

**A.R.I. - Sezione di Parma**

Corso di preparazione esame  
patente radioamatore 2019

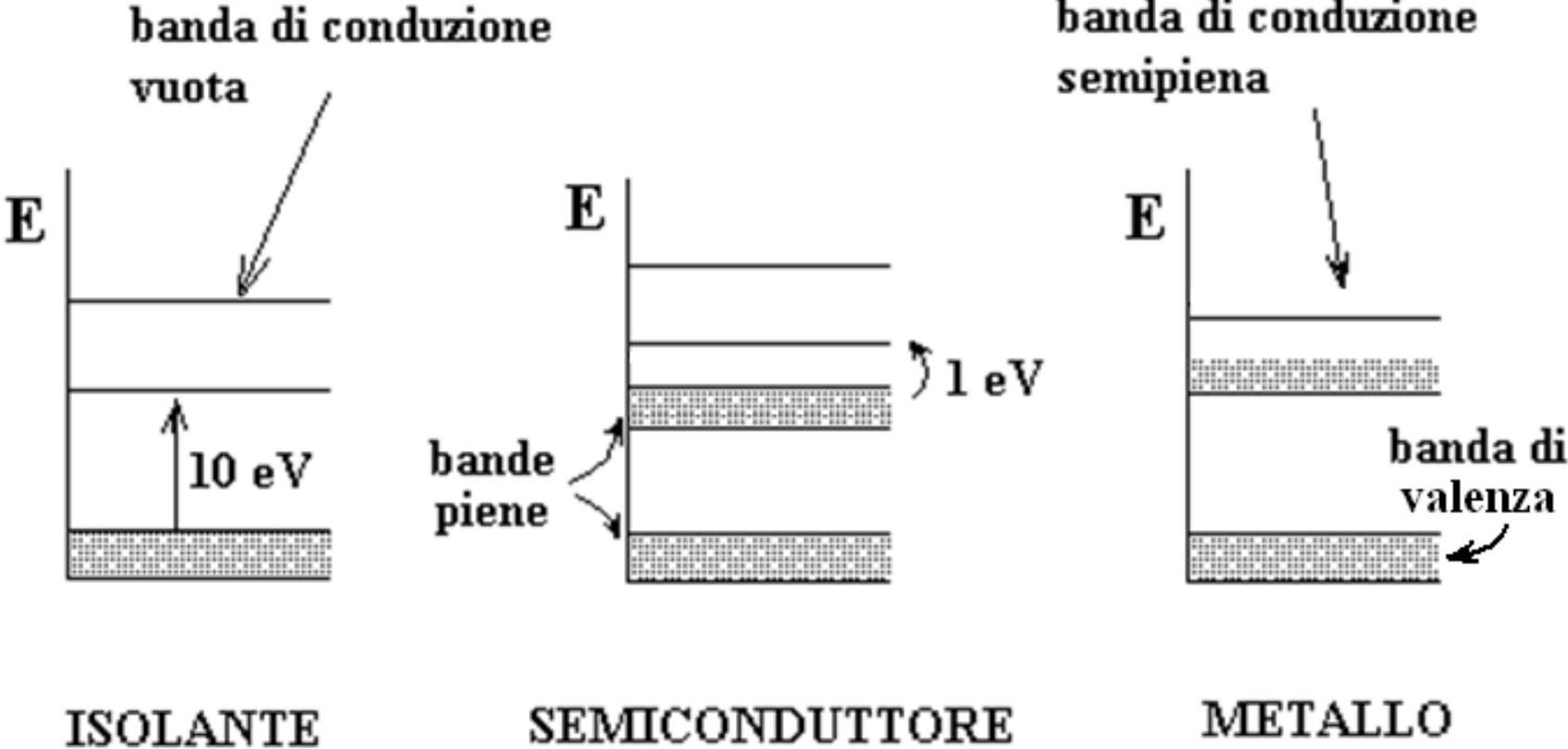
# **Semiconduttori**

**Carlo Vignali, I4VIL**

# TAVOLA PERIODICA DEGLI ELEMENTI DI MENDELEEV

<b>IA</b>																	<b>0</b>
<b>1</b> <b>H</b> 1.008											<b>2</b> <b>He</b> 4.003						
<b>3</b> <b>Li</b> 6.941	<b>4</b> <b>Be</b> 9.012											<b>5</b> <b>B</b> 10.81	<b>6</b> <b>C</b> 12.01	<b>7</b> <b>N</b> 14.01	<b>8</b> <b>O</b> 16.00	<b>9</b> <b>F</b> 19.00	<b>10</b> <b>Ne</b> 20.18
<b>11</b> <b>Na</b> 22.99	<b>12</b> <b>Mg</b> 24.31	<b>IIIA</b>	<b>IVA</b>	<b>VA</b>	<b>VIA</b>	<b>VIIA</b>	<b>VIII</b>			<b>IB</b>	<b>IIB</b>	<b>13</b> <b>Al</b> 26.98	<b>14</b> <b>Si</b> 28.09	<b>15</b> <b>P</b> 30.97	<b>16</b> <b>S</b> 32.06	<b>17</b> <b>Cl</b> 35.45	<b>18</b> <b>Ar</b> 39.95
<b>19</b> <b>K</b> 39.10	<b>20</b> <b>Ca</b> 40.08	<b>21</b> <b>Sc</b> 44.96	<b>22</b> <b>Ti</b> 47.90	<b>23</b> <b>V</b> 50.94	<b>24</b> <b>Cr</b> 52.00	<b>25</b> <b>Mn</b> 54.94	<b>26</b> <b>Fe</b> 55.85	<b>27</b> <b>Co</b> 58.93	<b>28</b> <b>Ni</b> 58.71	<b>29</b> <b>Cu</b> 63.55	<b>30</b> <b>Zn</b> 65.37	<b>31</b> <b>Ga</b> 69.72	<b>32</b> <b>Ge</b> 72.60	<b>33</b> <b>As</b> 74.92	<b>34</b> <b>Se</b> 78.96	<b>35</b> <b>Br</b> 79.90	<b>36</b> <b>Kr</b> 83.80
<b>37</b> <b>Rb</b> 85.47	<b>38</b> <b>Sr</b> 87.62	<b>39</b> <b>Y</b> 88.91	<b>40</b> <b>Zr</b> 91.22	<b>41</b> <b>Nb</b> 92.91	<b>42</b> <b>Mo</b> 95.94	<b>43</b> <b>Tc</b> (99)	<b>44</b> <b>Ru</b> 101.1	<b>45</b> <b>Rh</b> 102.9	<b>46</b> <b>Pd</b> 106.4	<b>47</b> <b>Ag</b> 107.9	<b>48</b> <b>Cd</b> 112.4	<b>49</b> <b>In</b> 114.8	<b>50</b> <b>Sn</b> 118.7	<b>51</b> <b>Sb</b> 121.8	<b>52</b> <b>Te</b> 127.6	<b>53</b> <b>I</b> 126.9	<b>54</b> <b>Xe</b> 131.3
<b>55</b> <b>Cs</b> 132.9	<b>56</b> <b>Ba</b> 137.3	<b>57</b> <b>La</b> 138.9	<b>72</b> <b>Hf</b> 178.5	<b>73</b> <b>Ta</b> 180.9	<b>74</b> <b>W</b> 183.9	<b>75</b> <b>Re</b> 186.2	<b>76</b> <b>Os</b> 190.2	<b>77</b> <b>Ir</b> 192.2	<b>78</b> <b>Pt</b> 195.1	<b>79</b> <b>Au</b> 197.0	<b>80</b> <b>Hg</b> 200.6	<b>81</b> <b>Tl</b> 204.4	<b>82</b> <b>Pb</b> 207.2	<b>83</b> <b>Bi</b> 209.0	<b>84</b> <b>Po</b> (210)	<b>85</b> <b>At</b> (210)	<b>86</b> <b>Rn</b> (222)
<b>87</b> <b>Fr</b> (223)	<b>88</b> <b>Ra</b> (226)	<b>89</b> <b>Ac</b> (227)															
<b>Lanthanides</b>			<b>58</b> <b>Ce</b> 140.1	<b>59</b> <b>Pr</b> 140.9	<b>60</b> <b>Nd</b> 144.2	<b>61</b> <b>Pm</b> (147)	<b>62</b> <b>Sm</b> 150.4	<b>63</b> <b>Eu</b> 152.0	<b>64</b> <b>Gd</b> 157.3	<b>65</b> <b>Tb</b> 158.9	<b>66</b> <b>Dy</b> 162.5	<b>67</b> <b>Ho</b> 164.9	<b>68</b> <b>Er</b> 167.3	<b>69</b> <b>Tm</b> 168.9	<b>70</b> <b>Yb</b> 173.0	<b>71</b> <b>Lu</b> 175.0	
<b>Actinides</b>			<b>90</b> <b>Th</b> 232.0	<b>91</b> <b>Pa</b> (231)	<b>92</b> <b>U</b> 238.0	<b>93</b> <b>Np</b> (237)	<b>94</b> <b>Pu</b> (242)	<b>95</b> <b>Am</b> (247)	<b>96</b> <b>Cm</b> (248)	<b>97</b> <b>Bk</b> (247)	<b>98</b> <b>Cf</b> (251)	<b>99</b> <b>Es</b> (254)	<b>100</b> <b>Fm</b> (253)	<b>101</b> <b>Md</b> (256)	<b>102</b> <b>No</b> (254)	<b>103</b> <b>Lr</b> (257)	

Quando più atomi sono legati insieme in una struttura cristallina o no, vedono i livelli energetici degli elettroni più esterni allargarsi in bande di energia.



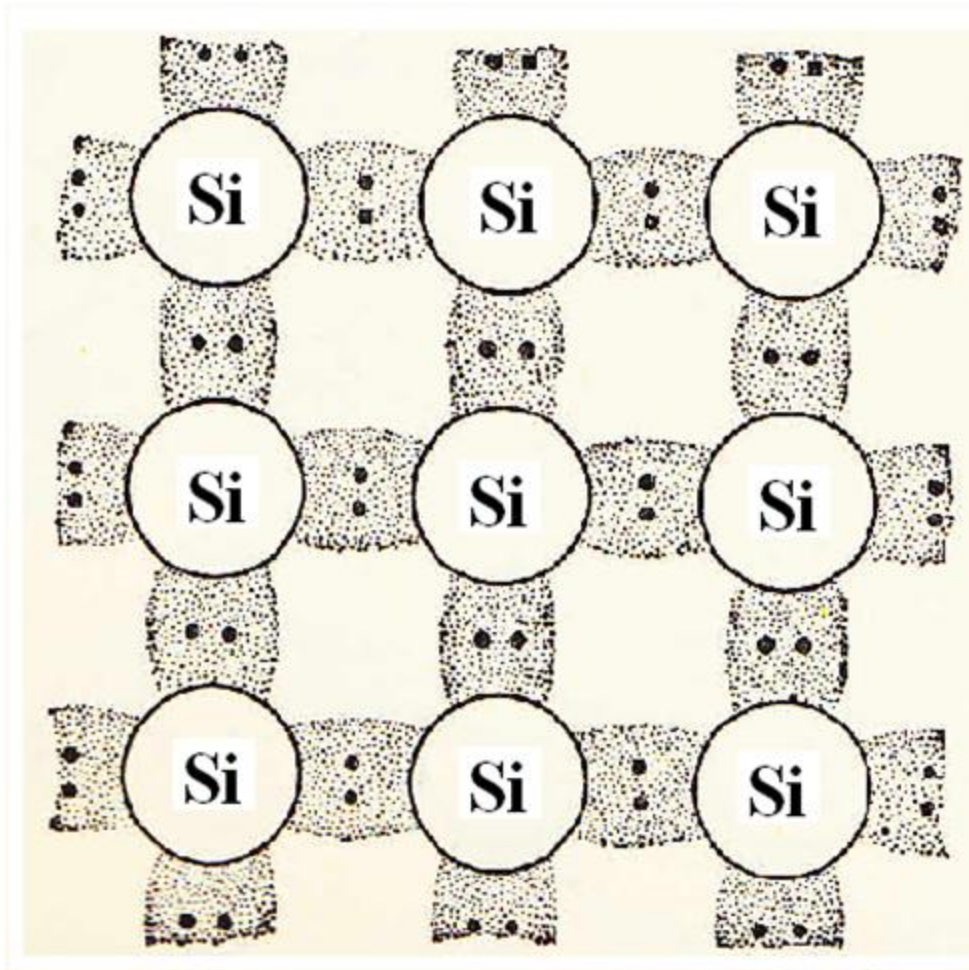
# SEMICONDUTTORI

Un semiconduttore è un materiale che ha un'apprezzabile conducibilità a temperatura ambiente che diminuisce all'abbassarsi della temperatura.

La banda proibita (gap) che separa la banda di valenza dalla banda di conduzione è abbastanza piccola ( $< 1$  eV) in modo che, già a temperatura ambiente ( $kT = 1/40$  eV), alcuni elettroni della banda di valenza riescano a “saltare” in banda di conduzione.

Quando l'elettrone è “saltato” nella banda di conduzione lascia una “**lacuna**” in banda di valenza che, essendo una mancanza di una carica negativa, si comporta come una carica positiva.

Entrambe le bande contribuiscono alla conduzione perché questa si ha quando le bande non sono completamente piene. Gli elettroni in banda di conduzione sono chiamati **elettroni liberi** e gli stati lasciati liberi nella banda di valenza sono chiamati **lacune**.



## Struttura del silicio puro cristallino

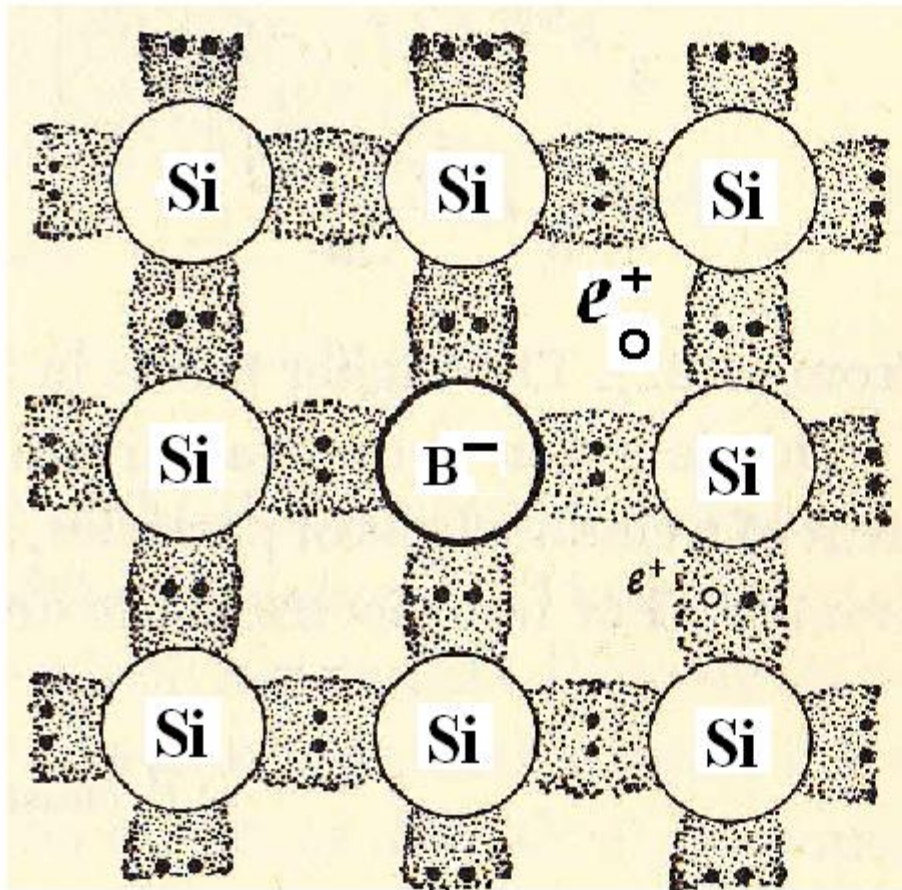
Le funzioni d'onda tendono a concentrare la densità elettronica lungo i 'legami', pur estendendosi per tutto il cristallo.

Ogni atomo di silicio mette in compartecipazione i suoi elettroni più esterni con i suoi vicini.

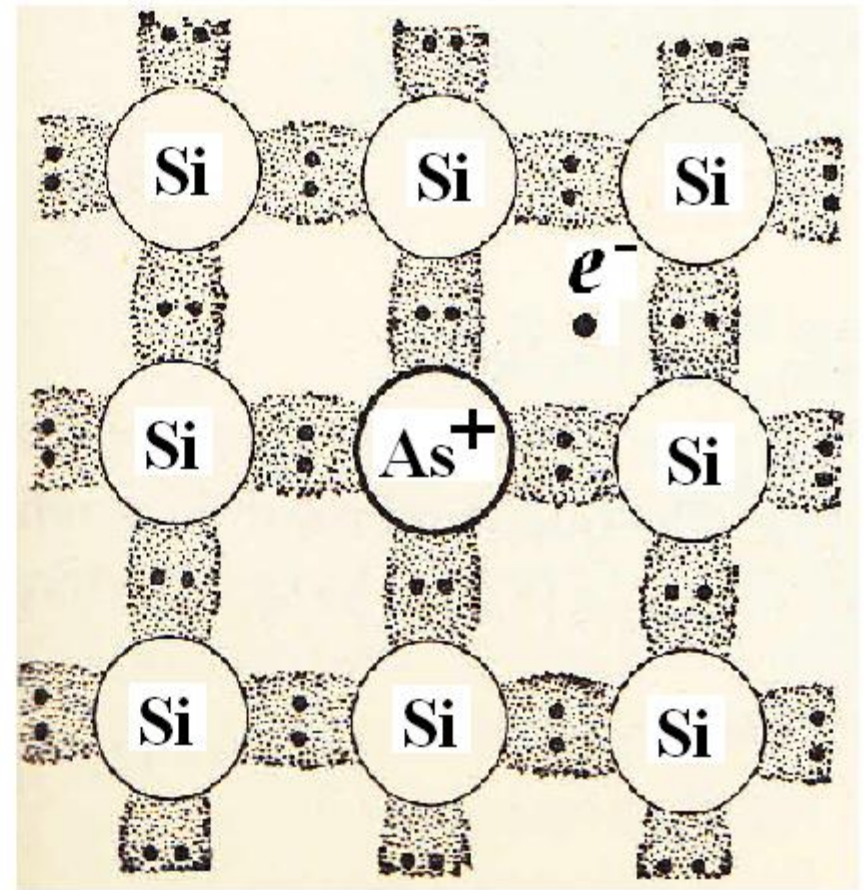
C'è sempre una nuvola di alta concentrazione di elettroni, equivalente ad un paio di elettroni con spin antiparallelo, nelle regioni comprese tra gli atomi di Si.

struttura elettronica del silicio puro

# DROGAGGIO DEL SILICIO



silicio drogato con boro



silicio drogato con arsenico

# Droganti *donori* ed *accettori*

Il silicio puro presenta una conduttività molto bassa (semiconduttore intrinseco) che aumenta sensibilmente se viene “drogato” con impurezze di atomi del Gruppo III o V del Sistema Periodico (semiconduttore estrinseco).

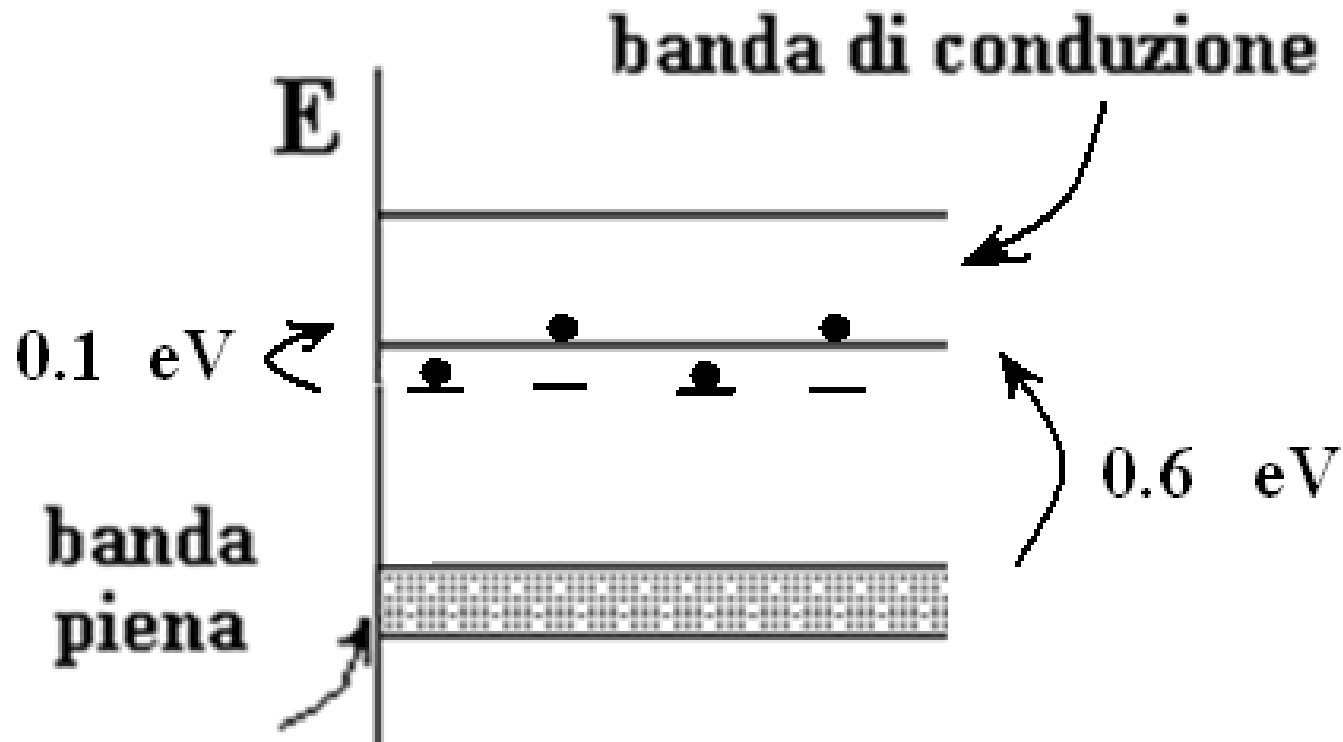
Gli atomi del Gruppo V hanno un elettrone esterno in più che rimane poco legato e finisce in banda di conduzione.

Gli atomi del Gruppo III hanno un elettrone esterno in meno del silicio (o germanio) e tendono a prelevare un elettrone dalla banda di valenza e crearvi una lacuna.

Un semiconduttore con eccesso di elettroni è detto **semiconduttore di tipo N**, mentre un semiconduttore con eccesso di lacune è detto **semiconduttore di tipo P**.

I droganti più comuni sono il fosforo, l'arsenico e l'antimonio (del Gruppo V) (droganti **donori**) per i semiconduttori di tipo N ed il Boro (del Gruppo III) (droganti **accettori**) per semiconduttori di tipo P.

# SEMICONDUTTORE DI TIPO N

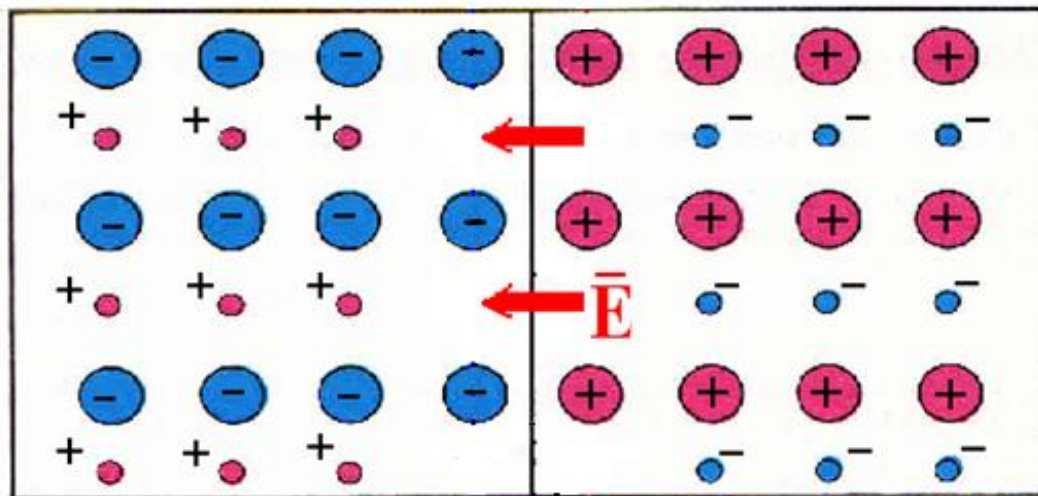
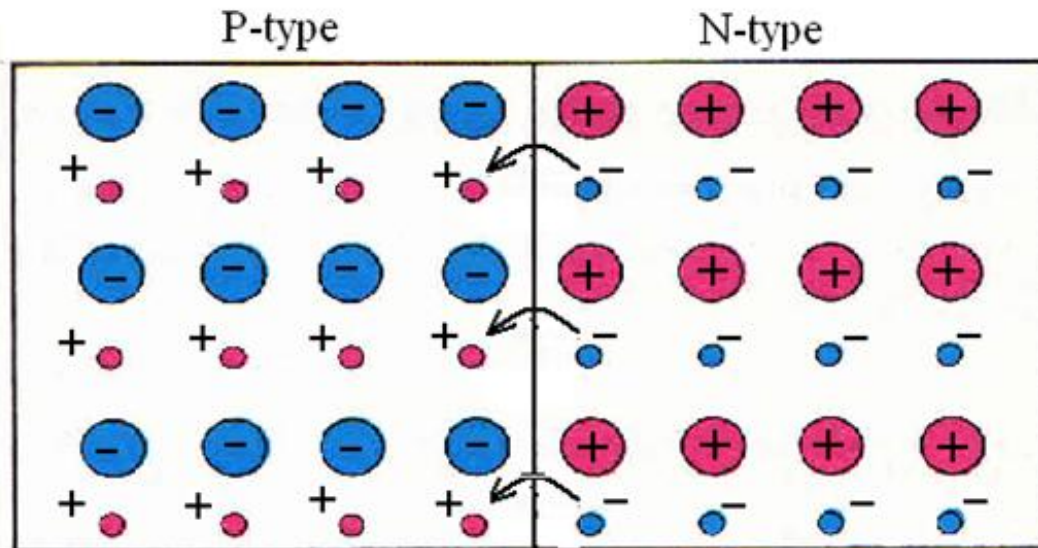


I livelli donori sono "localizzati" e posti molto vicino al fondo della banda di conduzione.

A temperatura ambiente il  $kT$  vale circa  $1/40 \text{ eV}$  ( $0.025 \text{ eV}$ ) e i livelli donori sono facilmente ionizzati, il che dà luogo ad elettroni liberi in banda di conduzione.



# GIUNZIONE PN



depletion layer (strato di svuotamento)

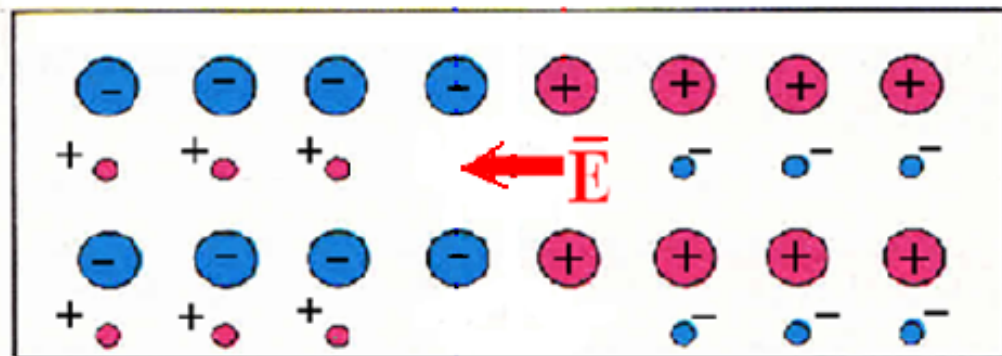
si ha diffusione degli elettroni dalla zona N a colmare le lacune nella zona P.

Si crea uno strato di svuotamento (privo di cariche mobili) e si crea un campo elettrico  $E$  dovuto agli ioni dei due strati che, invece, non possono muoversi.

Questo campo elettrico impedisce ulteriore diffusione delle cariche mobili.

zona P

zona N

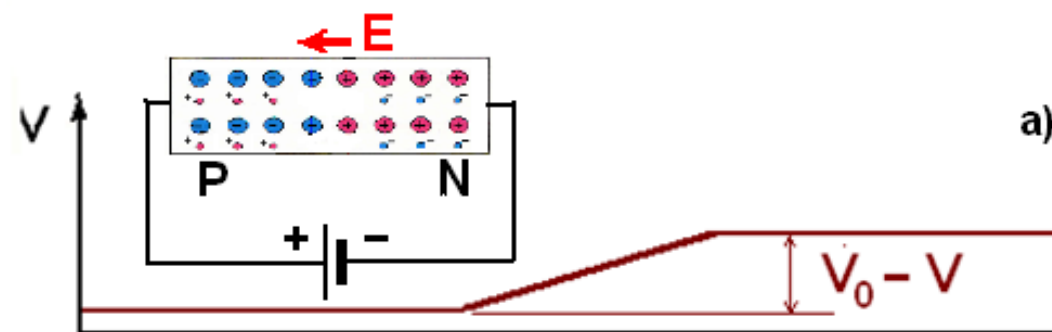
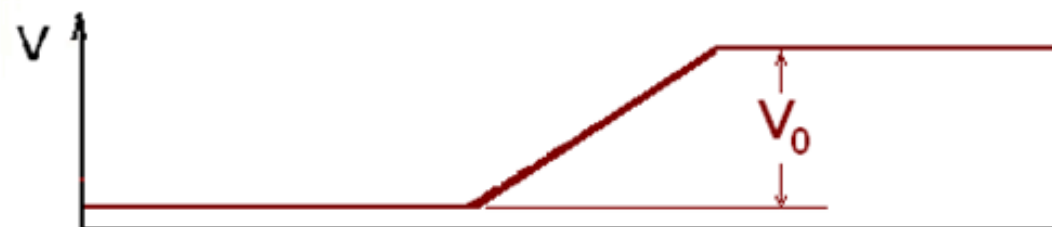


Il campo elettrico  $E$  è nullo al di fuori della *barriera*

La zona P è equipotenziale e così la zona N.

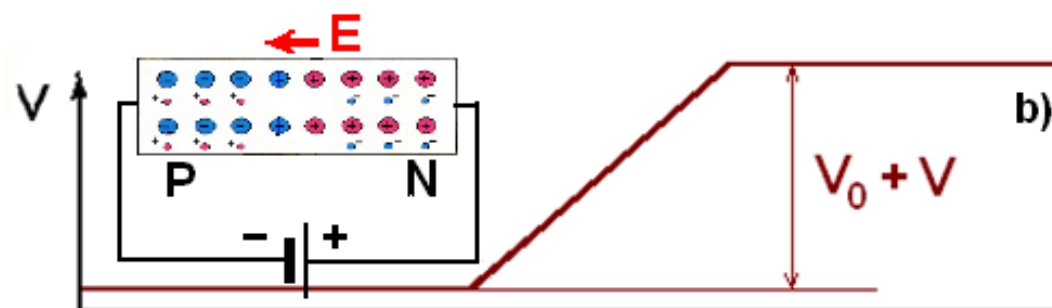
Il campo elettrico  $E$  che si instaura nella zona di transizione all'equilibrio è collegato alla differenza di potenziale tra la zona P e la zona N.

$V_0$  è indicato come *potenziale di contatto*



a)

applicando una tensione esterna  $V$ , a seconda del segno, è possibile abbassare o innalzare il potenziale attraverso la barriera e spostare la condizione di equilibrio.

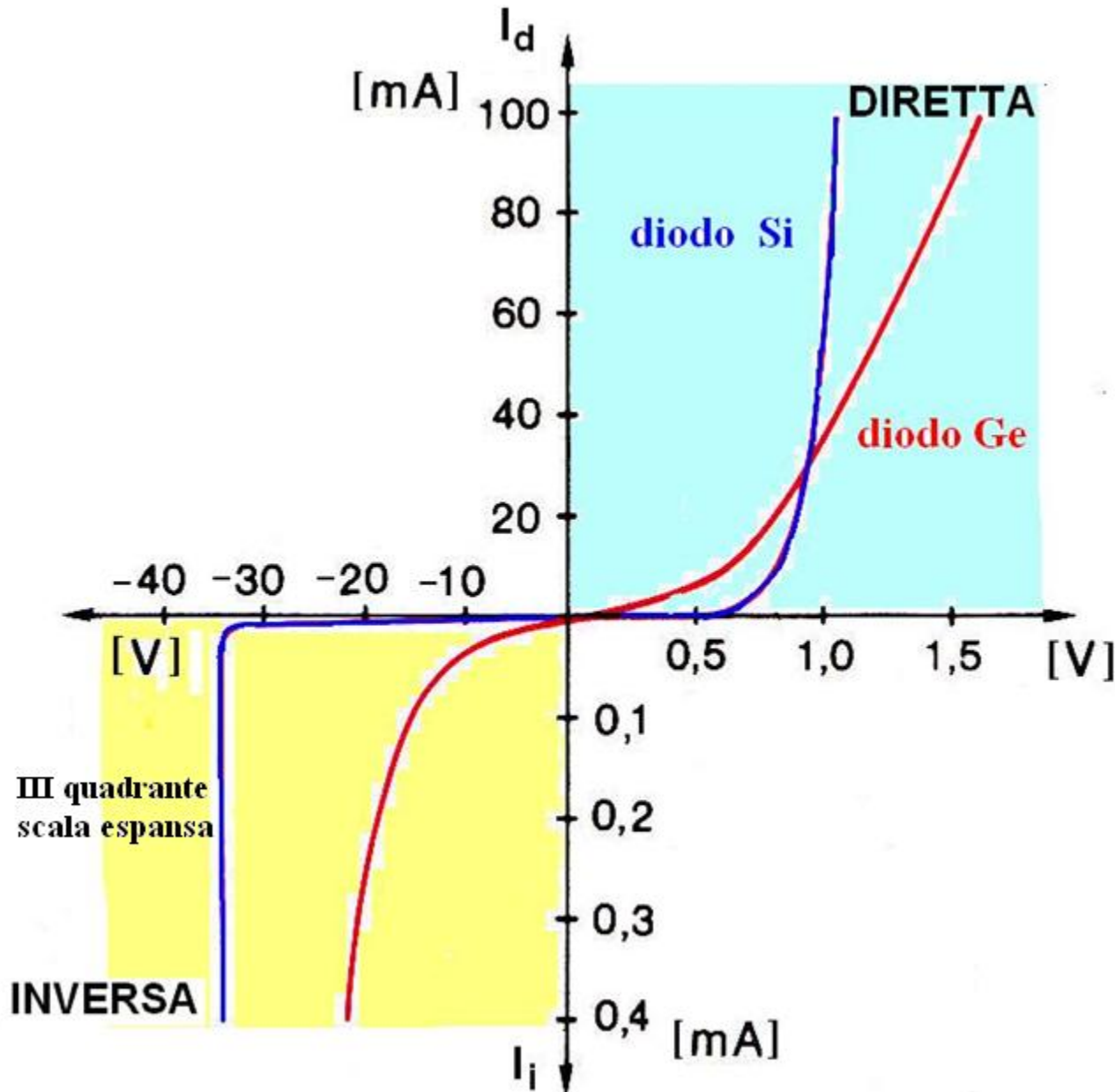


b)

a) polarizzazione diretta

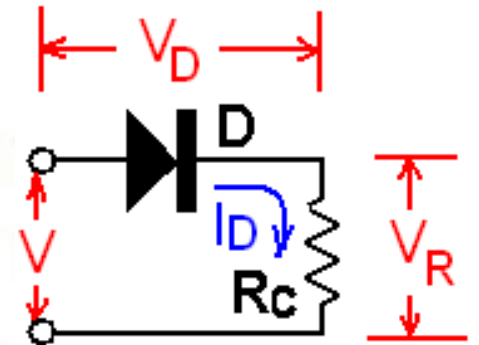
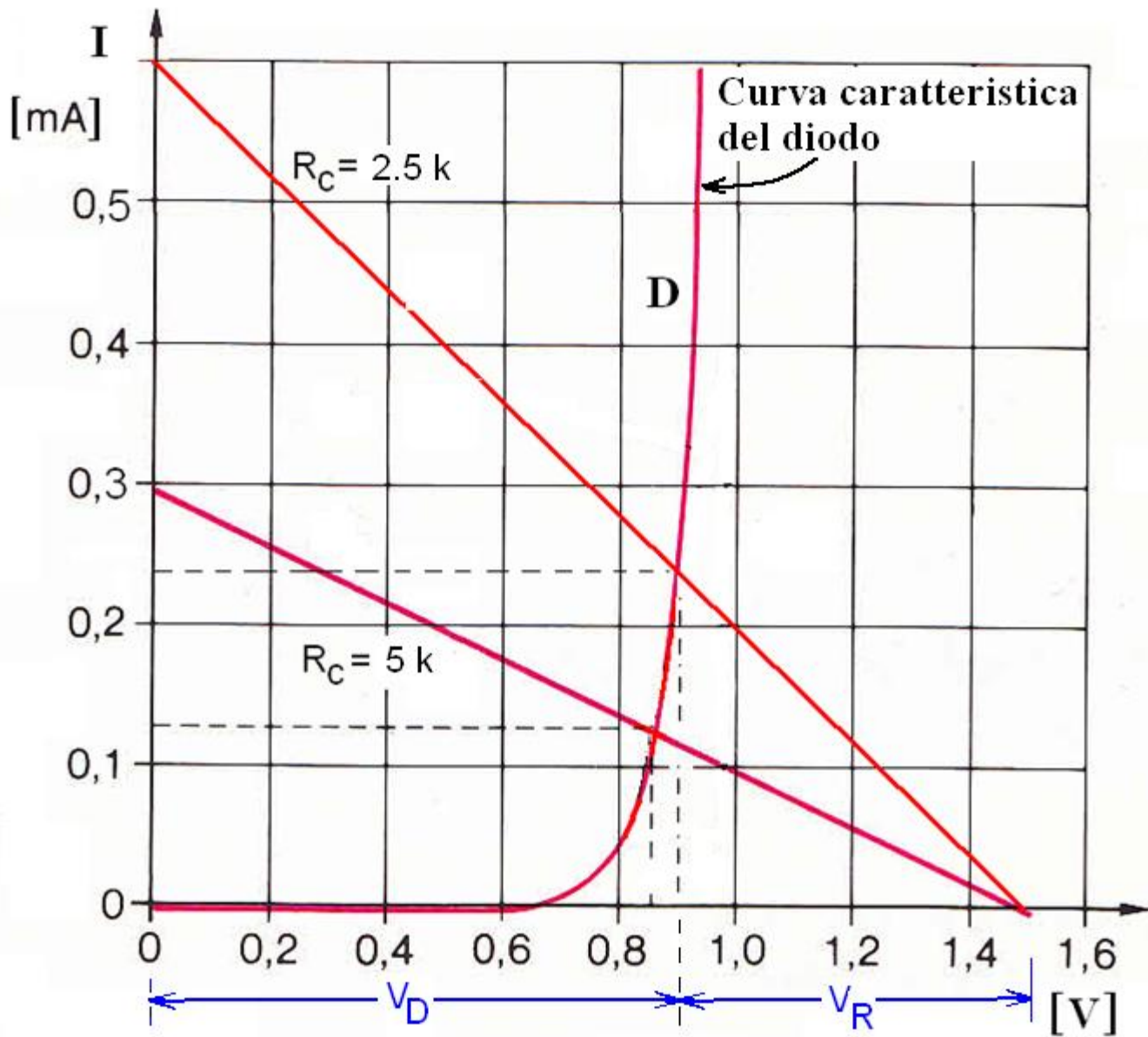
b) polarizzazione inversa

## CARATTERISTICA I-V DI GIUNZIONE PN



Il diodo polarizzato direttamente lascia scorrere corrente quando ai suoi capi cade un tensione maggiore di circa 0.2 V (diodo al germanio) o di circa 0.6 V (diodo al silicio).

Polarizzato inversamente offre resistenza anche molto elevata, a meno di giungere alla tensione di rottura



Esempio:  $V = 1.5 \text{ V}$

Se  $R_C = 2.5 \text{ k}\Omega$ ,  
 $I_D = 0.23 \text{ mA}$   
 $V_D = 0.9 \text{ V}$   
 $V_R = V - V_D = 0.6 \text{ V}$   
 $R_D = V_D / I_D = 2.6 \text{ k}\Omega$

Se  $R_C = 5.0 \text{ k}\Omega$ ,  
 $I_D = 0.12 \text{ mA}$   
 $V_D = 0.85 \text{ V}$   
 $V_R = V - V_D = 0.65 \text{ V}$   
 $R_D = V_D / I_D = 5.4 \text{ k}\Omega$

La retta di carico rappresenta tutti i valori possibili di  $I$  e  $V$  in un dispositivo non lineare (diodo, transistor, tubo elettronico), limitati dai valori di altre parti del circuito (resistenze e tensioni di alimentazione).

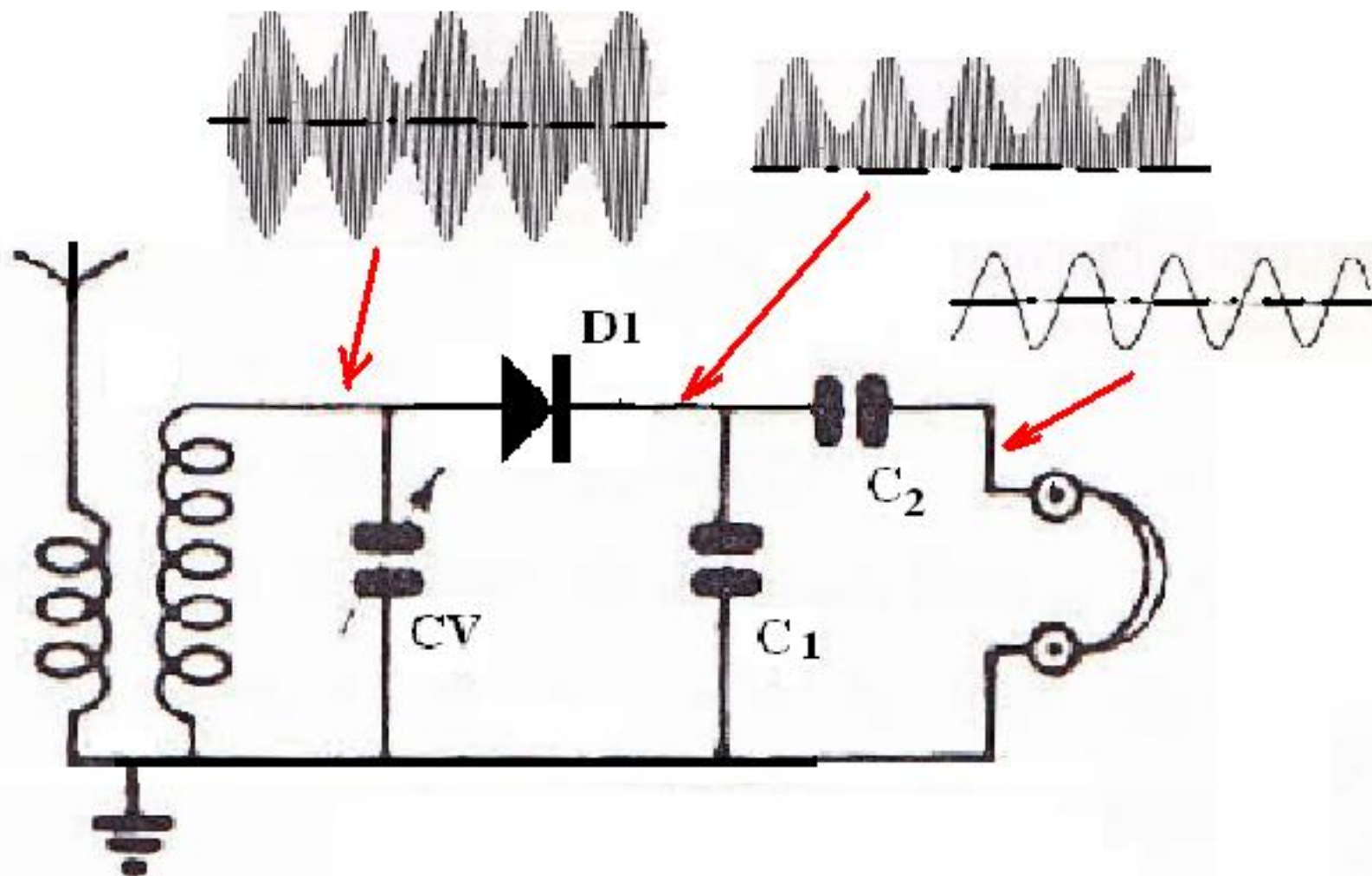
La retta è tracciata tra il punto dell'asse  $I$  dove la corrente è max. (dispositivo supposto in corto circuito; corrente limitata dalla resistenza esterna) ed il punto sull'asse  $V$  rappresentante la tensione di alimentazione.

La caratteristica diretta del diodo rappresenta tutti i punti possibili di funzionamento se non ci fosse la resistenza  $R$ .

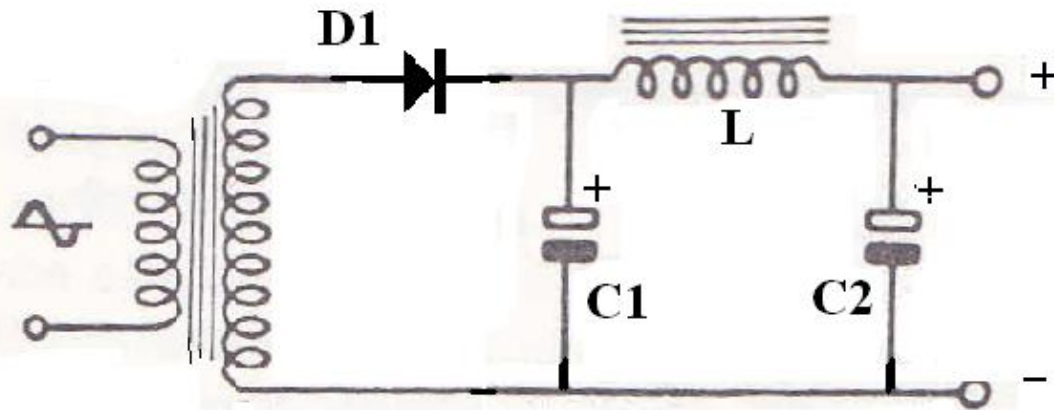
Il punto di funzionamento è dato dall'intersezione della retta di carico e della caratteristica diretta del diodo, chiamato punto di lavoro.

Più corrente circola nel diodo, minore è la sua resistenza  $R_D$ .

# RADIO RICEVITORE CON RIVELATORE A DIODO



## CIRCUITO RETTIFICATORE UNA SEMIONDA



Occorre 1 solo diodo

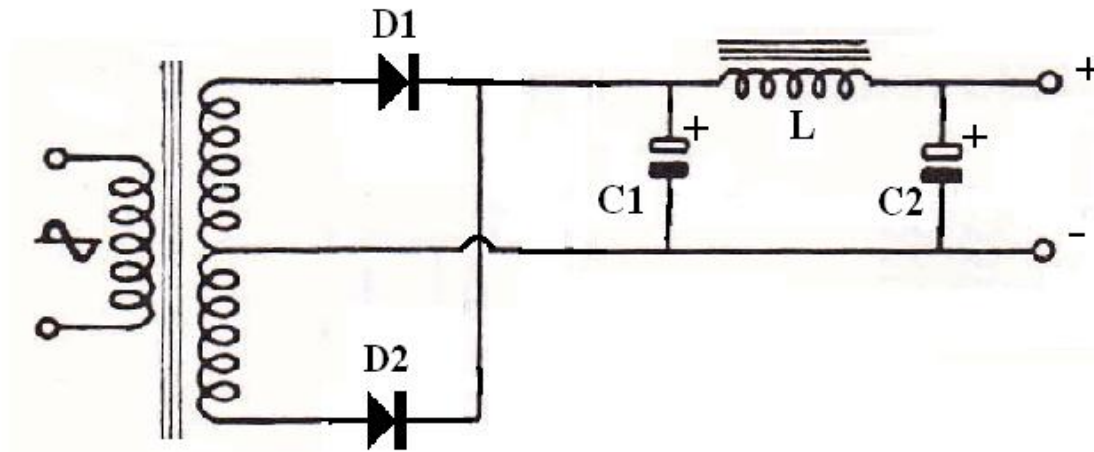


tensione rettificata  
dal solo diodo

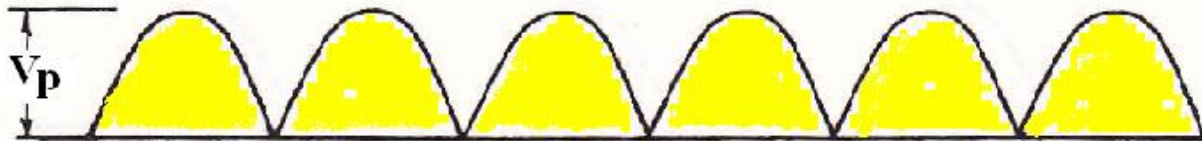


con circuito di filtro

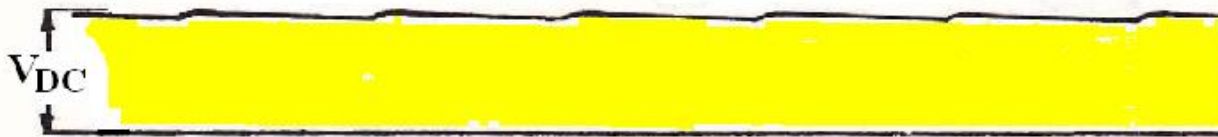
## CIRCUITO RETTIFICATORE A DUE SEMIONDE



Occorrono 2 diodi,  
ma con trasformatore  
a doppio secondario



tensione rettificata  
dai soli diodi

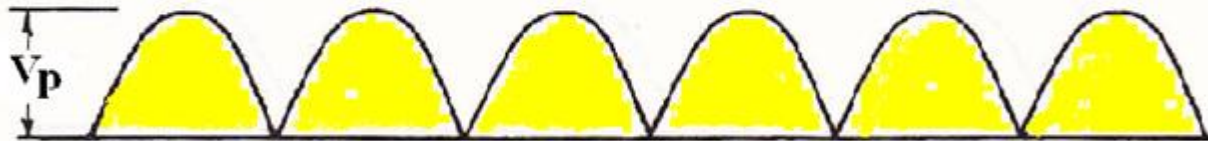
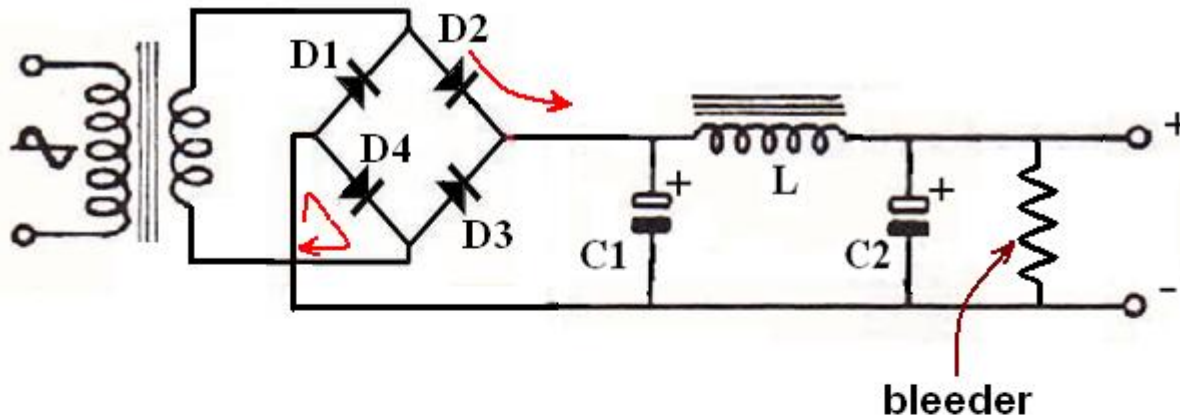


con circuito di filtro



## CIRCUITO RETTIFICATORE A PONTE

Occorrono 4 diodi e trasformatore con un solo secondario

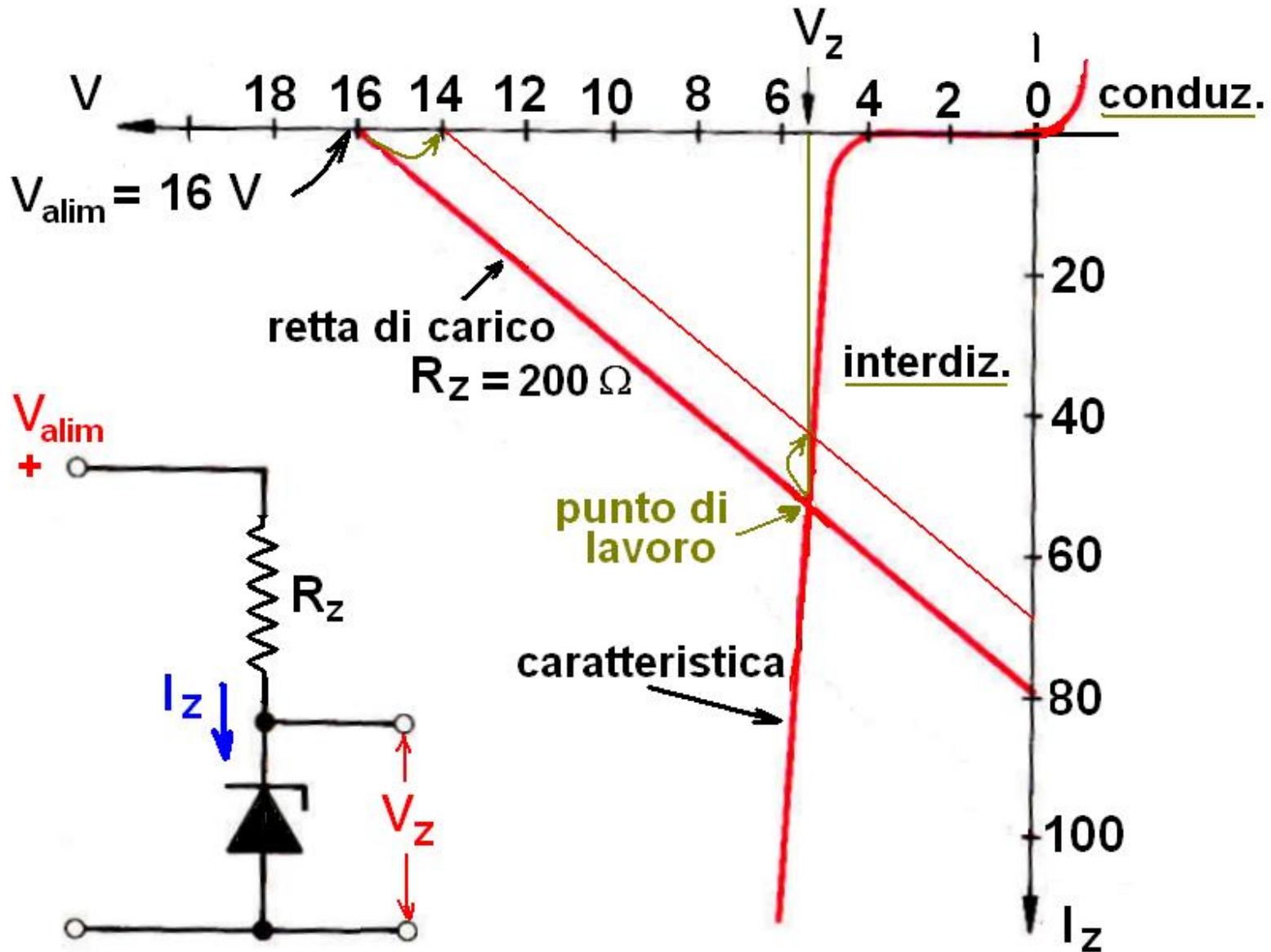


tensione rettificata dai soli diodi



con circuito di filtro

# DIODO ZENER



I diodi zener vengono utilizzati come sorgenti di tensione campione e come stabilizzatori di tensione.

Sono usati polarizzati in senso inverso con una resistenza in serie che limita il passaggio di corrente.

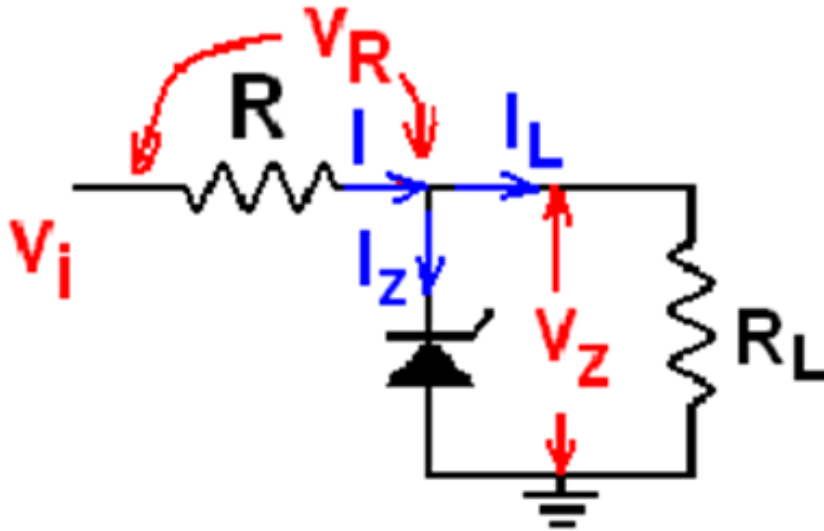
Quando la tensione ai capi del diodo zener è compresa tra 0 V e  $V_z$ , (tensione di Zener o tensione di *breakdown*) il componente è interdetto e si comporta come un interruttore aperto. Non appena la tensione applicata sale oltre il valore  $V_z$ , si innesca l'effetto valanga per il quale si ha un forte passaggio di corrente .

Non appena la tensione scende al di sotto della tensione  $V_z$ , il componente ritorna allo stato di interdizione.

Il punto di lavoro è trovato nell'incontro tra la curva caratteristica I-V dello zener e la retta di carico con pendenza  $R = V/I$  ( 200  $\Omega$ , nell'esempio) che congiunge la tensione di alimentazione con il punto di max. corrente (considerando lo zener con resistenza nulla).

**Al variare della tensione di alimentazione da 16 a 14 volt, la tensione ai capi dello zener diminuisce di soli 0.1 V circa.**

## ZENER con carico



$$I = I_Z + I_L$$

$$V_i = V_Z + V_R = V_Z + R(I_Z + I_L) = R_L I_L + R(I_Z + I_L)$$

$$V_i = R_L I_L + R(I_Z + I_L)$$

$$R = \frac{V_i - R_L I_L}{I_Z + I_L} = \frac{V_i - V_Z}{I_Z + I_L}$$

**ESEMPIO** - carico variabile, con tensione di alimentazione  $V_i$  stabile

$$V_i = 14 \text{ V} \quad V_Z = 8 \text{ V}$$

corrente minima per il buon funzionamento dello zener:  $I_Z(\text{min}) = 4 \text{ mA}$

corrente di carico variabile tra  $I_L(\text{min}) = 5 \text{ mA}$  e  $I_L(\text{max}) = 20 \text{ mA}$ .

---

calcolo R:

$$R = \frac{V_i - V_Z}{I_Z + I_L} = \frac{14 - 8}{(4+20) \cdot 10^{-3}} = \frac{6}{24} \cdot 10^3 = 250 \Omega$$

calcolo  $I_Z(\text{max})$ :

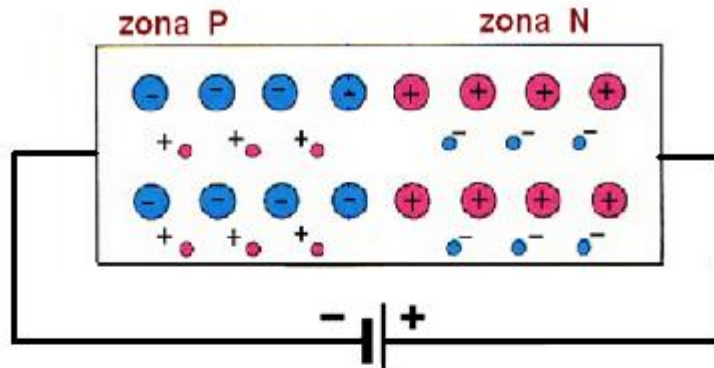
$$V_R = V_i - V_Z = 14 - 8 = 6 \text{ V}$$

quando  $I_L$  raggiunge il valore massimo (20 mA),  $I_Z$  tocca il valore minimo (4 mA).

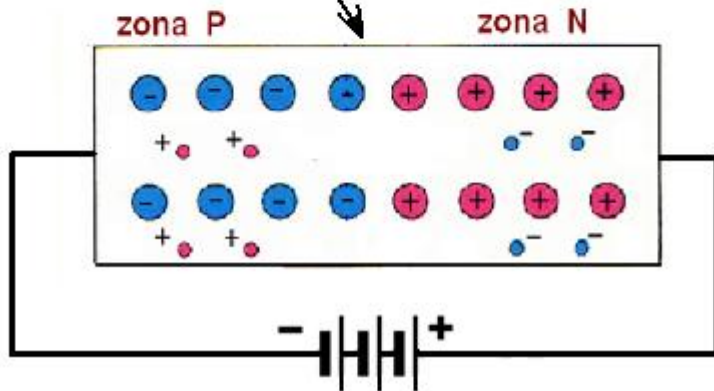
quando  $I_Z$  raggiunge il valore massimo,  $I_L$  tocca il valore minimo

$$I_Z(\text{max}) = I - I_L(\text{min}) = \frac{V_R}{R} - I_L(\text{min}) = \frac{6}{250} - 0.005 = 19 \text{ mA}$$

# DIODO VARICAP



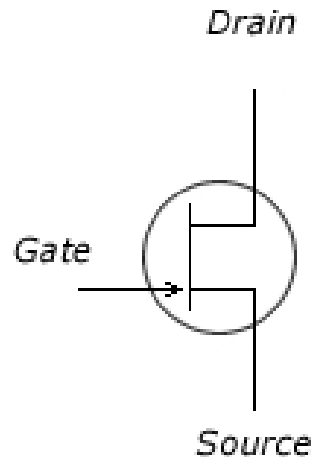
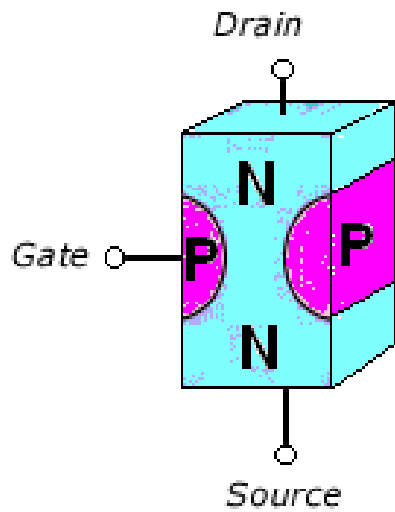
zona di svuotamento  
più ampia



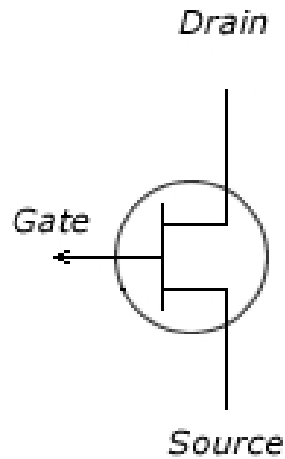
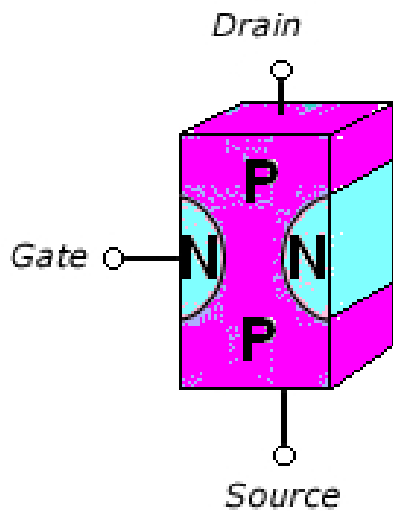
**Il diodo varicap è un diodo a semiconduttore in cui viene esaltata la caratteristica di variare la capacità della giunzione al variare della tensione di polarizzazione inversa.**

**Nella giunzione PN viene a formarsi una zona di svuotamento senza cariche libere che si comporta come un dielettrico il cui spessore dipende dalla tensione di polarizzazione..**

# FET FIELD-EFFECT TRANSISTOR



**FET canale-N**



**FET canale-P**

## **FET - Field-effect transistor**

è un dispositivo semiconduttore nel quale il campo elettrico controlla la conduttività di un “canale” di materiale semiconduttore tipo-N oppure tipo-P dove agiscono un solo tipo di cariche (elettroni nel tipo-N o buche nel tipo-P).

Il canale è attraversato da elettroni o buche che entrano da una sorgente (*source*) ed escono dal *drain*. Un terzo terminale (*gate*) controlla l'ampiezza del canale e quindi la sua conducibilità.

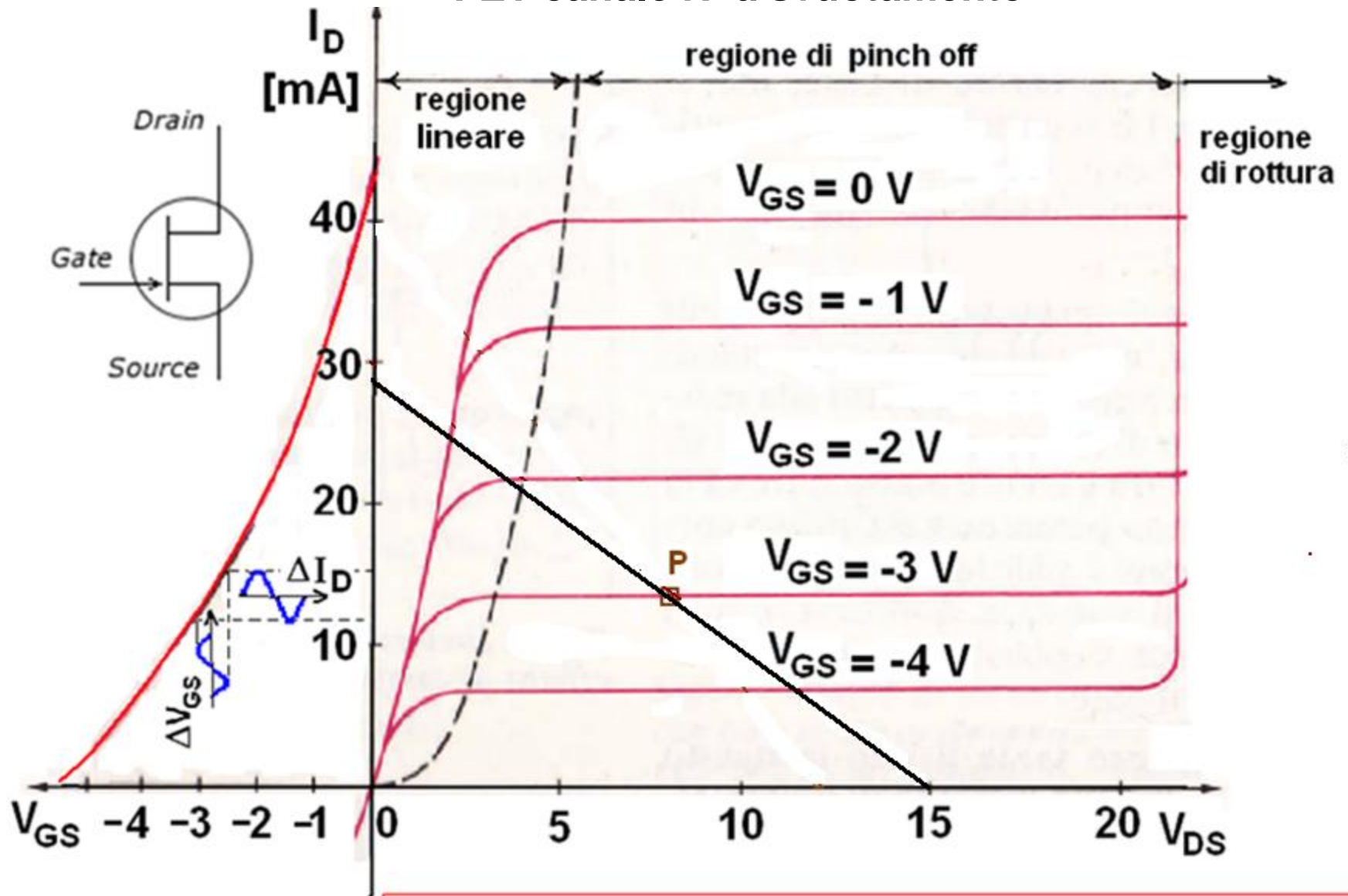
Si sono sviluppate varie tecniche di costruzione e vari modi di impiego. I Fet-N ed i Fet-P possono essere a svuotamento (*depletion*) o ad accumulazione (*enhancement*).

Più diffuso è il Fet-N a svuotamento (2N3819, BSS126,....)

L'impedenza d'ingresso dei FET è molto elevata (dell'ordine dei  $M\Omega$ ).



# FET canale N a svuotamento

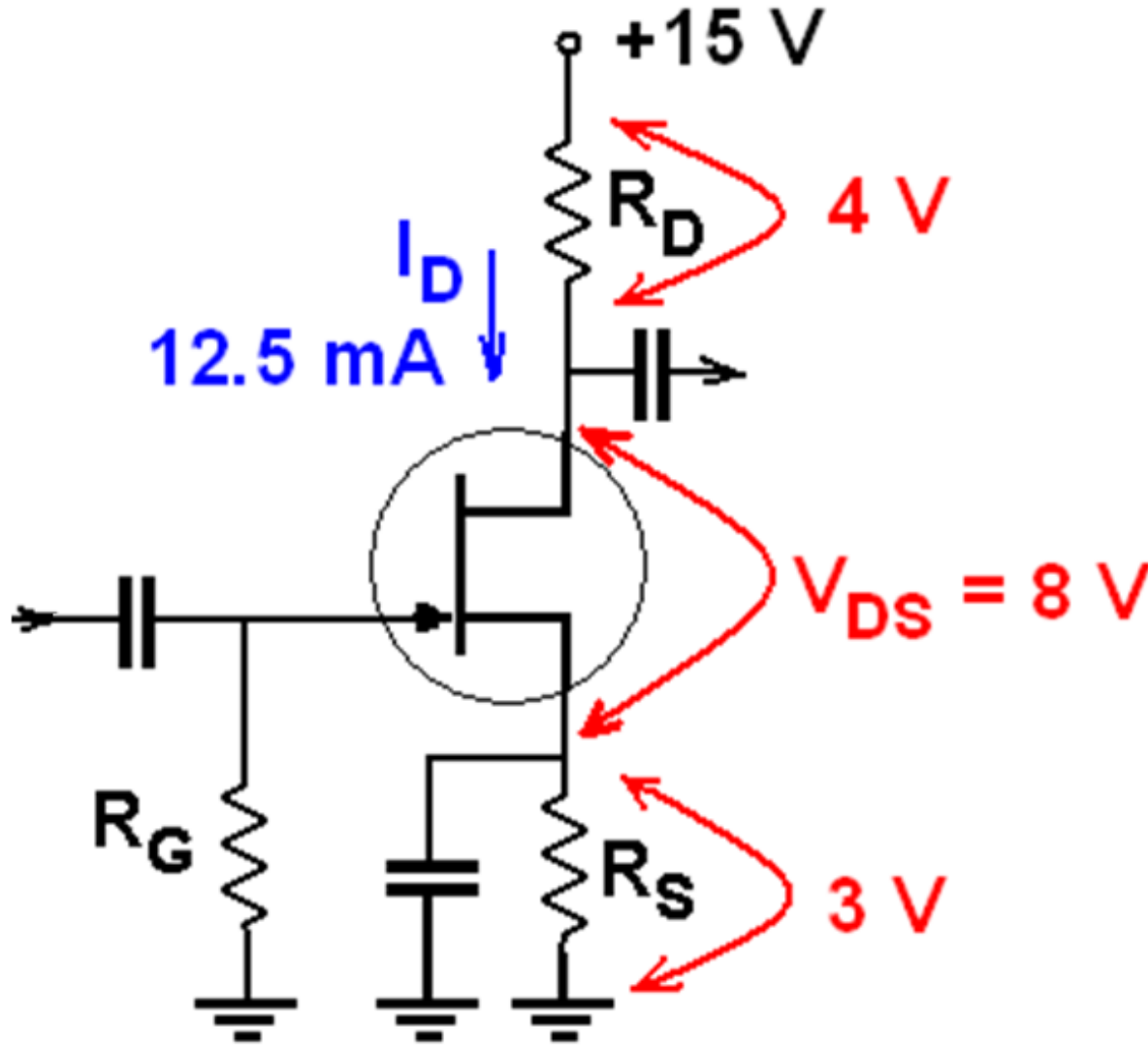


$$\Delta V_{GS} = \pm 0.3 \text{ V}$$

$$\Delta I_D = \pm 2 \text{ mA}$$

transconduttanza:  $G = \frac{\Delta I_D}{\Delta V_{GS}} = 6.7 \text{ mA/V}$

# FET canale-N polarizzazione



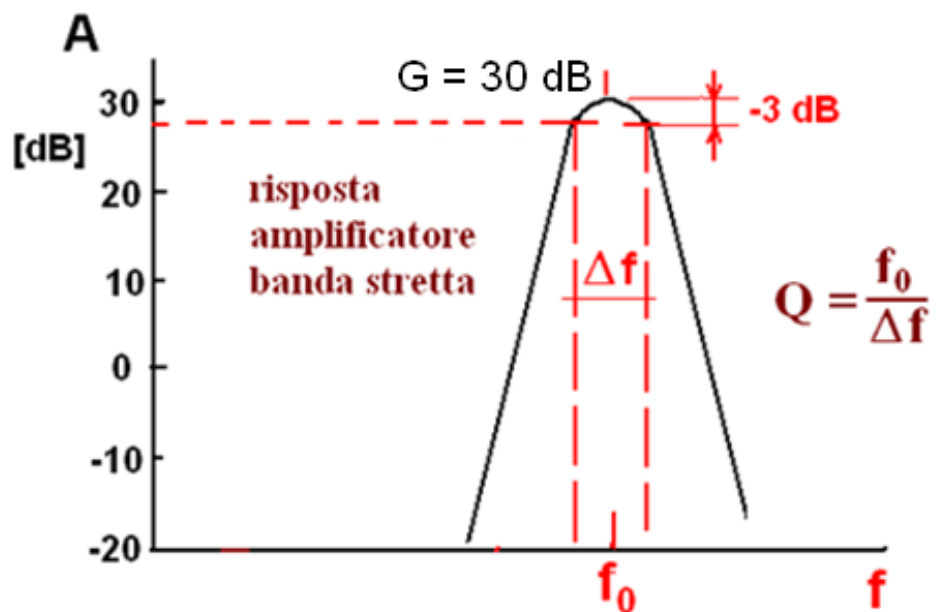
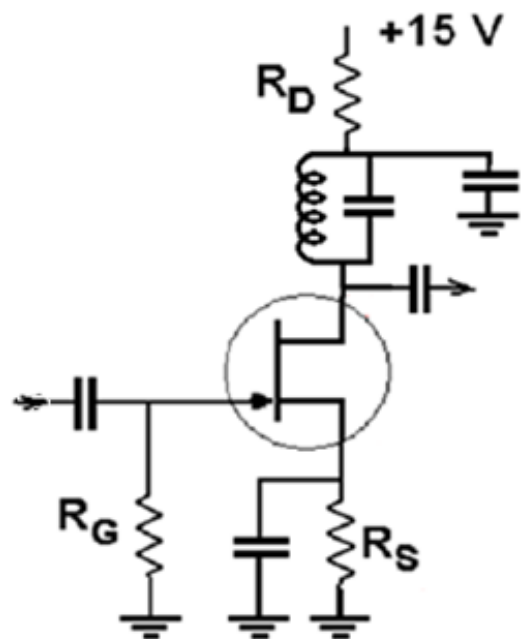
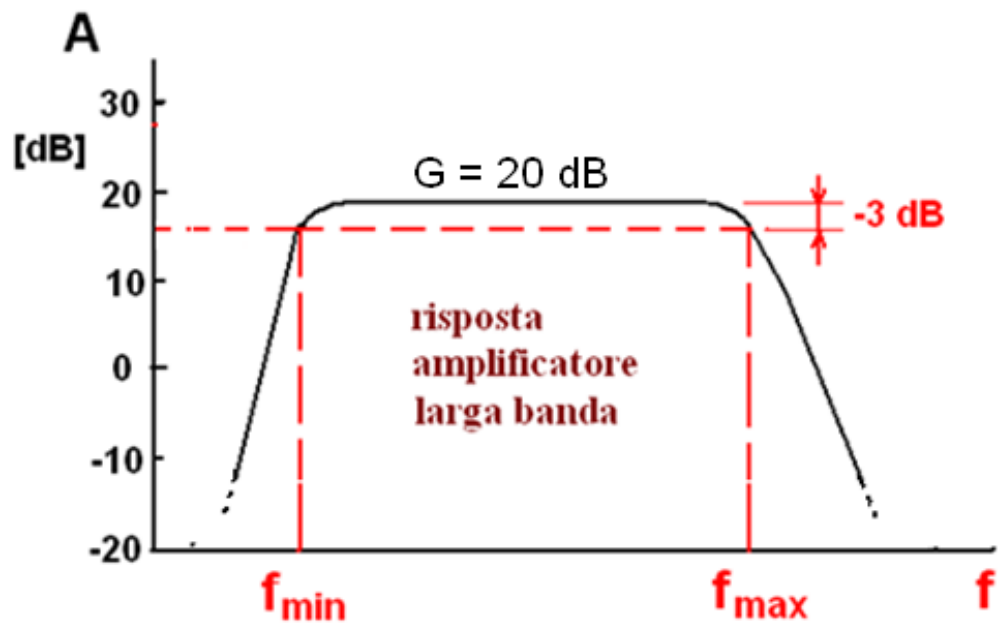
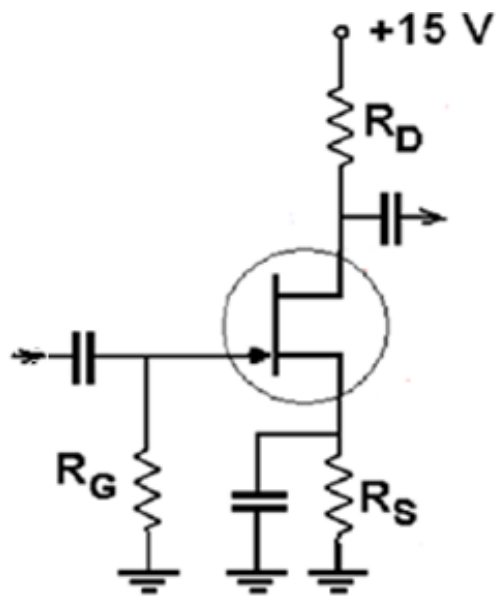
$$I_D = 12.5 \text{ mA}$$

$$V_{DS} = 8 \text{ V}$$

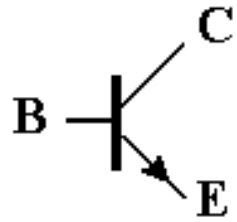
$$V_{GS} = -3 \text{ V}$$

$$R_S = \frac{3}{0.0125} = 240 \Omega$$

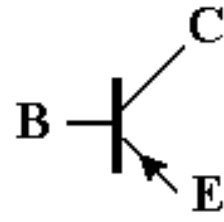
$$R_D = \frac{4}{0.0125} = 320 \Omega$$



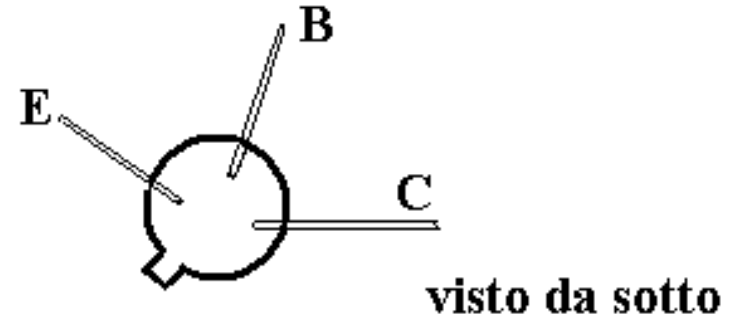
## TRANSISTOR



NPN



PNP



**Come riconoscere un transistor ignoto?**

**Con il tester, portare il puntale rosso (positivo) sulla base del transistor. Portare il terminale nero (negativo) sull'emitter indi sul collettore.**

**NPN il tester indica passaggio di corrente in entrambi i casi**

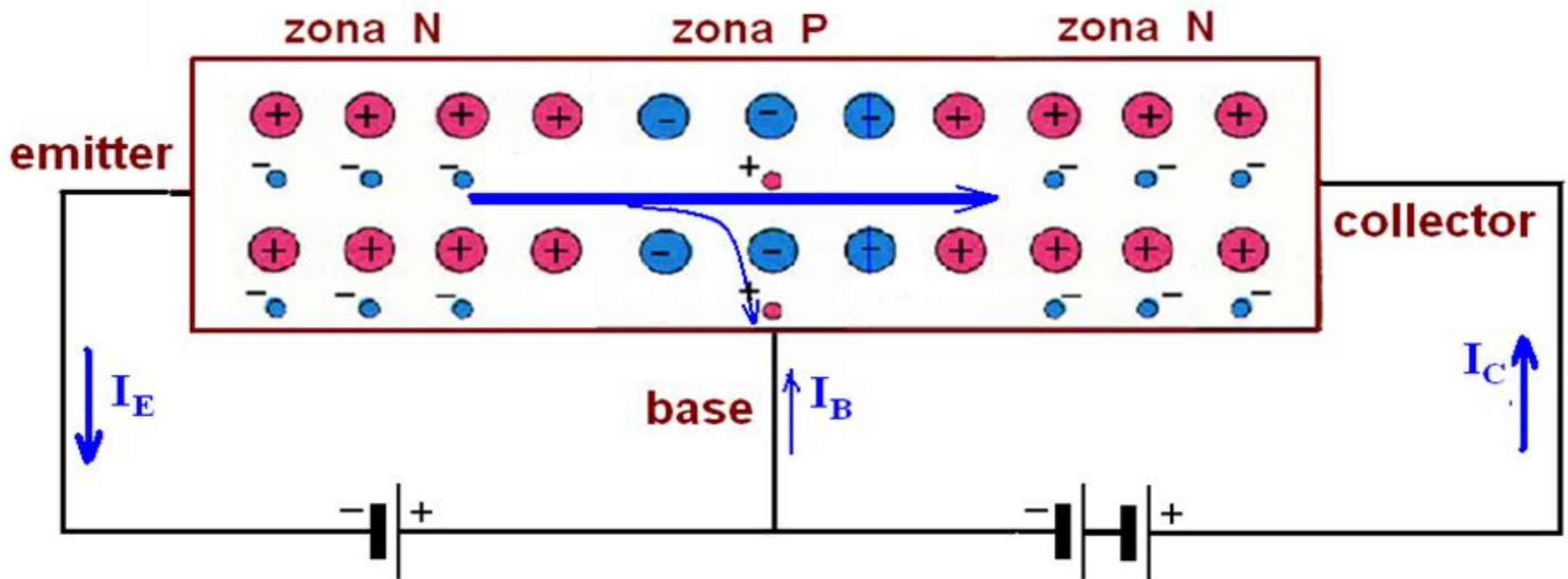
**PNP il tester non indica passaggio di corrente in entrambi i casi.**

**Per conferma, invertire i puntali.**

**NPN il tester non indica passaggio di corrente in entrambi i casi**

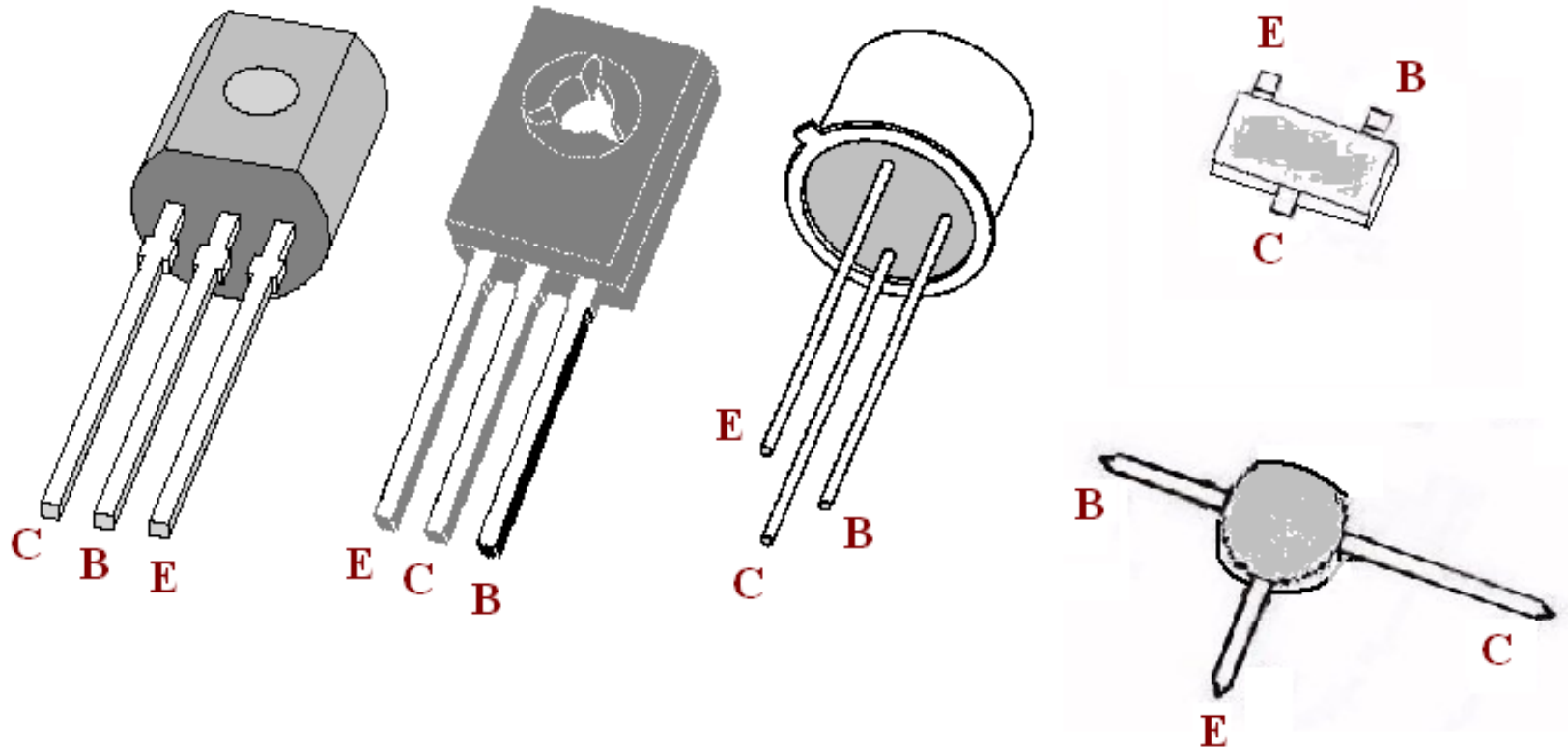
**PNP il tester indica passaggio di corrente in entrambi i casi.**

**Se, con l'inversione dei puntali, non si riscontra il comportamento indicato, o non sono stati riconosciuti correttamente i terminali EBC del transistor, o il transistor è difettoso.**

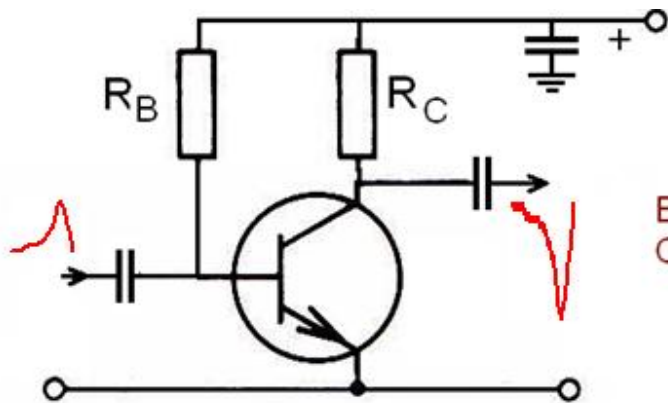


La giunzione E-B è polarizzata direttamente, mentre la giunzione B-C è polarizzata inversamente. Nella figura è indicato il movimento degli elettroni liberi, mentre le correnti, per convenzione, hanno verso opposto. Essendo la giunzione E-B polarizzata direttamente, il potenziale esterno abbassa la barriera EB e gli elettroni entrano nella zona P. Questa ha uno spessore sottilissimo: alcuni elettroni costruiscono una corrente di base, ma la maggior parte prosegue ed arriva alla zona N del collettore dove sono attratti dalla tensione positiva del collettore . In pratica, quasi la stessa corrente passa da una regione a bassa resistenza (E-B, polarizzata direttamente) ad una regione ad alta resistenza (B-C, polarizzata inversamente) con notevole guadagno di potenza.

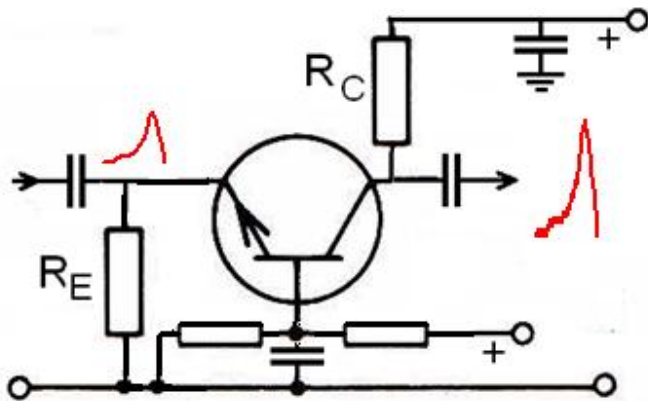
# LOW POWER TRANSISTORS



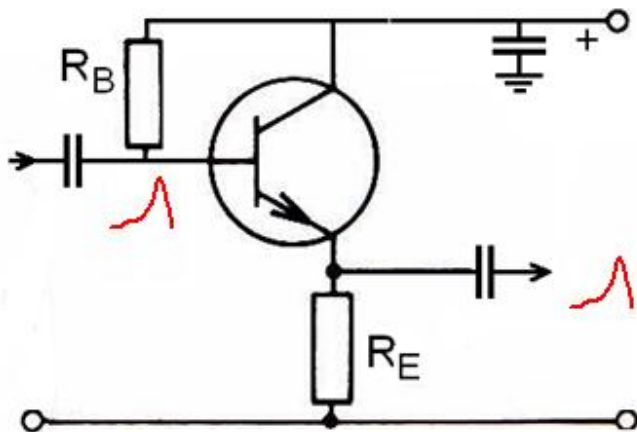
Alcune forme e connessioni esterne



EMETTITORE  
COMUNE



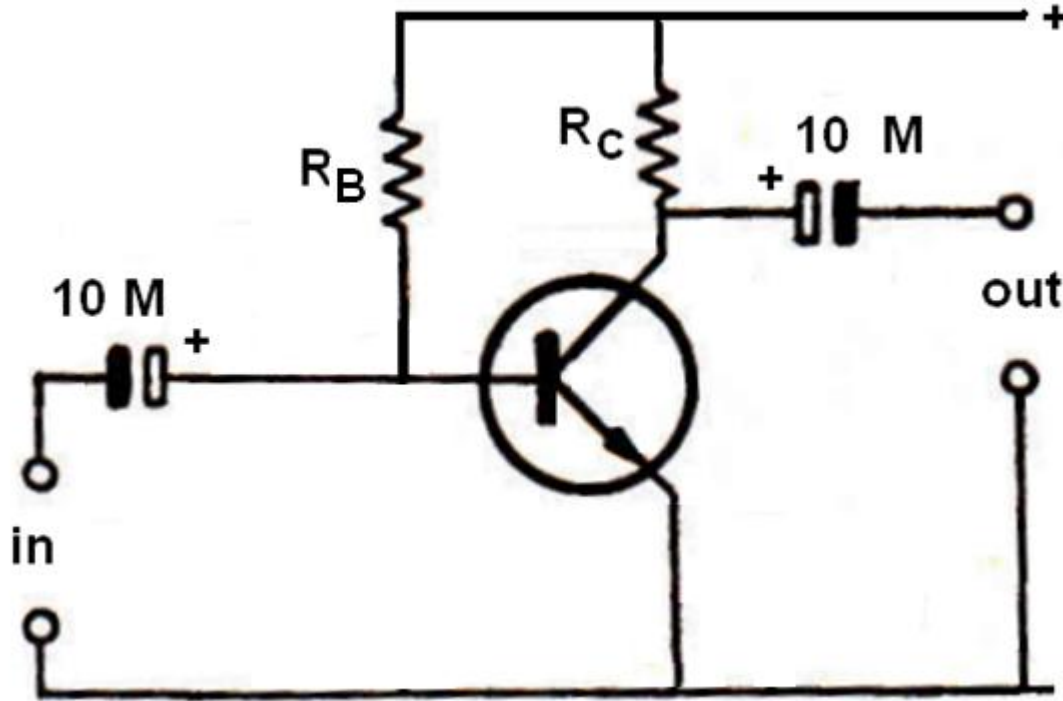
BASE  
COMUNE



COLLETTORE  
COMUNE

# TRE TIPICHE CONNESSIONI DI UN TRANSISTOR

## Esempio polarizzazione transistor NPN al silicio.



Condizioni di lavoro:

$$V_{CE} = 5 \text{ V}$$

$$I_c = 4 \text{ mA}$$

$$\beta = 80$$

$$\beta = \frac{I_c}{I_b}$$

Trovare  $R_B$  e  $R_C$ .

Buona scelta della tensione di alimentazione è circa il doppio della  $V_{CE}$ .

→  $V_{\text{lim}} = 10 \text{ V}$



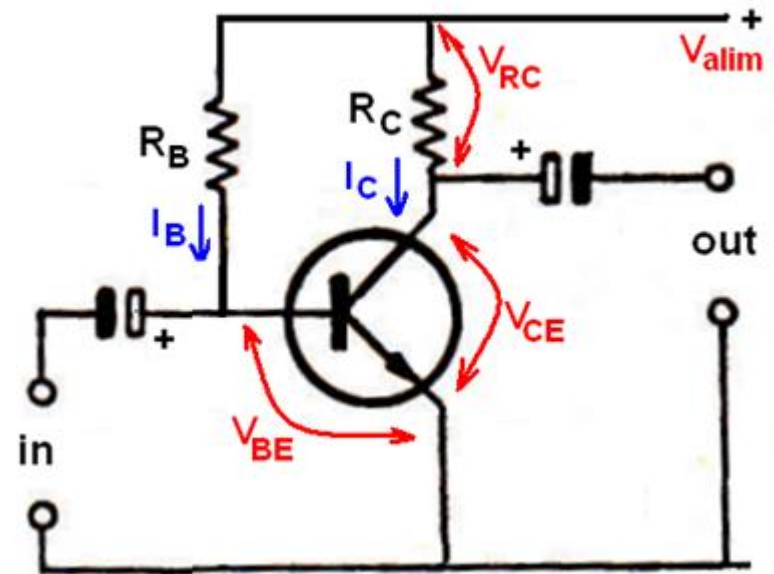
$$I_B = \frac{I_C}{\beta} = \frac{4 \cdot 10^{-3}}{80} = 5 \cdot 10^{-5} \text{ A}$$

e, anche

$$I_B = \frac{V_{\text{alim}} - V_{\text{BE}}}{R_B} = \frac{9.4}{R_B}$$

ma  $I_B$  è nota, per cui:

$$R_B = \frac{9.4}{5 \cdot 10^{-5}} = 188 \text{ k}\Omega$$



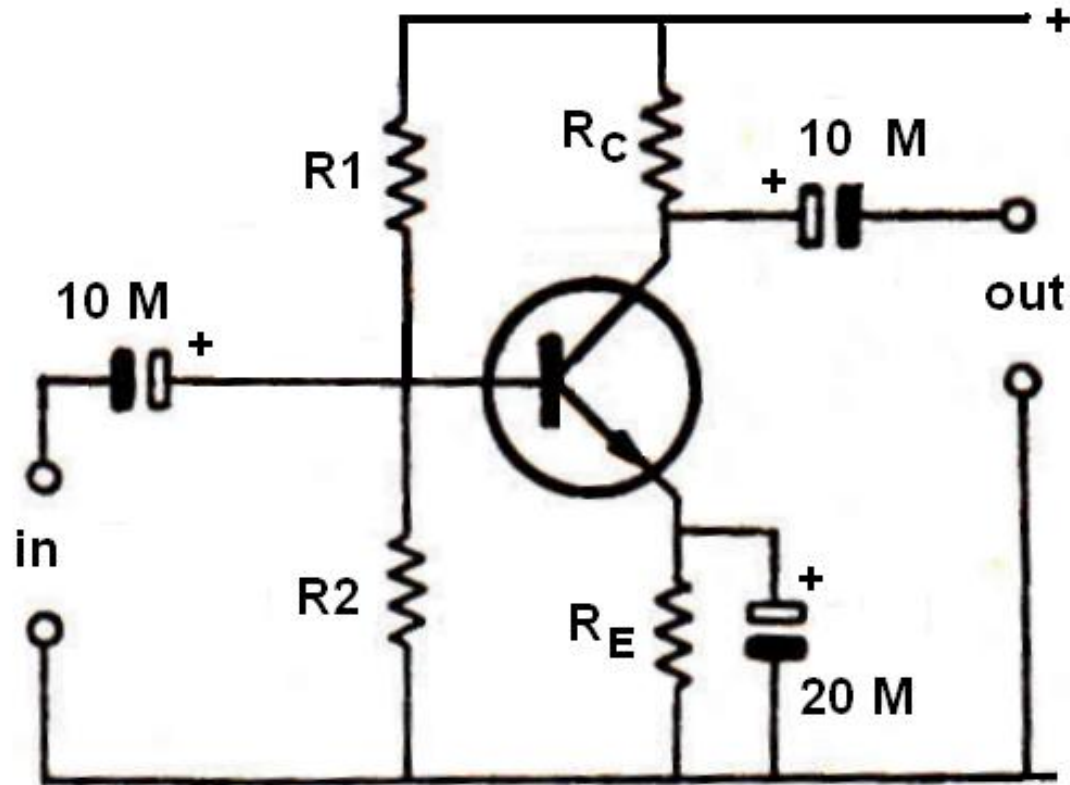
$$V_{\text{RC}} = V_{\text{alim}} - V_{\text{CE}}$$

$$V_{\text{RC}} = 10 - V_{\text{CE}} = 5 \text{ V}$$

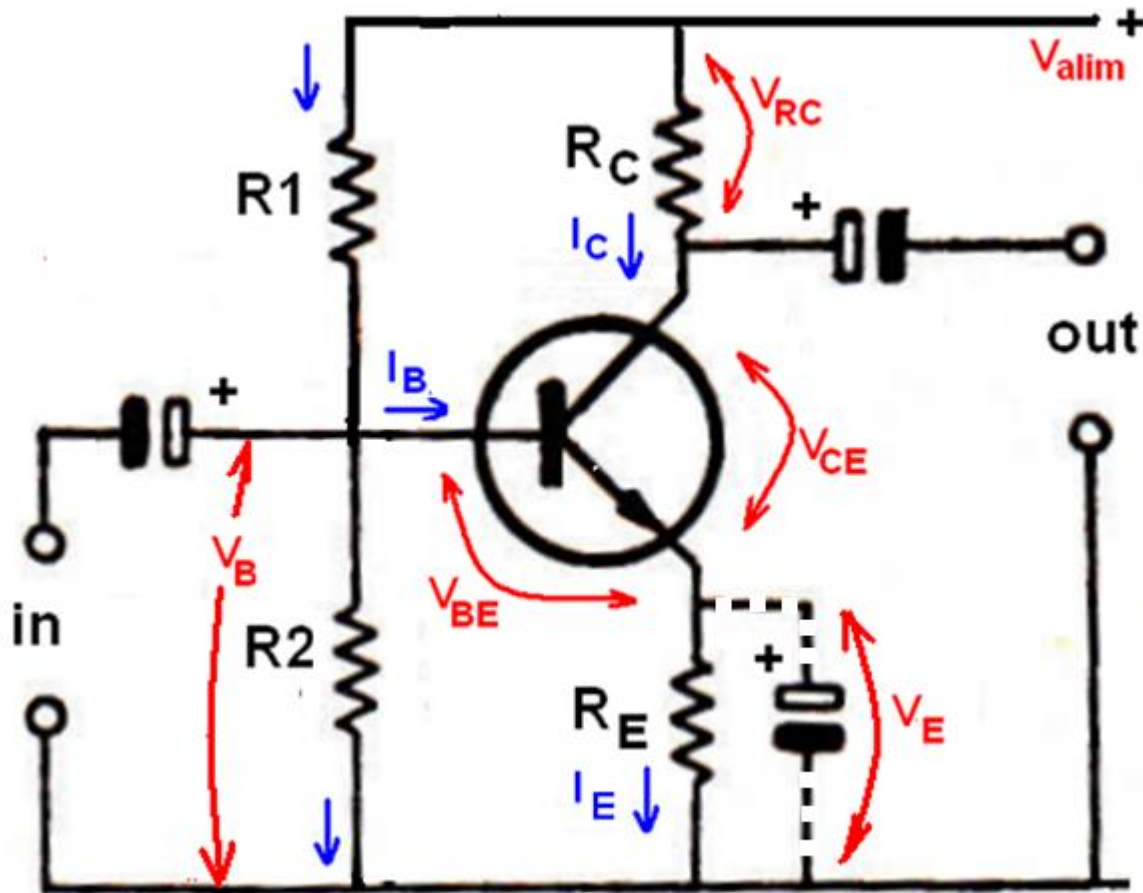
pertanto:

$$R_C = \frac{V_{\text{RC}}}{I_C} = \frac{5}{4 \cdot 10^{-3}} = 1250 \Omega$$

## Esempio polarizzazione transistor NPN al silicio con partitore di tensione di base



Una regola pratica è quella di scegliere  $V_{RE}$  uguale a circa 1/10 della tensione di alimentazione



dai data sheet

$V_{BE} = 0.6 \text{ V}$

$\beta = 100$

$I_C = 3 \text{ mA}$

$V_{CE} = 7 \text{ V}$

scelta oculata

$V_{alim} = 14 \text{ V}$

$V_E = 1 \text{ V}$

Una regola pratica è quella di scegliere  $V_E$  uguale a circa 1/10 della tensione di alimentazione  $\rightarrow V_E = 1 \text{ V}$

$$V_E = R_E I_E \approx R_E I_C$$

$$R_E = \frac{V_E}{I_C} = \frac{1}{3 \cdot 10^{-3}} = 330 \Omega$$

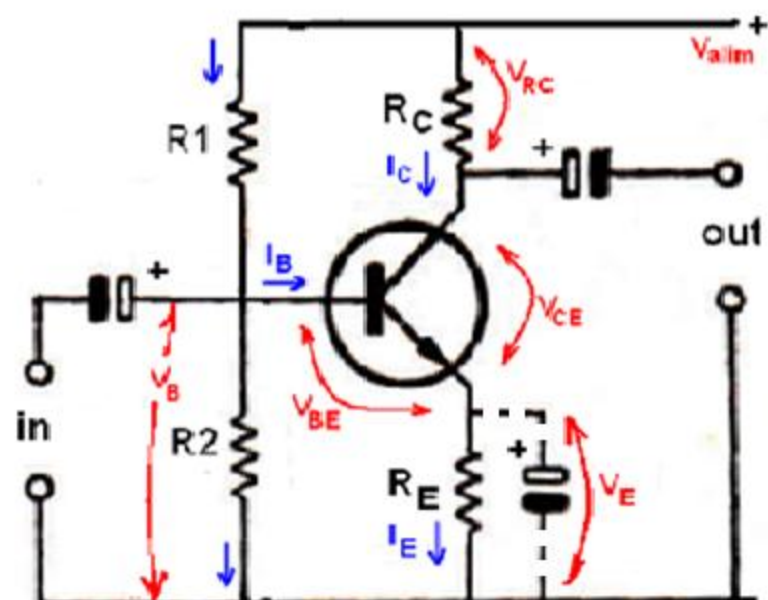
$$V_{alim} = R_C I_C + V_{CE} + V_E$$

$$R_C I_C = V_{alim} - V_{CE} - V_E$$

$$R_C = \frac{14 - 7 - 1}{I_C} = \frac{6}{3 \cdot 10^{-3}} = 2 \text{ k}\Omega$$

$$V_B = V_E + V_{BE} = 1 + 0.6 = 1.6 \text{ V}$$

$$I_B = \frac{I_C}{\beta} = \frac{3 \cdot 10^{-3}}{100} = 0.03 \text{ mA}$$



buona norma è far scorrere nel partitore resistivo sulla base una corrente che sia  $5 \div 10$  volte la  $I_B$ . Sia:

$$I_B = 0.2 \text{ mA}$$

$$R_2 = \frac{V_E}{I_2} = \frac{1.6}{0.2 \cdot 10^{-3}} = 8 \cdot 10^3 \Omega$$

$$R_1 = \frac{V_{R1}}{I_2 + I_B} = \frac{14 - 1.6}{0.23 \cdot 10^{-3}} = 53.9 \text{ k}\Omega$$

L'amplificazione  $A$  dell'amplificatore è data da (aprox.):

$$A \cong \frac{R_C}{R_E}$$

**NON** dipende dalle caratteristiche del transistor!  
Importante per la costanza delle prestazioni nel tempo e  
per la variabilità tra transistor anche dello stesso tipo!

In questo esempio:  **$A = 2000 / 330 = 6$**

Se inseriamo un condensatore in parallelo a  $R_E$ , la reale resistenza che vede il segnale è solo quella interna al transistor. In genere è chiamata  $r_E$  e la si trova nei data sheet.

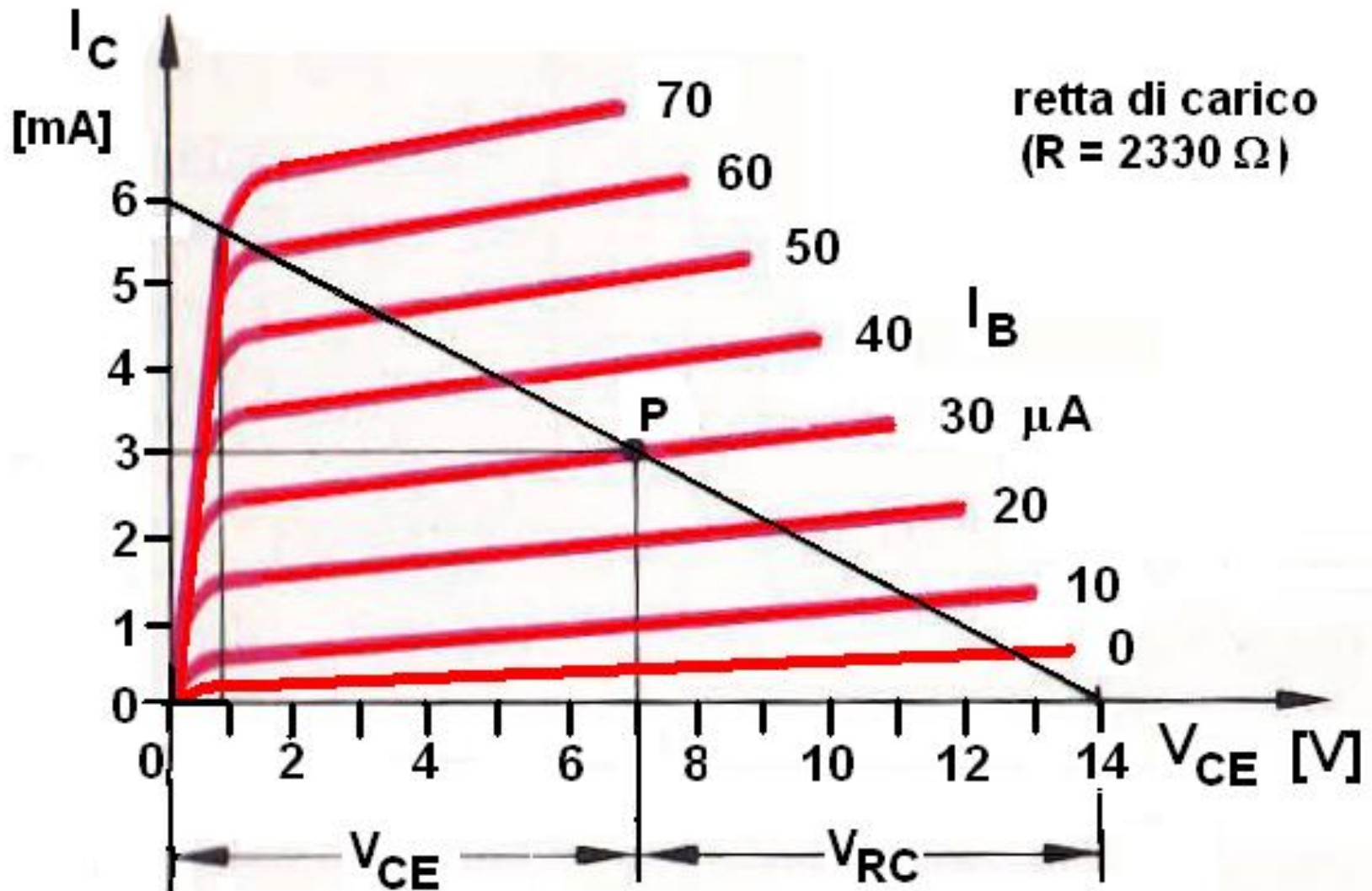
In questo caso, l'amplificazione  $A$  è molto più grande.

L'impedenza d'ingresso è data da (aprox):

$$Z_i = \beta R_E$$

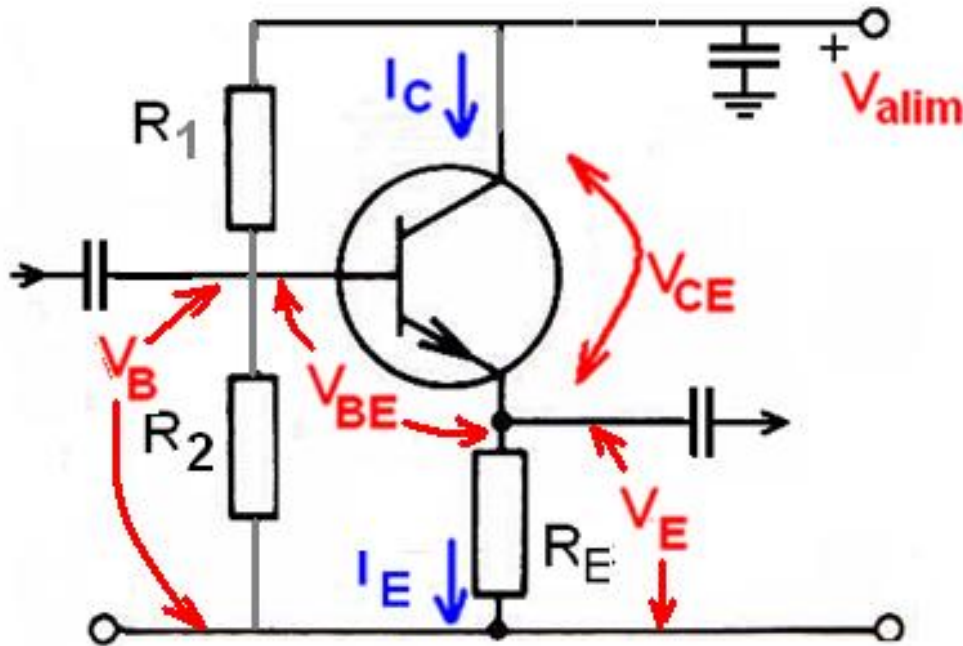
In questo esempio:  $Z_i = 100 \cdot 330 = 33 \text{ k}\Omega$

Occorre considerare, però, la presenza del partitore che fa abbassare il valore di impedenza visto dallo stadio precedente a circa  $7 \text{ k}\Omega$ .



Caratteristica di uscita e punto di lavoro. Esempio precedente.

## EMITTER FOLLOWER - COLLETTORE COMUNE



La tensione di alimentazione viene suddivisa in parti uguali tra  $V_{CE}$  e  $V_E$ , in modo da avere la massima variazione di segnale indistorto all'uscita.

Il partitore sulla base stabilizza il valore di  $V_B$  a circa metà della tensione di alimentazione

La tensione di uscita è leggermente minore della tensione di ingresso, ma su un'impedenza di valore molto più basso.

Con buona approssimazione. si ha:

### **IMPEDENZA DI INGRESSO**

$$Z_i \approx \beta R_E$$

( Occorre tenere conto anche del partitore resistivo sulla base )

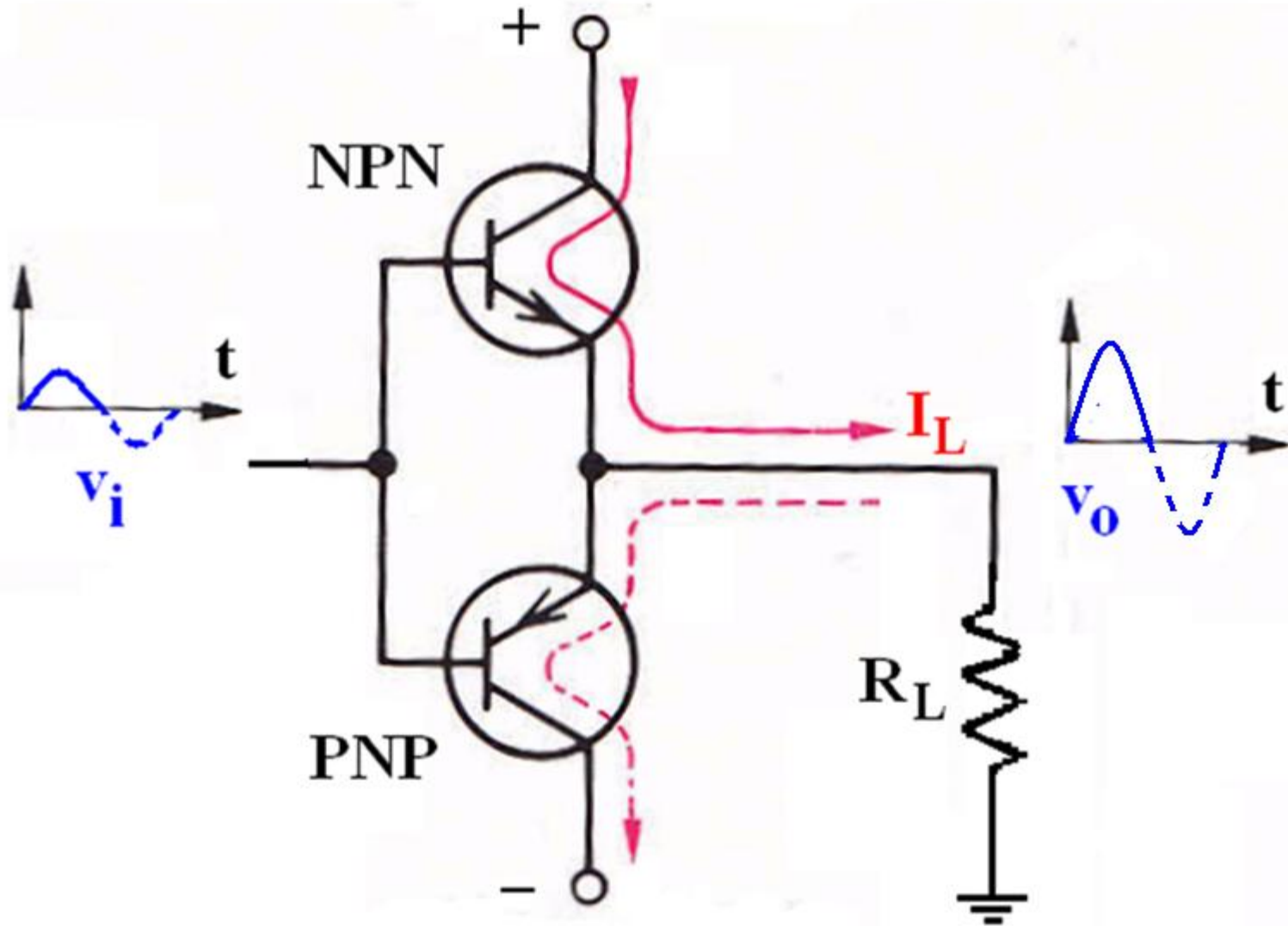
e con approssimazione grossolana:

### **IMPEDENZA DI USCITA**

$$Z_o \approx \frac{R_E}{\beta}$$



# Principio di funzionamento amplificatore di potenza in classe B in controfase a simmetria complementare



**L'amplificatore finale di potenza in classe B è costituito da due transistor (NPN e PNP) in collegamento emitter-follower che lavorano in classe B.**

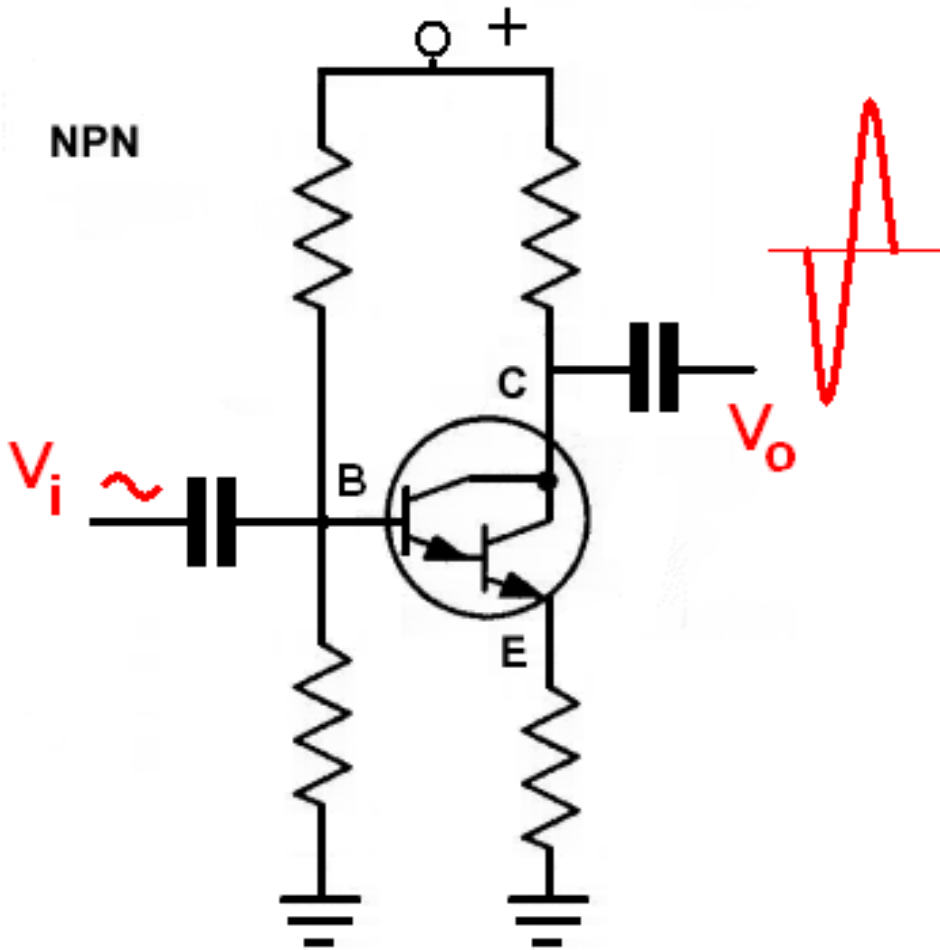
**Il guadagno è in potenza, visto che l'impedenza di uscita è molto bassa.**

**I due transistor lavorano alternativamente su una sola semionda del segnale applicato all'ingresso in base.**

**Senza segnale d'ingresso i due transistor sono interdetti: con la semionda positiva in ingresso funziona il transistor NPN (ed il transistor PNP è interdetto), con la semionda negativa funziona il transistor PNP (ed il transistor NPN è interdetto).**

**Le due semionde sono poi ricomposte in uscita.**

# CIRCUITO DARLINGTON

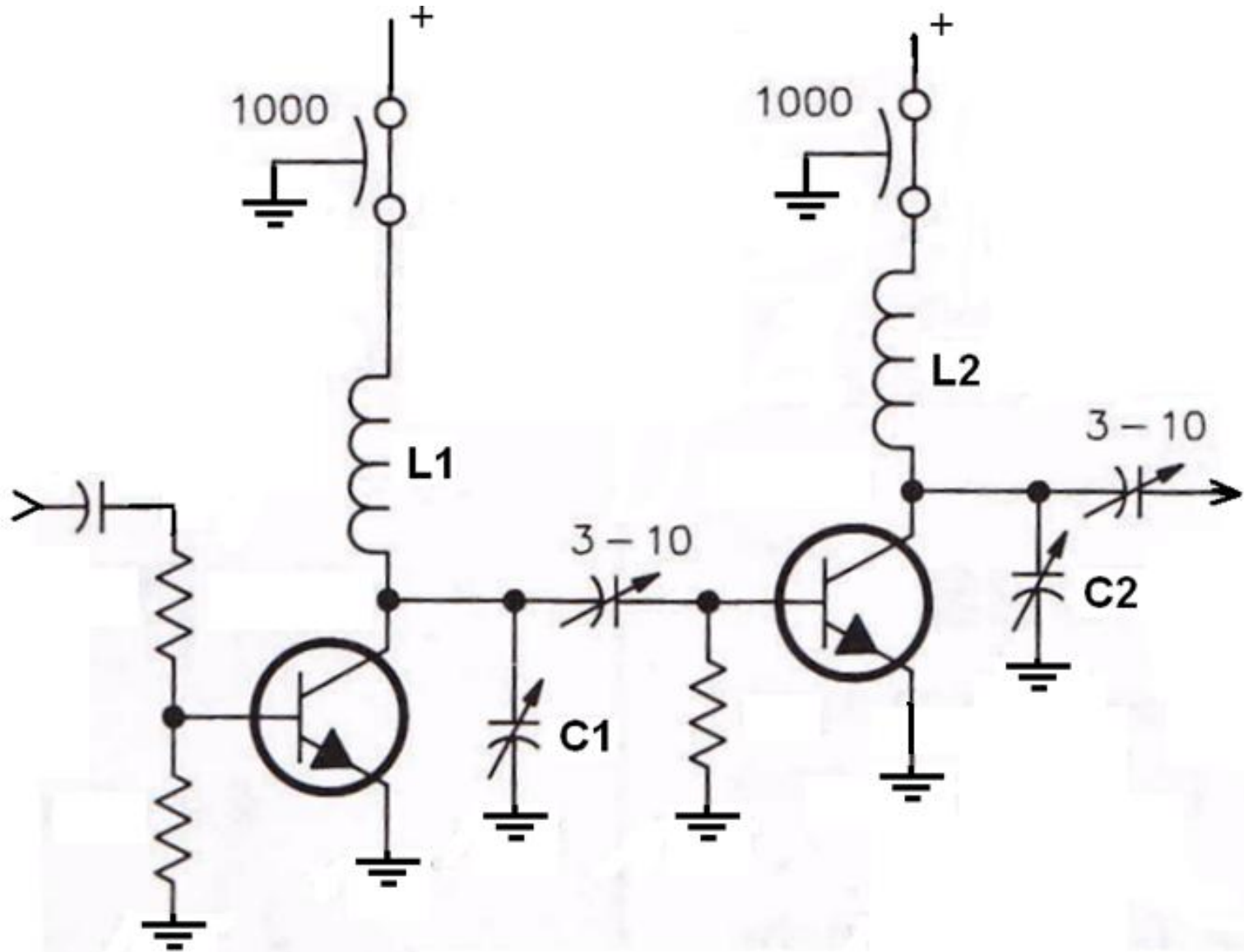


Transistor composito, costituito da due transistor in cascata, in un unico case o con due componenti discreti.

Caratteristica principale è l'elevatissimo guadagno in corrente  $\beta$ , dato dal prodotto dei  $\beta$  dei singoli transistor

Vengono spesso usati come interruttori e possono pilotare motori in corrente continua e passo-passo..

# AMPLIFICATORE RF DI POTENZA – CLASSE C

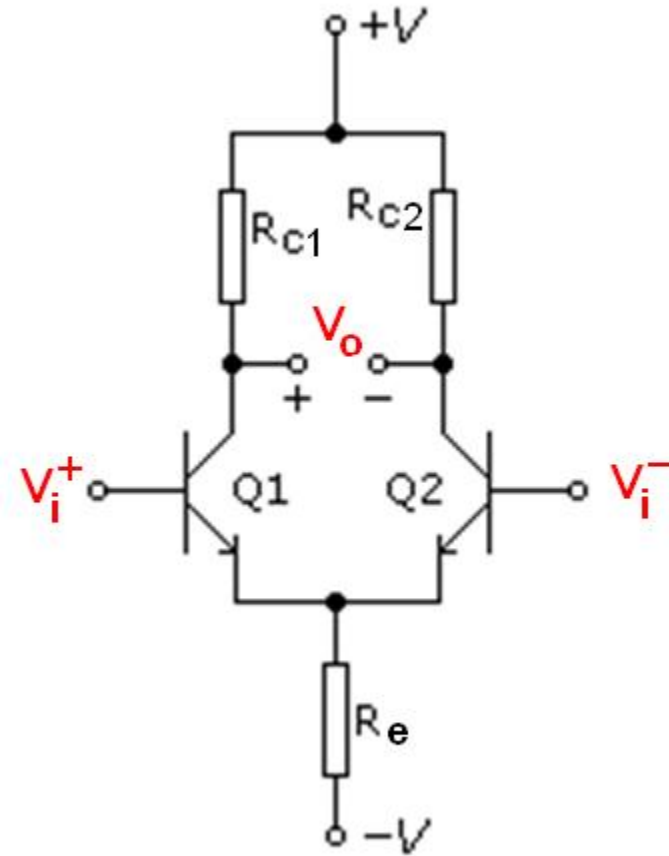


# AMPLIFICATORE DIFFERENZIALE

L'amplificatore differenziale consiste essenzialmente di due amplificatori identici connessi in modo che il segnale in uscita sia proporzionale alla differenza dei segnali di ingresso dei due amplificatori.

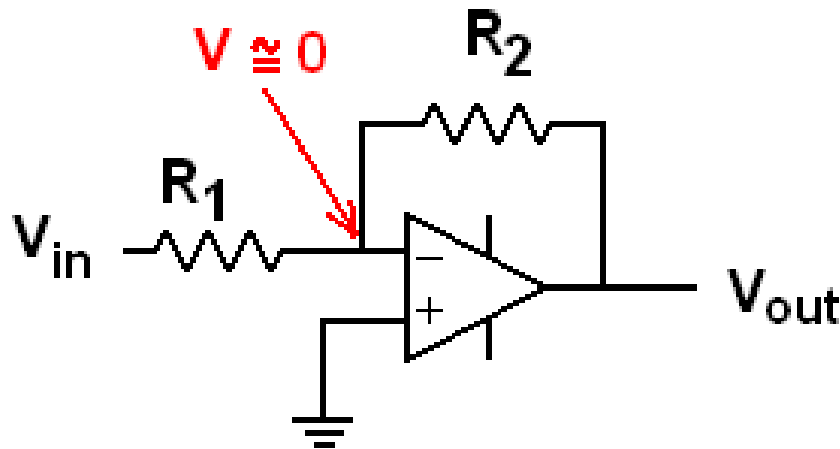
L'amplificatore differenziale ha uscita nulla se uno stesso segnale è presente simultaneamente sui due ingressi.

Questa reiezione di modo comune è importante in molte applicazioni, specialmente se i segnali utili sono deboli e si sta operando in ambienti molto rumorosi.



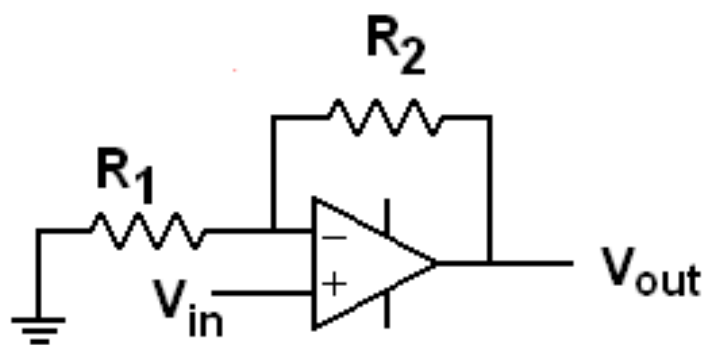
# AMPLIFICATORE OPERAZIONALE

Gli amplificatori operazionali (op-amp) sono stati introdotti a suo tempo per eseguire operazioni matematiche semplici come somma, moltiplicazione, integrazione, differenziazione, comparazione, ecc...  
Ciò è possibile semplicemente cambiando la rete di componenti all'esterno dell' op-amp.

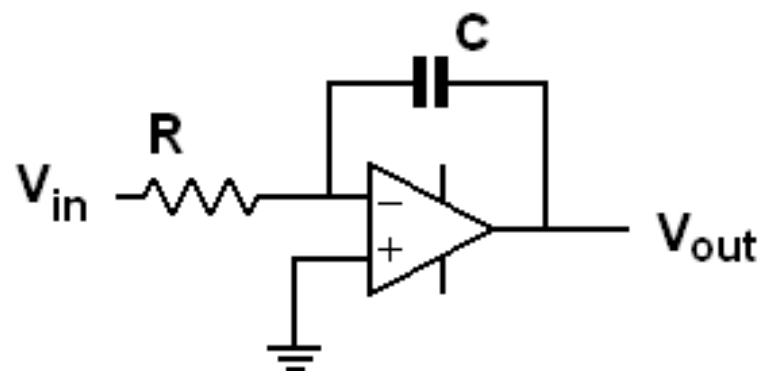


Op-amp. invertente

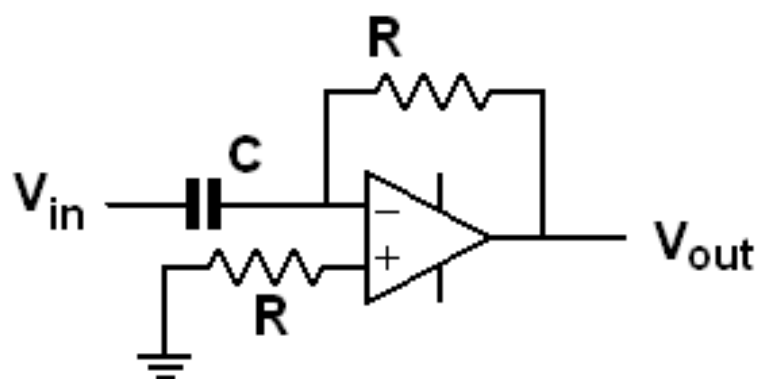
$$G = - \frac{R_2}{R_1}$$



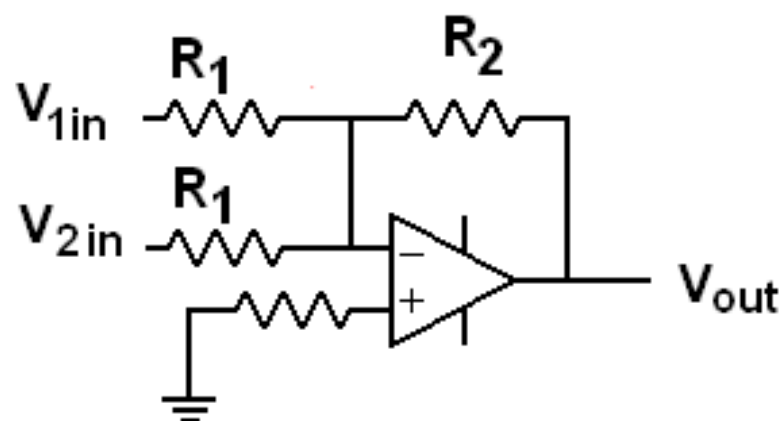
Op-amp. non invertente



Integratore

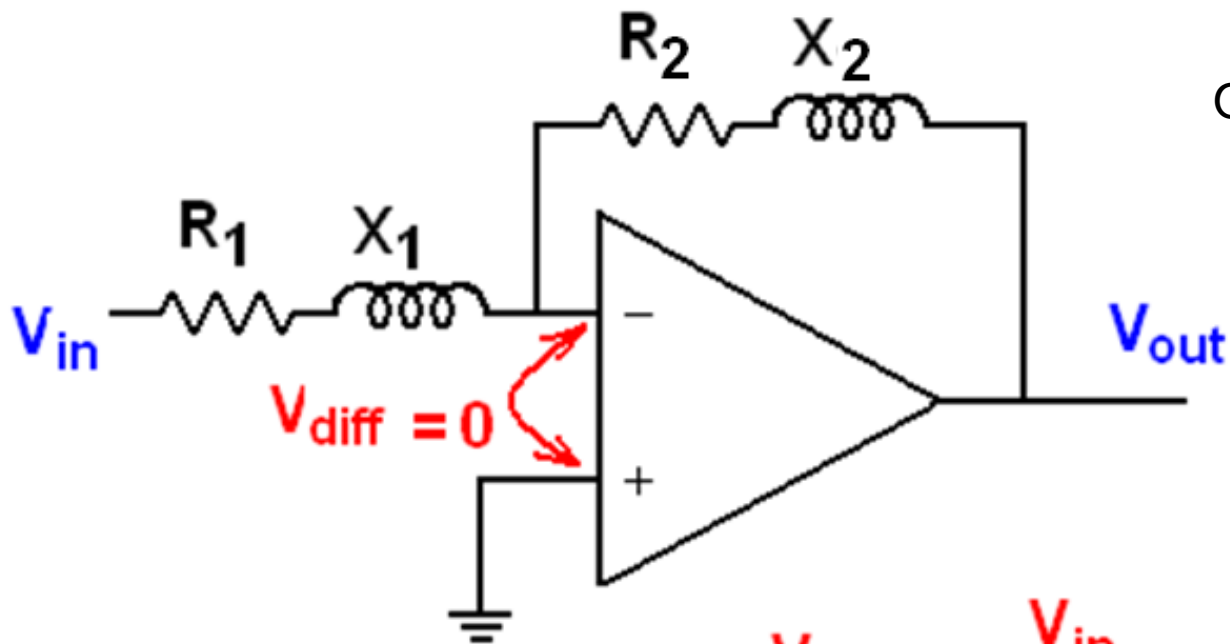


differenziatore



sommatore

In generale, ricordando il teorema di Millman:



Op-amp. invertente

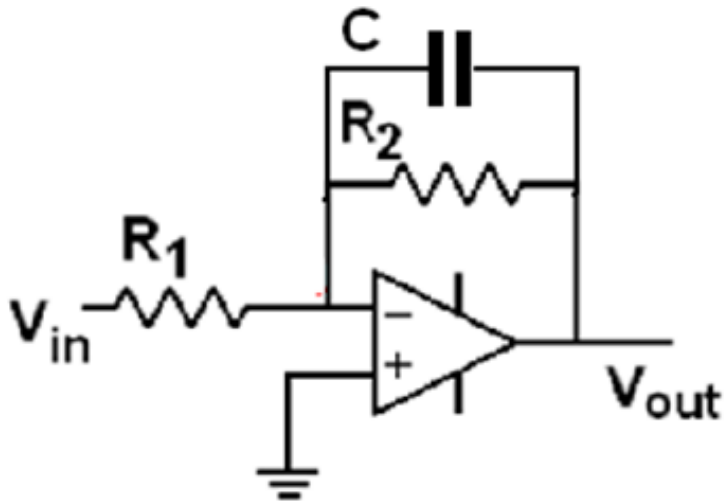
$$V_{diff} = \frac{V_{in}}{R_1 + jX_1} + \frac{V_{out}}{R_2 + jX_2} = 0$$

$$V_{diff} = \frac{\frac{V_{in}}{Z_1} + \frac{V_{out}}{Z_2}}{\frac{1}{Z_1} + \frac{1}{Z_2}} = 0$$

$$V_{out} = -V_{in} \frac{R_2 + jX_2}{R_1 + jX_1}$$

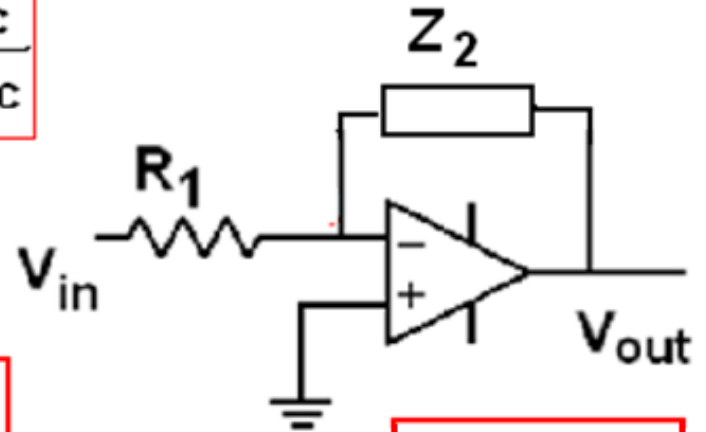


# AMPLIFICATORE PASSA-BASSO



$$Z_2 = \frac{R_2 \cdot j \chi_c}{R_2 + j \chi_c}$$

$$G = - \frac{Z_2}{R_1}$$



$$f_0 = \frac{1}{2\pi R_2 C}$$

Esempio:

$$R_1 = 10^3 \Omega$$

$$R_2 = 10^5 \Omega$$

$$C = 10^{-9} \text{ F}$$

$$f_0 = 1.59 \cdot 10^3 \text{ Hz}$$

