

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: $N_A x_p = N_D x_n$

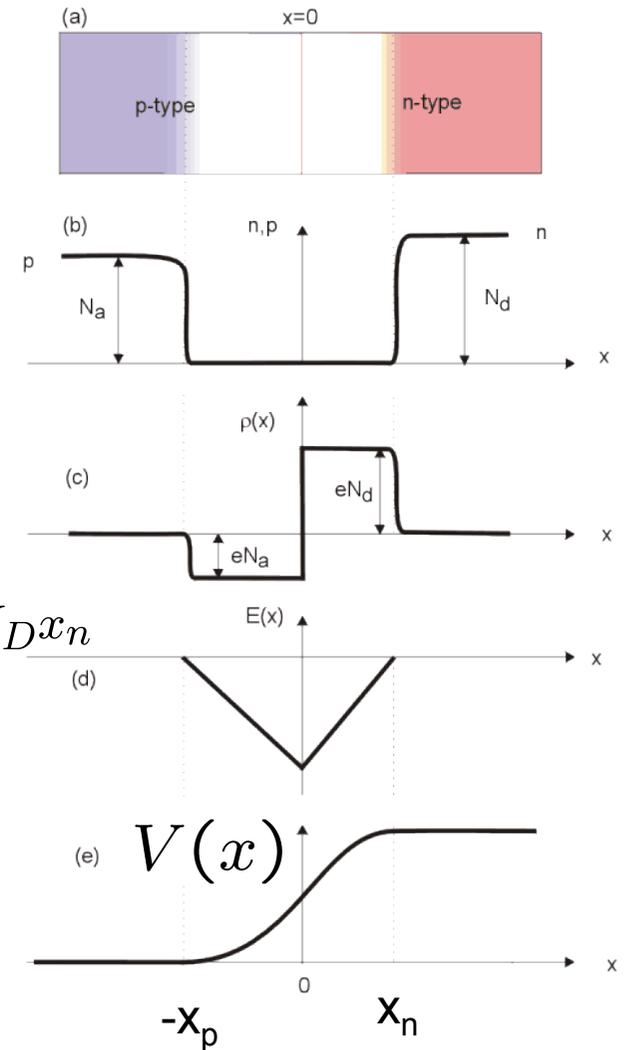
$$\mathcal{E} = -\frac{eN_A}{\epsilon}(x + x_p)\hat{u}_x \quad -x_p \leq x \leq 0$$

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

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

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

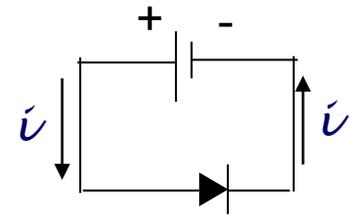
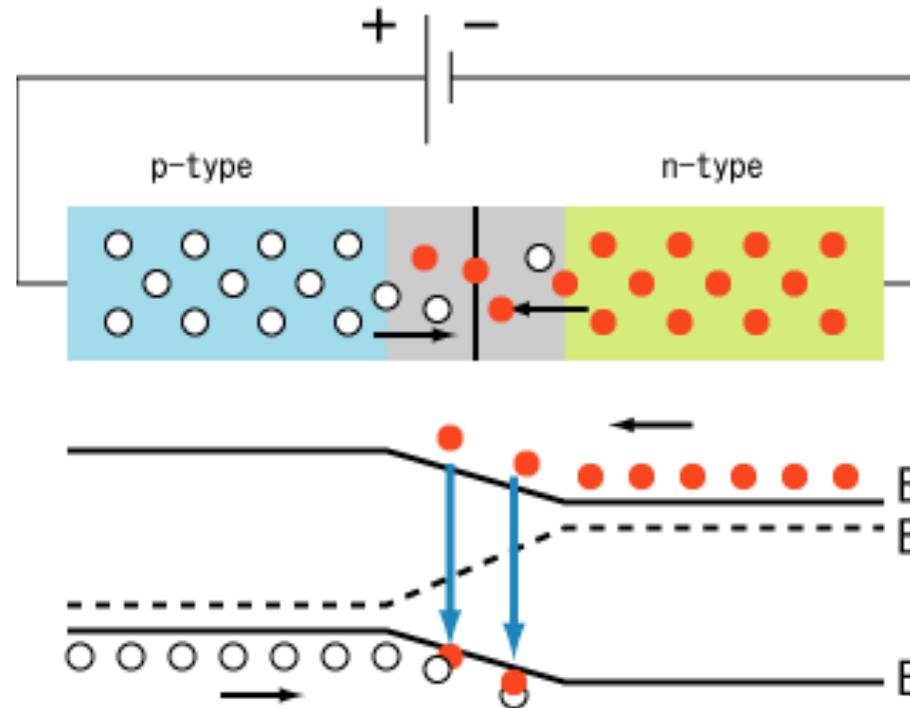
Integrandola possiamo legare ΔV alle
concentrazioni di drogaggio e temperatura
e stabilire che il livello di Fermi è costante lungo
la giunzione



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

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.

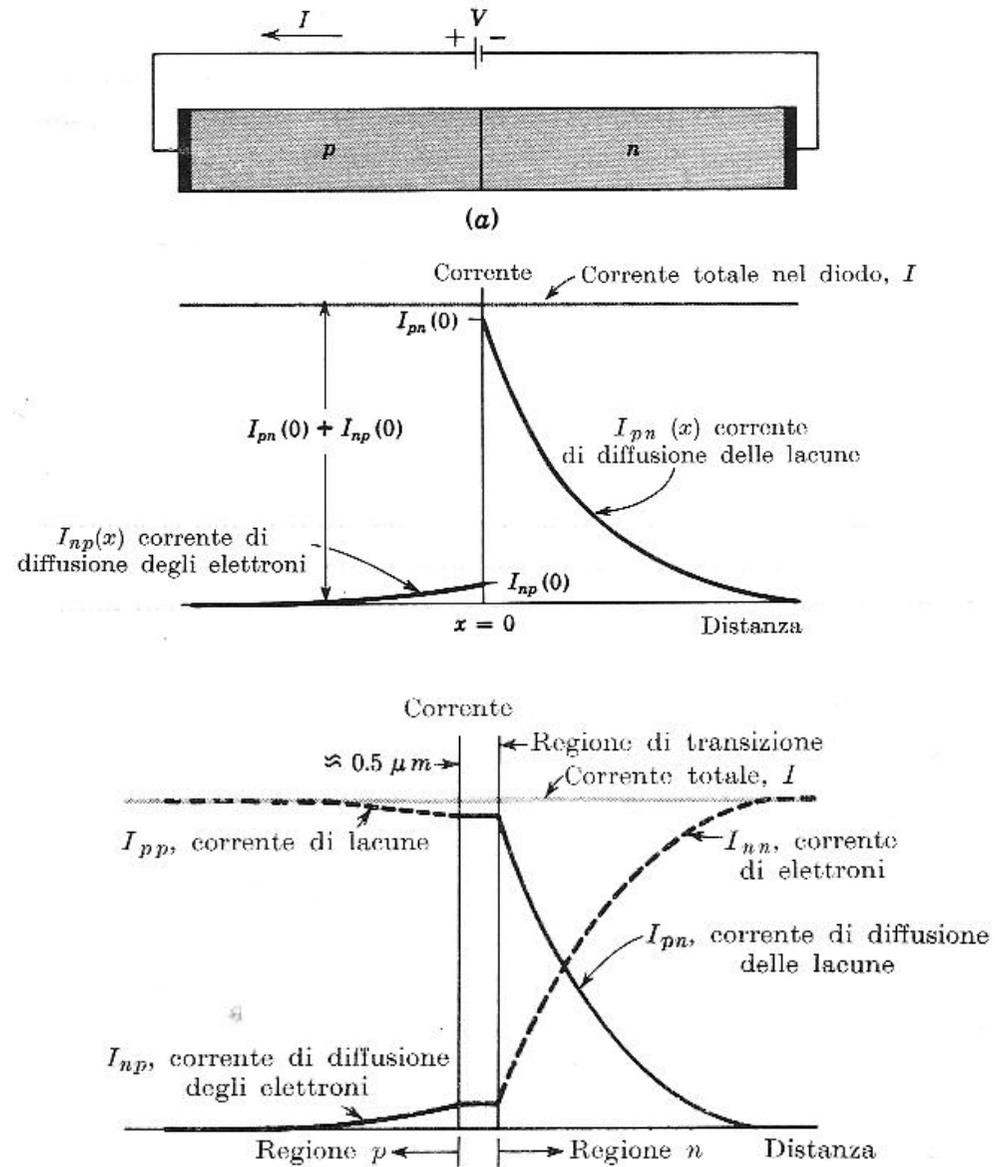
$$\begin{array}{llll} n_n \sim n_{n0} & n_{p0} = n_{n0} e^{-\frac{qV_{bi}}{KT}} & \longrightarrow & n_p = n_{p0} e^{\frac{qV}{KT}} \\ p_p \sim p_{p0} & p_{n0} = p_{p0} e^{-\frac{qV_{bi}}{KT}} & \longrightarrow & p_n = p_{n0} e^{\frac{qV}{KT}} \end{array}$$
$$V_{bi} \rightarrow V_{bi} - V$$

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:

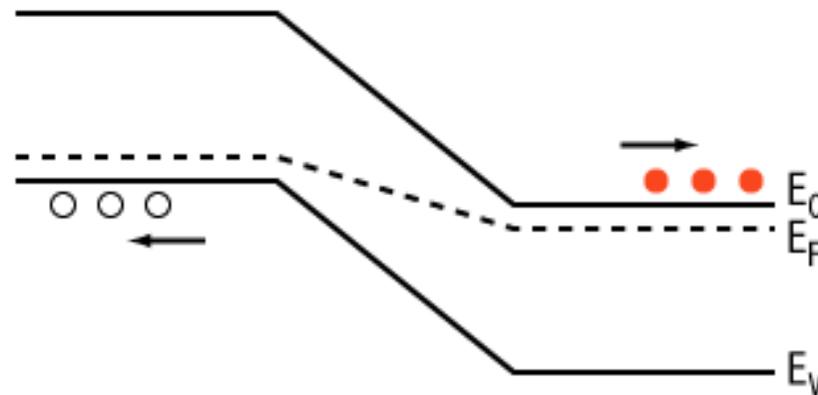
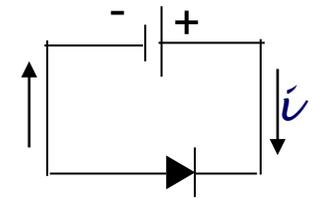
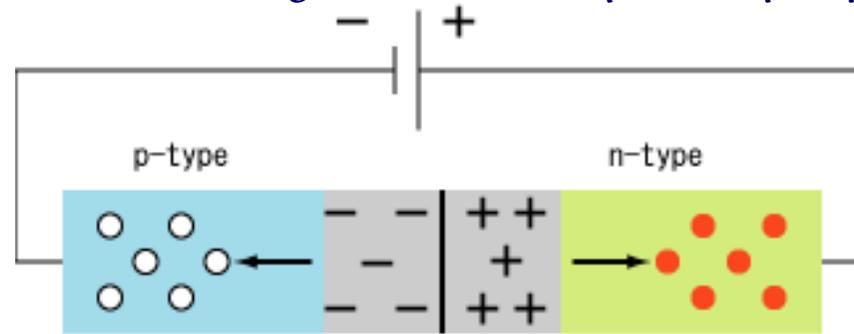
$$\left\{ \begin{array}{l} n_p - n_{p0} = n_{p0} \left(e^{\frac{qV}{KT}} - 1 \right) \\ p_n - p_{n0} = p_{n0} \left(e^{\frac{qV}{KT}} - 1 \right) \end{array} \right.$$

Come descrivere quindi la corrente?



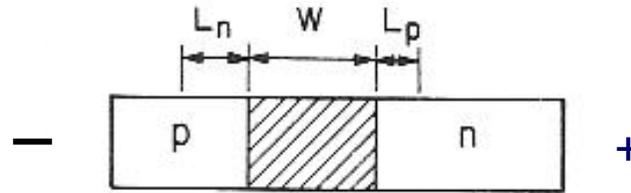
Giunzione polarizzata inversamente :

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



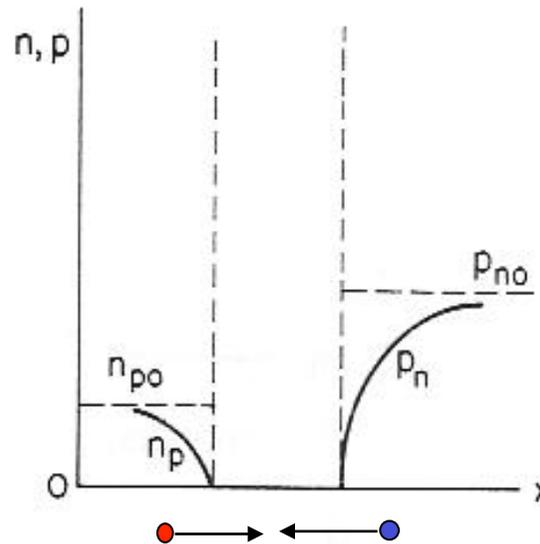
La d.d.p. applicata deforma il livello di fermi ed aumenta ulteriormente la barriera di energia potenziale che devono superare i portatori maggioritari per attraversare la giunzione.

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



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

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

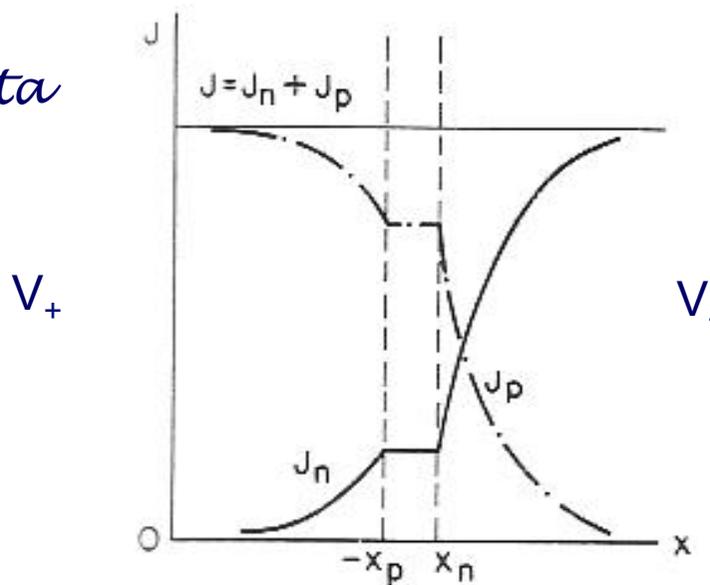


$$p_n(x_n) = p_{n0} e^{\frac{qV}{KT}}$$

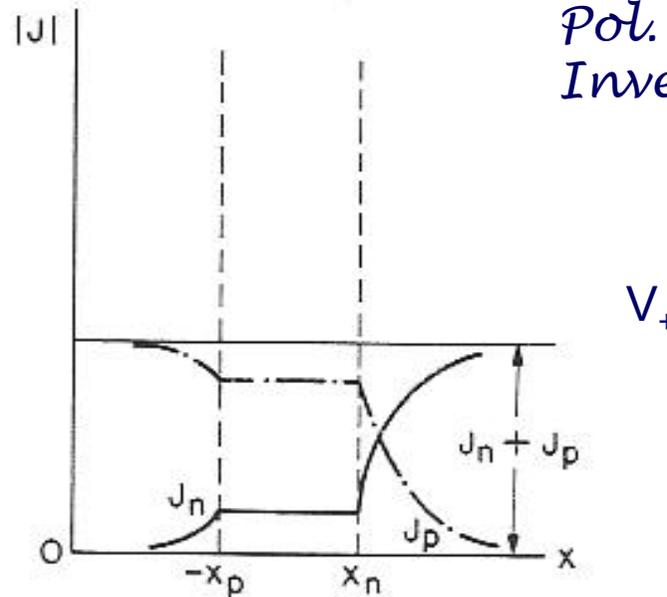
Ma: $V < 0 \rightarrow p_n < p_{n0}$

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

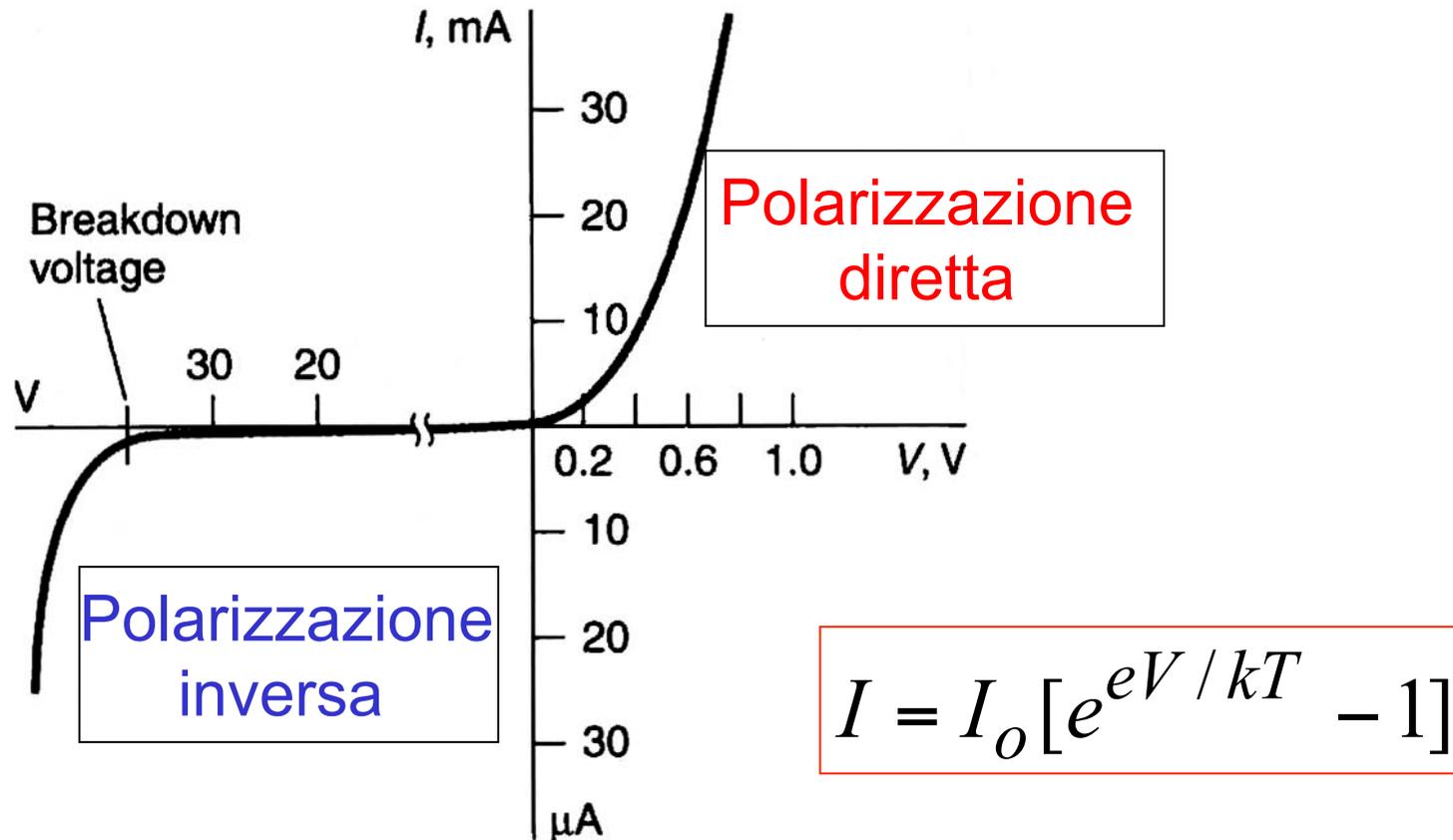


La corrente di **saturazione inversa** è sostenuta dalla generazione termica di nuove coppie e-h: è limitata quindi dalle densità di portatori minoritari del semiconduttore e non dipende dal valore della tensione applicata

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

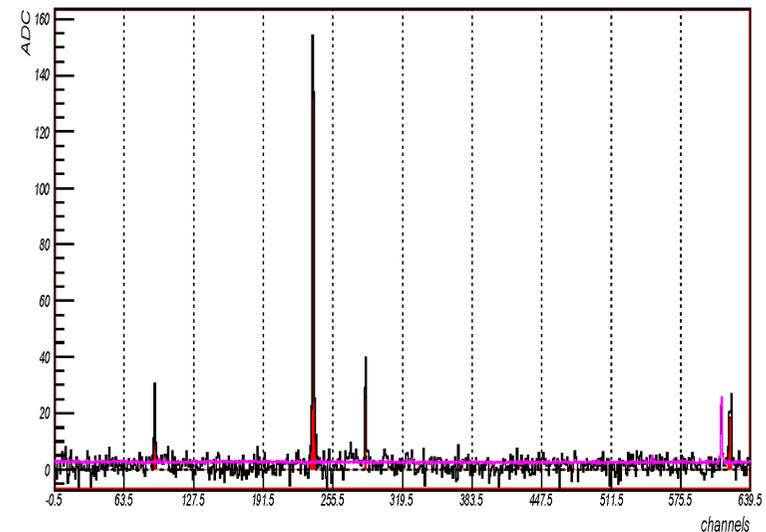
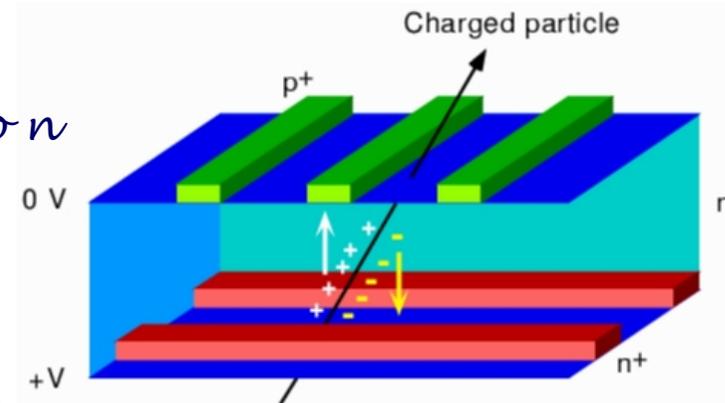
→ Una particella carica attraversa un sottile strato ($300\mu\text{ m}$) di silicio drogato n ed interagendo con il materiale libera 24000 coppie e/h ($\propto Z^2$)

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

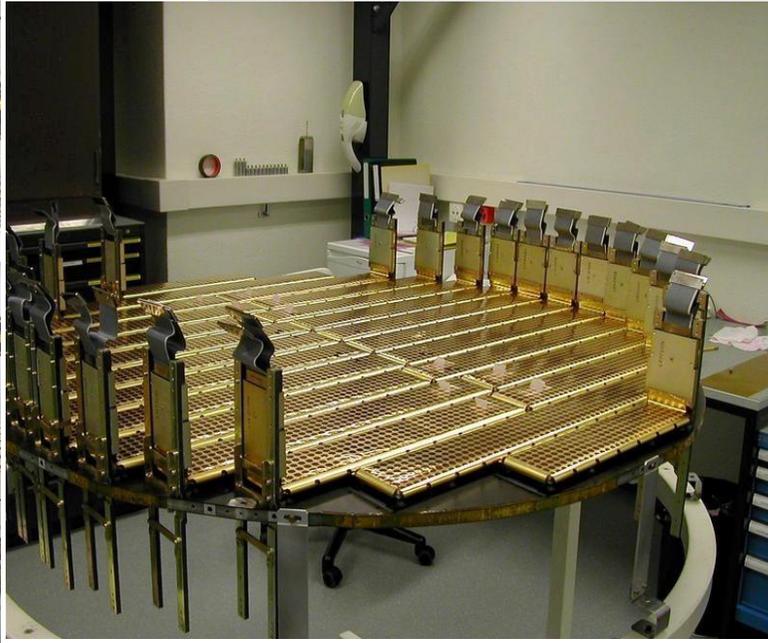
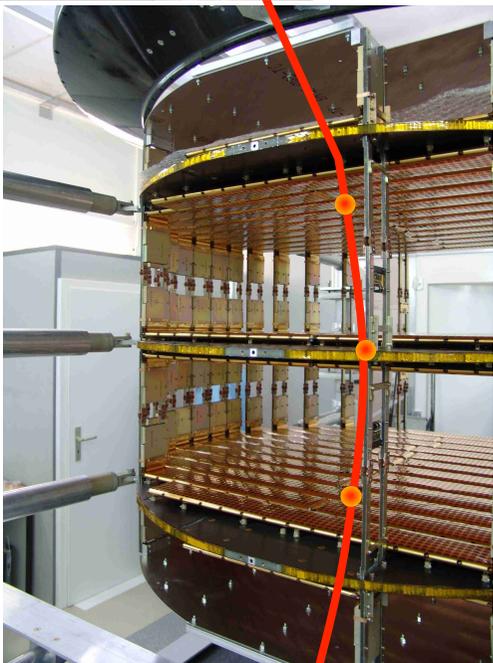
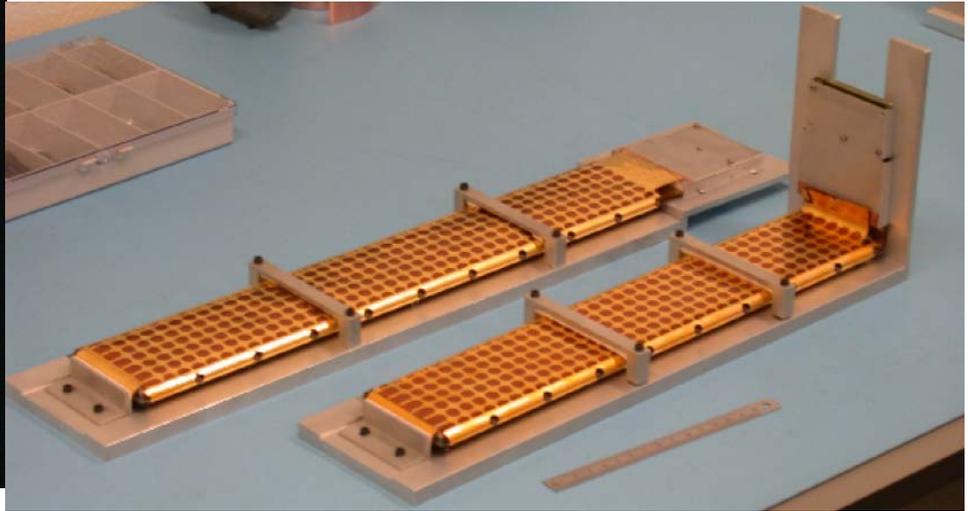
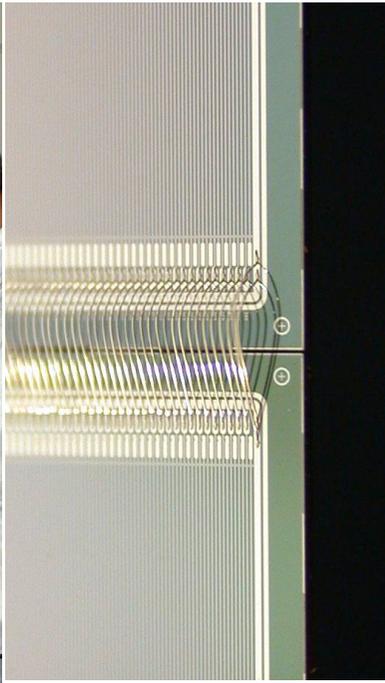
→ Le cariche e/h generate vengono raccolte dalle due parti della giunzione sulle strisce p+ e su delle strisce n+ dirette in senso ortogonale tramite contatti metallici

→ 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



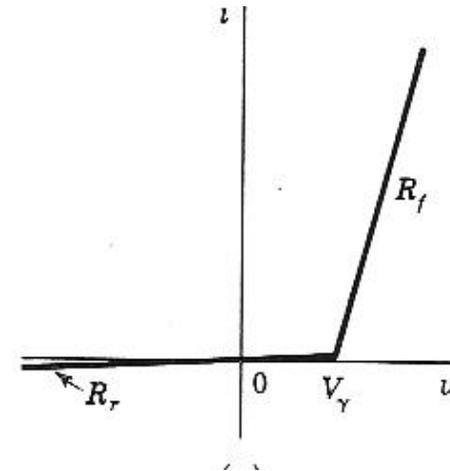
*La costruzione del tracker al silicio
di AMS @ PG/TR*



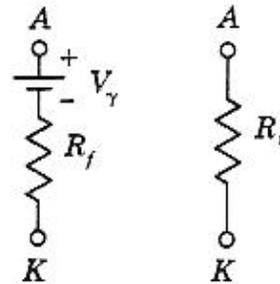
Il diodo come elemento circuitale raddrizzatore:

Caratteristica del diodo lineare a tratti:

- V_γ tensione di soglia
- R_f resistenza "forward" in pol. Diretta
- R_r resistenza "reverse" in pol. Inversa

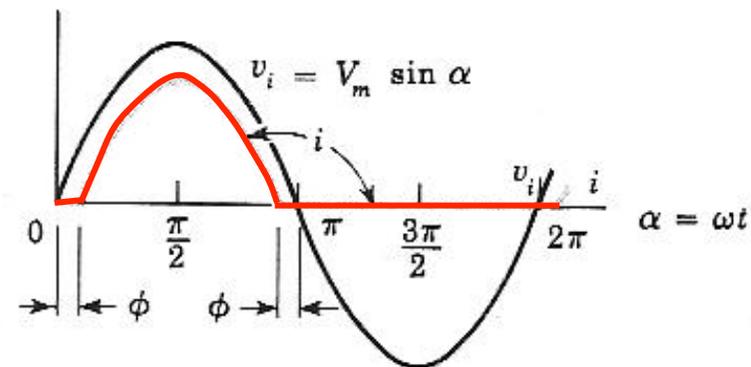
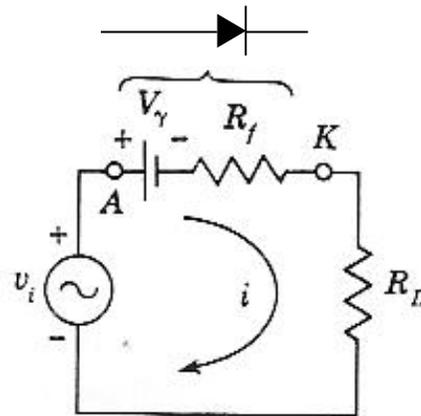


Rappresentazione
Equivalente in un circuito:

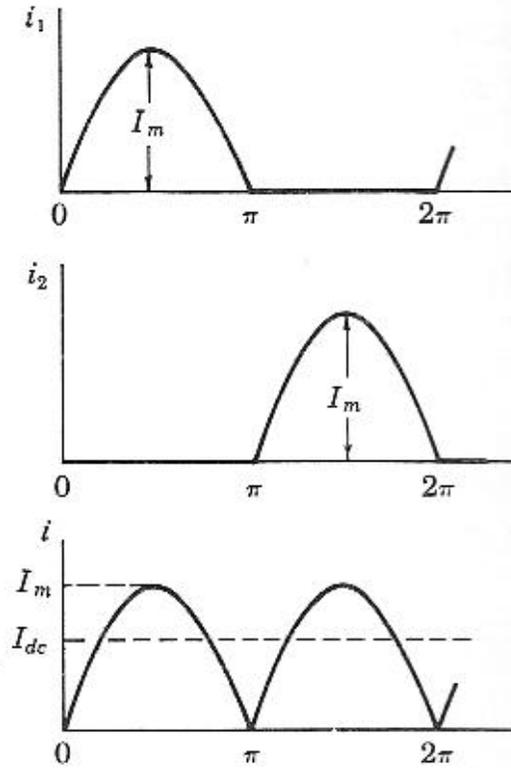
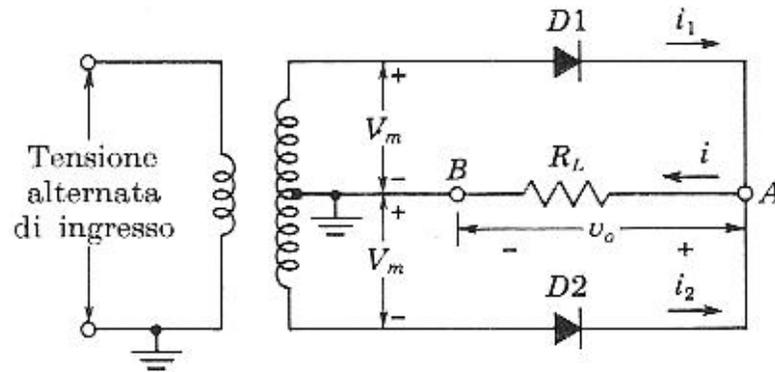


$$v_i = V_m \sin \omega t$$

$$\phi = \arcsin \frac{v_\gamma}{V_m}$$



Raddrizzatore a doppia-semionda

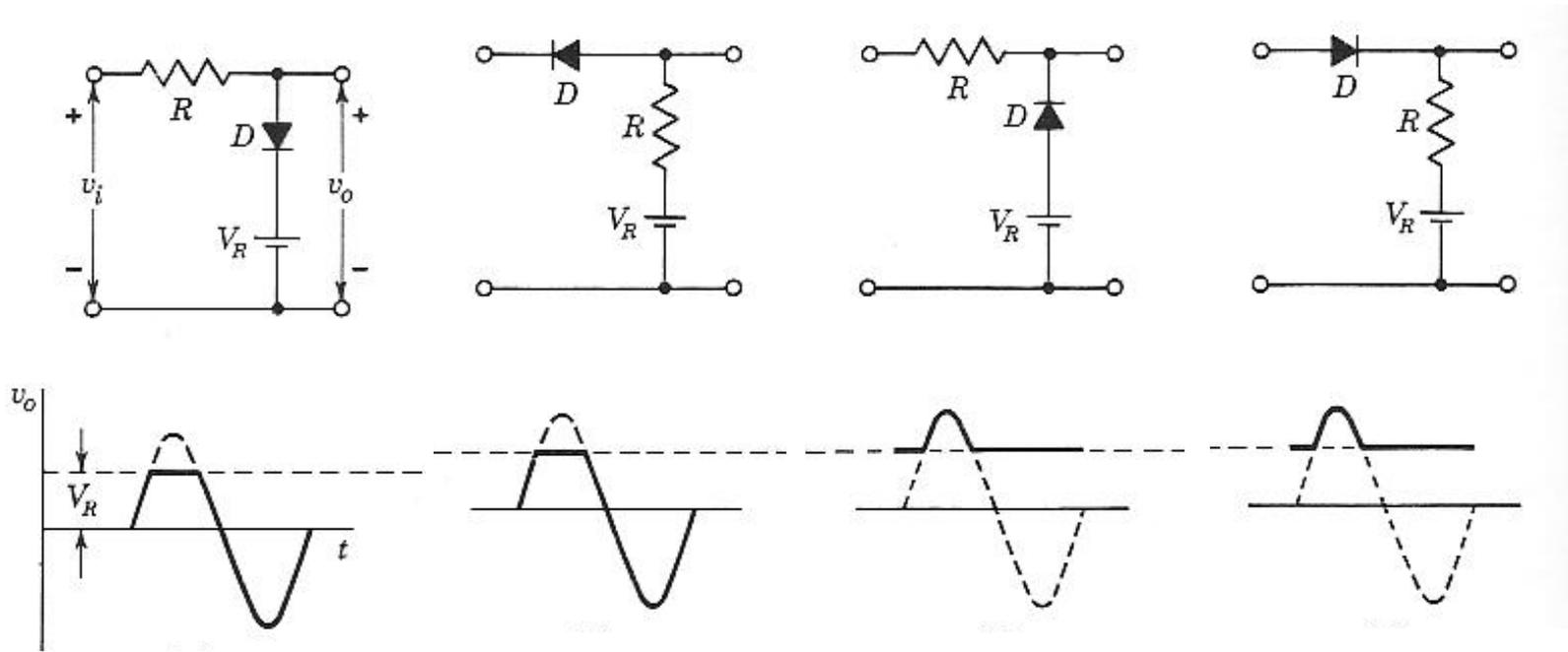


Corrente media? $I_{DC} = \frac{1}{\pi} \int_0^{\pi} i d\alpha = 2 \frac{I_m}{\pi}$

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

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

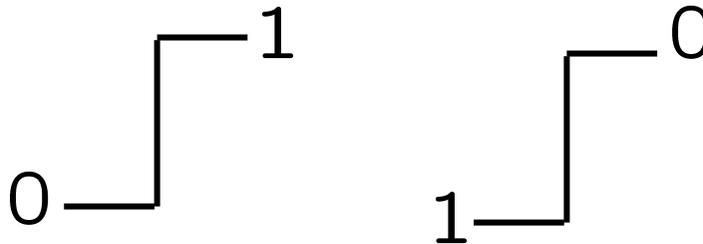
Per operare con segnali digitali si utilizza l'algebra Booleana:

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

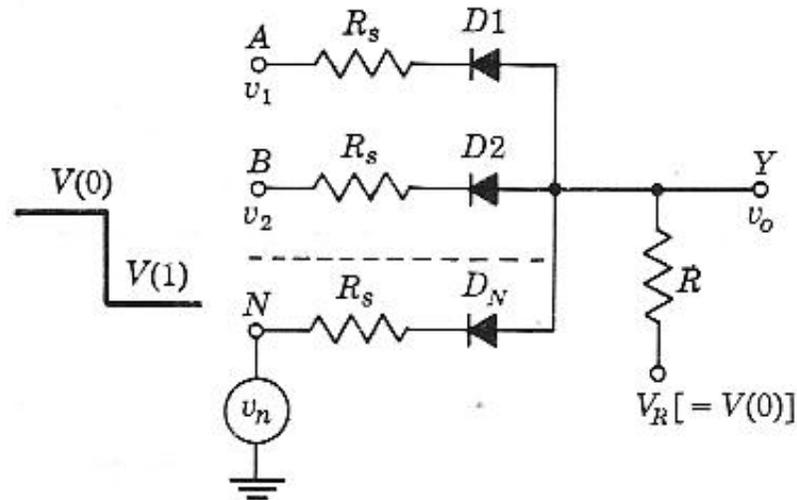


Logica negativa:

Il livello di tensione o corrente più alto corrisponde allo 0

Circuito OR in logica negativa

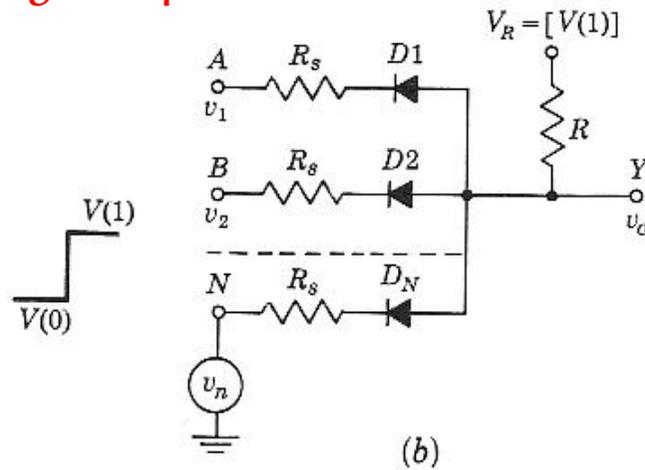
A	B	OR	AND
			D
0	0	0	0
0	1	1	0
1	0	1	0
1	1	1	1



$R \gg R_s, R_f$

= Circuito AND in logica positiva

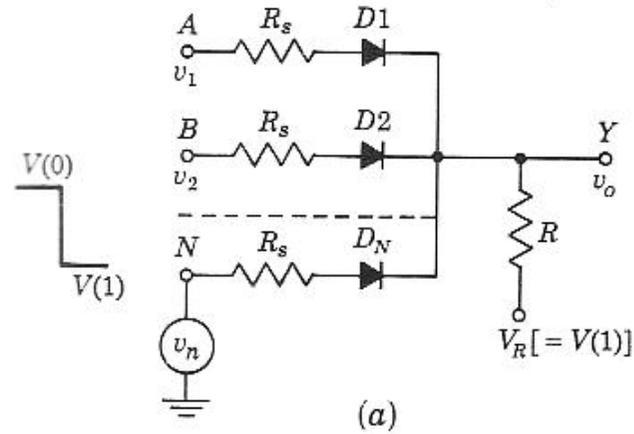
A	B	OR	AND
			D
0	0	0	0
0	1	1	0
1	0	1	0
1	1	1	1



(b)

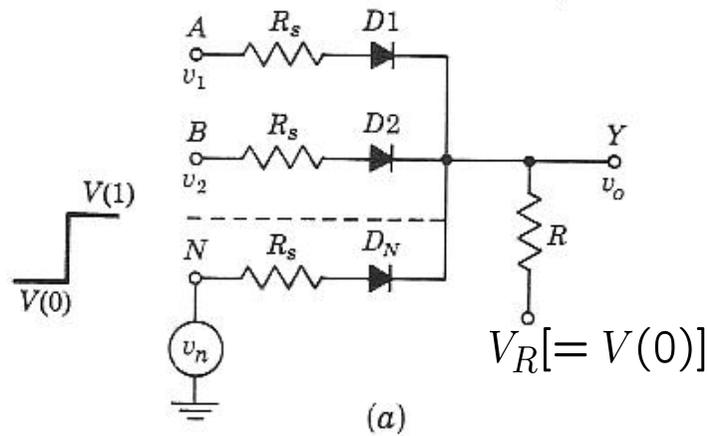
Circuito AND in logica negativa?

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



= Circuito OR in logica positiva

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



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

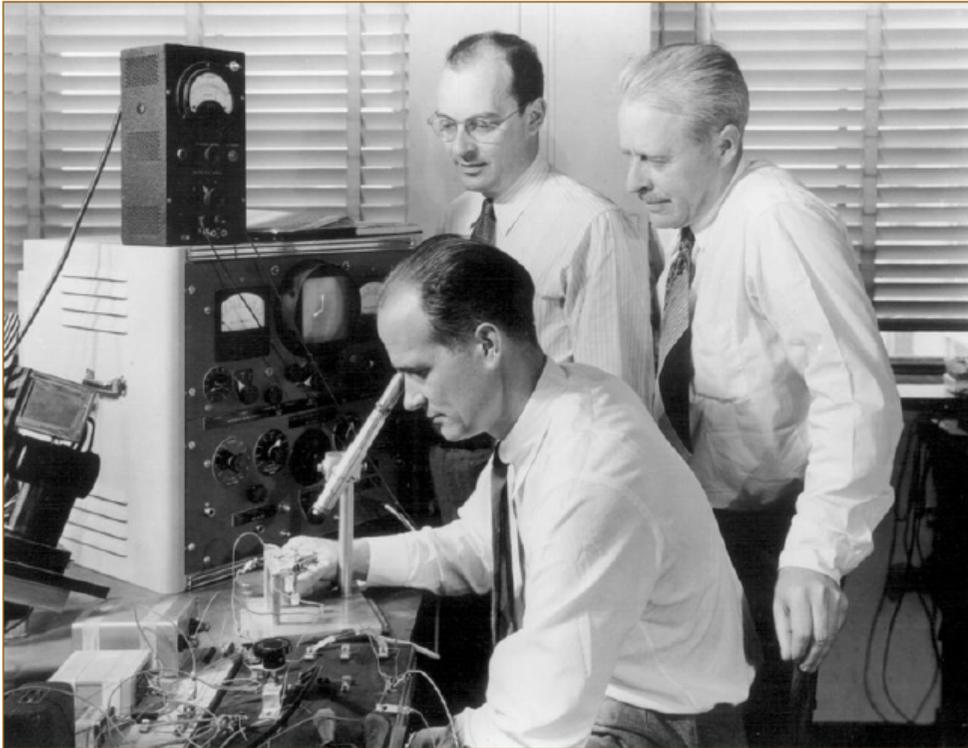
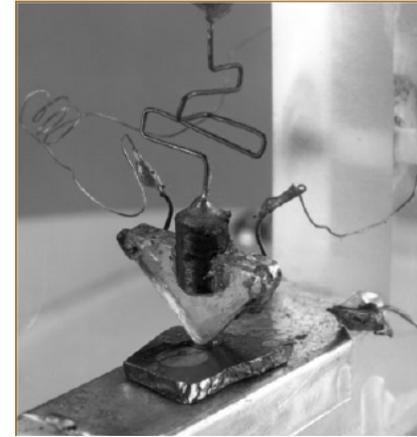
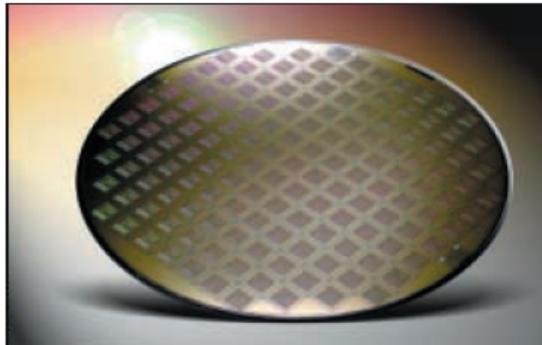


Figure 2.
The three inventors of the transistor: (left to right) William Shockley, John Bardeen, and Walter Brattain, who were awarded the 1956 Nobel Prize in physics.



1947

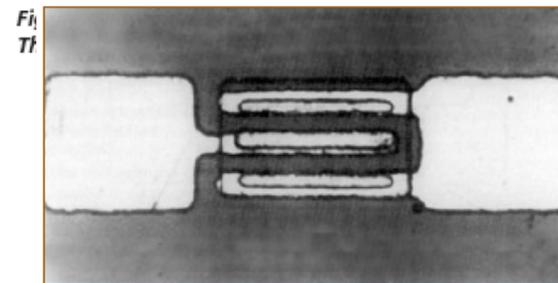
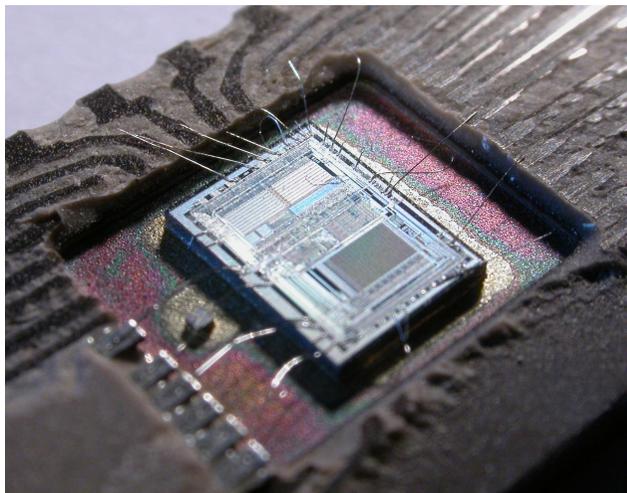
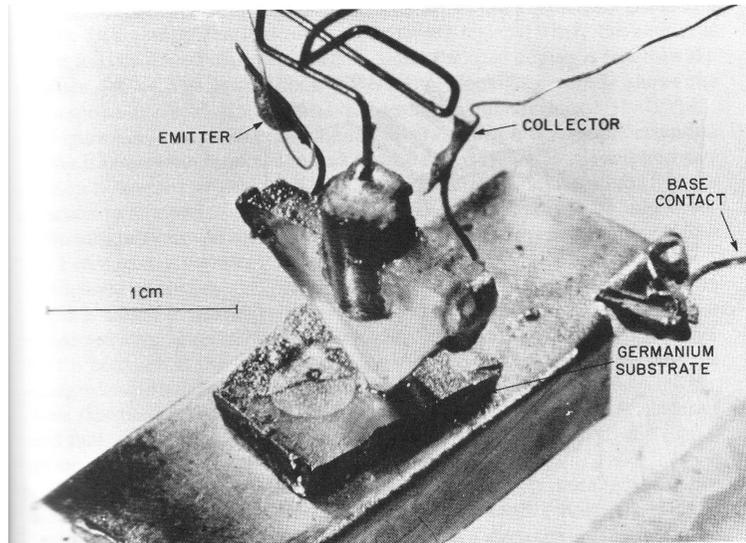
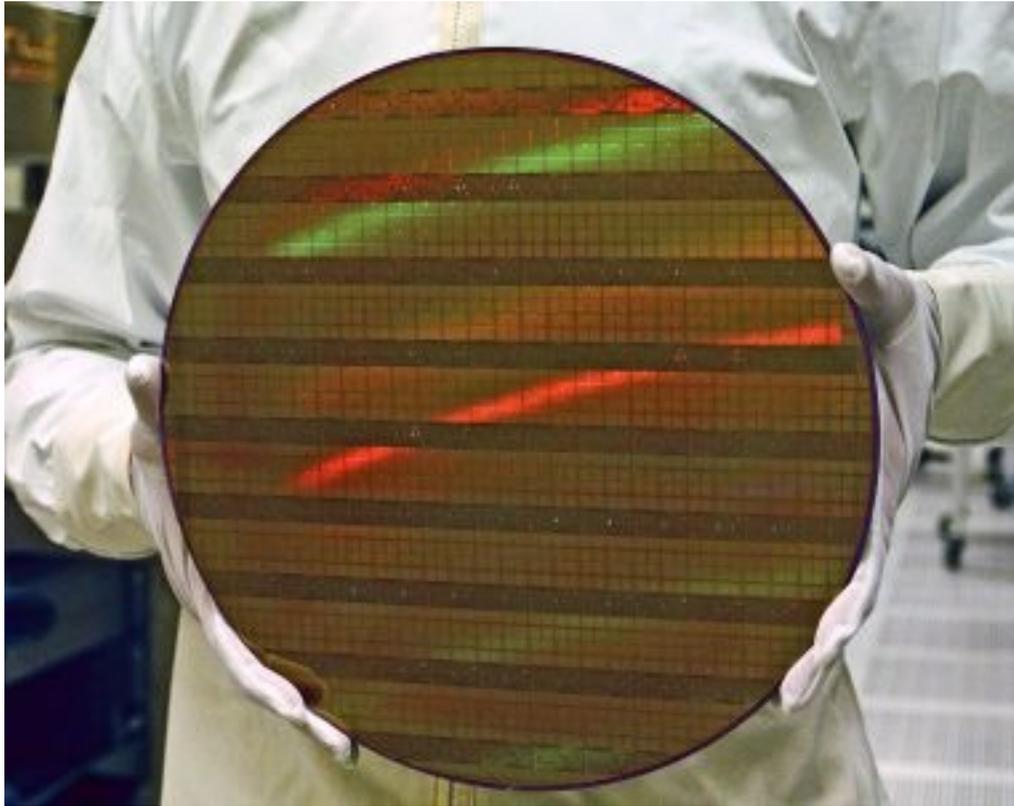


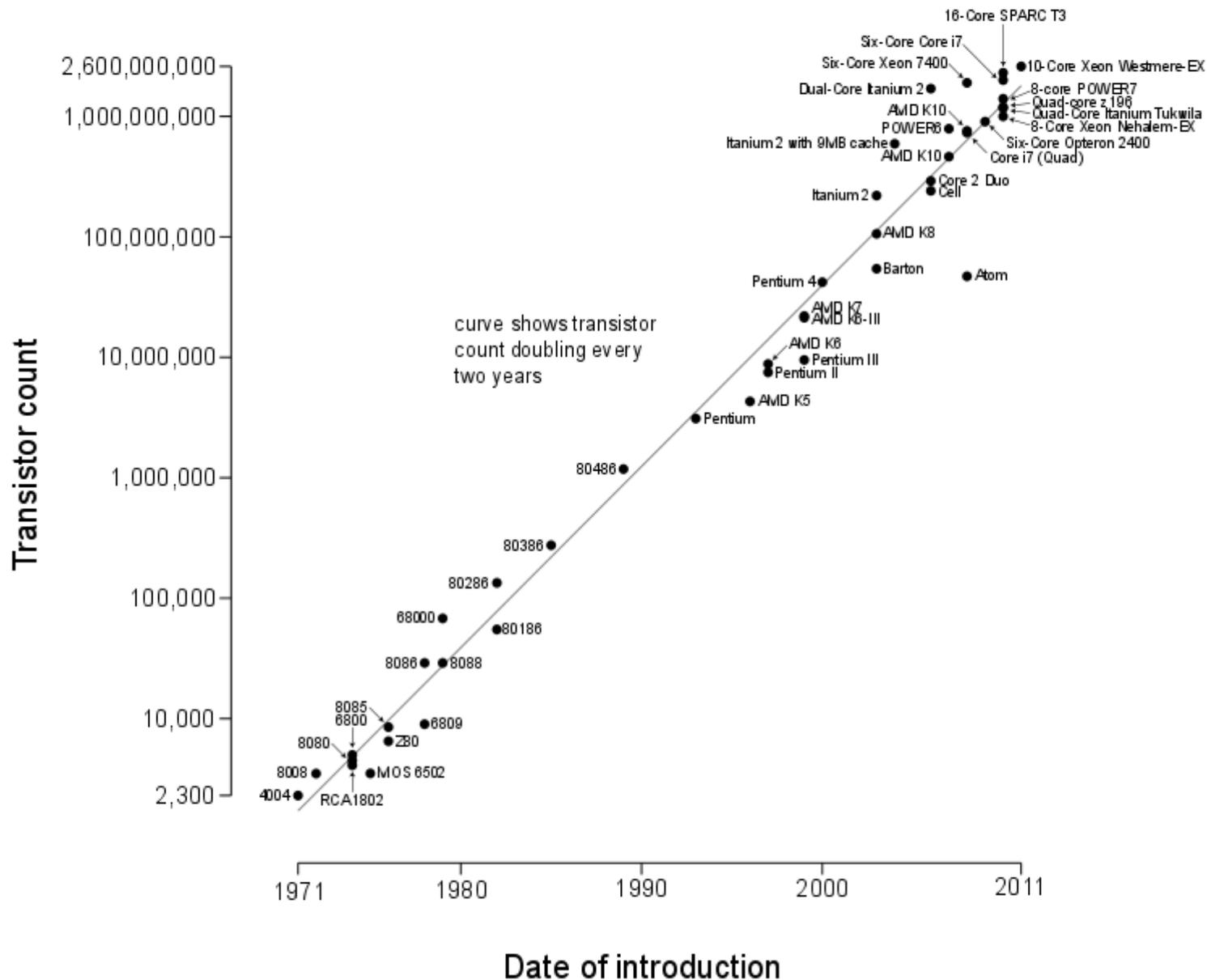
Figure 7.
A view of the surface of the planar transistor.

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



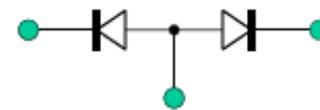
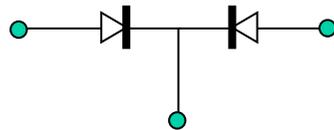
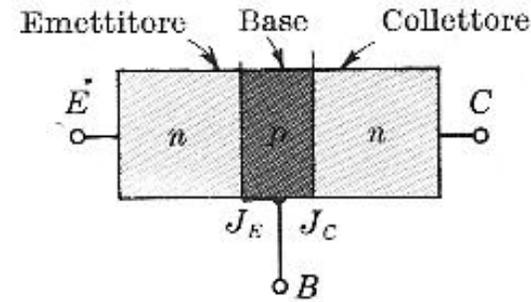
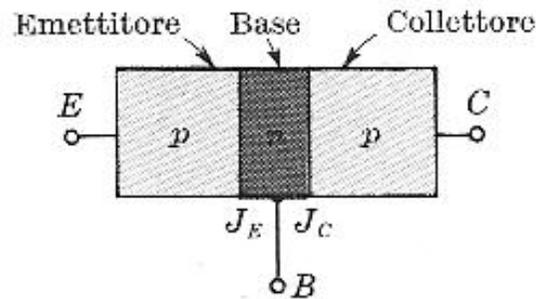


Microprocessor Transistor Counts 1971-2011 & Moore's Law



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:

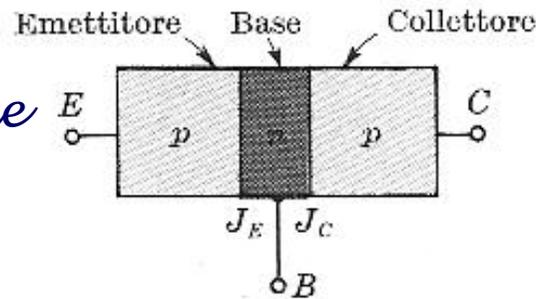


Le differenze di comportamento tra un transistor ed un semplice sistema di due diodi stanno nei fattori relativi di drogaggio ($N_E \gg N_B \gg N_C$) e nello spessore "sottile" della base, che permette il passaggio di corrente tra Emettitore e Collettore.

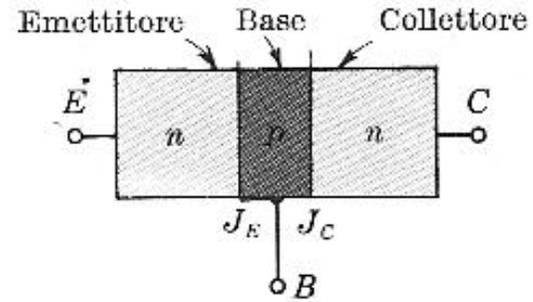
Il transistor bipolare a giunzione (BJT)

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.

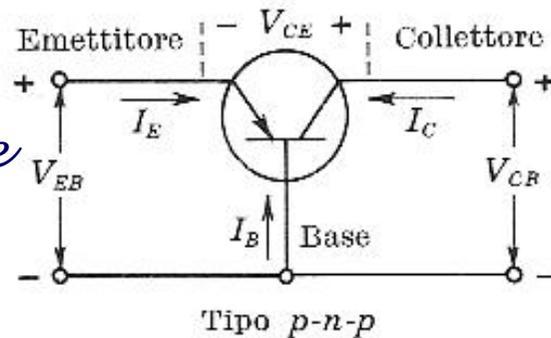
Rappresentazione schematica:



(a)

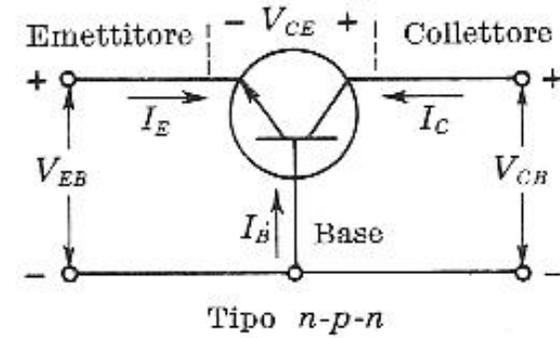


Rappresentazione circuitale:



Tipo p-n-p

(b)

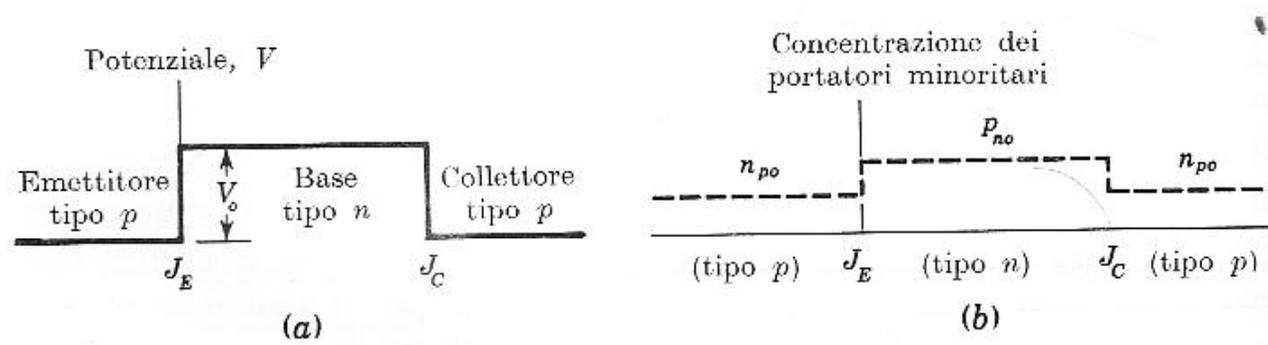


Tipo n-p-n

- Freccia tra Base Emettore 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 :

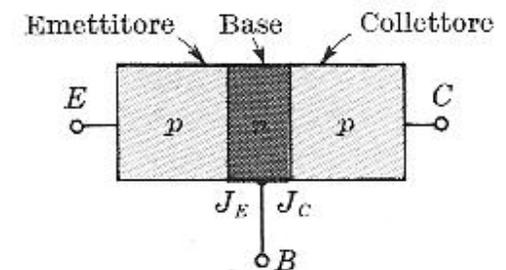
Se non si applicano tensioni di polarizzazione tutte le correnti devono essere nulle: valgono le considerazioni fatte per la singola giunzione p-n.



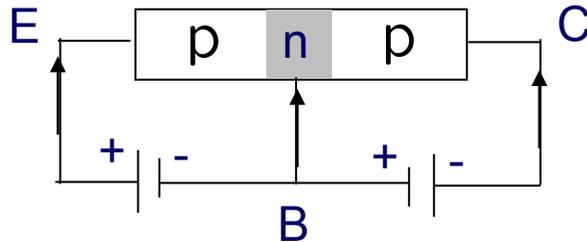
Il transistor polarizzato (premessa)

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

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

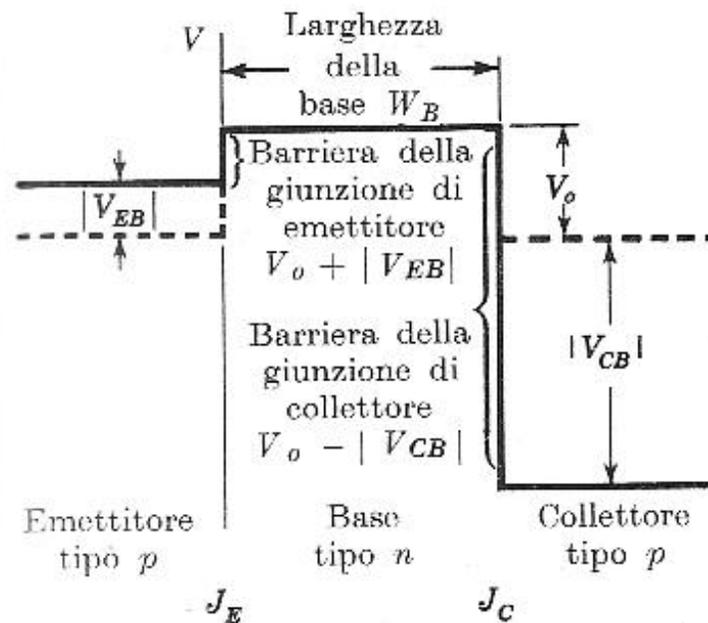


Il transistor polarizzato (1, base comune)



Partiamo da una configurazione in cui la giunzione Emittitore-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 Δ di quello della base

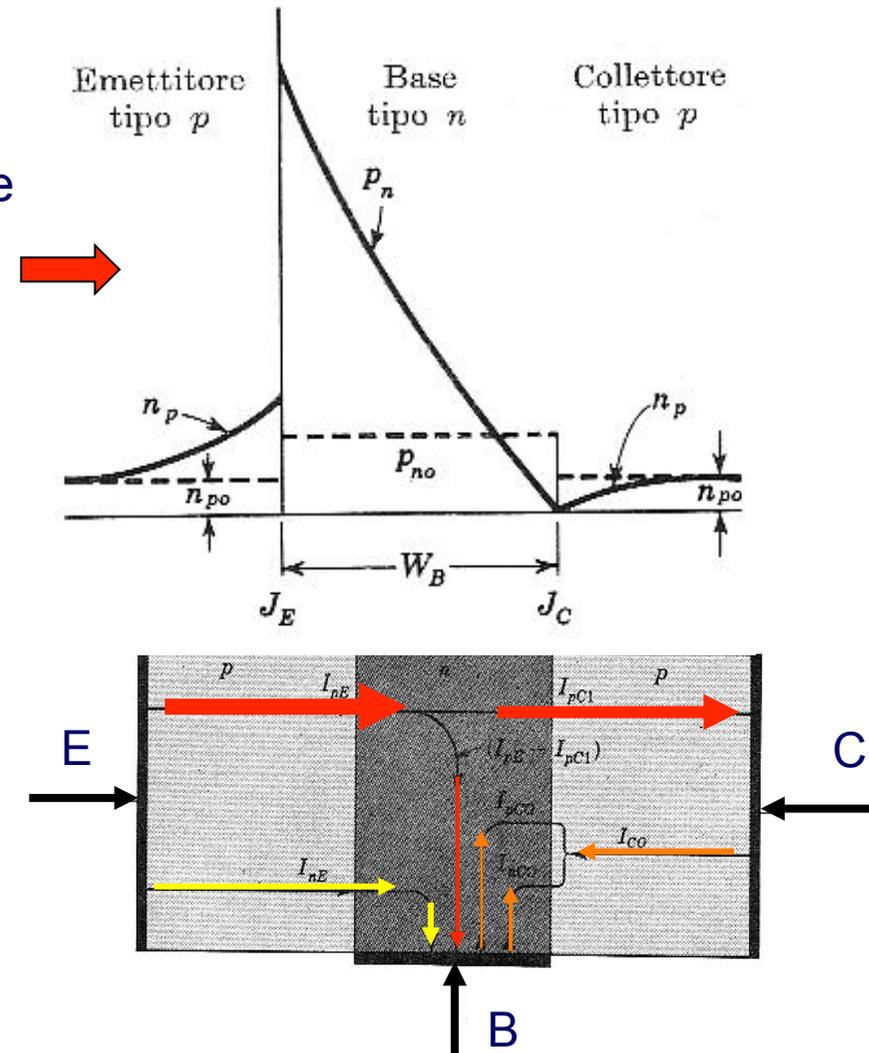
Distribuzione delle Correnti E/ B:

- ❖ 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 Δ 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 $J_{nE} \ll J_{pE}$)

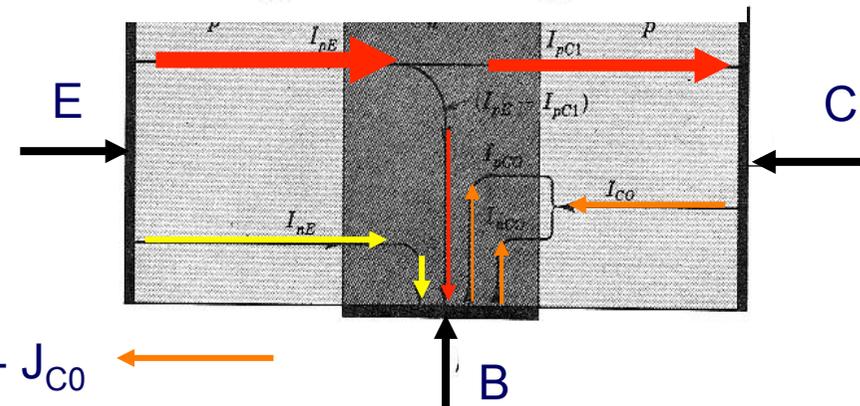
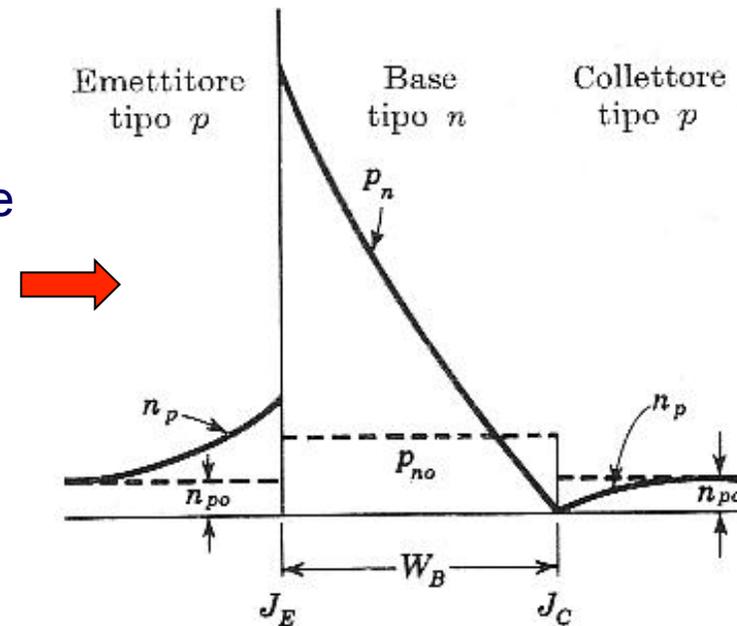
Correnti Collettore

- ❖ 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:

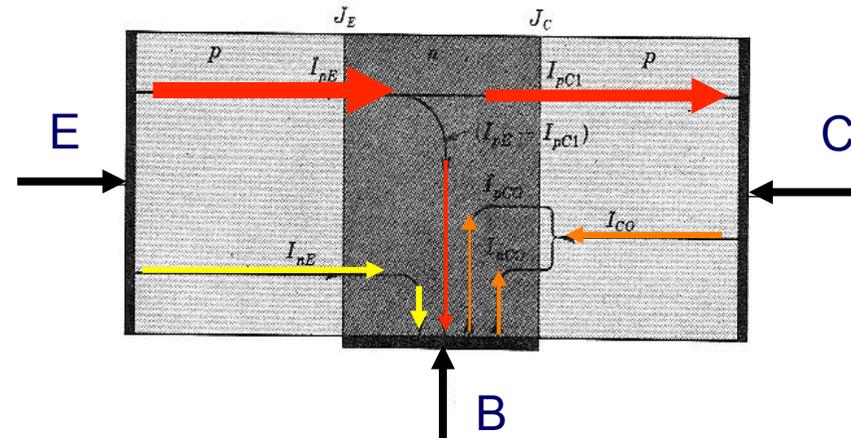
$$J_{pC1} = \alpha J_{pE}$$

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

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

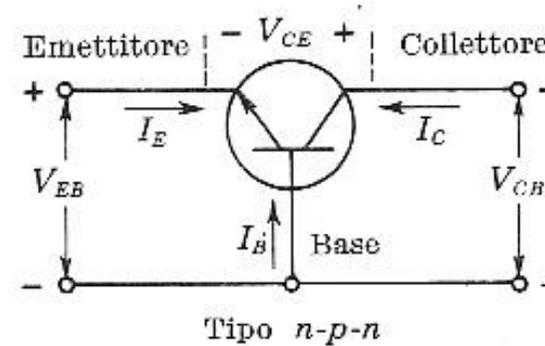
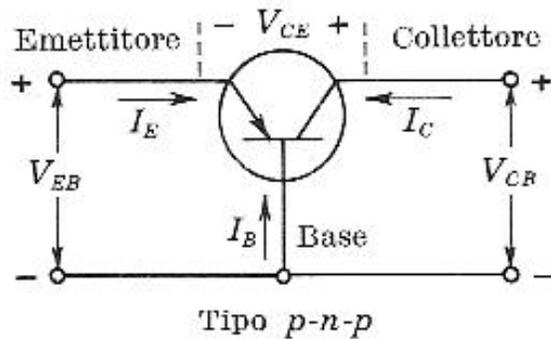
$$\alpha = -\frac{J_C - J_{C0}}{J_E}$$

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 ($J_E = 0$))

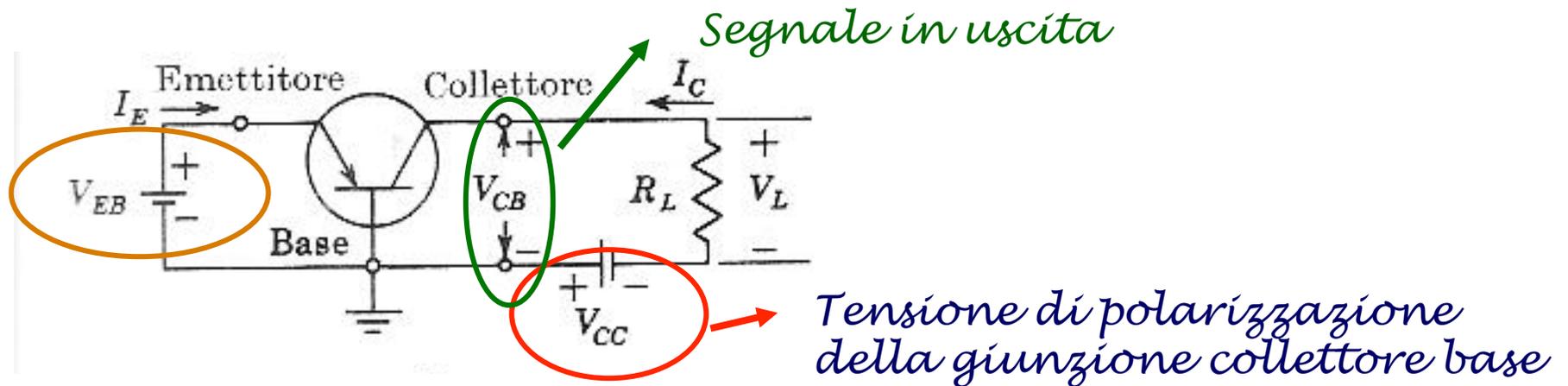


Amplificazione di tensione nel transistor a base comune:

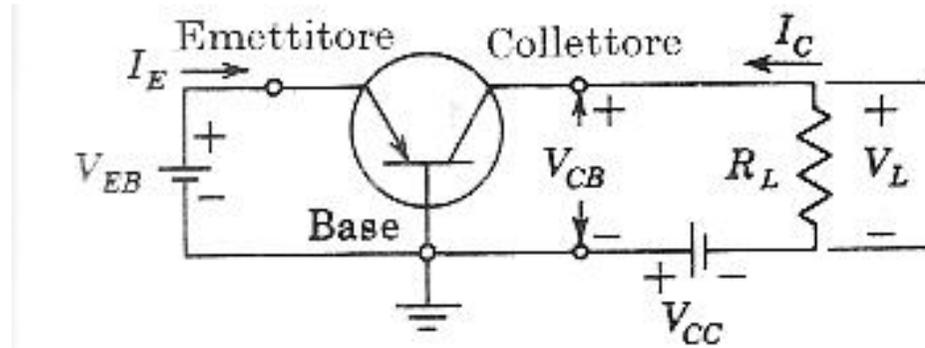
Base comune: la base è comune alla maglia di ingresso ed a quella di uscita.



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:

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

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

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

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

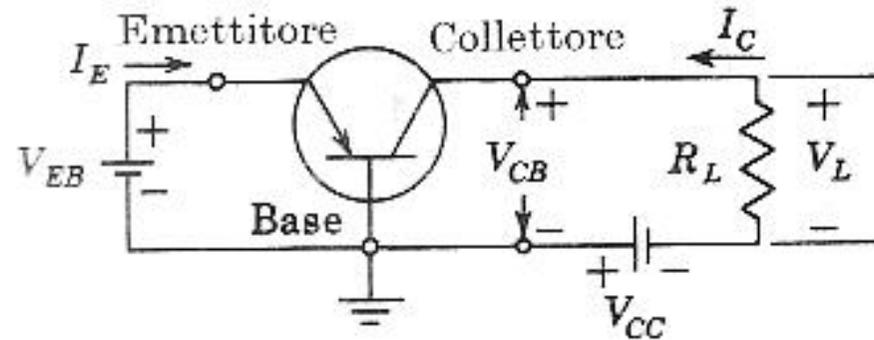
$$\alpha' \sim -1$$

$$r_e \sim 50 \Omega$$

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

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

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



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

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.

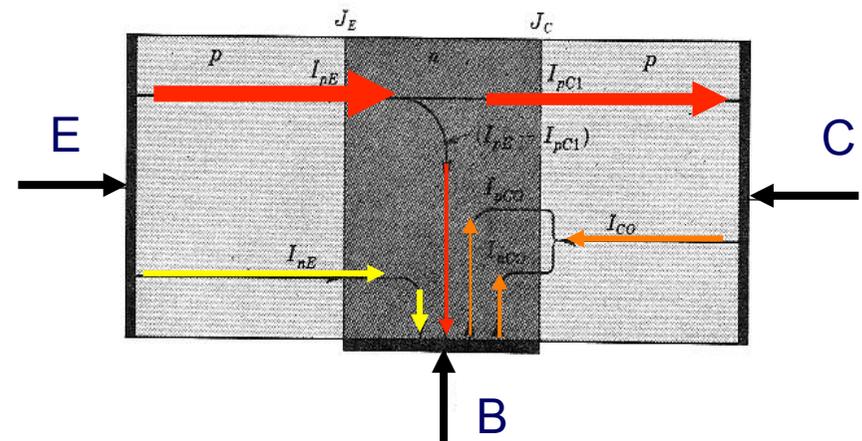
Ad esempio: come esprimere la corrente di collettore per una polarizzazione generica (anche positiva)

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):

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



Caratteristiche statiche di uscita del transistor a base comune

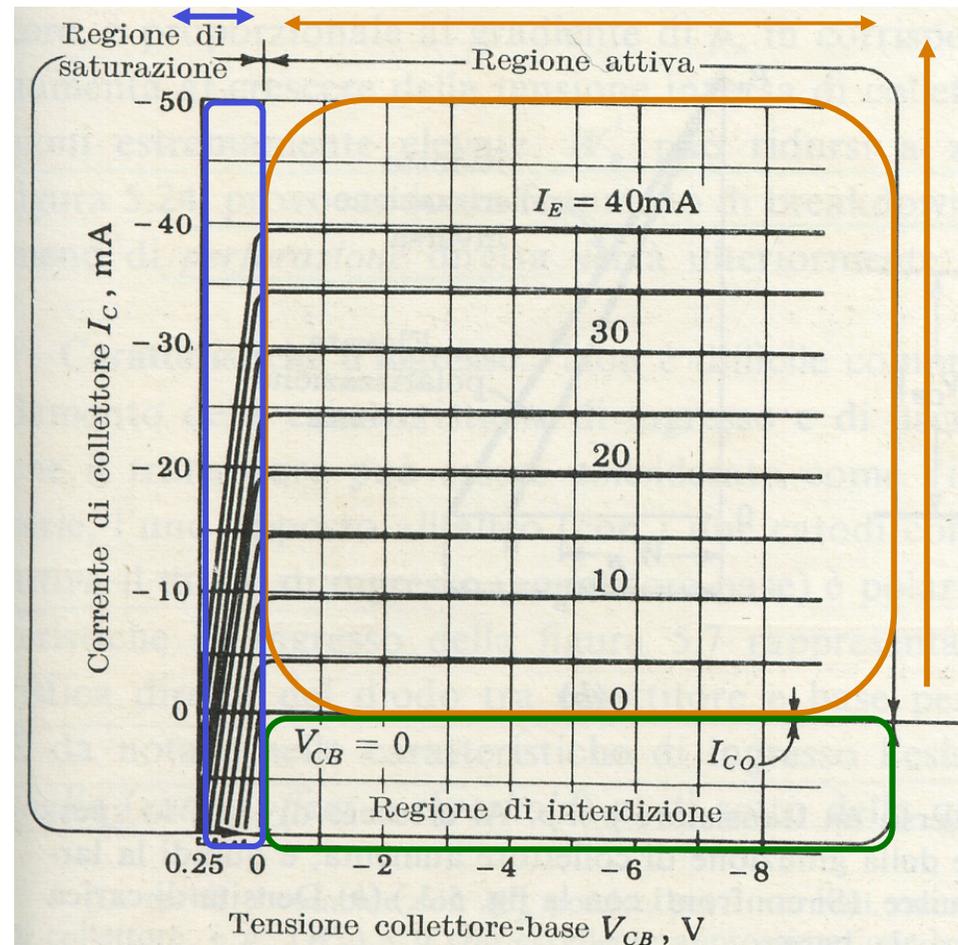
In generale potremo dire che la corrente di collettore è determinata dalla tensione di collettore (V_{CB}) e dalla corrente di ingresso (I_E)

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

- 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

Pol diretta C-B

Polarizzazione inversa C-B



Polarizzazione diretta E-B