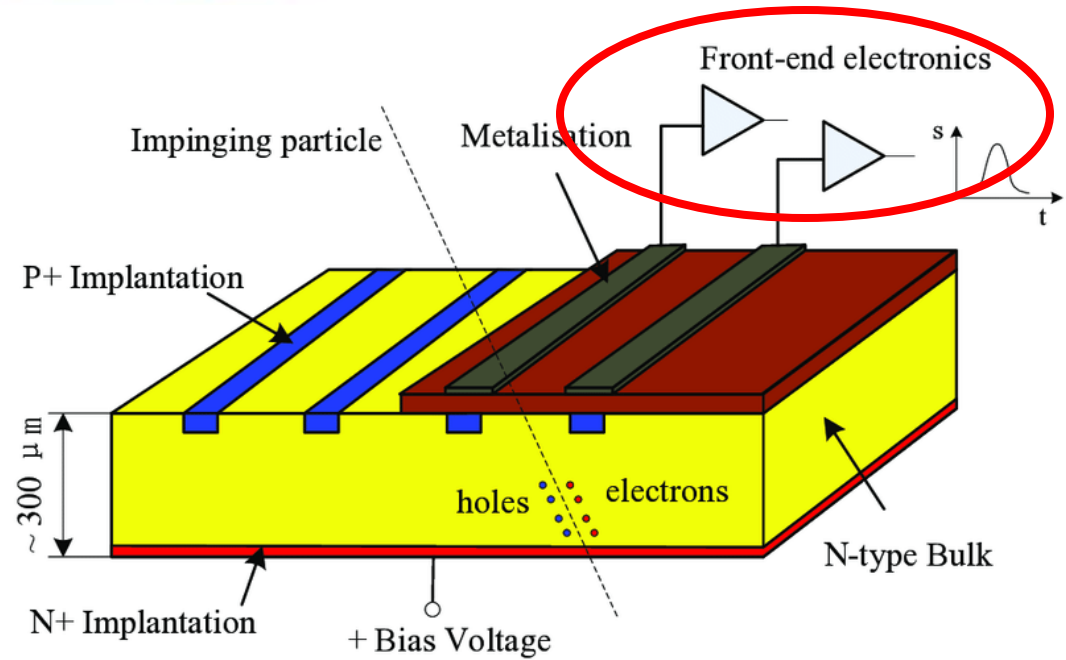
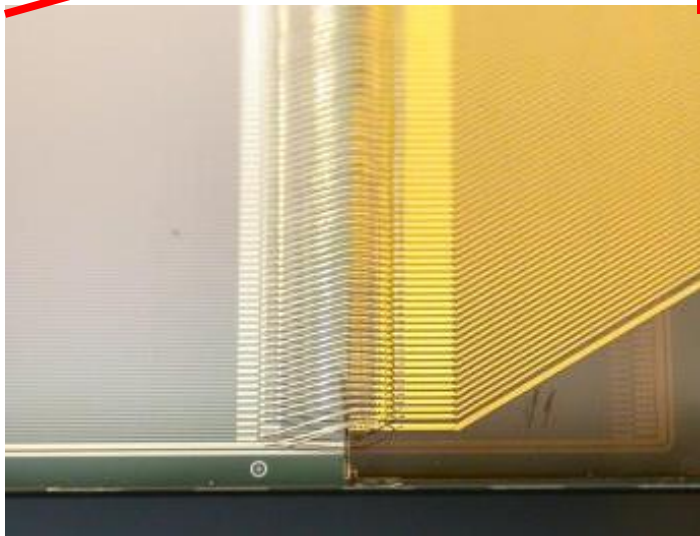
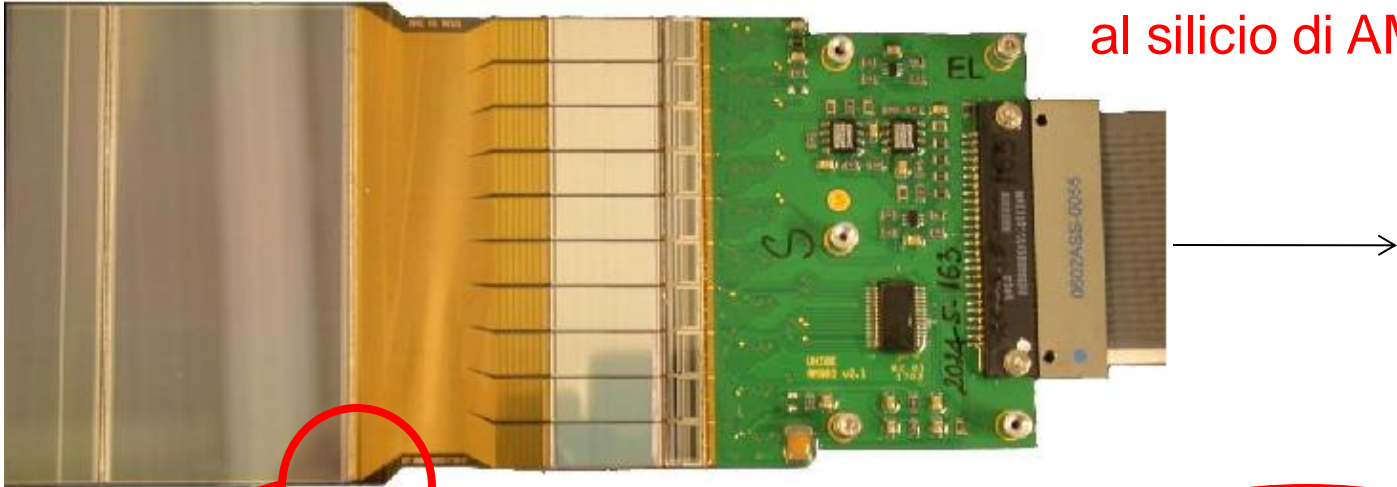


- "substrato" (300 μm, ad esempio) tutto completamente svuotato ($V_d \sim 100$ V)
- se passa una particella carica ionizza il materiale, oppure un fotone "promuove" un elettrone in conduzione per effetto fotoelettrico
- i portatori liberi migrano verso le "strip" sotto l'effetto del campo elettrico
- 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)

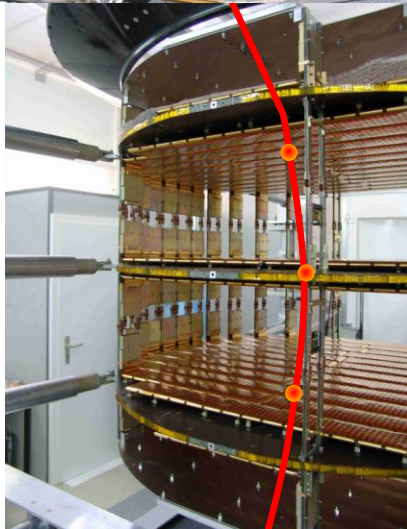
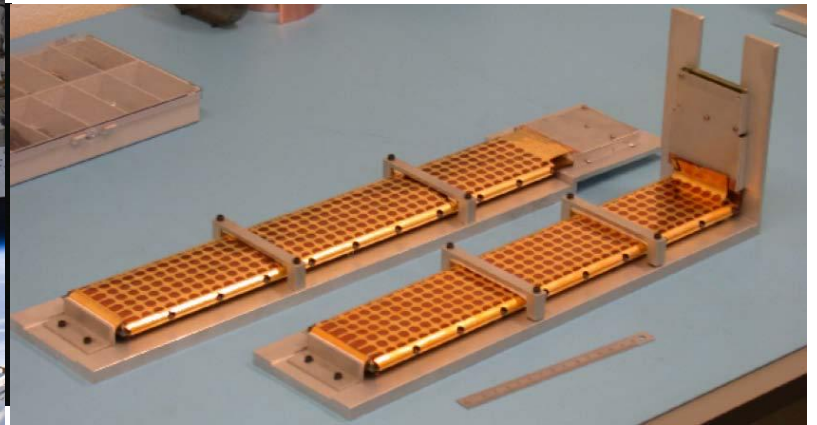


Rivelatore di particelle

Rivelatore microstrip
al silicio di AMS-02

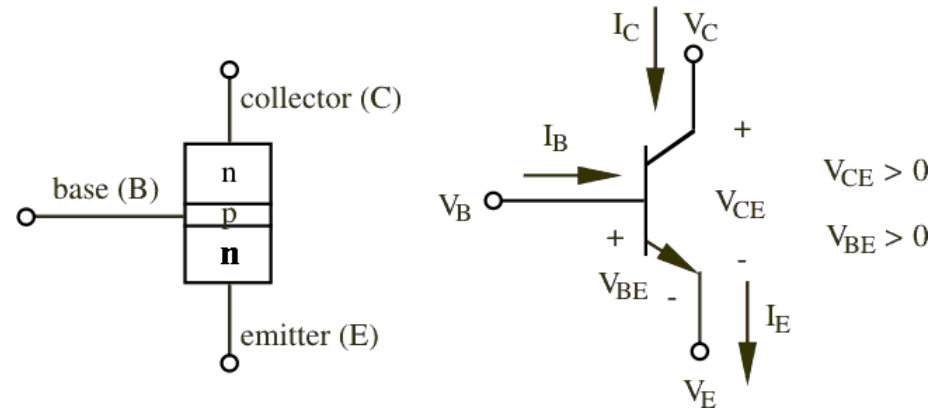


Tracciatore al Si – AMS-02

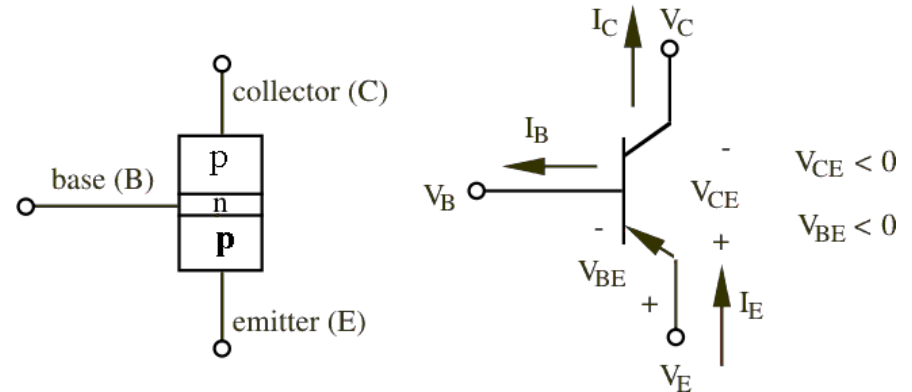


Bipolar Junction Transistor (BJT)

- 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

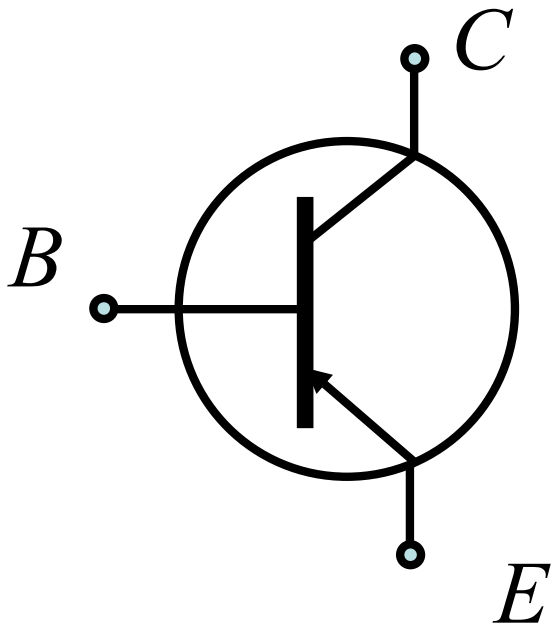


pnp bipolar junction transistor

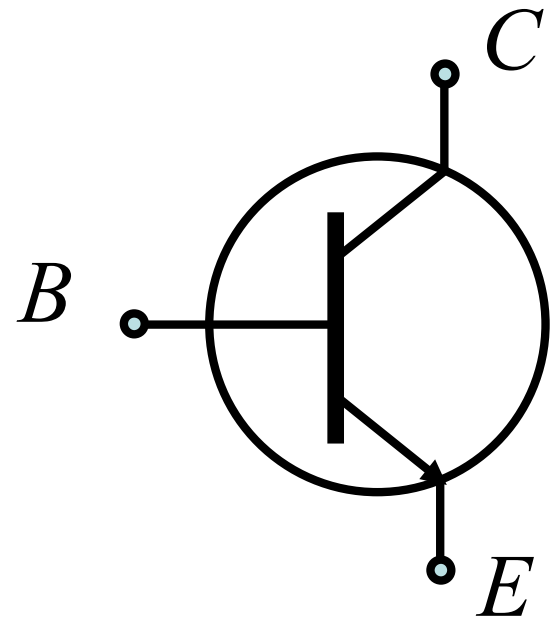
Sviluppato da
Shockley (1949)

Bipolar Junction Transistor (BJT)

pnp

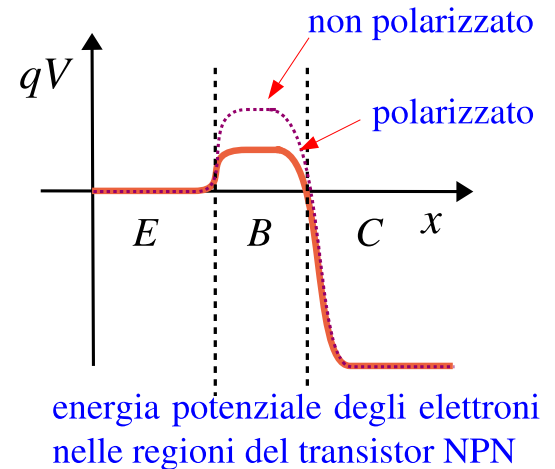
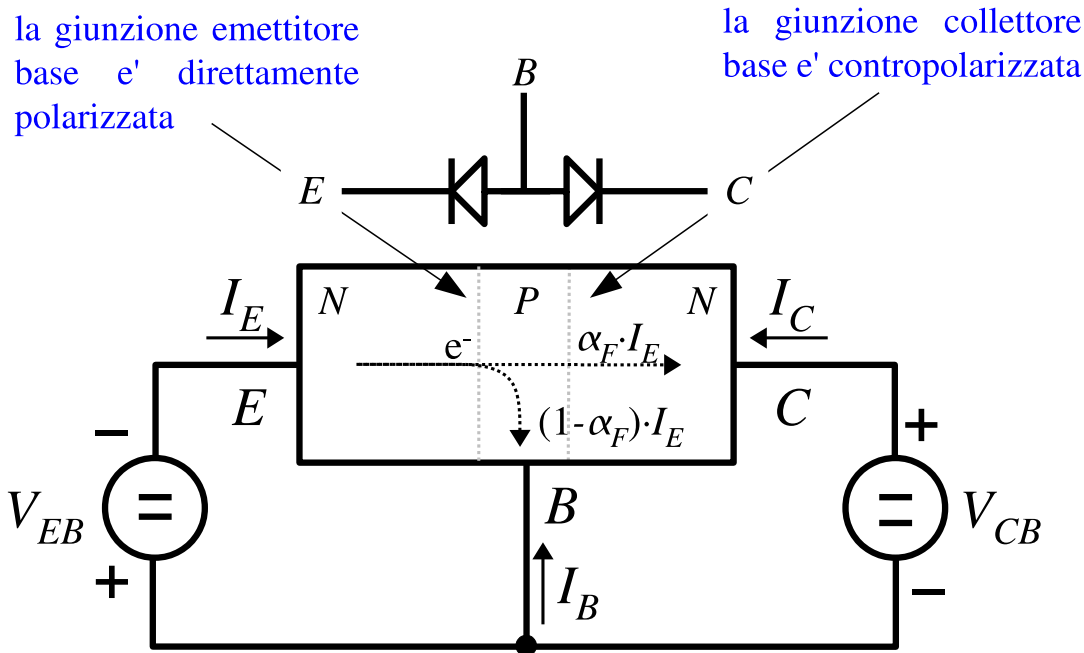


npn



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:

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

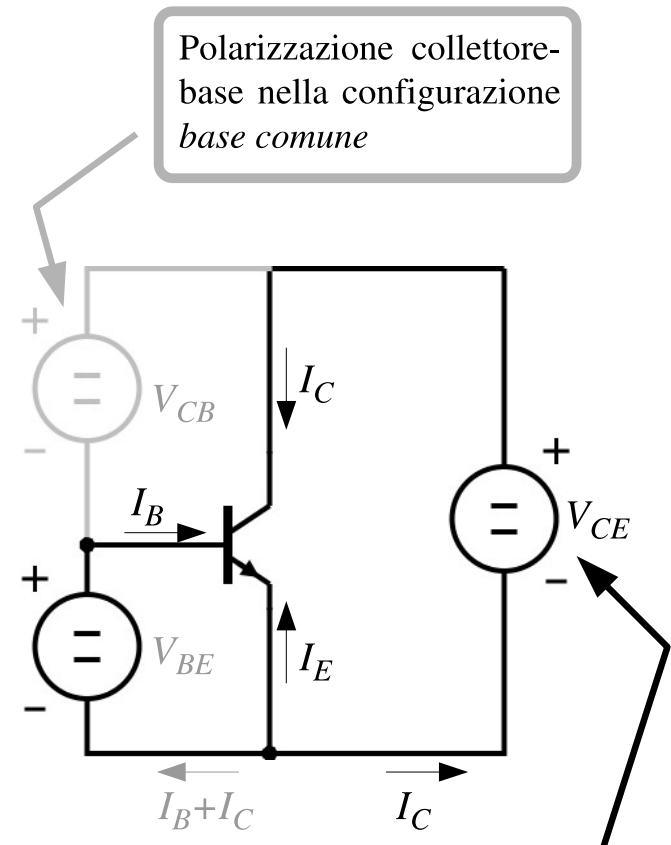
$$I_C = \frac{\alpha_F}{1 - \alpha_F} I_B = \beta_F I_B$$

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

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

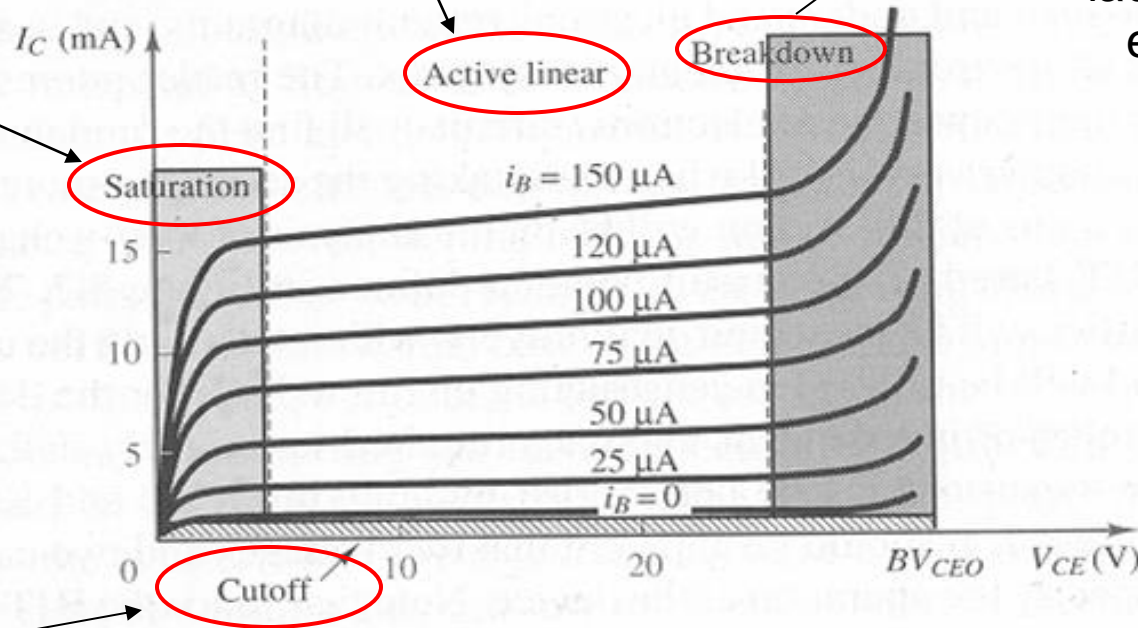
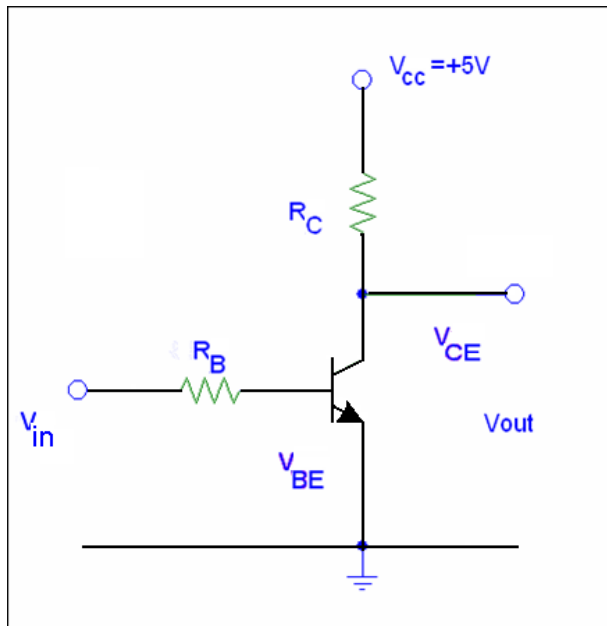


Figure 8.9(b) The collector-emitter output characteristics of a BJT

BJT come interruttore

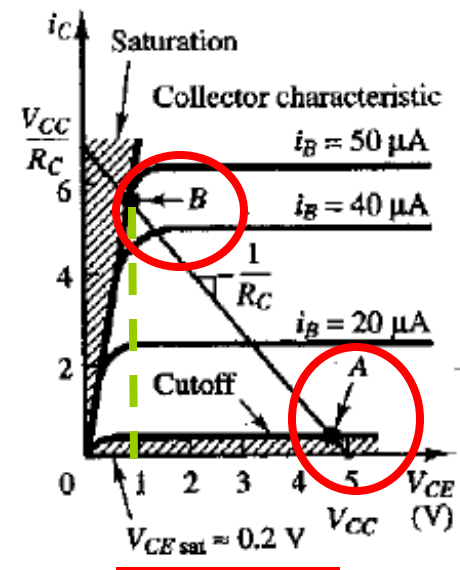


V_{in} (“bassa”) < 0.7 V

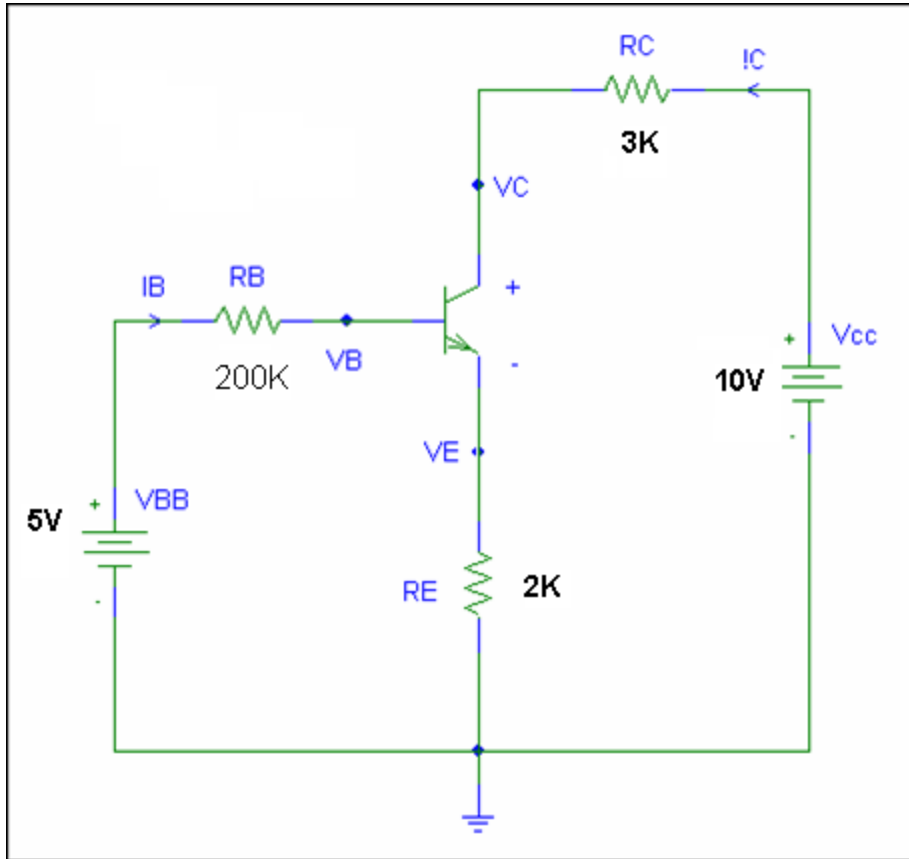
- B-E non polarizzata direttamente
- regione di **cutoff** → non fluisce corrente
- $V_{out} = V_{CE} = V_{cc}$
→ V_{out} = “alta”

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)

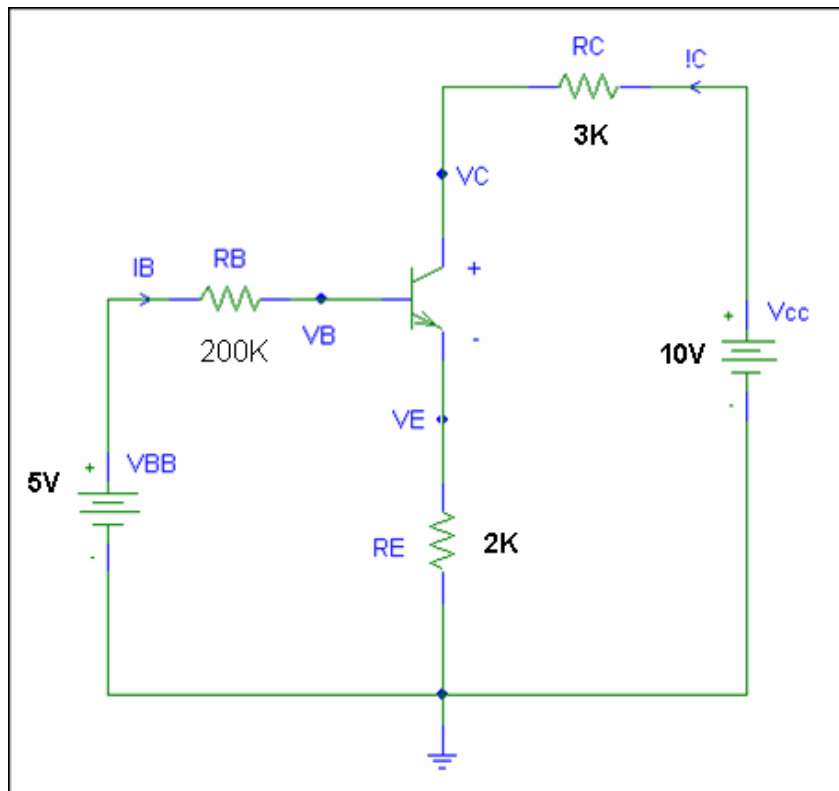


- Emettitore comune
- Regione di linearità
- Guadagno elevato

Esempio:

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

BJT come amplificatore (zona attiva)



$$V_{BE} = 0.7V$$

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

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

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

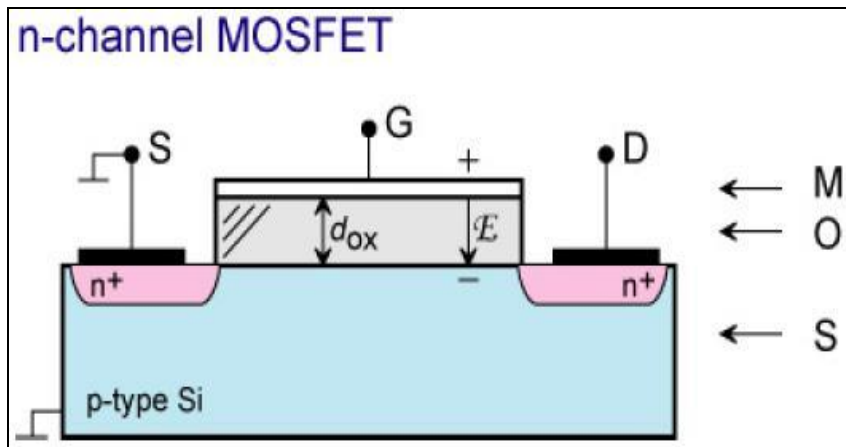
$$\begin{aligned} V_{CB} &= V_{CC} - I_C * R_C - I_E * R_E - V_{BE} = \\ &= 10 - (3)(1.07) - (2)(101 * 0.0107) - 0.7 = \\ &= 3.93V \end{aligned}$$

$V_{CB} > 0$ 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