

slides per cortesia di  
Prof. B. Bertucci



## Giunzione p-n in equilibrio:

Densità di portatori maggiori maggioritari/minoritari dai due lati della giunzione (lontano dalla zona di contatto):

$$p_p \sim N_A \quad p_n \sim \frac{n_i^2}{N_D} \quad n_p \sim \frac{n_i^2}{N_A} \quad n_n \sim N_D$$

Nella zona di contatto si crea una regione di svuotamento/ di carica spaziale che genera un campo e.s. / una d.d.p di contatto tra i due lati della giunzione:  $N_A x_p = N_D x_n$

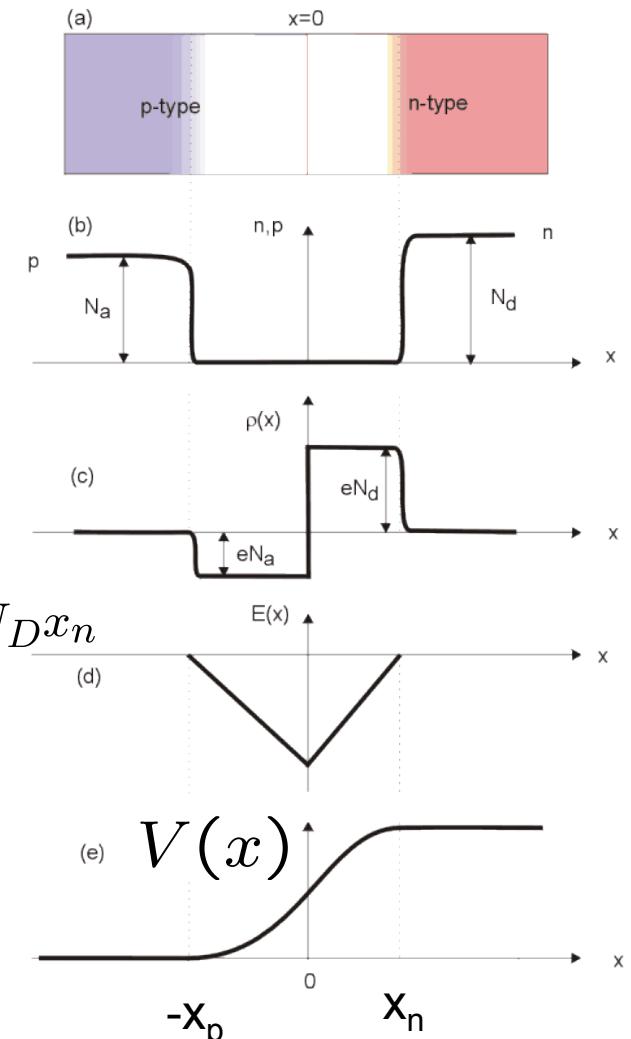
$$\mathcal{E} = -\frac{eN_A}{\epsilon}(x + x_p)\hat{u}_x \quad -x_p \leq x \leq 0$$

$$\mathcal{E} = \frac{eN_D}{\epsilon}(x - x_n)\hat{u}_x \quad 0 \leq x \leq x_n$$

La condizione di equilibrio della giunzione, scritta in termini di nullità della corrente:

$$J^e = J_{\text{drift}}^e + J_{\text{diff}}^e = qn\mu\mathcal{E} - \mu kT \frac{dn}{dx} = 0$$

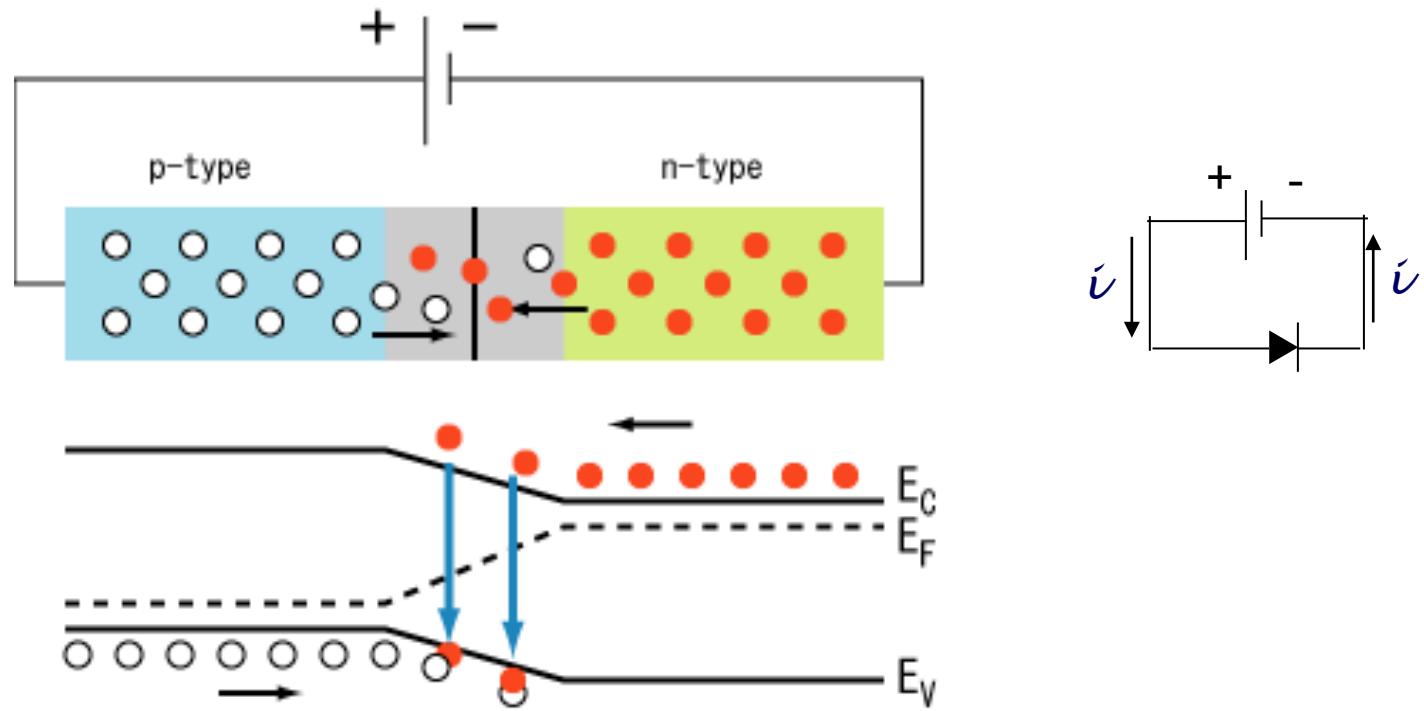
Integrando la possiamo legare  $\Delta V$  alle concentrazioni di drogaggio e temperatura e stabilire che il livello di Fermi è costante lungo la giunzione



$$\Delta V_{bi} = \frac{KT}{q} \ln \frac{N_D N_A}{n_i^2}$$

## Giunzione polarizzata direttamente:

Applichiamo una d.d.p mediante un generatore esterno  
Collegato con il morsetto positivo alla parte p / negativo alla parte n



La d.d.p applicata deforma il livello di fermi ed abbassa la barriera di energia potenziale che devono superare i portatori maggioritari per diffondere attraverso la giunzione.

## Le densità di portatori iniettati vs le distribuzioni all'equilibrio

Ip. le densità dei portatori maggioritari in ciascuno dei due lati della giunzione non cambiano significativamente, si presenta un eccesso (pol. Diretta) o una diminuzione (pol. Inversa) delle distribuzioni di portatori minoritari.

$$\begin{array}{lll} n_n \sim n_{n0} & n_{p0} = n_{n0} e^{-\frac{qV_{bi}}{KT}} & \rightarrow n_p = n_{p0} e^{\frac{qV}{KT}} \\ p_p \sim p_{p0} & p_{n0} = p_{p0} e^{-\frac{qV_{bi}}{KT}} & \rightarrow p_n = p_{n0} e^{\frac{qV}{KT}} \end{array}$$

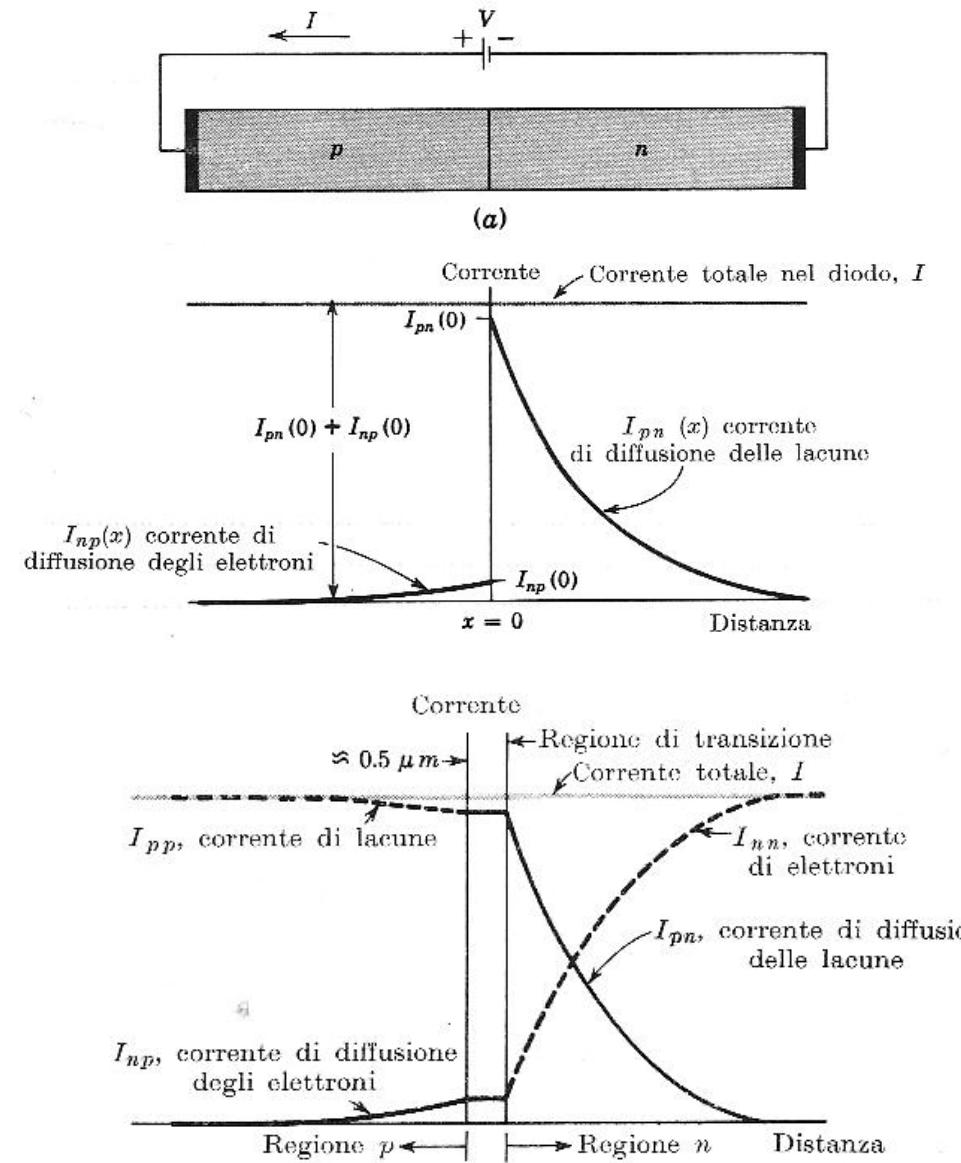
$$V_{bi} \rightarrow V_{bi} - V$$

La densità di portatori di tipo n nella zona p / la densità di portatori di tipo p nella zona n sarà funzione esponenziale della d.d.p applicata dall'esterno.

L'eccesso di portatori iniettati:

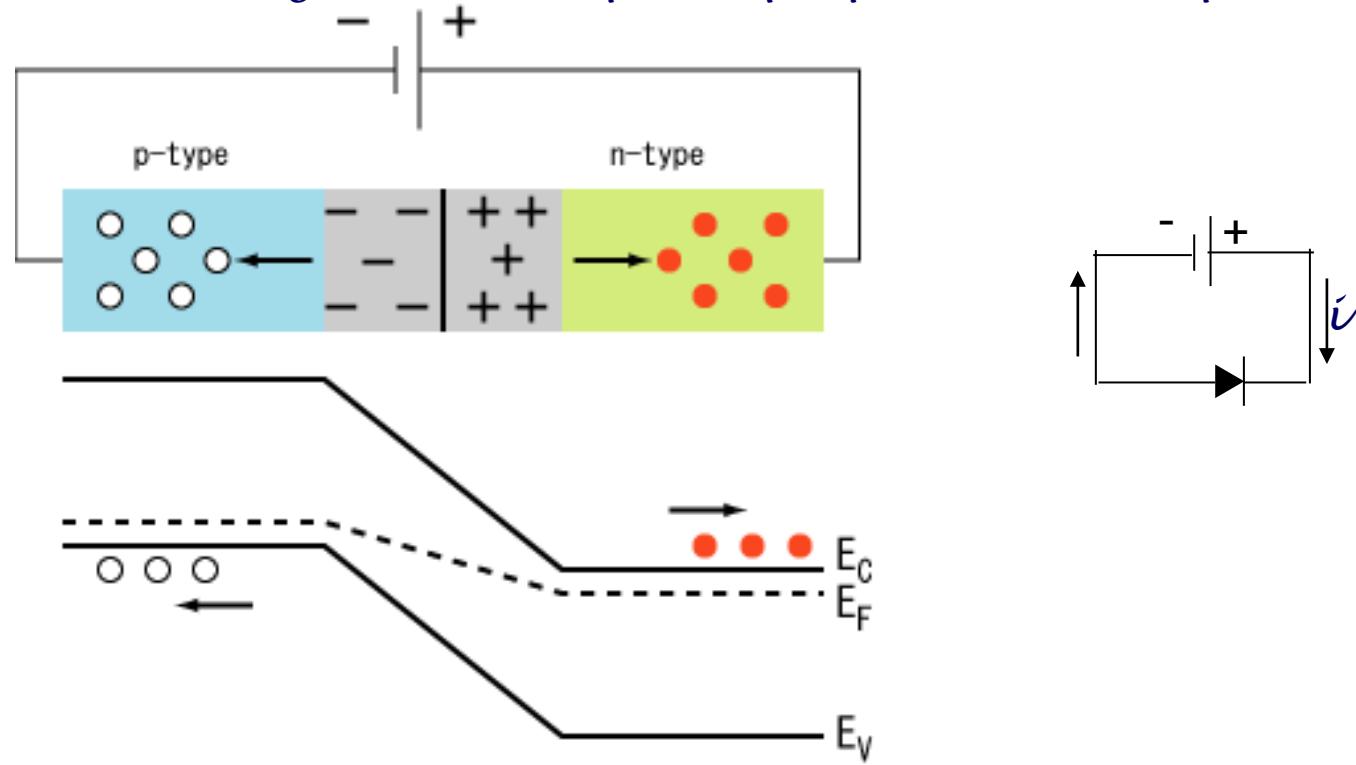
$$\left\{ \begin{array}{l} n_p - n_{p0} = n_{p0} \left( e^{\frac{qV}{KT}} - 1 \right) \\ p_n - p_{n0} = p_{n0} \left( e^{\frac{qV}{KT}} - 1 \right) \end{array} \right.$$

## Come descrivere quindi la corrente?



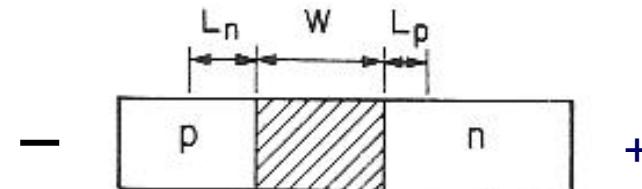
## Giunzione polarizzata inversamente:

Applichiamo una d.d.p mediante un generatore esterno  
Collegato con il morsetto negativo alla parte p / positivo alla parte n



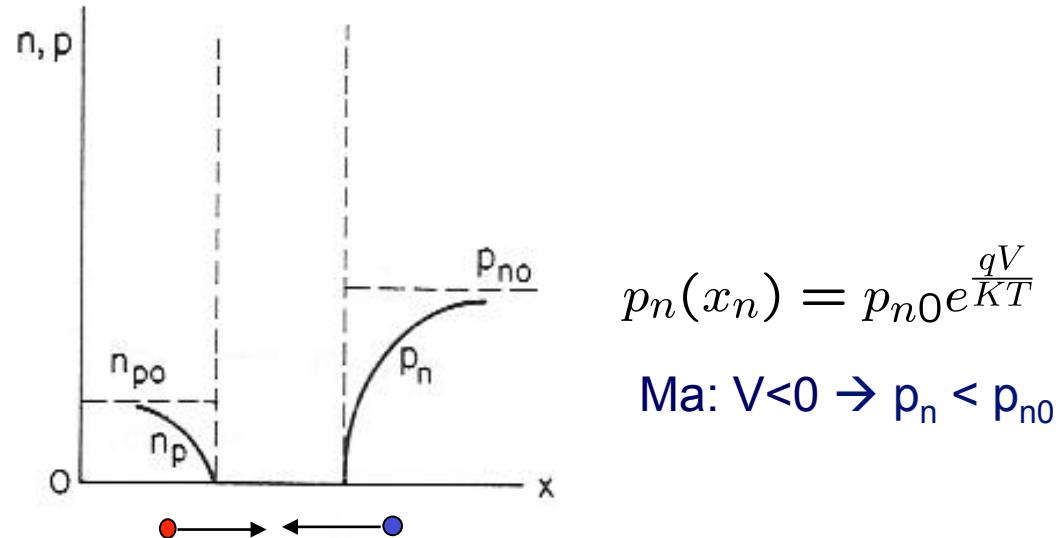
La d.d.p applicata deforma il livello di fermi ed aumenta ulteriormente la barriera di energia potenziale che devono superare i portatori maggioritari per attraversare la giunzione.

La descrizione utilizzata per stabilire la densità di portatori e le corrispondenti correnti nella giunzione è la stessa del caso di polarizzazione diretta:



$$n_p(-x_p) = n_{p0} e^{\frac{qV}{KT}}$$

$$\text{Ma: } V < 0 \rightarrow n_p < n_{p0}$$

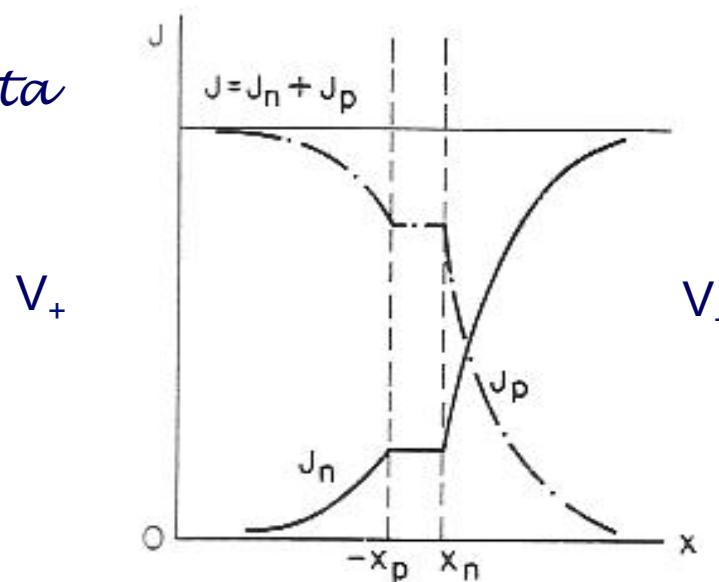


$$p_n(x_n) = p_{n0} e^{\frac{qV}{KT}}$$

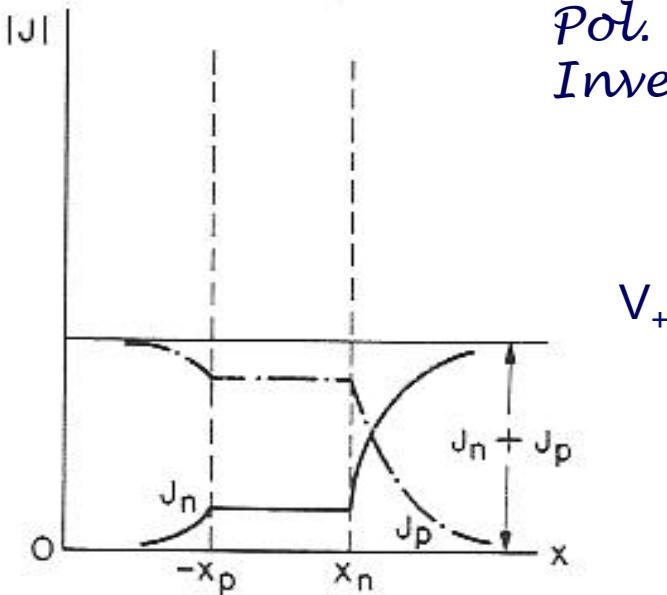
$$\text{Ma: } V < 0 \rightarrow p_n < p_{n0}$$

I portatori minoritari ( $p_n$ ,  $n_p$ ) nei due lati della giunzione vengono "spazzati via" in prossimità alla giunzione dove tendono ad avere una concentrazione » nulla e la regione di carica spaziale si allarga

Pol.  
Diretta



Pol.  
Inversa

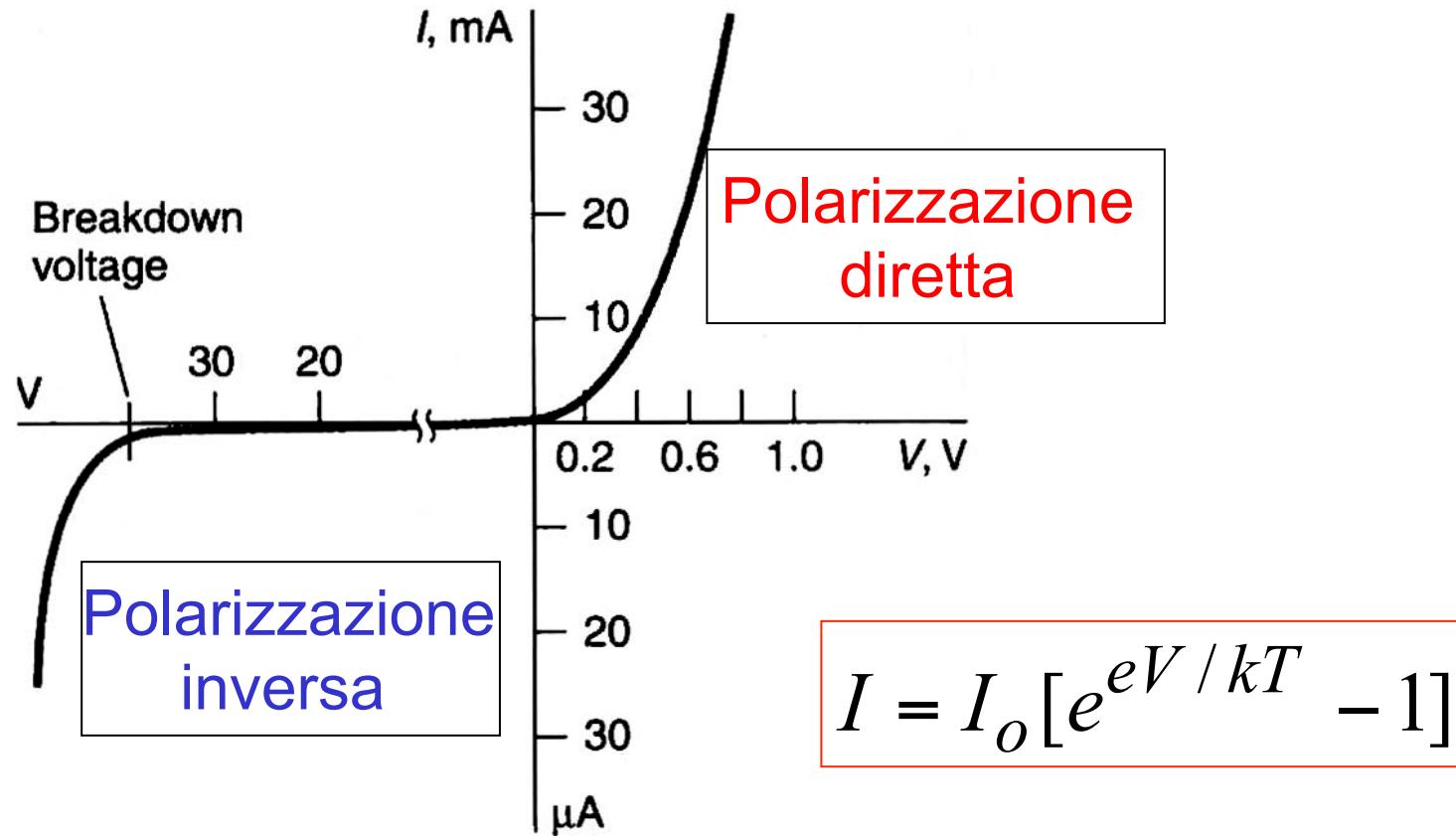


La corrente di **saturazione inversa** è sostenuta dalla generazione termica di nuove coppie e-h: è limitata quindi dalle densità di portatori minoritari del semiconduttore e non dipende dal valore della tensione applicata

In regime di **breakdown**, l'energia acquistata dagli elettroni generati termicamente sotto l'azione del campo è sufficiente:

- A far liberare nuovi elettroni negli urti del portatore accelerato con il reticolo. **Effetto a Valanga**
- A far liberare nuovi elettroni per azione diretta del campo elettrico particolarmente intenso: **Effetto Zener**.

## Caratteristica tensione-corrente di una giunzione



La caratteristica di far scorrere corrente solo in una direzione è  
rende la giunzione p-n (diodo) un elemento “raddrizzatore” in  
un circuito

## La giunzione p-n e i rivelatori a microstrip di silicio

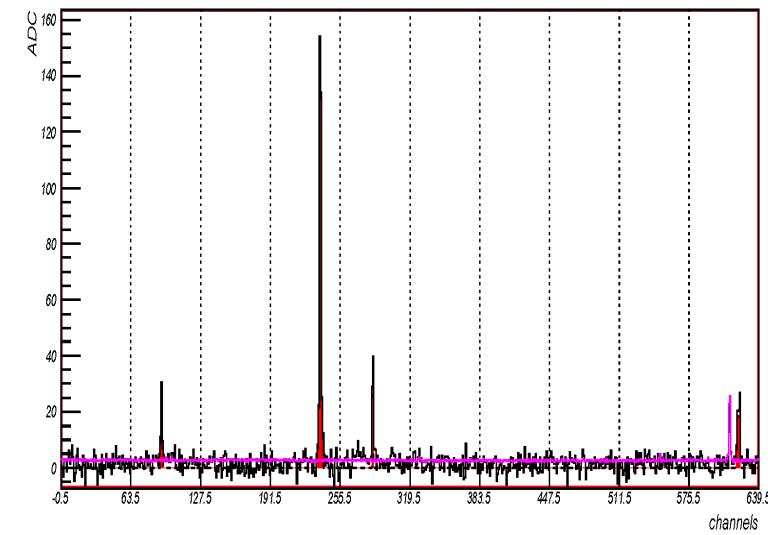
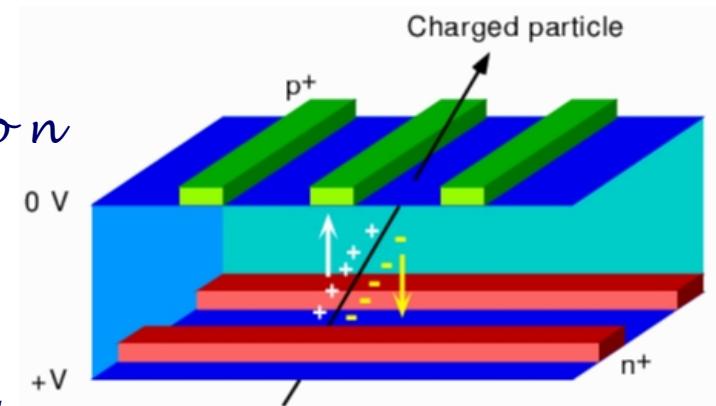
→ Una particella carica attraversa un sottile strato ( $300\mu m$ ) di silicio drogato n ed interagendo con il materiale libera 24000 coppie e/h ( $\propto Z^2$ )

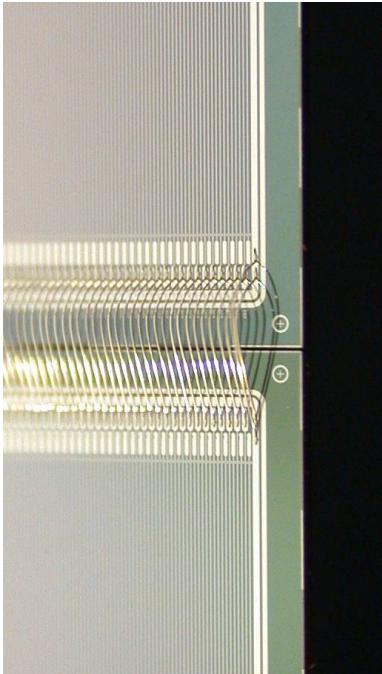
→ Sulla superficie del silicio sono impiantate delle sottili strisce di drogaggio p+ ( $6\mu m$  ogni  $108\mu m$ ) ed il sistema p+-n è mantenuto in condizioni di polarizzazione inversa

→ 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

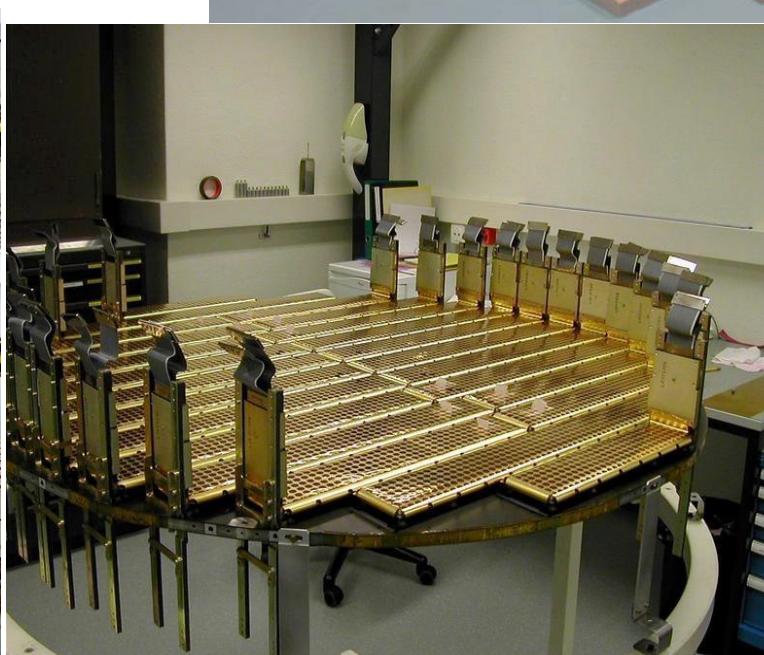
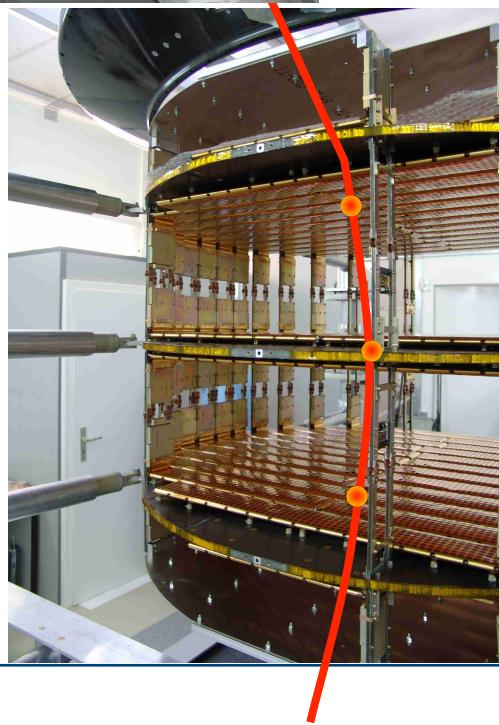
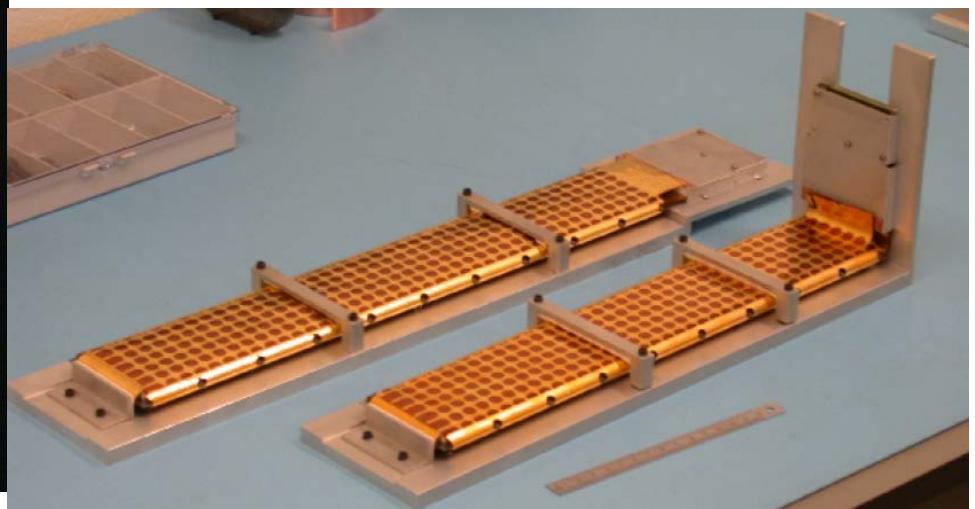
→ L'ampiezza del segnale rilasciato ci permette di valutare la carica Z della particella

→ La posizione della striscia colpita permette di risalire alla posizione di passaggio della particella





*La costruzione del tracker al silicio  
di AMS @ PG/TR*



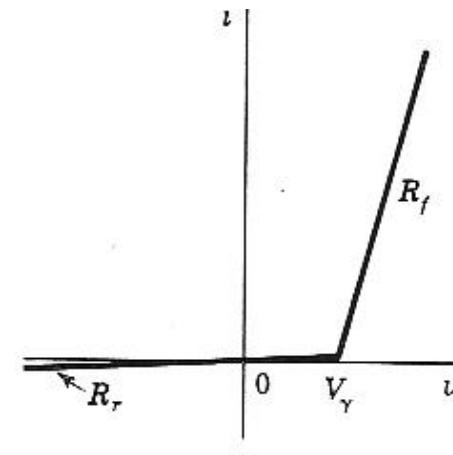
## Il diodo come elemento circuitale raddrizzatore:

Caratteristica del diodo lineare  
a tratti:

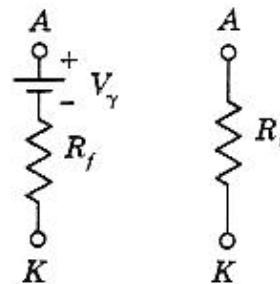
→  $V_g$  tensione di soglia

→  $R_f$  resistenza "forward" in pol. Diretta

→  $R_r$  resistenza "reverse" in pol. Inversa

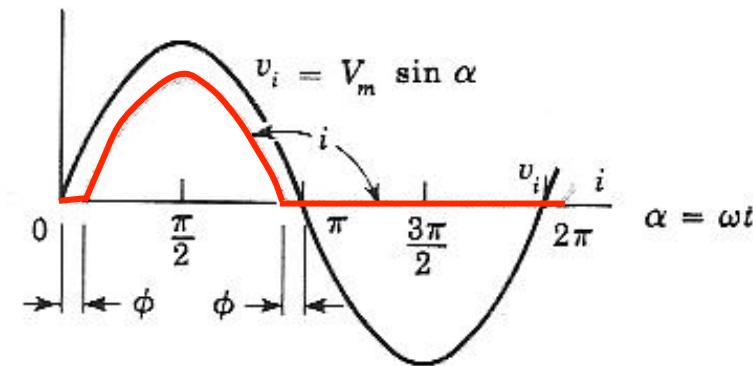
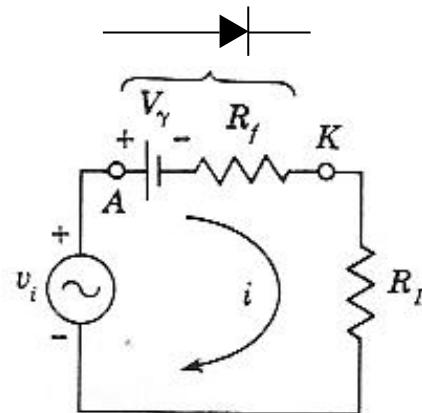


Rappresentazione  
Equivalente in un circuito:

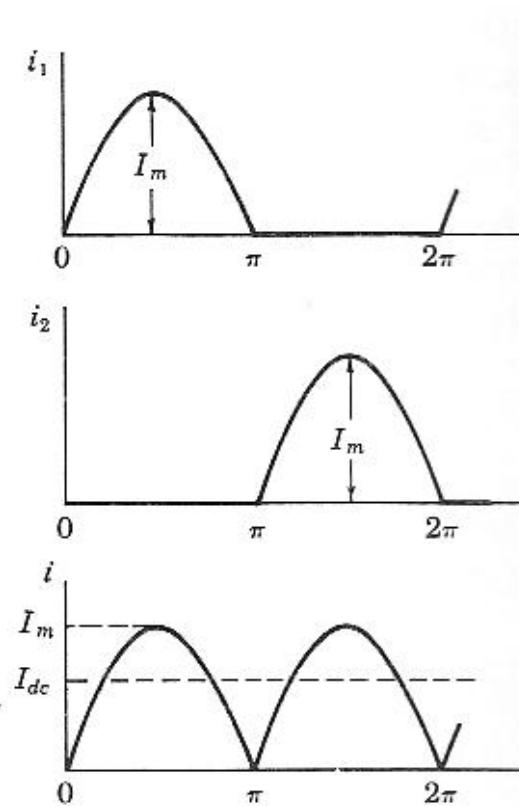
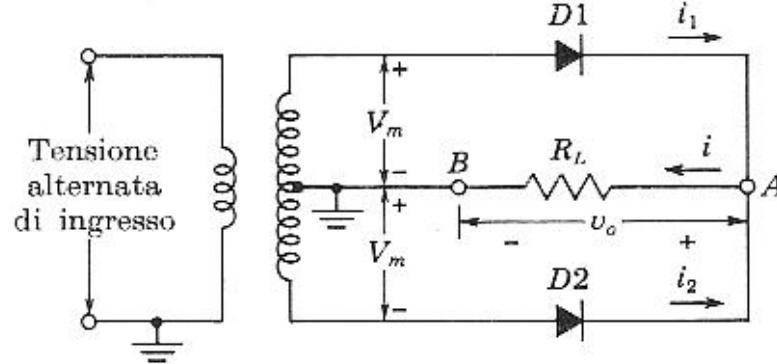


$$v_i = V_m \sin \omega t$$

$$\phi = \arcsin \frac{v_g}{V_m}$$



## Raddrizzatore a doppia-semionda

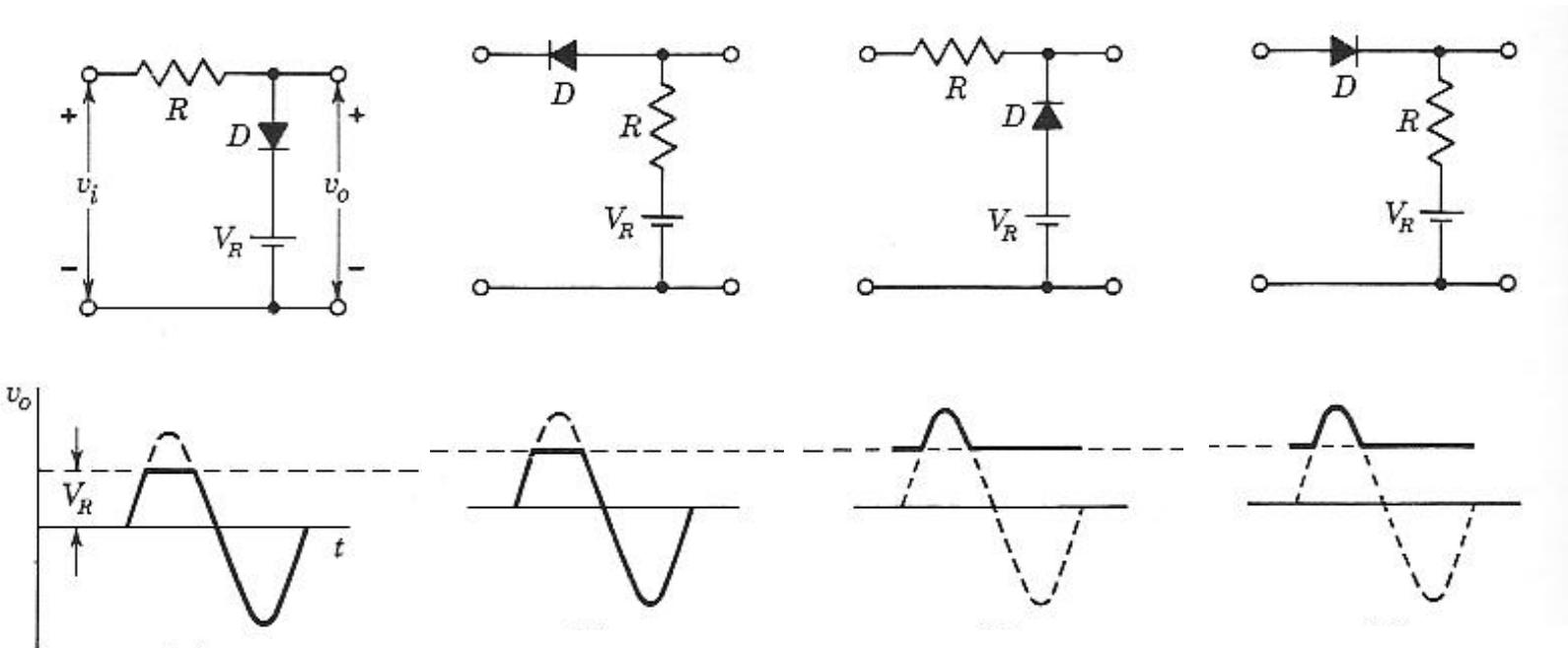


**Corrente media?**  $I_{DC} = \frac{1}{\pi} \int_0^{\pi} id\alpha = 2 \frac{I_m}{\pi}$

**Tensione media?**  $V_{DC} = R_L I_{DC}$

**Corrente efficace?**  $I_{rms} = \left( \frac{1}{2\pi} \int_0^{2\pi} i^2 d\alpha \right)^{1/2} = \frac{I_m}{\sqrt{2}}$

*Il diodo come elemento circuitale “tosatore”:*



## La logica a diodi (DL)

Rappresentazione binaria: numeri / lettere possono essere rappresentati come sequenze di 0/1

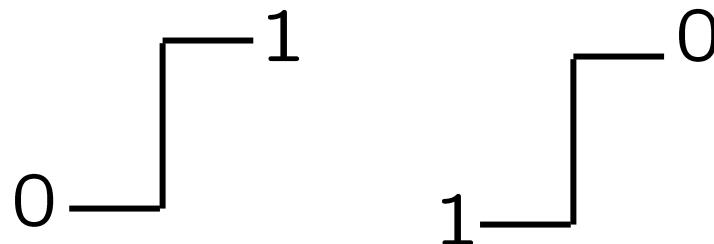
$$101011 = 2^5 + 2^3 + 2^1 + 2^0 = 43$$

Per operare con segnali digitali si utilizza l'algebra Booleana:

A	B	OR	AND
0	0	0	0
0	1	1	0
1	0	1	0
1	1	1	1

Ma cosa vuol dire da un punto di vista circuitale?

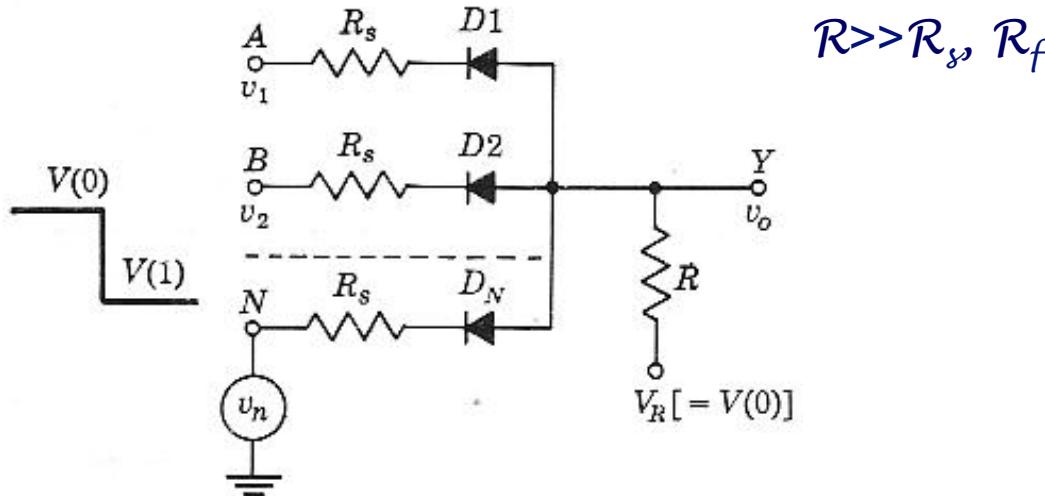
Logica positiva:  
Il livello di tensione o corrente più alto corrisponde allo 1



Logica negativa:  
Il livello di tensione o corrente più alto corrisponde allo 0

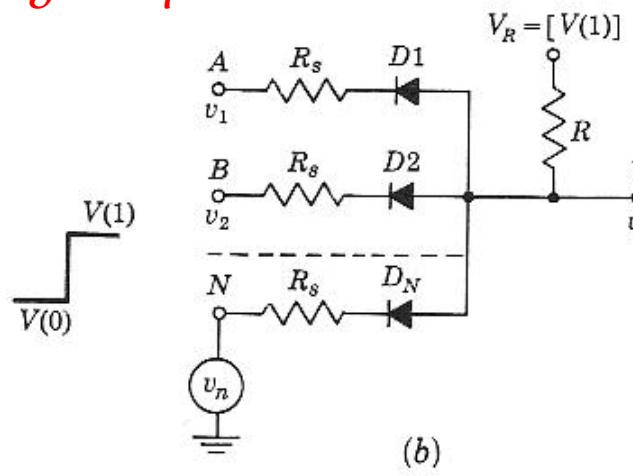
## Circuito OR in logica negativa

A	B	OR	AN D
0	0	0	0
0	1	1	0
1	0	1	0
1	1	1	1



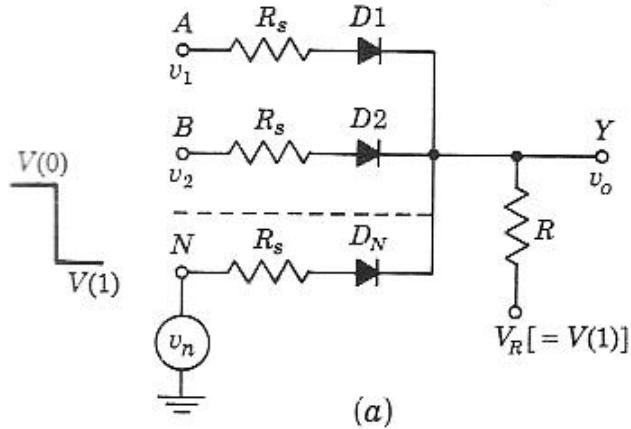
= Circuito AND in logica positiva

A	B	OR	AN D
0	0	0	0
0	1	1	0
1	0	1	0
1	1	1	1



Circuito AND in logica negativa?

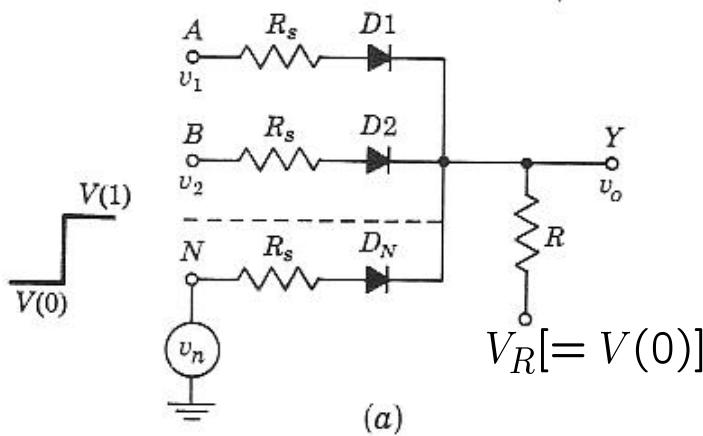
A	B	OR	AN D
0	0	0	0
0	1	1	0
1	0	1	0
1	1	1	1



(a)

= Circuito OR in logica positiva

A	B	OR	AN D
0	0	0	0
0	1	1	0
1	0	1	0
1	1	1	1



(a)

# Il Transistor

Elemento circuitale in grado di fornire amplificazione di potenza/corrente/tensione : Transfer Resistor o di agire come "switch" on/off → Elemento base della logica digitale e IC

Transistor Bipolare a giunzione :

❖ Bipolar Junction Transistor (BJT)

→ Alla base dei circuiti logici con tecnologia TTL

Transistor ad Effetto di Campo : Field Effect Transistor (FET)

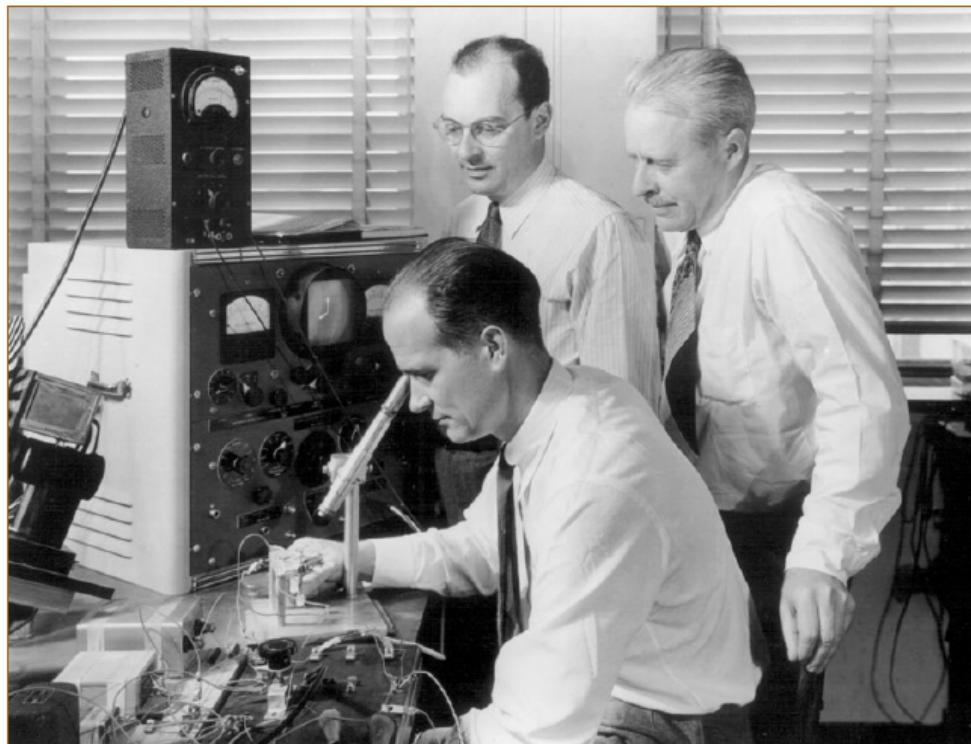
❖ a giunzione (JFET)

❖ a Metal-Oxide-Semiconductor (MOSFET, nMOS, pMOS)

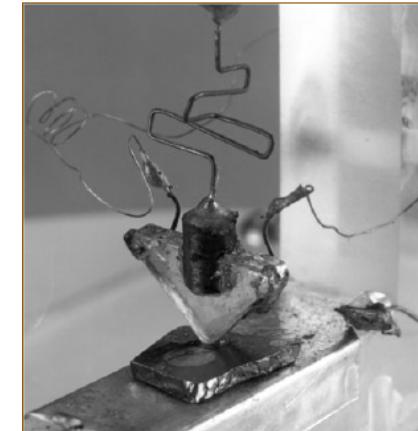
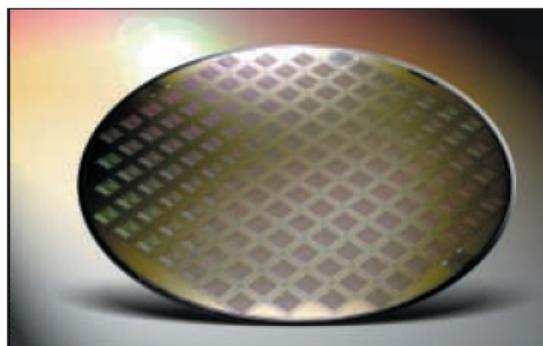
→ Alla base dei circuiti logici con tecnologia CMOS

# Un po' di storia

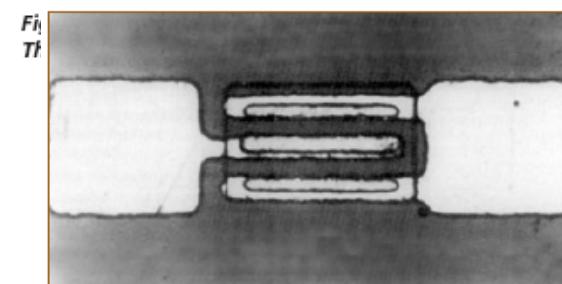
---



*Figure 2.*  
The three inventors of the transistor: (left to right) William Shockley, John Bardeen, and Walter Brattain, who were awarded the 1956 Nobel Prize in physics.

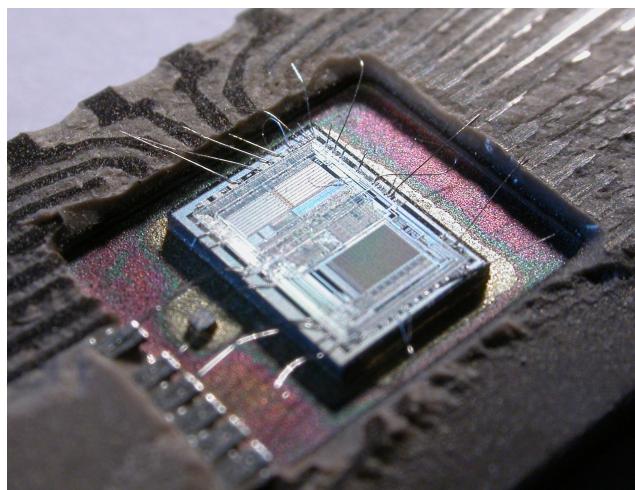
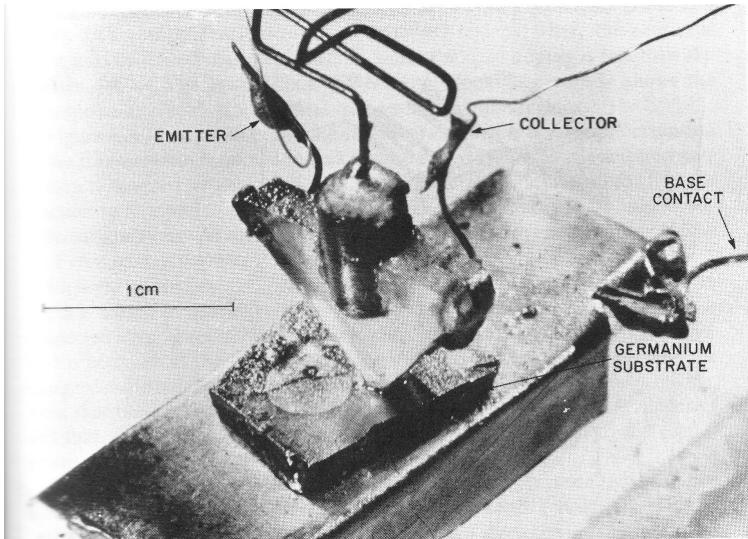


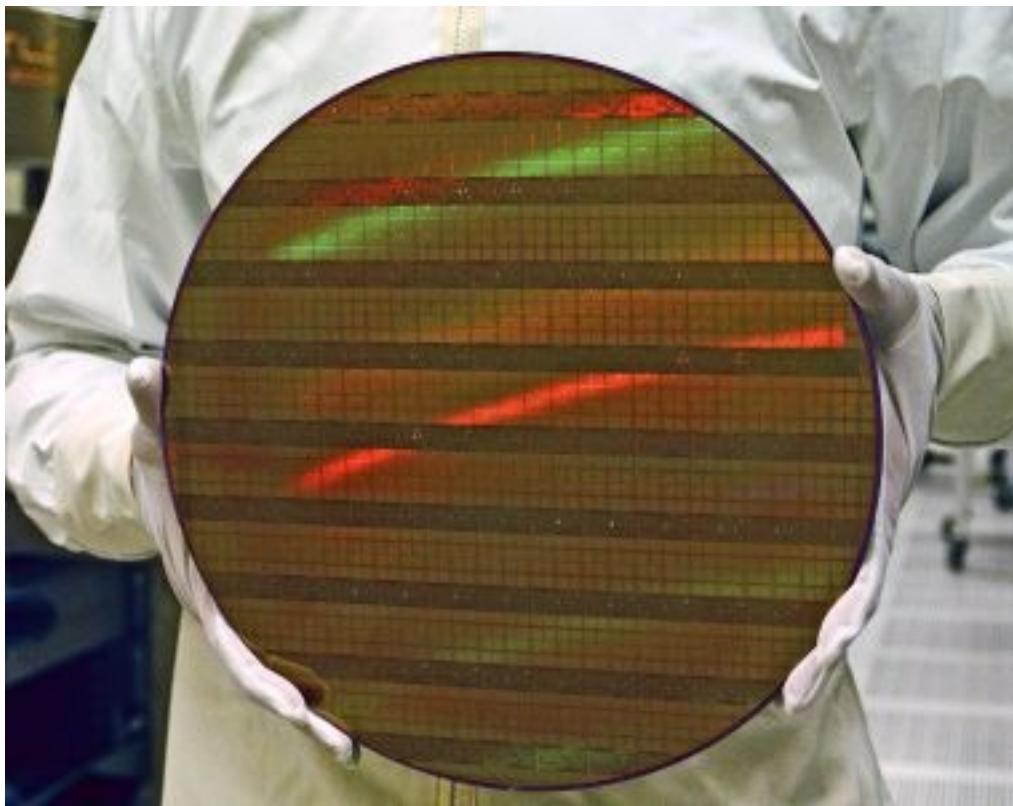
1947



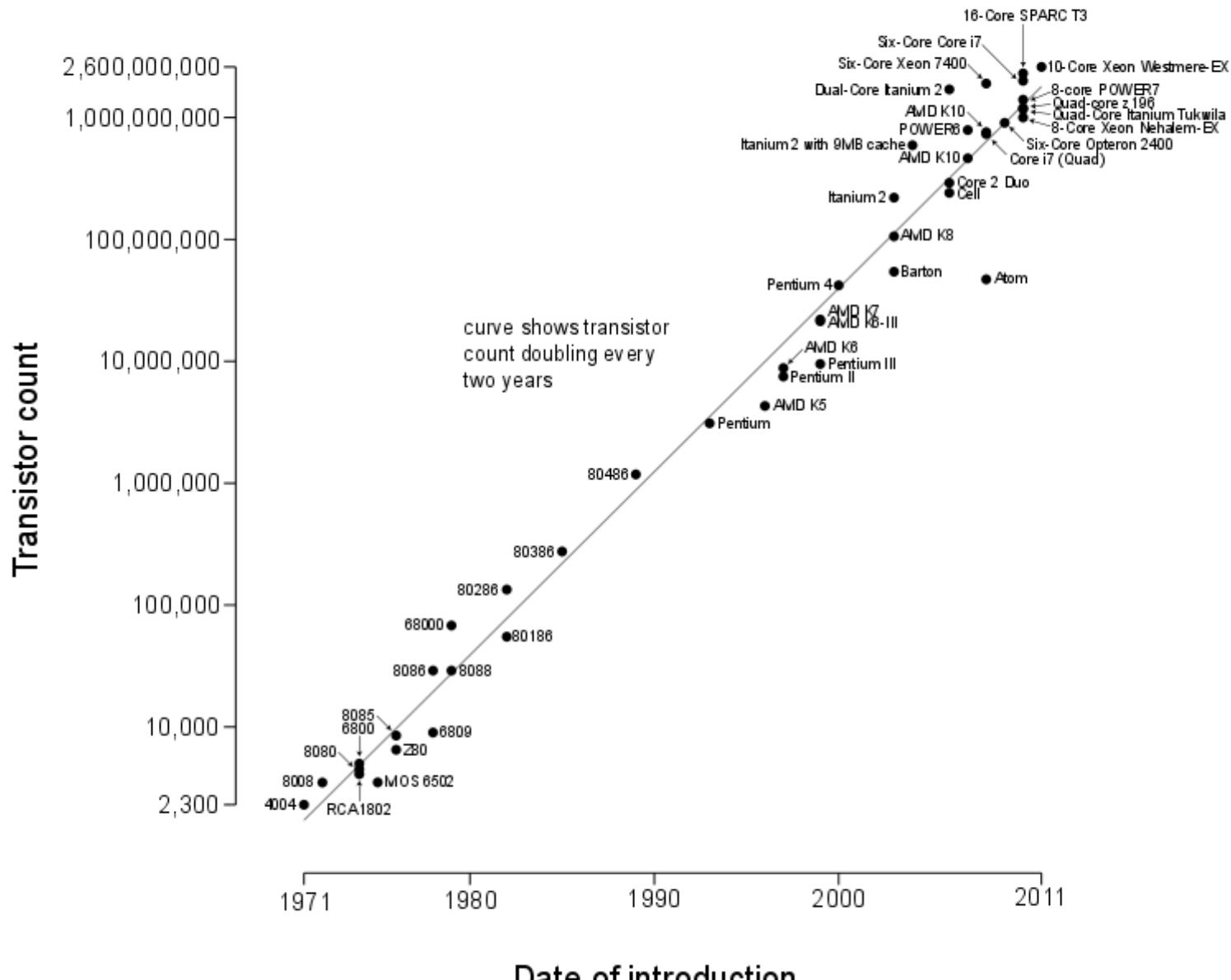
*Figure 7.*  
A view of the surface of the planar transistor.

*La strada del transistor e della logica digitale in » 60 anni....*



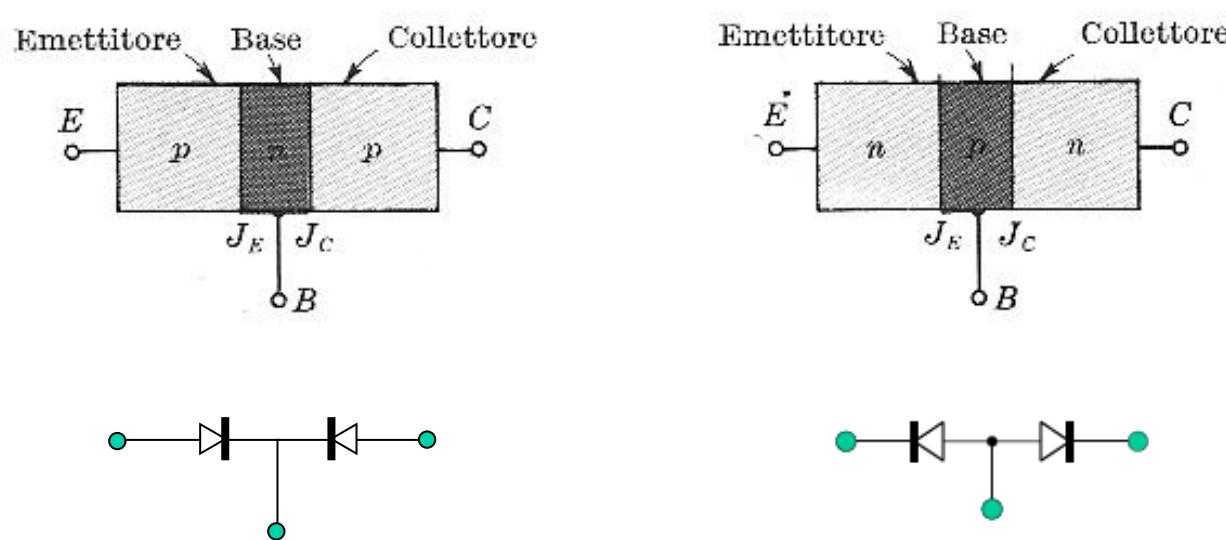


## Microprocessor Transistor Counts 1971-2011 & Moore's Law



## Il transistor bipolare a giunzione (BJT)

Il transistor bipolare è un dispositivo costituito dalla successione di due giunzioni n-p-n o p-n-p:

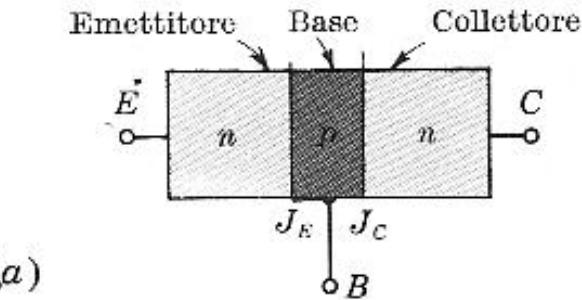
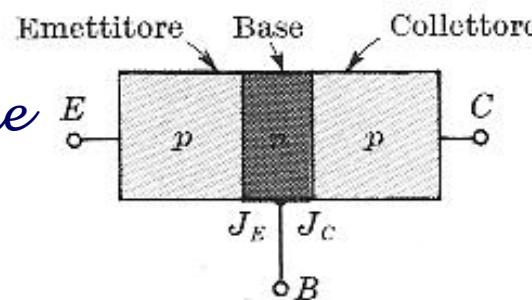


Le differenze di comportamento tra un transistor ed un semplice sistema di due diodi stanno nei fattori relativi di drogaggio ( $N_E \gg N_B \gg N_C$ ) e nello spessore "sottile" della base, che permette il passaggio di corrente tra Emettore e Collettore.

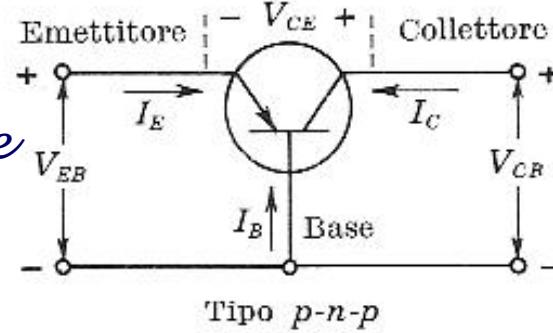
## Il transistor bipolare a giunzione (BJT)

Il transistor bipolare è un dispositivo costituito dalla successione di due giunzioni n-p-n o p-n-p, in cui entrambi i tipi di portatori (h,e) contribuiscono ai meccanismi di conduzione.

Rappresentazione schematica:

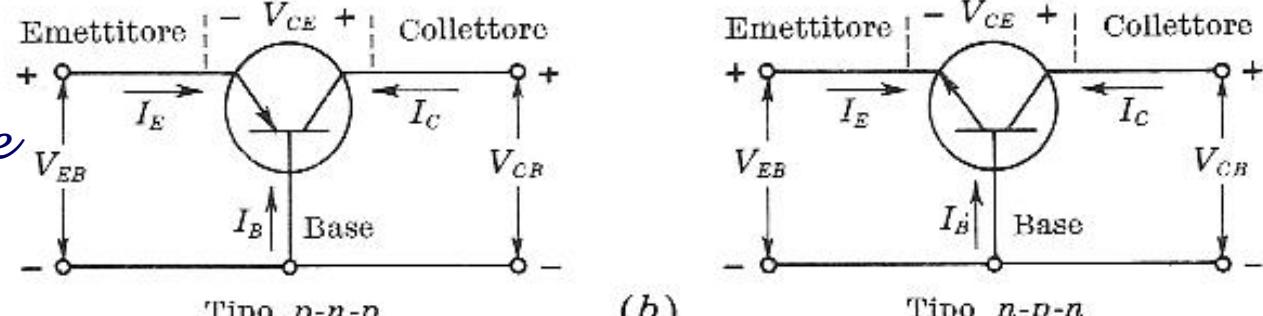


Rappresentazione circuituale:



(a)

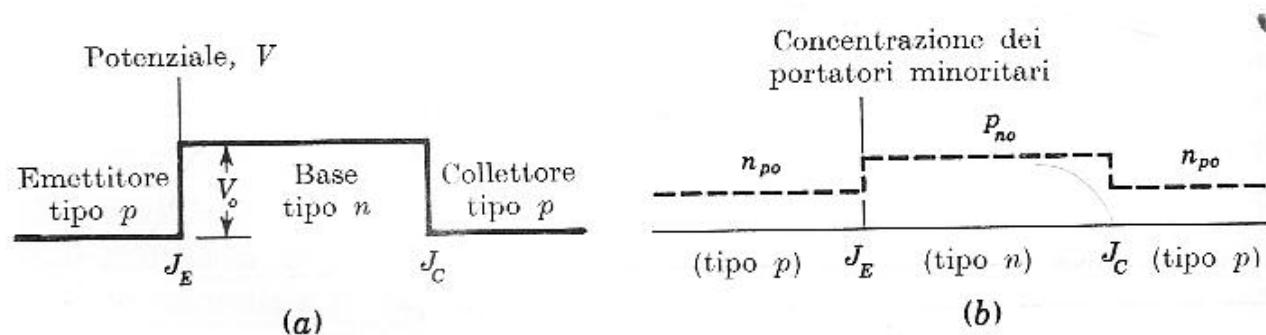
(b)



- Freccia tra Base Emettitore orientata secondo il verso in cui scorre la corrente per polarizzazione diretta della giunzione relativa
- Il verso convenzionale delle correnti è comunque assunto positivo per correnti entranti

## Il transistor a circuito aperto:

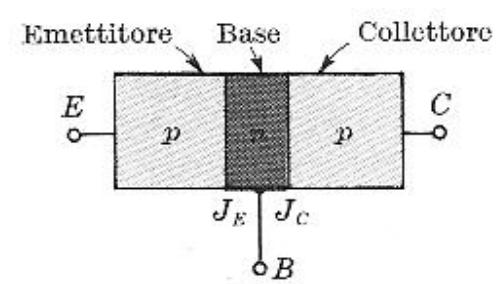
Se non si applicano tensioni di polarizzazione tutte le correnti devono essere nulle: valgono le considerazioni fatte per la singola giunzione p-n.



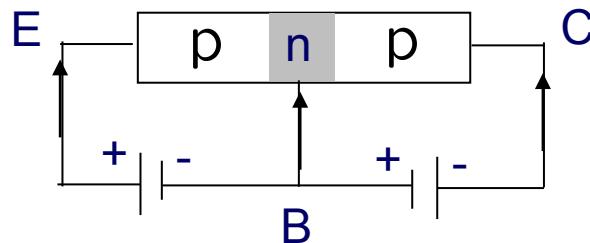
## Il transistor polarizzato (premessa)

Abbiamo un elemento con 3 poli (Emettore, Base, Collettore) e quindi più schemi polarizzazioni:

- Base comune → amplificazione di tensione,
- Emettore comune → amplificazione di corrente
- Collettore Comune → trasformatore di impedenza

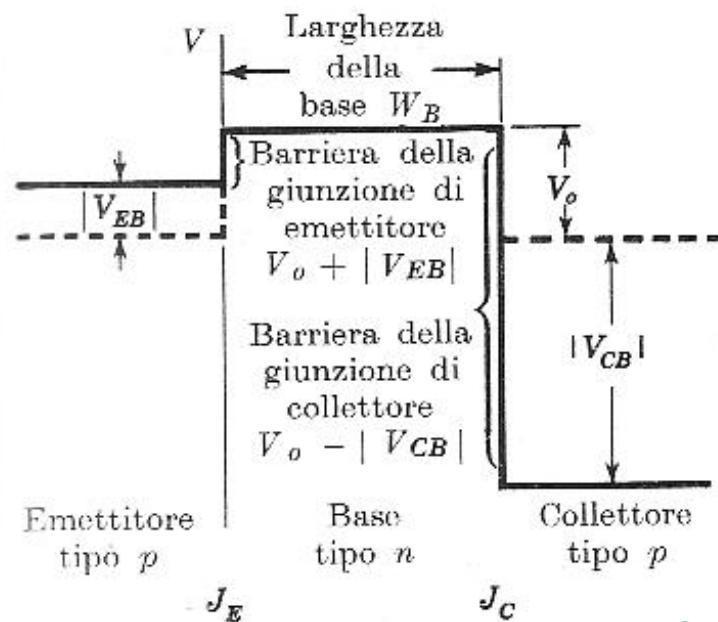


## Il transistor polarizzato (1, base comune)



Partiamo da una configurazione in cui la giunzione Emettore-Base sia polarizzata direttamente e quella Collettore-Base sia polarizzata inversamente.

$$|V_{EB}| \ll |V_{CB}|$$



### EMETTITORE-BASE:

- ✓ Corrente di portatori maggioritari
- ✓ Iniezione di carica dall'emettitore alla base

### BASE COLLETTORE

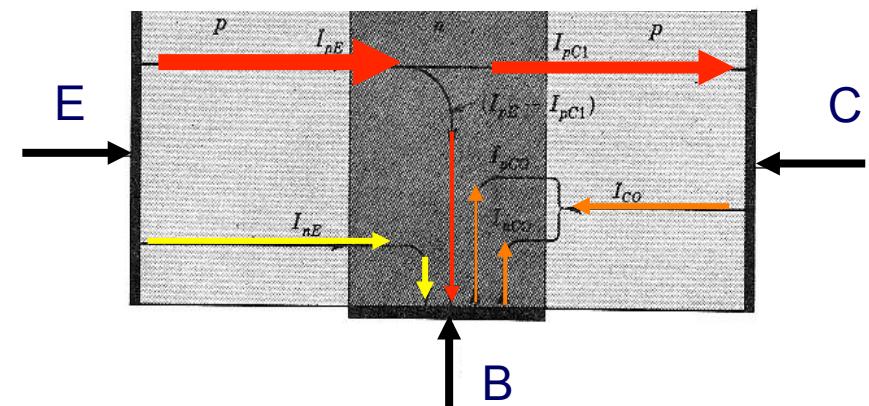
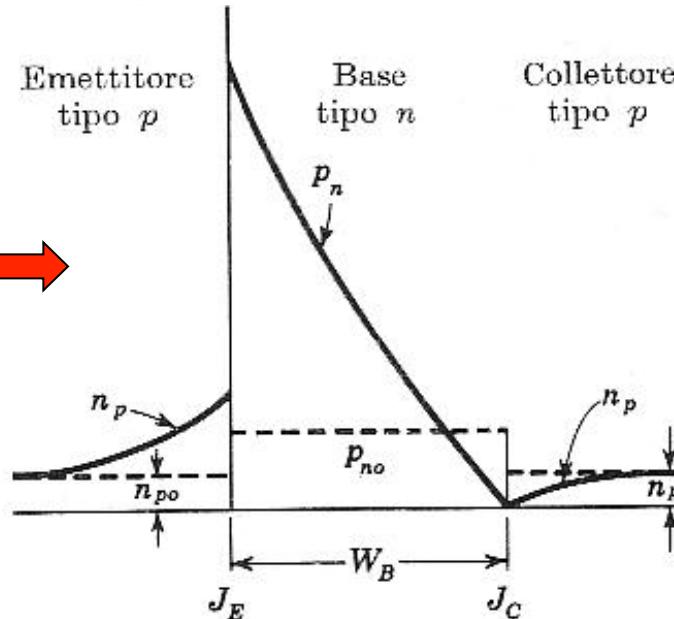
- ✓ Corrente di portatori minoritari
- ✓ Trasferimento della carica ricevuta dall'emettitore al collettore

## Il transistor polarizzato (2)

Densità dei portatori minoritari per emettitore con drogaggio  $\bar{A}$  di quello della base

Distribuzione delle Correnti E/ B:

- ❖ Corrente diretta di lacune  $E \rightarrow B$  :  $J_{pE}$
- ❖ Corrente diretta di elettroni  $B \rightarrow E$  :  $J_{nE}$
- ( per le condizioni di drogaggio  $J_{nE} \ll J_{pE}$  )
- ❖ Corrente di lacune iniettate dall' emettitore nella base e poi nel collettore  $B \rightarrow C$  :  $J_{pC1}$
- ❖ Corrente di lacune che lasciano la base (i.e. di elettroni che entrano dal circuito esterno nella base e si ricombinano con le lacune di  $J_{pE}$ )



Distribuzione delle Correnti B/C:

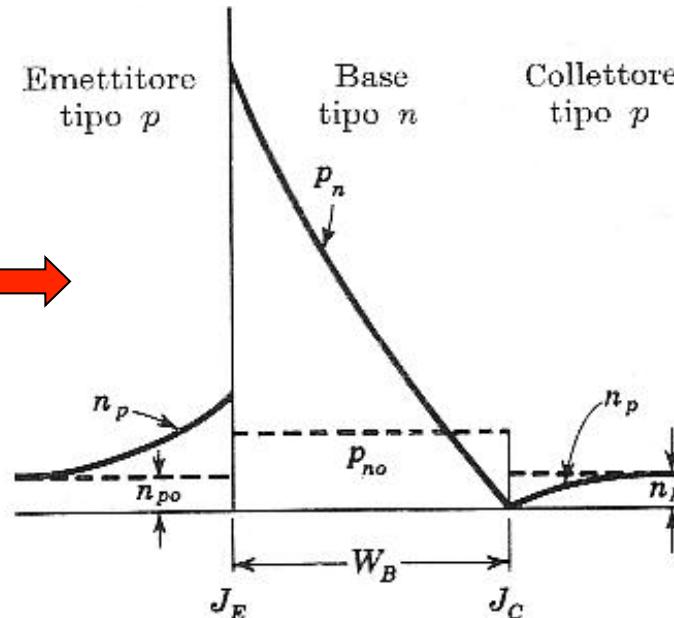
- ❖ Corrente di lacune iniettate dall' emettitore nella base e poi nel collettore  $B \rightarrow C$  :  $J_{pC1}$
  - ❖ Corrente inversa di elettroni  $C \rightarrow B$  :  $J_{nc0}$
  - ❖ Corrente inversa di lacune  $B \rightarrow C$  :  $J_{pc0}$
- $- J_{c0}$  (segno di  $J_{c0}$  per convenzione entrante nel collettore)

## Il transistor polarizzato (2)

Densità dei portatori minoritari per emettitore con drogaggio  $\bar{A}$  di quello della base

### Correnti Emettitore:

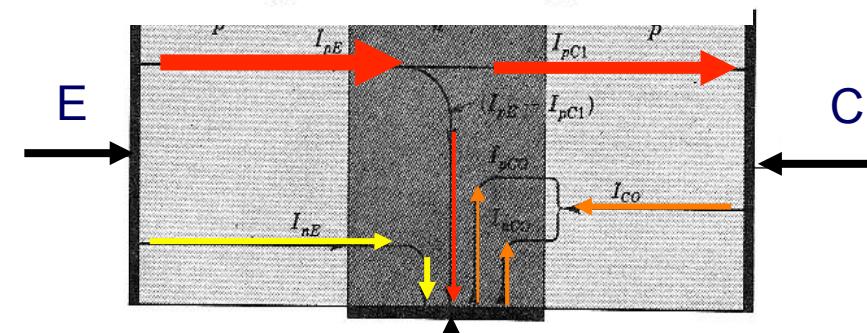
- ❖ Corrente diretta di lacune  $E \rightarrow B$  :  $J_{pE}$
  - ❖ Corrente diretta di elettroni  $B \rightarrow E$  :  $J_{nE}$
- ( per le condizioni di drogaggio  $J_{nE} \ll J_{pE}$  )



### Correnti Collettore

- ❖ Corrente di lacune iniettate dall' emettitore nella base e poi nel collettore  $B \rightarrow C$  :  $J_{pC1}$

- ❖ Corrente inversa di elettroni  $C \rightarrow B$  :  $J_{nc0}$
- ❖ Corrente inversa di lacune  $B \rightarrow C$  :  $J_{pc0}$



### Correnti Base:

- ❖ Corrente inversa di elettroni/ lacune  $C \rightarrow B$  :  $J_{nc0}$   $J_{pc0}$
- ❖ Corrente di lacune che lasciano la base (i.e. di elettroni che entrano dal circuito esterno nella base e si ricombinano con le lacune di  $J_{pE}$ )

## Il transistor polarizzato (3)

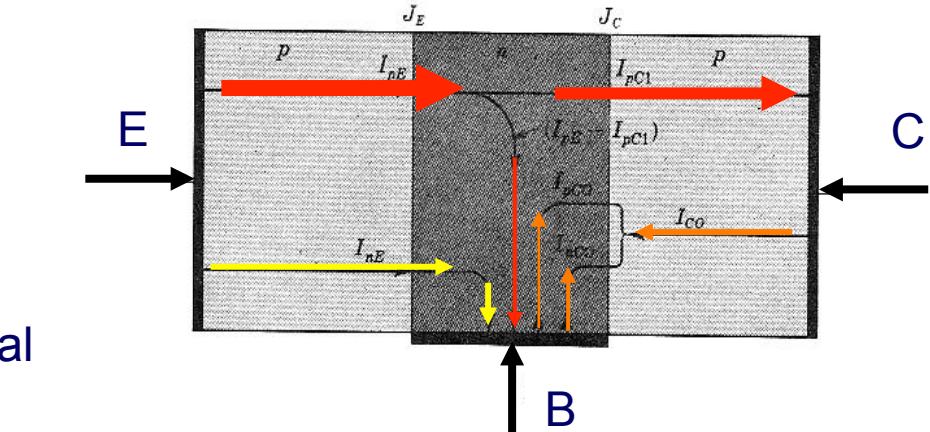
$$J_E = J_{pE} + J_{nE}$$

$$-J_B = J_{C0} + (J_{pE} - J_{pC1})$$

$$J_C = J_{C0} - J_{pC1}$$

Ma la corrente di lacune  $J_{pC1}$  dipende dal livello di iniezione di lacune nella base, quindi è legata direttamente alla corrente di emettitore:

$$J_{pC1} = \alpha J_{pE}$$



Rapporto di trasferimento della corrente tra emettitore e collettore :  $\alpha \sim 0.9 - 0.99$

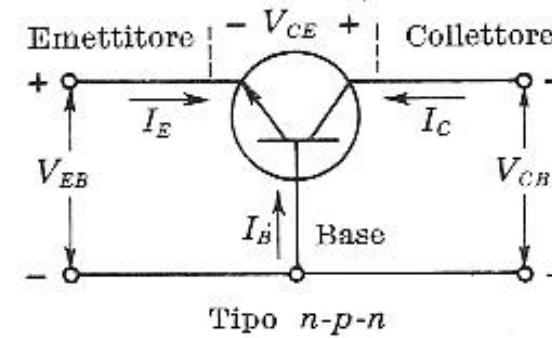
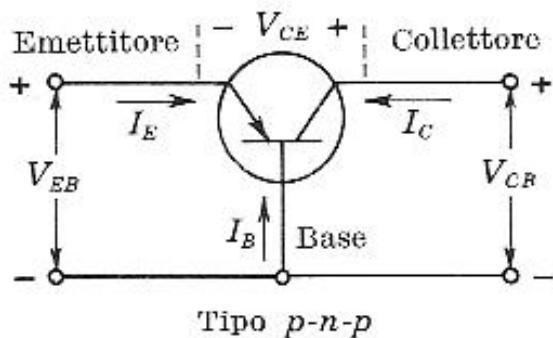
$$J_C = J_{C0} - J_{pC1} \rightarrow J_C = J_{C0} - \alpha J_E$$

$$\alpha = -\frac{J_c - J_{c0}}{J_E}$$

Fattore di amplificazione di corrente per ampi segnali di un transistor a base comune: rapporto tra l'incremento della corrente di collettore rispetto all'interdizione ( $J_{c0}$ ) e quella di emettitore all'interdizione ( $J_E = 0$ )

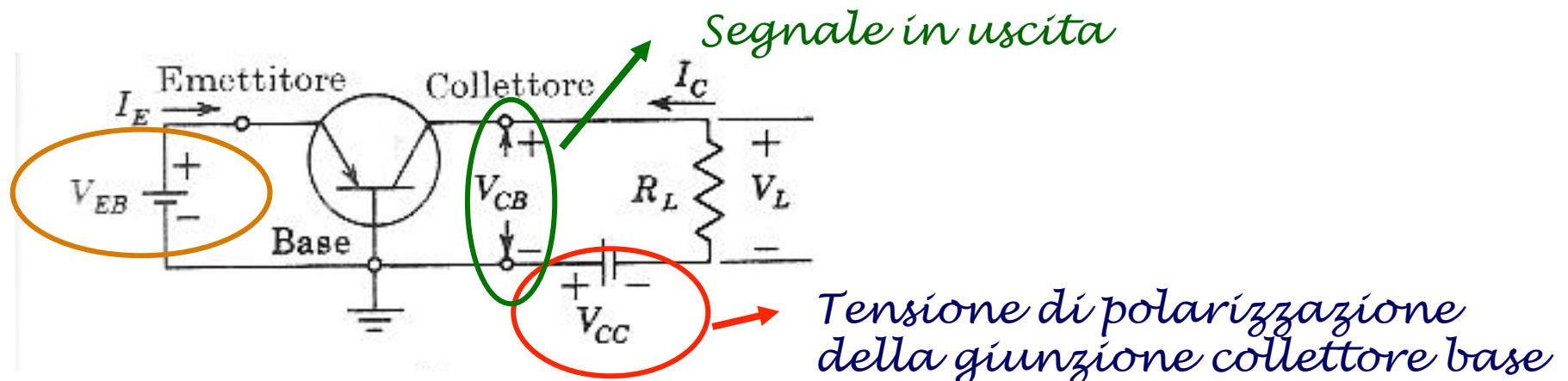
## Amplificazione di tensione nel transistor a base comune:

Base comune: la base è comune alla maglia di ingresso ed a quella di uscita.

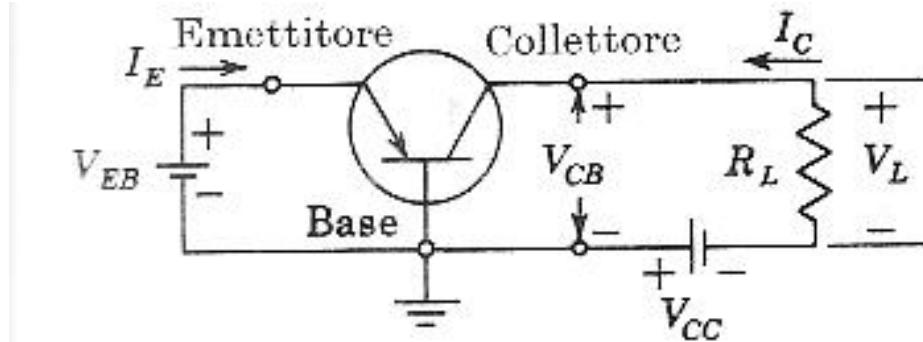


Segnale in ingresso: tensione emettitore-base  $V_{EB}$

Segnale in uscita: tensione collettore base  $V_{CB}$



## Amplificazione di tensione nel transistor a base comune:



Una variazione della corrente in ingresso ( $I_E$ ) provoca una variazione in quella di uscita ( $I_C$ )

$$\Delta I_C = \alpha' \Delta I_E$$

Ma la variazione della corrente in ingresso può essere direttamente legata alla variazione di tensione in ingresso, mediante la resistenza  $r_E$  dinamica della giunzione EB

$$\Delta I_E = \frac{\Delta V_{EB}}{r_E}$$

Abbiamo una variazione nella tensione di uscita legata alla variazione di corrente sul carico  $R_L$  ( $V_{CC}$  rimane invariato):

$$\Delta V_L = -R_L \Delta I_C$$

## Amplificazione di tensione nel transistor a base comune:

$$\Delta I_C = \alpha' \Delta I_E$$

$$\Delta I_E = \frac{\Delta V_{EB}}{r_E}$$

$$\Delta V_L = -R_L \Delta I_C$$



$$\frac{\Delta V_L}{\Delta V_{EB}} = -\frac{R_L}{r_e} \alpha'$$

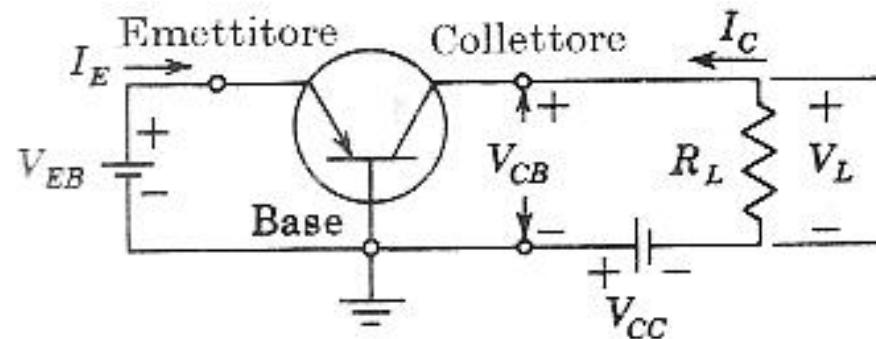


$$\alpha' \sim -1$$

$$r_e \sim 50 \Omega$$

$$R_L \sim 3 \text{ K}\Omega$$

$$\Delta V_L = 60 \Delta V_{EB}$$



Il transistor opera come amplificatore in quanto la corrente d'ingresso in un circuito a bassa resistenza viene trasferita pressoché integralmente ad un circuito di uscita con alta resistenza: di qui il nome di **Transfer-Resistor !!**

$$\alpha' = \frac{\Delta I_C}{\Delta I_E} \Big|_{V_{CB}=\text{cost}}$$

Rapporto di trasferimento della corrente di corto circuito per piccoli segnali:  $\alpha' = -\alpha$

## Caratteristiche di uscita del transistor a base comune

Finora abbiamo visto solo quello che succede nella regione di amplificazione: i.e. emettitore-base in polarizzazione diretta, collettore-base in polarizzazione inversa.

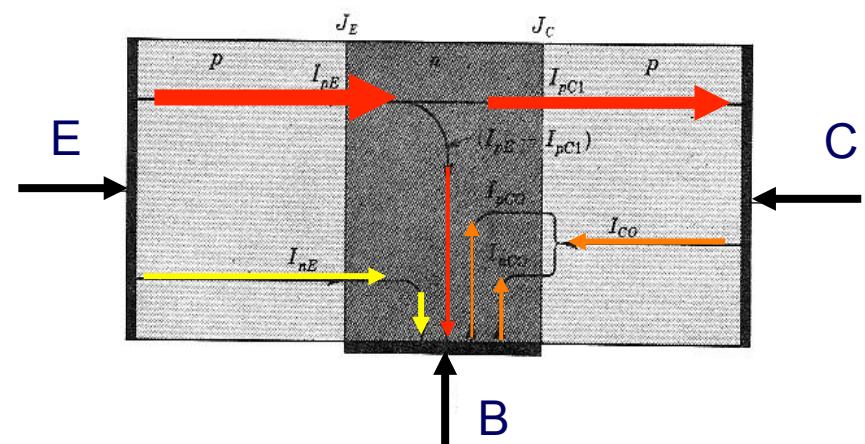
Ad esempio: come esprimere la corrente di collettore per una polarizzazione generica (anche positiva)

L'espressione della corrente di collettore:

$$I_C = I_{C0} - \alpha I_E$$

Dovremo sostituire ad  $I_{C0}$  l'espressione generale della corrente di diodo (con un segno - per la convenzione scelta sulle correnti) :

$$I_C = I_{C0}(1 - e^{\frac{V_{CB}}{KT}}) - \alpha I_E$$



## Caratteristiche statiche di uscita del transistor a base comune

In generale potremo dire che la corrente di collettore è determinata dalla tensione di collettore ( $V_{CB}$ ) e dalla corrente di ingresso ( $I_E$ )

$$I_C = \phi(I_E, V_{CB})$$

- **Regione attiva:**

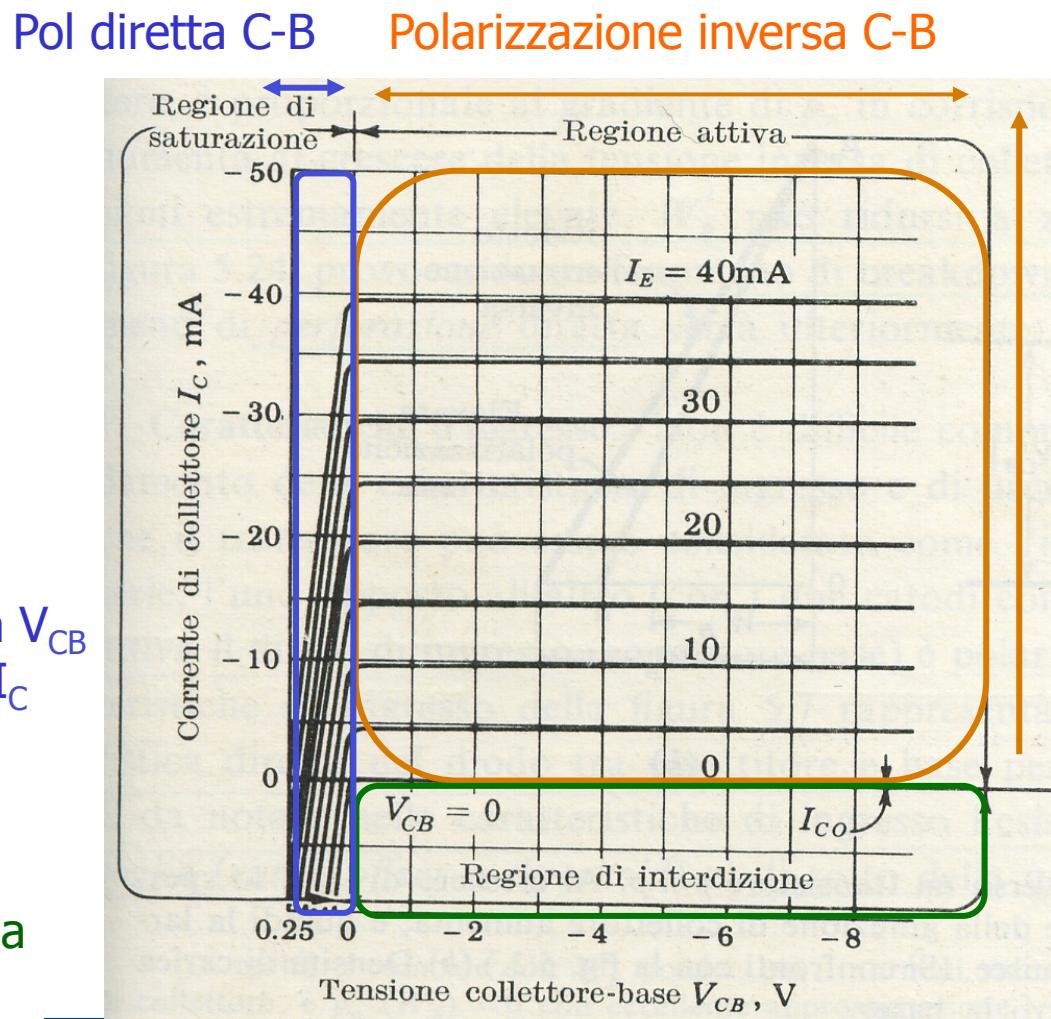
Corrente di collettore è pressocchè indipendente dalla tensione di polarizzazione  $V_{CB}$  ed  $= -V_E$

- **Regione di saturazione:**

La giunzione C-B è polarizzata direttamente, piccole escursioni della  $V_{CB}$  corrispondono a grandi variazioni di  $I_C$  (cfr. caratteristica del diodo)

- **Regione di Interdizione:**

Entrambe le giunzioni sono in pol. inversa: corrente di collettore pari alla corrente di saturazione inversa



Polarizzazione diretta E-B